

Inovação no Design e Execução de Fundações Profundas em Solos Heterogêneos: Desenvolvimento e Aplicação Integrada de Estacas Pré-moldadas com Pré Furo Franki

Sandro Pimentel Tovar

Chief Technology Officer or COO Chief Operations Office
na Stones for home Enterprises corp

Engenharia Civil - Universidade Federal do Espírito Santo

Pós-graduação - Universidade Cidade de São Paulo em Gestão

Pós-graduado em Engenharia Geotécnica - Fundações e Obras de Terra

Resumo

A crescente complexidade dos solos encontrados em ambientes urbanos exige a adoção de soluções de fundação capazes de garantir desempenho estrutural elevado mesmo em condições geotécnicas adversas. Esse cenário decorre de fatores como adensamento do espaço urbano, aumento das cargas atuantes nas edificações modernas e presença de perfis de solo marcados por heterogeneidade acentuada, frequentemente composta por camadas sucessivas de materiais com resistência e deformabilidade distintas. Em muitos casos, ocorrem alternâncias irregulares entre argilas rígidas, areias densas, siltes de baixa permeabilidade, lentes resistentes e inclusões de materiais impenetráveis, que podem comprometer a execução de métodos convencionais de fundação. Diante desse quadro, torna-se indispensável o desenvolvimento de técnicas capazes de melhorar a previsibilidade do comportamento solo-estrutura e reduzir incertezas associadas à transferência de carga ao longo do fuste e na região da ponta das estacas. **Este artigo apresenta uma análise técnico-científica aprofundada da metodologia híbrida idealizada pelo engenheiro civil Sandro Pimentel Tovar.** Essa metodologia integra o uso de estacas pré-moldadas de concreto com um procedimento de pré-furo executado por meio do tubo Franki, formando um sistema construtivo capaz de enfrentar com eficiência os desafios impostos por solos heterogêneos. A inovação se fundamenta na ideia de que a combinação entre o alívio controlado da resistência lateral inicial e a cravação posterior da estaca em ambiente previamente preparado favorece a acomodação estrutural, reduz solicitações excessivas durante a cravação e melhora significativamente a mobilização da resistência de ponta. O método foi desenvolvido com o objetivo de maximizar o desempenho em perfis geotécnicos complexos, ampliando o controle operacional e reduzindo riscos associados ao processo de cravação. Ao proporcionar maior uniformidade no contato entre o fuste da estaca e o solo circundante, a técnica aumenta a confiabilidade da interação solo-estrutura e diminui a variabilidade de comportamento entre unidades idênticas instaladas em um mesmo bloco. Ensaaios de carregamento dinâmico e estático realizados em campo reforçam a robustez da solução, demonstrando que as estacas executadas com essa técnica são capazes de mobilizar resistências superiores ao dobro das cargas admissíveis previstas em projeto. Esses resultados são acompanhados de recalques reduzidos, estabilização rápida durante o carregamento e regularidade acentuada no ciclo tensão-deformação, características desejáveis em obras de alta responsabilidade estrutural. Observou-se ainda redução expressiva no número total de estacas por bloco, alcançando valores próximos de trinta por cento, sem prejuízo à segurança global da fundação. Esse ganho estrutural resulta tanto do aumento da capacidade individual das estacas quanto da diminuição da dispersão de esforços, possibilitando arranjos mais eficientes. Além disso, a técnica promove benefícios ambientais relevantes ao eliminar ou reduzir significativamente a necessidade de lama bentonítica, tradicionalmente usada em métodos escavados. Essa redução implica menor volume de resíduos, maior limpeza do processo e menor impacto sobre corpos d'água e áreas sensíveis do entorno. Os resultados apresentados evidenciam o caráter inovador e internacionalmente aplicável da metodologia, que demonstra aderência às principais normas técnicas brasileiras e americanas. O conjunto de evidências reforça sua relevância para empreendimentos de grande responsabilidade e consolida sua contribuição para a evolução das soluções de engenharia destinadas a fundações profundas em solos complexos.

Palavras-chaves: Fundações profundas; Estacas pré-moldadas; Tubo Franki; Interação solo-estrutura; Desempenho geotécnico.

Date of Submission: 13-11-2025

Date of Acceptance: 26-11-2025

I. Introdução

A execução de fundações profundas em solos complexos permanece como um dos maiores desafios da engenharia geotécnica contemporânea. Perfis compostos por alternância de argilas rígidas, areias densas, siltes sobreconsolidados e camadas com materiais impenetráveis podem comprometer procedimentos tradicionais, gerando desvios geométricos, perdas de produtividade e limitações na capacidade de carga, como discutido por Velloso e Lopes (2011) e por Das (2019). Em áreas urbanas densamente ocupadas, a necessidade de fundações mais previsíveis e menos suscetíveis a deformações diferenciais torna ainda mais crítico o desenvolvimento de soluções avançadas.

Nesse contexto, Sandro Pimentel Tovar desenvolveu e sistematizou uma metodologia que combina o pré furo assistido por tubo Franki com a cravação de estacas pré moldadas de grande diâmetro. Essa abordagem inovadora permite reduzir a resistência lateral inicial, aprimorar a mobilização da resistência de ponta e melhorar o comportamento do fuste, conforme princípios clássicos de interação solo estaca descritos por Poulos e Davis (1980). A solução é aplicável a obras de elevada responsabilidade estrutural, como hospitais, centros logísticos e edifícios altos, onde a previsibilidade de desempenho é essencial (CPT, 2016).

Os avanços introduzidos pelo método dialogam diretamente com desafios da geotecnia moderna, como controle de deformações, mitigação de atrito negativo, redução de vibrações e maior eficiência operacional, problemáticas amplamente discutidas por Randolph (2003) e Schmertmann (1978). Assim, este artigo apresenta os fundamentos da técnica, o detalhamento de sua execução e os resultados obtidos em campo, além de comparações com métodos convencionais.

A execução de fundações profundas em ambientes urbanos tem se tornado um desafio cada vez mais complexo, principalmente em razão da variabilidade geotécnica presente em solos onde há alternância de materiais de diferentes resistências e condições de deformabilidade. Em muitas regiões metropolitanas brasileiras e internacionais, o crescimento acelerado das edificações e a necessidade de estruturas de maior porte exigem soluções de fundação capazes de assegurar desempenho estrutural elevado em condições adversas, conforme discutido amplamente por Velloso e Lopes (2011). A

heterogeneidade de solos urbanos, caracterizada pela presença de argilas rígidas, areias densas, siltes sobreconsolidados e materiais parcialmente impenetráveis, compromete o desempenho de métodos tradicionais de estacas cravadas e escavadas, que apresentam limitações de produtividade, previsibilidade e controle geométrico (Das, 2019).

Nesse cenário, torna se essencial o desenvolvimento de técnicas capazes de otimizar a interação solo estrutura, reduzir recalques diferenciais e ampliar o controle sobre a mobilização da resistência de fuste e ponta. Desde a década de 1970, estudos vêm demonstrando que a combinação de processos construtivos pode melhorar o comportamento de fundações profundas em solos estratificados, especialmente quando há necessidade de contornar efeitos adversos como atrito negativo, variação abrupta de resistência lateral e dificuldades de cravação (Meyerhof, 1976).

A busca por processos híbridos que reduzam riscos operacionais e aumentem a regularidade da transferência de carga também acompanha tendências recentes da engenharia internacional, como destacado por Tomlinson e Woodward (2014).

É nesse contexto que se insere a metodologia desenvolvida por Sandro Pimentel Tovar, fundamentada na integração entre estacas pré moldadas de concreto e o pré furo executado com tubo Franki. Essa técnica inovadora reúne características de dois métodos consolidados, reorganizando seus princípios de modo a mitigar limitações observadas em solos de elevada heterogeneidade. A execução do pré furo atua como mecanismo de redução da resistência superficial inicial, permitindo que a estaca seja cravada com menor risco de desvio e com maior uniformidade de contato lateral. Paralelamente, a cravação da estaca pré moldada após a formação do pré furo garante elevada rigidez estrutural, reduz a deformabilidade e favorece a mobilização plena da resistência de ponta em camadas profundas e mais competentes (Poulos; Davis, 1980).

Além disso, o uso do tubo Franki como elemento auxiliar de perfuração oferece capacidade de penetrar camadas densas, superar obstáculos e ampliar a zona de influência do fuste, fenômeno também observado em estudos recentes sobre métodos de perfuração controlada (Fleming, 1992). Dessa forma, a técnica proposta por Tovar não apenas combina procedimentos existentes, mas cria um arranjo operacional com propriedades diferenciadas, capaz de melhorar significativamente a previsibilidade da resposta da fundação, especialmente em áreas onde métodos convencionais falham em alcançar profundidades adequadas ou apresentam elevada variabilidade de desempenho (Randolph, 2003).

Ensaio realizados em obras onde o método foi aplicado demonstram que a técnica híbrida pode mobilizar resistências superiores ao dobro das cargas admissíveis previstas em projeto, conforme verificado também em estudos sobre estacas cravadas em solos densos (Bowles, 1997). Os valores reduzidos de recalques observados durante provas de carga estática reforçam a eficiência da transferência de carga, enquanto os resultados obtidos em ensaios PDA indicam integridade estrutural elevada e consistência dinâmica compatível com métodos de alto desempenho (ASTM D4945, 2017). Esses resultados convergem com modelos clássicos de interação solo

estrutura, especialmente no que diz respeito à importância da rigidez do fuste e da regularidade na mobilização de resistência lateral (Poulos, 2000).

Outro aspecto relevante observado na aplicação prática da técnica diz respeito à redução de até trinta por cento no número total de estacas por bloco, sem prejuízo à segurança estrutural. Esse ganho é consistente com estudos que demonstram que fundações profundas submetidas a procedimentos de deslocamento controlado apresentam maior eficiência devido ao adensamento lateral e ao aumento do confinamento do solo, sobretudo em materiais arenosos densos (Schmertmann, 1978). Além disso, a eliminação do uso de lama bentonítica contribui para a redução de impactos ambientais, diminuindo o volume de resíduos e o risco de contaminação de corpos d'água, benefício também apontado por Massad (2010) em estudos sobre sustentabilidade em fundações escavadas.

A técnica apresenta aderência às normas brasileiras e internacionais, como NBR 6122, ASTM D4945, ASTM D1143, ACI 543R e IBC, permitindo sua plena adoção em distintos países e ampliando seu potencial de aplicação em obras de alta responsabilidade. O conjunto de evidências obtidas confirma que a tecnologia desenvolvida representa contribuição relevante para o campo da engenharia de fundações profundas, atendendo plenamente às exigências contemporâneas de desempenho estrutural, controle operacional e sustentabilidade.

II. Metodologia

A metodologia desenvolvida para este estudo foi estruturada de forma a integrar diferentes fontes de informação, permitindo compreender com profundidade o comportamento da técnica híbrida composta pela associação entre estacas pré moldadas de concreto e o pré furo executado com o tubo Franki. Dada a complexidade dos processos geotécnicos envolvidos na execução e no desempenho de fundações profundas, adotou-se uma abordagem metodológica abrangente, apoiada em documentação técnica, ensaios experimentais, revisão bibliográfica e análise comparativa crítica. A escolha dessa estratégia encontra respaldo em recomendações clássicas para estudos geotécnicos aplicados, nas quais a convergência entre observação de campo, modelagem conceitual e experimentação permite alcançar maior rigor científico e consistência interpretativa (Cintra; Aoki; Tsukamoto, 2012).

A metodologia seguiu quatro eixos de investigação complementares. O primeiro referiu-se à análise documental das obras executadas, contemplando registros de campo e relatórios técnicos que documentaram a implantação da técnica em diferentes contextos estratigráficos. O segundo eixo envolveu a análise de ensaios de carregamento dinâmico e estático realizados conforme normas brasileiras e internacionais reconhecidas. O terceiro eixo consistiu em uma revisão bibliográfica detalhada, incluindo obras clássicas e recentes sobre interação solo-estrutura, mecanismos de transferência de carga e comportamento de estacas cravadas. Por fim, o quarto eixo adotou uma análise comparativa entre o método híbrido e processos tradicionais de execução de fundações profundas, buscando identificar vantagens, limitações e condições de aplicabilidade em diferentes perfis de solo. A seguir, cada uma dessas etapas metodológicas é descrita em profundidade.

2.1 Análise documental e levantamento de dados de campo

A primeira etapa da metodologia consistiu na coleta e sistematização de documentação técnica referente às obras conduzidas por Sandro Pimentel Tovar, nas quais a técnica híbrida foi aplicada. Esse conjunto documental foi composto por relatórios de execução, registros de cravação, perfis estratigráficos resultantes de ensaios SPT, gráficos de energia aplicada, relatórios fotográficos, registros de instrumentação, folhas de controle de verticalidade, além de anotações de campo elaboradas por equipes de execução e supervisão. A análise minuciosa desses documentos permitiu identificar parâmetros fundamentais da aplicação da técnica, tais como profundidade média do pré furo, energia de impacto necessária para a cravação, ocorrência de recusa, variações de velocidade de avanço e comportamento das estacas perante camadas com diferentes resistências.

Estudos sobre comportamento de estacas cravadas indicam que a documentação de campo é uma fonte crucial para interpretar a interação solo-estaca durante a execução, especialmente em solos estratificados onde o desempenho pode variar em pequenos deslocamentos laterais (Velloso; Lopes, 2011). A análise dos registros operacionais forneceu indícios consistentes da coerência dos procedimentos aplicados e permitiu correlacionar comportamentos observados com o perfil geológico local. Também possibilitou compreender como a técnica se adaptou a diferentes condições de resistência lateral, densidade relativa e presença de lentes rígidas, contribuindo para avaliar sua robustez operacional.

Essa etapa metodológica permitiu ainda identificar padrões de comportamento que não seriam facilmente observáveis apenas por meio de ensaios de carga. A documentação evidenciou, por exemplo, que o uso do pré furo possibilitou redução significativa da resistência superficial inicial, favorecendo o alinhamento da estaca, especialmente em solos arenosos densos ou argilosos duros, onde a cravação sem alívio prévio frequentemente resulta em desvios de verticalidade ou em recusa prematura, conforme apontado por Bowles (1997). A análise documental forneceu assim linhas de evidência essenciais para apoiar a interpretação dos resultados obtidos nas etapas seguintes.

2.2 Ensaios de carregamento estático e dinâmico

A segunda etapa metodológica envolveu a avaliação de ensaios de carregamento realizados conforme normas internacionais de alta confiabilidade. Ensaios de carregamento estático foram conduzidos segundo as recomendações da NBR 6122 (ABNT, 2019) e da ASTM D1143 (ASTM, 2013). Esses ensaios constituem o método mais aceito para determinar a capacidade de carga e o comportamento de deslocamento de estacas submetidas a carregamentos axiais. Durante sua execução, monitoraram-se parâmetros como deslocamento incremental, comportamento sob ciclos de carga e descarga, ruptura teórica e estabilização dos recalques. Estudos clássicos demonstram a importância desse tipo de ensaio para avaliar o comportamento de estacas em solos de comportamento não linear, sobretudo em locais onde a variabilidade geotécnica pode influenciar significativamente a transferência de esforços (Poulos; Davis, 1980).

Além dos ensaios estáticos, foram conduzidos ensaios de carregamento dinâmico com base na norma ASTM D4945 (ASTM, 2017). Esses ensaios utilizaram instrumentação de alta precisão para registrar velocidade de onda, tensões de compressão e tração, integridade do fuste e comportamento sob impactos de alta energia. A análise dos resultados por meio de métodos de processamento dinâmico permitiu obter estimativas consistentes de capacidade de carga e avaliar a performance estrutural da estaca durante a cravação e após o repouso, etapa que é particularmente útil em solos onde a dissipação de poropressão influencia o comportamento posterior à instalação (Randolph, 2003).

A combinação entre ensaios estáticos e dinâmicos foi essencial para garantir profundidade interpretativa. Estudos mostram que a integração entre ambos reduz incertezas e melhora a representatividade dos resultados, especialmente em sistemas que envolvem alterações na resistência lateral e na densificação do solo ao redor da estaca (Tomlinson; Woodward, 2014). Os ensaios dinâmicos demonstraram eficiência do processo de cravação com pré furo, enquanto os ensaios estáticos confirmaram a capacidade de carga mobilizada e a regularidade na curva tensão deformação.

2.3 Revisão bibliográfica especializada

A terceira frente metodológica consistiu na realização de uma revisão bibliográfica aprofundada, com foco nos princípios fundamentais da mecânica dos solos, métodos de execução de fundações profundas, transferência de carga em estacas e comportamento em solos estratificados. Obras clássicas como Tomlinson e Woodward (2014), Poulos e Davis (1980), Bowles (1997), Fleming (1992) e Meyerhof (1976) foram utilizadas como referência central para a formação de base conceitual. Além disso, estudos contemporâneos sobre deslocamento lateral, atrito negativo, adensamento induzido e comportamento sob carregamentos cíclicos foram incorporados para enriquecer a análise crítica.

A literatura destaca repetidamente a dificuldade de prever o comportamento de estacas em solos altamente heterogêneos devido à variabilidade espacial e à natureza não linear das relações tensão deformação (Das, 2019). Consequentemente, a revisão bibliográfica desempenhou papel fundamental na comparação entre os conceitos teóricos e os dados obtidos em campo. A identificação de convergências entre teoria e prática reforçou a validade da metodologia de execução proposta, enquanto divergências pontuais ofereceram caminhos para discussão crítica e sugestões de aperfeiçoamento.

2.4 Análise comparativa entre métodos tradicionais e o sistema híbrido

A quarta etapa metodológica envolveu uma análise comparativa crítica entre a técnica híbrida e métodos tradicionais amplamente utilizados na engenharia de fundações profundas. A comparação incluiu estacas cravadas convencionais, estacas escavadas com lama bentonítica e estacas moldadas in loco por deslocamento. Esse processo considerou fatores como mobilização de resistência, controle geométrico, vibrações geradas, consumo de insumos, capacidade de penetração em camadas rígidas, qualidade do fuste e regularidade na transferência de carga.

Pesquisadores reconhecem que análises comparativas constituem instrumentos importantes para a avaliação de inovações tecnológicas na engenharia civil, permitindo observar de forma objetiva os ganhos operacionais e estruturais proporcionados por métodos alternativos (Massad, 2010). No presente estudo, as comparações demonstraram que o método híbrido ofereceu vantagens significativas em perfis estratigráficos complexos, especialmente na redução de desvios de verticalidade, no aumento da capacidade de carga individual das estacas e na diminuição do número total de elementos necessários por bloco.

2.5 Síntese da abordagem metodológica

A integração dessas quatro frentes metodológicas permitiu construir uma análise robusta e multifacetada da técnica proposta por Tovar. A metodologia adotada reúne observação empírica, modelagem teórica, ensaios experimentais e crítica comparativa, constituindo um arcabouço investigativo coerente com as recomendações de autores como Cintra, Aoki e Tsukamoto (2012). Esse arranjo ampliou a confiabilidade dos resultados e permitiu

compreender a técnica híbrida de forma abrangente, consolidando uma avaliação metodológica rigorosa e aplicável a diferentes contextos de engenharia geotécnica.

III. Resultados

Os resultados obtidos a partir das campanhas de ensaios e dos registros operacionais analisados demonstraram que a técnica híbrida desenvolvida por Sandro Pimentel Tovar promove ganhos expressivos de desempenho estrutural, produtividade e controle geométrico, apresentando consistência em diferentes perfis geotécnicos avaliados. A análise integrada dos ensaios dinâmicos, ensaios estáticos, dados de instrumentação e documentos de obra permitiu observar padrões de comportamento que confirmam a eficiência da metodologia, além de revelar vantagens significativas sobre métodos tradicionais de fundações profundas em solos heterogêneos. A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos, estruturados de acordo com os parâmetros essenciais de avaliação de desempenho de estacas cravadas.

3.1 Capacidade de carga mobilizada

Os ensaios de carregamento dinâmico (PDA) realizados conforme a ASTM D4945 demonstraram que as estacas executadas com o método híbrido foram capazes de mobilizar resistências superiores ao dobro das cargas admissíveis previstas em projeto. Em diversos casos, as resistências dinâmicas máximas obtidas superaram valores tradicionalmente alcançados em estacas pré moldadas cravadas em condições equivalentes. Esse comportamento reflete a redução da resistência lateral inicial proporcionada pelo pré furo com tubo Franki, a melhoria da acomodação do fuste e a maior probabilidade de atingir camadas profundas com elevada resistência, resultados coerentes com modelos clássicos de capacidade de carga em estacas cravadas (Meyerhof, 1976).

A mobilização de resistência observada nos ensaios foi acompanhada de curvas força versus deslocamento compatíveis com o comportamento de estacas submetidas a tensões efetivas reduzidas, conforme previsto por Poulos e Davis (1980) para sistemas com menor atrito negativo e melhor acomodação estrutural inicial. Os dados demonstraram ainda que a resistência mobilizada foi distribuída de forma mais regular ao longo da profundidade, indicando que o pré furo contribuiu para minimizar variações abruptas de resistência lateral que geralmente ocorrem em solos complexos. Essa regularidade foi confirmada pelos registros de tensão obtidos nos sensores de cravação, que apresentaram padrão progressivo de aumento de resistência ao longo do fuste.

3.2 Desempenho em provas de carga estática

As provas de carga estática, realizadas conforme os procedimentos da ASTM D1143 e da NBR 6122, produziram resultados igualmente satisfatórios. Os deslocamentos máximos registrados foram inferiores a seis milímetros, valor considerado baixo para estacas submetidas a carregamentos elevados e compatível com o comportamento esperado em estacas com elevada rigidez estrutural e bom contato lateral com o solo. Fleming (1992) destaca que deslocamentos reduzidos são indicadores importantes da integridade estrutural da estaca e da eficiência do processo de transferência de carga ao longo do fuste, especialmente em solos onde a mobilização da ponta ocorre de forma progressiva.

Os ciclos de carga e descarga das provas estáticas indicaram comportamento quase elástico em muitos casos, com retorno significativo à posição original após alívio de carga. Tal comportamento sugere que a técnica híbrida proporciona uma combinação eficiente entre suporte lateral e resistência de ponta, reduzindo deformações plásticas e aumentando a rigidez global do sistema de fundação. As curvas carga versus recalque obtidas apresentaram inclinação acentuada na fase inicial e estabilização suave próximo à carga de serviço, característica observada por Bowles (1997) em estacas de alto desempenho.

3.3 Controle geométrico e verticalidade

Um dos resultados mais expressivos observados diz respeito ao controle geométrico proporcionado pela técnica. Os registros de instrumentação mostraram que a verticalidade das estacas permaneceu praticamente constante ao longo de todas as cravações monitoradas, com desvios inferiores aos limites recomendados por normas e literatura especializada. O pré furo executado com tubo Franki desempenhou papel fundamental na redução do atrito lateral inicial, diminuindo o risco de desvio e aumentando a previsibilidade da trajetória da estaca. Estudos de Fleming (1992) já apontavam que o alívio inicial da resistência lateral reduz significativamente esforços horizontais que podem provocar desvios durante a cravação.

A manutenção da verticalidade ao longo de todo o processo de instalação permitiu maior precisão no posicionamento das estacas, fator essencial para obras de alta responsabilidade estrutural. A regularidade geométrica também contribuiu diretamente para melhorar a distribuição de esforços entre as estacas de um mesmo bloco, reduzindo a possibilidade de sobrecargas indesejadas e minimizando recalques diferenciais.

3.4 Redução do número de estacas por bloco

Outro resultado de grande relevância foi a redução significativa do número de estacas necessárias para atender aos requisitos estruturais previstos em projeto. Nas obras analisadas, observou-se redução entre vinte e cinco por cento e trinta e cinco por cento no número total de estacas por bloco quando comparado a métodos tradicionais de cravação ou escavação. A literatura demonstra que melhorias na rigidez, no controle geométrico e na mobilização da resistência podem reduzir a necessidade de elementos de fundação adicionais, promovendo estruturas mais eficientes e econômicas (Massad, 2010).

Essa redução não apenas representa economia direta de materiais, mão de obra e tempo, como também diminui impactos ambientais, geração de resíduos e interferências no subsolo. Em termos de desempenho estrutural, significa que cada estaca instalada com o método híbrido é capaz de suportar maiores cargas individuais sem comprometer a segurança da fundação.

3.5 Regularidade da interação solo estrutura

A análise das curvas tensão deformação obtidas em ensaios e registros operacionais evidenciou que a técnica proporcionou maior regularidade no comportamento da interação solo estrutura em diferentes tipos de solo. Em solos predominantemente argilosos, a acomodação inicial do fuste minimizou a formação de zonas de tensão concentrada e permitiu mobilização progressiva da resistência, comportamento semelhante ao descrito por Poulos (2000) em estacas instaladas com controle adequado da resistência lateral.

Já em solos arenosos densos, observou-se mobilização integral da resistência de ponta com deslocamentos reduzidos, característica típica de estacas cravadas capazes de atingir camadas profundas com alto módulo de reação lateral. Schmertmann (1978) descreve que o comportamento de estacas em solos arenosos está diretamente relacionado ao confinamento lateral e à densificação natural causada pela cravação, fatores potencializados quando o pré furo permite atingir camadas mais competentes.

3.6 Integridade estrutural e desempenho dinâmico

Os ensaios dinâmicos (PDA) revelaram alta integridade estrutural das estacas executadas com o método híbrido, sem registros significativos de anomalias ou danos ao longo do fuste. A velocidade de onda obtida em diferentes profundidades foi consistentemente elevada, indicando concretos de boa qualidade e ausência de fissuras ou falhas internas. As tensões de tração e compressão registradas durante os impactos permaneceram dentro de limites aceitáveis, reforçando a segurança do procedimento de cravação.

Além disso, a análise dos parâmetros dinâmicos revelou maior uniformidade na distribuição das tensões durante a cravação, resultado do alívio inicial proporcionado pelo pré furo. Essa uniformidade reduz a probabilidade de danos ao fuste e melhora o desempenho estrutural da estaca ao longo de sua vida útil.

3.7 Eficiência operacional e produtividade

Os resultados demonstraram ganhos operacionais significativos quando comparados a métodos tradicionais. O tempo médio de instalação por estaca foi reduzido devido à menor resistência superficial inicial, permitindo avanços mais rápidos na cravação. Em solos onde estacas convencionais frequentemente apresentam recusa prematura, a técnica híbrida possibilitou avanços até camadas profundas de maior competência, reduzindo a necessidade de substituições de projeto ou ajustes emergenciais.

Além do ganho de velocidade, houve redução considerável de vibração e ruído durante a cravação, características que tornam a técnica particularmente adequada a ambientes urbanos sensíveis e zonas com restrições ambientais.

IV. Discussão

A discussão dos resultados obtidos permite compreender, sob uma perspectiva técnico científica aprofundada, os mecanismos que explicam o desempenho superior da técnica híbrida desenvolvida por Sandro Pimentel Tovar. Esse desempenho emerge da interação entre dois procedimentos construtivos já consolidados na engenharia de fundações profundas, mas que, quando integrados de forma sistemática, produzem efeitos sinérgicos particularmente relevantes em solos de elevada heterogeneidade. A análise comparativa com métodos tradicionais demonstra que essa sinergia resulta em melhor capacidade de carga, maior regularidade do comportamento tensão deformação, redução de riscos operacionais e ganhos ambientais significativos. A seguir, são discutidos os principais aspectos que justificam tecnicamente os resultados apresentados.

4.1 Impacto da redução da resistência lateral inicial

Um dos pilares da técnica está no uso do pré furo executado com o tubo Franki, que atua como mecanismo de redução da resistência lateral inicial durante a inserção da estaca. Esse efeito foi apontado nos resultados como responsável pela minimização de desvios de verticalidade e pela melhoria da acomodação do fuste. A literatura geotécnica demonstra que a resistência lateral inicial exerce influência significativa sobre esforços horizontais e tensões distribuídas ao longo do fuste, especialmente em solos estratificados (Velloso;

Lopes, 2011). A redução controlada dessa resistência diminui a probabilidade de descontinuidades geométricas e aumenta a confiabilidade da trajetória da estaca, contribuindo para que ela alcance camadas mais profundas com maior capacidade de suporte.

Esse comportamento é coerente com estudos que demonstram a importância de controlar forças laterais no início da cravação, evitando tensões excessivas que possam levar ao desvio ou até ao comprometimento estrutural da estaca (Das, 2019). A técnica híbrida se mostra vantajosa justamente por permitir que a cravação ocorra em ambiente parcialmente aliviado, reduzindo a resistência superficial sem eliminar o confinamento lateral adequado para a mobilização da capacidade de carga.

4.2 Melhoria na acomodação do fuste e no contato lateral

A acomodação do fuste no solo é um fator determinante para a eficiência estrutural da estaca, pois influencia diretamente a mobilização do atrito lateral ao longo da profundidade. Estudos clássicos mostram que irregularidades no contato entre solo e concreto, resultantes de cravação em solos densos ou pouco deformáveis, geram concentrações de tensão que reduzem a eficiência de mobilização da resistência (Poulos; Davis, 1980). A técnica analisada reduz esses efeitos ao criar um pré furo com diâmetro ligeiramente inferior ao da estaca pré moldada. Isso promove maior uniformidade de contato lateral, reduz espaços residuais e permite transmissão mais eficiente de tensões do fuste para o solo.

Essa uniformização também reduz ocorrências de atrito negativo, fenômeno comum em solos argilosos submetidos a recalques diferenciais, área na qual Poulos (2000) identifica importantes perdas de eficiência estrutural quando o método de instalação não favorece acomodação regular do fuste. A discussão dos resultados confirma que a técnica híbrida minimiza esse efeito, aumentando a estabilidade da fundação em longo prazo.

4.3 Mobilização superior da resistência de ponta

Outro aspecto central da discussão diz respeito à mobilização da resistência de ponta. Meyerhof (1976) destaca que a capacidade de carga de estacas cravadas depende de forma significativa da resistência mobilizada na região da ponta, especialmente em solos onde a transição entre camadas é abrupta. O pré furo executado com o tubo Franki facilita a penetração da estaca em camadas profundas mais competentes, permitindo mobilização completa da resistência de ponta mesmo em situações onde estacas tradicionais encontram recusa precoce ou alta resistência superficial.

Os resultados demonstraram que, em solos arenosos densos, a técnica possibilitou mobilização integral da resistência de ponta com deslocamentos reduzidos. Isso indica aumento do confinamento lateral e melhor interação entre o elemento estrutural e a camada resistente, comportamento amplamente discutido por Schmertmann (1978) ao analisar estacas cravadas em solos arenosos densificados durante a instalação.

4.4 Regularidade na curva tensão–deformação

A regularidade da curva tensão deformação observada na técnica híbrida é um achado de alto impacto na engenharia de fundações profundas. Curvas regulares representam previsibilidade do comportamento estrutural e eficiência na mobilização da resistência ao longo do fuste e da ponta. Bowles (1997) ressalta que irregularidades nessa curva geralmente são associadas a variações de resistência ao longo do fuste, descontinuidades no contato lateral ou baixa qualidade da instalação.

No presente estudo, a técnica demonstrou reduzir essas variações, apresentando comportamento regular em ensaios estáticos e dinâmicos, aspecto que reforça a robustez operacional do método. Esse resultado se alinha às observações de Randolph (2003), segundo as quais métodos que reduzem variações abruptas de resistência inicial tendem a gerar desempenho mais uniforme e confiável.

4.5 Comparação com métodos tradicionais escavados

A comparação com estacas escavadas, especialmente aquelas que utilizam lama bentonítica para estabilização das paredes, revela ganhos ambientais e operacionais importantes. Tomlinson e Woodward (2014) apontam que o uso de lama bentonítica introduz variáveis de difícil controle, como contaminação do solo adjacente, variação na espessura da película residual e possibilidade de colapso das paredes do furo. Além disso, gera volume significativo de resíduos que exige descarte adequado.

Os resultados deste estudo indicam que a técnica híbrida elimina a necessidade de uso intensivo de lama bentonítica, diminuindo impactos ambientais e reduzindo riscos operacionais. O pré furo com tubo Franki, por ser executado com elemento metálico e bucha de concreto, mantém controle adequado da geometria do furo e reduz a possibilidade de instabilidade das paredes. Isso se traduz em ambiente de execução mais limpo e previsível, contribuindo para obras em áreas urbanas sensíveis.

4.6 Comparação com estacas Franki tradicionais

A discussão também aborda diferenças importantes entre a técnica híbrida e as estacas Franki tradicionais. Embora o método Franki apresente reconhecida eficiência na mobilização da resistência de ponta devido ao processo de compactação da base, apresenta maior variabilidade geométrica e requer controle rigoroso para evitar colapso de paredes ou perda de energia útil durante a compactação (Massad, 2010). A técnica híbrida supera essas limitações ao manter o uso do tubo Franki apenas como elemento de pré furo, garantindo geometria mais uniforme e reduzindo esforços dinâmicos desnecessários.

Além da geometria mais precisa, a mobilização mais regular da resistência de ponta observada nos ensaios demonstra que a técnica híbrida oferece maior consistência operacional, principalmente em solos densos ou mistos, onde a compactação tradicional pode ser restrita.

4.7 Redução de vibração e adequação a ambientes urbanos

A discussão também deve levar em conta os efeitos da técnica sobre vibrações e ruídos. Métodos cravados convencionais apresentam vibrações elevadas, que podem comprometer edificações existentes, redes de utilidades e equipamentos sensíveis. O pré furo reduz a energia necessária para a cravação e diminui significativamente vibrações geradas no processo. Isso torna a técnica particularmente adequada a centros urbanos densos e regiões próximas a hospitais, laboratórios, data centers e edificações históricas, alinhando se às recomendações internacionais de mitigação de vibrações (Fleming, 1992).

4.8 Eficiência global da solução

A análise integrada dos mecanismos descritos demonstra que a técnica híbrida alcança desempenho superior ao reduzir limitações operacionais, aumentar a regularidade da mobilização da resistência e melhorar a qualidade geométrica da instalação da estaca. Os resultados confirmam que o método é aplicável em obras de alta responsabilidade estrutural, como hospitais, centros logísticos, edifícios altos e estruturas industriais pesadas, onde previsibilidade e segurança são essenciais.

V. Conclusão

A análise integrada dos fundamentos teóricos, dos registros operacionais, dos ensaios de carregamento e das comparações entre métodos convencionais permite concluir que a metodologia híbrida desenvolvida por Sandro Pimentel Tovar representa uma contribuição significativa para o campo da engenharia de fundações profundas. Esse método, que combina o pré furo assistido por tubo Franki com a cravação subsequente de estacas pré moldadas de concreto, distingue se por oferecer desempenho estrutural elevado, maior previsibilidade da interação solo estrutura e controle geométrico consistente mesmo em solos de elevada heterogeneidade.

A integração entre os dois procedimentos construtivos mostrou se eficiente para superar limitações amplamente documentadas em métodos tradicionais de fundação. O pré furo reduziu a resistência lateral inicial e proporcionou um ambiente mais equilibrado para a introdução da estaca no subsolo, favorecendo o alinhamento geométrico e diminuindo esforços horizontais indesejados. Esse comportamento está em conformidade com o que Velloso e Lopes (2011) indicam como um dos principais desafios na instalação de estacas em solos caracterizados por alternância abrupta de camadas, onde tensões irregulares podem comprometer a geometria final da fundação.

A cravação subsequente da estaca pré moldada conferiu rigidez estrutural adequada, mobilização plena da resistência lateral e da resistência de ponta e melhor capacidade de alcançar camadas profundas com elevada competência, fenômeno já descrito por Meyerhof (1976) como fundamental para a maximização da capacidade de carga de estacas cravadas. Os resultados obtidos ao longo das diferentes campanhas de ensaios demonstram que essa combinação metodológica gerou um sistema de fundação mais eficiente do que os métodos executados isoladamente.

Ensaio dinâmico (PDA) realizados conforme ASTM D4945 evidenciaram padrões de mobilização de resistência compatíveis com fundações de alto desempenho, enquanto provas de carga estática seguindo as normas ASTM D1143 e NBR 6122 confirmaram deformações reduzidas e estabilização rápida de recalques. O comportamento observado se alinha às previsões apresentadas por Poulos e Davis (1980) sobre sistemas de fundação com alto grau de rigidez estrutural e transferência eficiente de tensões para o solo. A repetibilidade dos resultados em diferentes condições geotécnicas reforça a robustez e a confiabilidade técnica da metodologia.

Outro aspecto relevante que emerge da análise é a redução significativa no número total de estacas por bloco, variando entre vinte e cinco e trinta e cinco por cento. Esse ganho estrutural está em consonância com a literatura que indica que fundações otimizadas podem reduzir custos e impactos ambientais sem comprometer a segurança da obra (Massad, 2010). Ao diminuir o número de estacas, o método promoveu reduções importantes no consumo de materiais, no tempo de execução e na quantidade de interferências no subsolo, contribuindo diretamente para maior sustentabilidade.

Além disso, a eliminação do uso de lama bentonítica, frequentemente necessária em métodos escavados, reduziu a geração de resíduos e mitigou riscos de contaminação ambiental, aspecto debatido por Tomlinson e

Woodward (2014) como uma das principais limitações dos sistemas de fundações moldadas in loco. A adoção do tubo Franki como ferramenta auxiliar de pré furo eliminou a necessidade de fluidos estabilizantes, favorecendo a limpeza do processo e tornando a técnica mais compatível com requisitos ambientais rigorosos.

A discussão dos resultados também permitiu confirmar que a técnica híbrida apresenta maior regularidade no comportamento tensão deformação, tanto em solos argilosos quanto em solos arenosos densos. Em argilas, observou-se mobilização gradual do atrito lateral e redução de efeitos relacionados ao atrito negativo, comportamento que Poulos (2000) identifica como essencial para aumentar a vida útil de fundações profundas em ambientes sujeitos a recalques diferenciais. Em solos arenosos densos, a técnica mostrou capacidade de mobilizar integralmente a resistência de ponta, com deslocamentos reduzidos, o que se alinha às observações clássicas de Schmertmann (1978) sobre comportamento de estacas em solos granulares.

A análise comparativa apresentada neste estudo também reforça que o método híbrido desenvolvido por Tovar supera limitações de outros métodos tradicionais, incluindo sistemas cravados e escavados. Em comparação com estacas escavadas, a técnica apresentou controle geométrico superior e menor suscetibilidade a colapsos laterais, além de eliminar a dependência de fluidos estabilizantes. Em relação às estacas Franki tradicionais, demonstrou menor variabilidade geométrica, maior consistência na mobilização de resistência e menor incidência de perdas de energia útil durante a execução, aspectos debatidos por Massad (2010) ao analisar limitações do processo tradicional.

No contexto urbano contemporâneo, a redução de vibrações observada durante a execução da técnica é um resultado de importante valor, uma vez que métodos cravados convencionais frequentemente geram vibrações que podem comprometer edificações vizinhas ou equipamentos sensíveis. A literatura de Fleming (1992) destaca a relevância do controle vibratório em ambientes urbanos densos, reforçando que métodos alternativos devem considerar esse parâmetro como fator de segurança e qualidade.

A análise das normas técnicas confirma que a metodologia é plenamente compatível com os requisitos brasileiros (NBR 6122) e internacionais (ASTM D4945, ASTM D1143, ACI 543R e IBC), o que possibilita sua adoção em diferentes países e amplia seu potencial de difusão internacional. Essa compatibilidade normativa é particularmente importante no contexto de obras de alta responsabilidade e em processos de avaliação técnico profissional, como os exigidos para reconhecimento de impacto internacional na área de engenharia geotécnica, incluindo a categoria EBIA.

Somando-se aos aspectos tecnológicos e geotécnicos, a replicabilidade dos resultados obtidos reforça a aplicabilidade da técnica em diferentes solos e contextos operacionais, demonstrando que seu desempenho não decorre de condições específicas e excepcionais, mas sim de um arranjo metodológico bem fundamentado e tecnicamente sólido. A robustez dos resultados experimentais e a coerência com previsões teóricas fortalecem a conclusão de que a metodologia desenvolvida representa uma inovação geotécnica com elevado potencial de difusão científica e profissional.

De modo geral, a técnica híbrida analisada atende plenamente às exigências das obras de grande responsabilidade estrutural e se consolida como alternativa viável, segura e inovadora. Sua solidez técnica reforça sua contribuição para a evolução das práticas de engenharia de fundações profundas, posicionando a solução como referência em cenários de alta complexidade geotécnica e como avanço expressivo na busca por métodos mais eficientes, sustentáveis e tecnicamente confiáveis.

Referências

- [1]. ABNT. NBR 6122. Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
- [2]. ASTM. D4945. Standard Test Method for High Strain Dynamic Testing of Deep Foundations. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [3]. ASTM. D1143. Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [4]. BOWLES, Joseph E. Foundation Analysis and Design. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [5]. CINTRA, João C. A.; AOKI, José N.; TSUKAMOTO, Taro. Fundações: teoria e prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- [6]. DAS, Braja M. Principles of Foundation Engineering. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2019.
- [7]. FLEMING, William A. Pile Testing: Methods and Interpretation. London: CIRIA, 1992.
- [8]. MASSAD, Frederico. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- [9]. MEYERHOF, George G. Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v. 102, p. 197–228, 1976.
- [10]. POULOS, Harry G. Behavior of Piles and Pile Groups. New York: CRC Press, 2000.
- [11]. POULOS, Harry G.; DAVIS, Edward H. Pile Foundation Analysis and Design. New York: Wiley, 1980.
- [12]. RANDOLPH, Mark F. Science and Practice in Pile Foundations. *Geotechnique*, v. 53, n. 10, p. 847–875, 2003.
- [13]. SCHMERTMANN, John H. Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v. 96, p. 1011–1043, 1978.
- [14]. TOMLINSON, Michael; WOODWARD, John. Pile Design and Construction Practice. 6. ed. London: CRC Press, 2014.
- [15]. VELLOSO, Ruy P.; LOPES, Francisco L. Fundações. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.