

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/319

Fundações Profundas em Regiões Cársticas Estudo de Caso

Carolina Cesilo dos Santos

Engenheira Civil, Geofix Engenharia e Fundações, São Paulo, Brasil, carolina.santos@geofix.com.br

Luiz Ricardo Araújo Piccolo

Assistente de Engenharia Civil, Geofix Engenharia e Fundações, São Paulo, Brasil, luiz.piccolo@geofix.com.br

Marcio Abreu Freitas

Engenheiro Civil, Geofix Engenharia e Fundações, São Paulo, Brasil, marcio.freitas@geofix.com.br

Denis Pereira Andrade

Engenheiro Civil, Geofix Engenharia e Fundações, São Paulo, Brasil, denis.andrade@geofix.com.br

RESUMO: O artigo apresenta um estudo de caso de uma obra em Cajamar, São Paulo. A região é conhecida por sua geologia cárstica, que apresenta formações rochosas suscetíveis à dissolução química, resultando em “cavernas” e abatimentos de solo, como o "Buraco de Cajamar" e o incidente no "Espaço Natura". Durante a construção dos três galpões logísticos, a geotecnia foi um desafio crucial, pois a execução das fundações profundas enfrentou dificuldades devido à presença dessas formações cársticas e à necessidade de perfurações em meio a elas, além da camada de aterro de 13 metros, exigindo um cuidadoso planejamento e monitoramento para garantir a estabilidade das estruturas. Outra questão abordada foi o consumo excessivo de concreto durante a concretagem das estacas do tipo Hélice Contínua, que atingiram até 34 metros de profundidade e diâmetros variando entre 50 e 80 centímetros. Assim, o estudo ressalta a importância de considerar o ponto de vista geotécnico, técnicas especiais de execução e controle de qualidade para obras em regiões com características especiais, como as formações cársticas de Cajamar, garantindo segurança e eficiência das estruturas construídas.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Geotecnia, Carste, Estaca Hélice Contínua, Cajamar

ABSTRACT: The article presents a case study of a project in Cajamar, São Paulo. The region is known for its karst geology, which presents rock formations susceptible to chemical dissolution, resulting in “caves” and soil collapses, such as the "Buraco de Cajamar" and the incident at "Espaço Natura". During the construction of the three logistics warehouses, geotechnical engineering was a crucial challenge, as the execution of deep foundations was difficult due to the presence of these karst formations and the need to drill through them, in addition to the 12 meter layer of embankment, requiring careful planning and monitoring to ensure the stability of structures. Another issue addressed was the excessive consumption of concrete during the concreting of the Continuous Flight Auger Pile, which reached up to 34 meters depth and diameters varyng between 50 to 80 centimeters. Thus, the study highlights the importance of considering the geotechnical point of view, special execution techniques and quality control in works in regions with special characteristics, such as the karst formations of Cajamar, to guarantee the safety and efficiency of the constructed structures.

KEYWORDS: Foundations, Geotechnics, Karst, Continuous Flight Auger Pile, Cajamar

1 INTRODUÇÃO

O Centro Logístico construído às margens da Rodovia Anhanguera, em Cajamar, São Paulo, destaca-se não apenas pela sua magnitude e importância no cenário logístico brasileiro, mas também pelos desafios geotécnicos e de fundação enfrentados durante sua edificação. Este empreendimento, composto por três galpões pré-fabricados, representa um marco na região, exigindo uma abordagem cuidadosa e técnica devido às características do solo e à presença de fenômenos cársticos. A escolha da fundação em estacas do tipo Hélice Contínua foi determinada por rigorosas investigações geotécnicas como Sondagem à Percussão (SPT - Standard Penetration Test) e Sondagem Rotativa, demonstrando a importância da boa prática da engenharia civil, em especial na área da geotecnia, visando a garantia da estabilidade em ambientes desafiadores como este. Além disso, a região oferece uma infraestrutura favorável para o desenvolvimento de empreendimentos logísticos de grande porte.

2 CARACTERÍSTICAS DO SOLO E SONDAGEM

Conforme a sondagem apresentada na figura 1, observa-se que as características do solo no projeto em questão são: nos primeiros 23 metros, encontra-se silte argiloso com fragmentos de rocha, estruturas relictas preservadas, com consistência variando de mole a duro e coloração marrom claro. Entre os 23 e 29 metros, há a presença de matacão de filito, com coloração cinza escuro, silte argiloso, fragmentos de rocha e estruturas relictas preservadas, com consistência também variando de mole a duro e coloração marrom claro. A partir dos 31 metros, observamos as características do fenômeno cárstico, composto por filito de coloração cinza escuro e inclusões centimétricas de material carbonático.

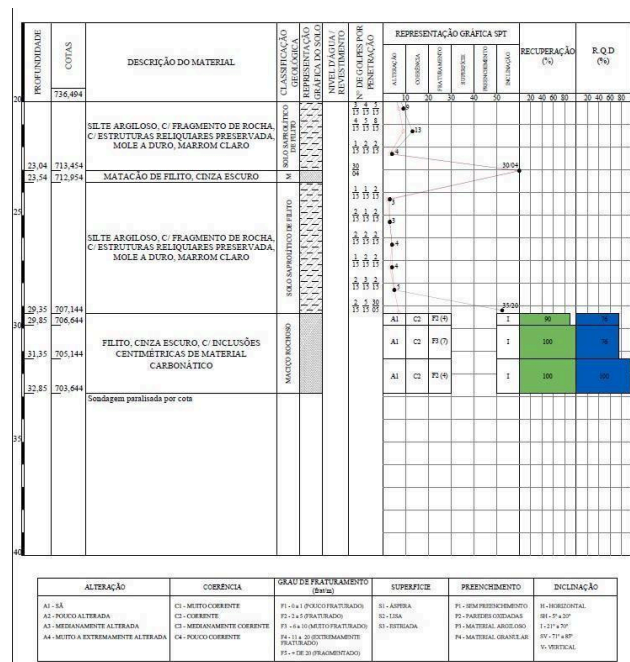


Figura 1. Perfil de sondagem mista/rotativa Projeto SYSLOG CAJAMAR (2022).

A sondagem rotativa revelou a presença de formações cársticas entre 29 e 32 metros de profundidade, com amostras de rocha mostrando evidências de dissolução e vazios internos. As amostras inalteradas permitiram a análise da estrutura interna da rocha, confirmando a presença de cavidades típicas de terrenos cársticos. Nessas condições, é indispensável considerar a influência da topografia local, das condições hidrogeológicas e das cargas das estruturas sobre o comportamento do solo. Esses aspectos requerem análises específicas e precauções durante o planejamento e execução das obras.

3 FUNDAÇÃO

A escolha da fundação em estacas do tipo hélice contínua foi baseada em vários aspectos geotécnicos que a tornaram a mais adequada para o projeto em questão.

De suma importância, a técnica permite uma rápida execução das estacas, o que contribui para a agilidade da obra. Isso se deve à sua eficiência na transferência de cargas para camadas mais resistentes do solo, reduzindo a necessidade de escavações profundas e facilitando a instalação em comparação a outros métodos de fundação.

Além do mais, a execução das estacas em hélice contínua é um processo controlado por equipamentos eletrônicos, o que garante maior precisão e controle sobre as etapas de perfuração e concretagem. Esse controle é especialmente relevante em áreas urbanas densamente povoadas ou próximas a estruturas sensíveis, onde a redução das vibrações no solo durante a instalação das estacas é crucial para evitar danos. Outro aspecto relevante é a capacidade da estaca de alcançar grandes profundidades sem a necessidade de paradas frequentes para troca de ferramentas ou reposicionamento, tornando o processo mais eficiente e econômico.

Durante a execução, o monitoramento da pressão do concreto permitiu a identificação das regiões de "caverna", variando entre 18 e 34 metros, o que possibilitou a adoção de medidas de reforço nas estacas em que o sobreconsumo de concreto excedeu 50%. Essa medida foi essencial para garantir a integridade estrutural das estacas frente a possíveis mudanças nas condições do solo.

Para assegurar que as estacas atingissem a profundidade especificada no projeto e fossem compatíveis com o diâmetro e a resistência do solo, foi necessário que o equipamento utilizado atendesse aos requisitos mínimos estabelecidos pelo projetista e executor. Esse cuidado é fundamental para minimizar o desconfinamento do solo durante a perfuração, garantindo a resistência geotécnica prevista em projeto para cada estaca, conforme a norma ABNT NBR 6122:2019.

Em resumo, a escolha da fundação em hélice contínua foi motivada pela sua eficiência, rapidez e precisão na execução, além da redução das vibrações no solo e da capacidade de alcançar grandes profundidades de forma contínua. Esses fatores e as especificações de projeto, tornaram essa opção a mais adequada para garantir a estabilidade e segurança das estruturas construídas sobre elas.

3.1 Método executivo e cuidados na execução

A estaca hélice contínua é uma fundação profunda de concreto armado, utilizada em diversas obras de engenharia civil. Sua construção envolve a inserção no solo de um trado helicoidal contínuo com diâmetro constante, que é girado para perfurar o terreno. Na sequência desse processo, o concreto é bombeado pela haste central vazada do trado, preenchendo a cavidade deixada pela perfuração. A colocação da armadura da estaca ocorre sempre após a concretagem, garantindo sua integridade estrutural.

A execução da estaca hélice contínua requer equipamentos e técnicas específicas e é fundamental que seja realizada por profissionais qualificados para garantir a qualidade e segurança da fundação.

Para prevenir a entrada de solo ou água na haste tubular durante a introdução do trado e consequentemente, evitar a contaminação do concreto, é empregada uma tampa metálica temporária em sua extremidade inferior, que é expelida no início da concretagem. Essa abordagem de perfuração possibilita a execução da estaca em terrenos coesivos e arenosos, independentemente da presença do lençol freático. Ademais, é capaz de transpor camadas de solo resistente com índice de penetração padrão (SPT) acima de 50 golpes, dependendo do equipamento e ferramental de ponta utilizado.

3.2 Equipamento utilizado

Para garantir a eficácia na realização do projeto, a equipe de engenharia realizou uma cuidadosa seleção de equipamentos e ferramentas apropriadas, considerando as características apresentadas pelo terreno, nas quais incluíam trechos com passagem de rocha fragmentada e aterros com altura de até 13 metros.

Diante dessas condições, foi definido o modelo Casagrande C850 de torque elevado, que demonstrou capacidade para atingir as profundidades necessárias suportando pressões acima de 300 bar para ultrapassar trechos com passagens de rocha, garantindo um desempenho satisfatório na perfuração e concretagem.

Além disso, foram utilizadas ponteiras com BIT's de vídea para superar os trechos de alteração de rocha, proporcionando maior eficiência e precisão no trabalho. Quanto à profundidade, o equipamento mostrou-se plenamente adequado às necessidades do projeto, podendo atingir até 34 metros sem a necessidade de utilização do prolongador, satisfazendo assim o limite requerido no projeto.

4 A OBRA

A construção das fundações do centro logístico teve início em maio de 2022, conforme o plano inicial que previa a execução de 1.083 estacas hélice contínua, com profundidade máxima de 34 metros. No entanto, devido às revisões no projeto e interferências durante a execução, o total de estacas foi de 1.762. Essas interferências incluíram a descoberta de camadas de solo mais resistentes do que o esperado, exigindo ajustes no projeto e a inclusão de estacas adicionais para garantir a estabilidade da estrutura.

O aumento do número de estacas resultou em um significativo acréscimo no prazo da obra, que passou de 5 para 13 meses. Esse aumento de 2,6 vezes em relação ao previsto inicialmente também teve um impacto nos custos da obra, cerca de 30% superiores ao orçamento inicial. Este fato deve-se principalmente aos custos adicionais com mão de obra, equipamentos e materiais necessários para a perfuração e concretagem das estacas adicionais.

Apesar dos desafios encontrados, as fundações foram concluídas com sucesso e o centro logístico foi inaugurado dentro do prazo estendido conforme figura 2.



Figura 2. Foto capturada durante a construção do centro logístico

4.1 Projeto x Execução

O gráfico apresentado na Figura 3 compara as quantidades de estacas projetadas com as efetivamente executadas. Houve um incremento considerável nos diâmetros das estacas devido às interferências de rochas no terreno, o que exigiu a inclusão de estacas de reforço. Por outro lado, houve uma redução no número de estacas com diâmetro de 80 cm, pois algumas foram convertidas para 70 cm durante as revisões do projeto, buscando otimizar a produção.

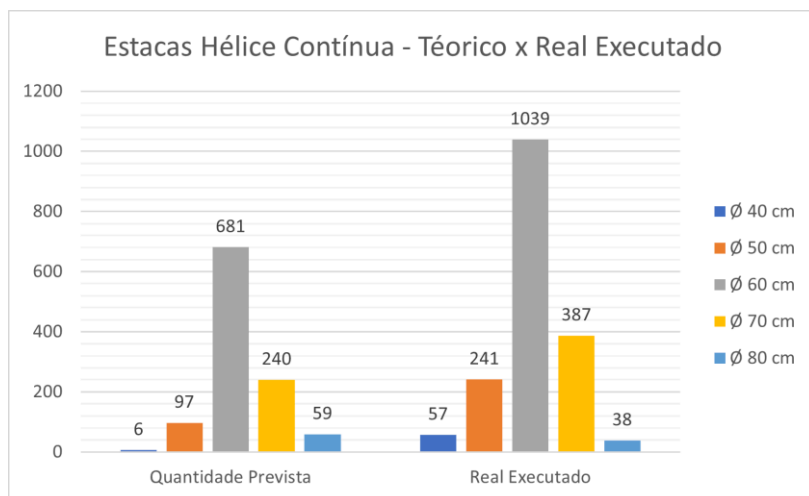


Figura 3. Quantidade de Estacas Hélice Contínua.

Em relação aos metros perfurados, a previsão inicial era de 36.822 metros, mas foram perfurados efetivamente 43.877,53 metros, o que representa um aumento de cerca de 20%. Em relação aos fatos mencionados anteriormente, esse acréscimo ocorreu devido às dificuldades encontradas no terreno e à necessidade de reforçar as fundações para atender às especificações do projeto.

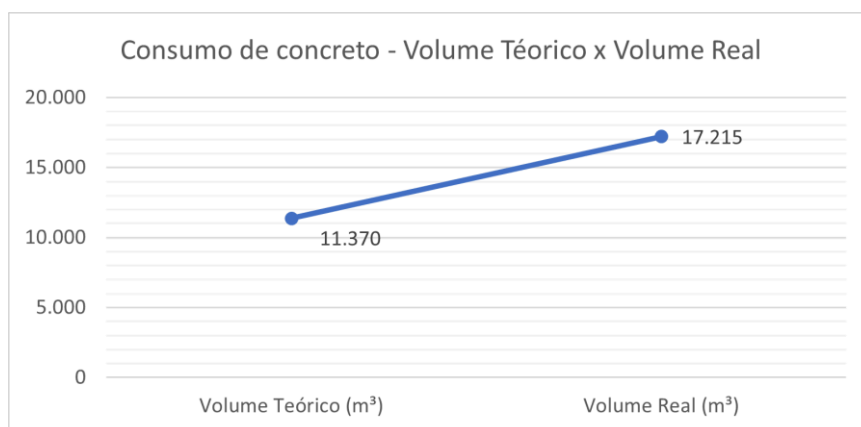


Figura 4. Consumo de concreto – Estacas Hélice Contínua.

A seguir, na tabela 1 seguem os dados de execução das quatro estacas que registraram o maior consumo adicional de concreto durante a obra, todas localizadas no Deck Park do projeto de fundações.

Essas estacas foram objeto de atenção especial por causa do consumo excessivo de concreto, exigindo análises adicionais. Portanto, a equipe de engenharia utilizou métodos avançados de monitoramento e análise geotécnica, como análise em tempo real de dados e inspeções regulares para mitigar quaisquer riscos associados ao sobreconsumo elevado de concreto.

Tabela 1. Estacas com maior sobreconsumo de concreto da obra do Centro Logístico.

Estaca	Ø	Profundidade (m)	Vol. Téorico (m³)	Vol. Real (m³)	Consumo Concreto	Caminhões Betoneira
P15	60	30	7,63	144,00	1786%	21
P31A	60	30	8,48	58,00	584%	9
P48A	60	31	8,77	65,50	647%	10
P53	60	28,5	8,06	89,50	1011%	13

4.2 Interferências

Durante a obra, a principal interferência foram as “cavernas” subterrâneas. A existência dessas cavidades levantou preocupações significativas devido ao potencial perigo de recalque excessivo do solo, desabamentos e até mesmo colapso total da área demarcada. Ao total, durante as escavações, 95 (noventa e cinco) estacas encontraram interferência de cavernas, resultando em um consumo excessivo médio de 51% entre o volume teórico de concreto e o volume total real consumido.

Após análise geotécnica, o consultor de fundações propôs uma solução para lidar com as interferências identificadas: preencher os vazios nas estacas com concreto até o nível do terreno. A implementação dessa medida foi complexa, demandando supervisão técnica para garantir o preenchimento completo das cavidades detectadas, tanto nas estacas quanto nas “cavernas”. Além disso, foram realizados reforços com feixes de três barras adicionais de 20 mm nas estacas.

Foi efetuado um monitoramento minucioso da concretagem e uma Prova de Carga Estática (PCE) na estaca com maior sobreconsumo para verificar a capacidade de carga e integridade. Esse processo é fundamental para verificar se a estaca suporta as cargas previstas no projeto sem apresentar deformações excessivas.

Durante o processo de concretagem da estaca P15, a equipe de obra enfrentou um significativo desafio relacionado à disponibilidade de caminhões betoneiras para atender à demanda de concreto necessária. Isso resultou na paralisação das outras atividades em curso no canteiro de obras, aguardando o fornecimento adequado do material. Após seis horas de concretagem, o procedimento foi concluído com êxito, finalizando a estaca.

Na locação apresentada na Figura 5, podemos notar que ambas as estacas estão posicionadas no mesmo eixo 11, sugerindo a possibilidade de uma caverna única com uma extensão de cerca de 25 metros ter sido encontrada durante a fase de execução da fundação deste centro logístico. Embora as dimensões precisas da caverna não tenham sido completamente determinadas, o volume total de concreto utilizado nas quatro estacas foi de 357 m³, equivalente a preencher os espaços vazios com o uso de 53 caminhões betoneiras.

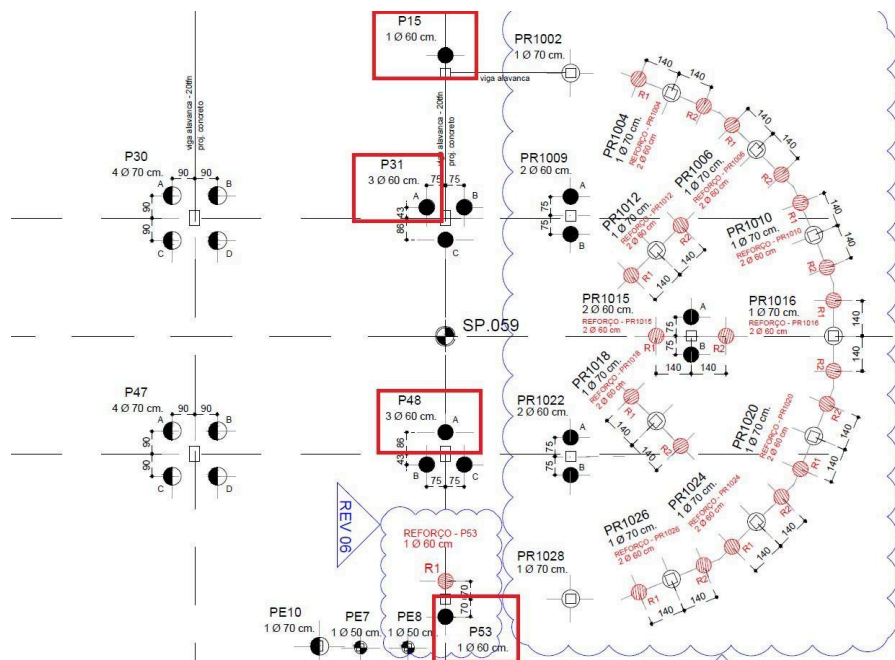


Figura 5. Localização das estacas P15, P31A, P48A e P53.

4.3 Prova de carga

Vamos agora analisar o gráfico da figura 6 que representa a carga (tf) em relação ao deslocamento (mm) registrado para estaca P15, tipo hélice contínua, com diâmetro de 60 centímetros e profundidade de 30 metros.

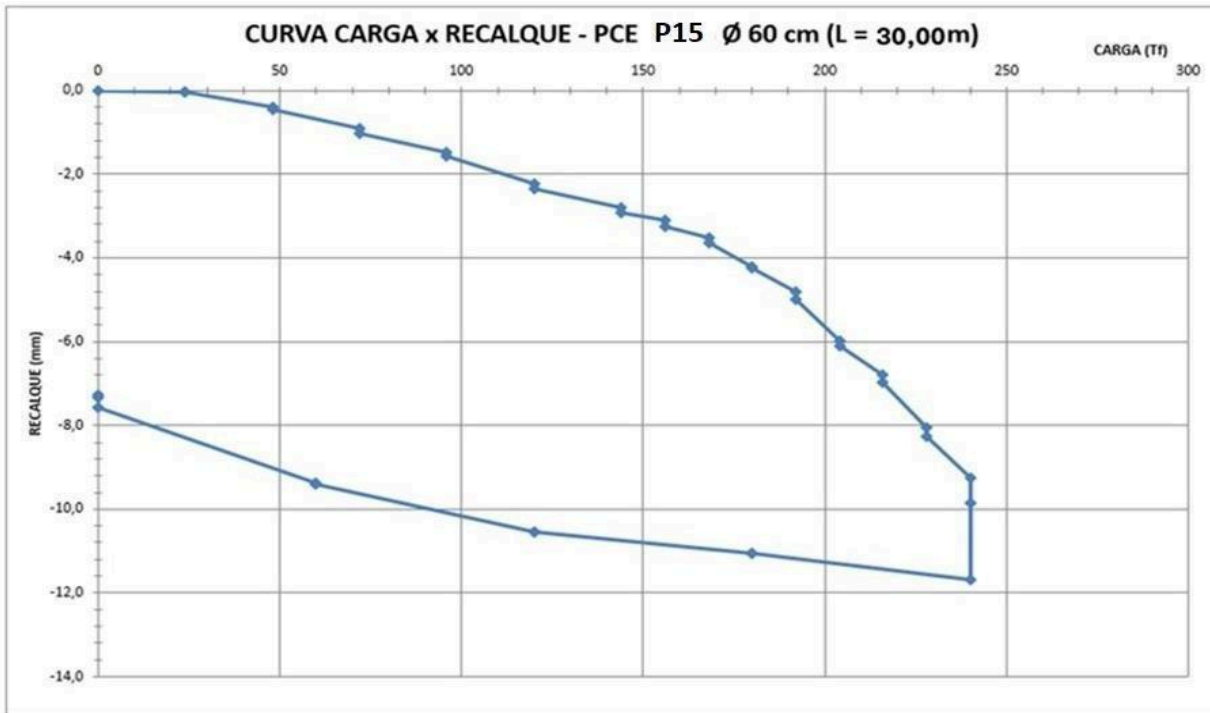


Figura 6. Prova de carga PCE.

Ao longo do ensaio, a carga máxima prevista de 240 toneladas-força (tf) foi atingida com êxito. Após um período de estabilização de duas horas com essa carga, o deslocamento total acumulado registrado foi de 11,69 mm conforme apresentado na figura 7. O processo de descarregamento foi conduzido em quatro etapas, culminando em um recalque residual de 11,05 mm ao término do teste.

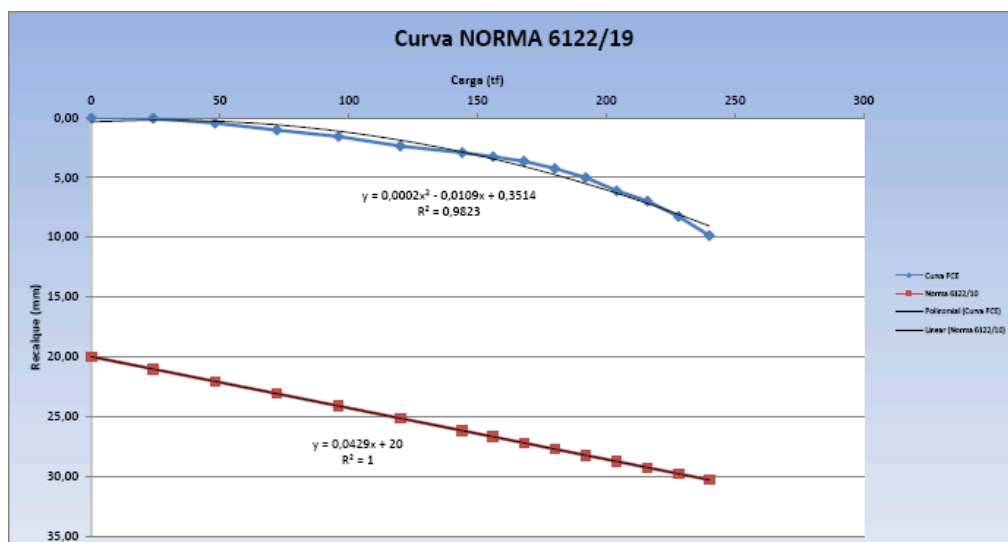


Figura 7. Curva Norma 6122/19.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos desafios encontrados na execução das fundações em regiões cársticas para o Centro Logístico em Cajamar, São Paulo, é evidenciada a vital importância da engenharia geotécnica e da seleção criteriosa de técnicas e equipamentos. A presença de fenômenos cársticos exigiu ajustes no projeto, utilização de estacas de reforço e aplicação de medidas especializadas para garantir a estabilidade das estruturas.

A opção pela estaca Hélice Contínua revelou-se crucial para enfrentar os desafios, proporcionando rapidez, eficiência e precisão na execução das fundações. O monitoramento constante, prova de carga estática e a implementação de medidas de reforço foram fundamentais para assegurar o excelente resultado obtido.

O estudo ressalta a importância de uma análise geotécnica detalhada, a escolha criteriosa de técnicas e equipamentos, bem como a gestão eficiente de projetos para garantir a segurança e eficácia das obras em regiões com peculiaridades geológicas, como as formações cársticas de Cajamar. A superação dos desafios na construção do Centro Logístico evidencia a habilidade da engenharia em lidar com ambientes complexos, contribuindo para o avanço do conhecimento e das práticas na área geotécnica.

Foram utilizados os principais métodos de investigação geotécnica, incluindo sondagem à percussão (SPT), sondagem rotativa e ensaios geofísicos (GPR - Ground Penetrating Radar e sísmica de refração). O número de sondagens realizadas foi satisfatório para delinear e auxiliar todas as decisões tomadas durante o projeto. No entanto, uma técnica que não foi empregada, mas que poderia ter sido benéfica, é a injeção de calda de cimento para o preenchimento das regiões afetadas pelas patologias cársticas identificadas.

A utilização dessas técnicas permite uma caracterização precisa das condições do subsolo, identificando a presença de cavidades e outros fatores críticos que poderiam impactar a estabilidade das fundações. A implementação de injeções de calda de cimento poderia ter complementado os métodos empregados, mitigando os riscos associados às formações cársticas e assegurando uma maior estabilidade do terreno. A análise geotécnica detalhada, juntamente com uma gestão de projeto eficiente, demonstrou a capacidade da engenharia geotécnica de adaptar-se e superar os desafios apresentados por ambientes geologicamente complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA. **Manual de execução de fundações e geotecnia – Práticas recomendadas**. 2ª ed. São Paulo, Pini, 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122 – **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro. 2019.