XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8961

Geração de uma biblioteca de modelos de simulação para execução de fundações

Generation of a library of simulation models for foundation execution

Bruna Souza Oliveira
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | bruna.oliveira@ctec.ufal.br
Anna Julya de Carvalho Rêgo Barros
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | anna.barros@ctec.ufal.br
André Luís Santos Ferreira de Araújo
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | andre.araujo@iqb.ufal.br
Maria Luiza Nunes Lopes
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | maria.nunes@ctec.ufal.br
Nielton Augusto de Souza Dantas
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | nielton.dantas@ctec.ufal.br
Adriana de Oliveira Santos Weber
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | adrianaos@ctec.ufal.br
Roberto Barbosa dos Santos
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | rbs@ctec.ufal.br

Resumo

O planejamento da execução de fundações é dificultado pela elevada variabilidade dos processos e pela escassez de dados de produtividade. Este trabalho objetivou desenvolver uma biblioteca de modelos de simulação de eventos discretos para fundações rasas e profundas, por meio de estudo experimental-computacional fundamentado em Design Science Research. Os modelos desenvolvidos apresentaram alta precisão, baixa variabilidade e consistência interna, reproduzindo adequadamente o comportamento produtivo das fundações analisadas, o que confirma a viabilidade da abordagem e seu potencial de ampliação para outras tipologias.

Palavras-chave: Simulação. Fundações. Planejamento de obras. Modelagem de processos. Análise de produtividade.

Abstract

The execution of foundations is challenged by the high variability of its processes and by the scarcity of productivity data. This study aimed to develop a library of discrete-event simulation models for shallow and deep foundations, through an experimental-computational study grounded in Design Science Research. The developed models exhibited high precision, low variability, and internal consistency, adequately reproducing the productive behavior of the analyzed foundations, which confirms the viability of the approach and its potential for extension to other typologies.

Keywords: Simulation. Foundations. Construction planning. Process modeling. Productivity analysis.

INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

A indústria da construção civil, embora tradicionalmente conservadora, passa por transformações impulsionadas pela digitalização. Segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) [1], houve um avanço no uso do *Building Information Modeling* (BIM) e de plataformas colaborativas para maior eficiência nos processos. Contudo, as barreiras para a implementação tecnológica relacionam-se à capacitação da mão de obra e à resistência de gestores [2]. A adoção limitada dessas tecnologias contribui para a persistência de problemas históricos do setor, como os elevados índices de desperdício: no final da década de 1990, já se apontava que desperdícios e retrabalhos poderiam representar cerca de 30% do valor total de uma obra [3].

Essa realidade ainda persiste. A gestão inadequada de resíduos e a falta de planejamento integrado permanecem como causas primordiais de desperdício [4]. Nesse contexto, o retrabalho destaca-se como um dos principais fatores responsáveis por atrasos e aumento de custos na construção civil [5]. Suas causas são múltiplas e inter-relacionadas, incluindo a execução de atividades em condições subótimas (*making-do*), falhas no planejamento executivo, alterações tardias de projeto, deficiências de comunicação entre projetistas e equipes de campo e erros durante a execução [5][6]. Neste cenário, ferramentas de simulação ganham espaço no planejamento e controle de obras [7]. A simulação consolidou-se como recurso para representar processos complexos e apoiar a tomada de decisão [8][9]. No Brasil, destaca-se o potencial dessas ferramentas para reduzir variabilidades operacionais e aprimorar a gestão de processos [10][11].

Dentre as técnicas disponíveis, a Simulação de Eventos Discretos (SED) permite avaliar o comportamento do sistema em diferentes cenários antes do início da obra [12]. Apesar de obstáculos históricos na linguagem das simulações [13], sua aplicação em fundações é estratégica. Esta etapa, que representa entre 3% e 10% do valor total do empreendimento [14], é sujeita a diversas fontes de incerteza — tanto geotécnicas, relacionadas à heterogeneidade do solo e à variabilidade dos parâmetros de resistência [15], quanto climáticas, como a ocorrência de intempéries que podem paralisar ou comprometer a execução dos serviços, com impactos estimados entre 5% e 20% de acréscimo na duração dos projetos [16]. A combinação dessas incertezas torna o uso de ferramentas de previsão essencial para mitigar riscos operacionais. Diante do exposto, este artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma biblioteca de modelos de simulação, baseada na SED, aplicada à execução de fundações, com foco na representação dos processos construtivos e na análise de cenários de produtividade. Busca-se, assim, avaliar o potencial da ferramenta como suporte ao planejamento e controle de obras em contextos de elevada variabilidade operacional e incertezas.

MÉTODO

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada de natureza experimental-computacional, fundamentada nos princípios da Design Science Research (DSR), por envolver a construção e avaliação de um artefato técnico — a

biblioteca de modelos de simulação — concebido para auxiliar o planejamento e o controle de obras. As etapas seguidas correspondem às fases características da DSR [17]: a conscientização do problema — a dificuldade de prever prazos e produtividade na execução de fundações sob elevada variabilidade — delimitou a classe de problemas tratada; a revisão da literatura e a definição das tipologias corresponderam à fase de sugestão; a modelagem dos processos e sua implementação no Stroboscope constituíram o desenvolvimento do artefato; a verificação da estabilidade estatística e a calibração frente a dados de referência foram a etapa de avaliação; e a organização dos modelos em uma biblioteca parametrizável e reutilizável representa a generalização para a classe de problemas, isto é, sua aplicabilidade a outras obras e tipologias de fundação. A adoção da DSR justifica-se porque a abordagem não se limita à produção de um artefato: exige que seu processo de construção seja rigoroso e rastreável, e que o artefato seja avaliado segundo critérios explícitos de desempenho. Conforme Lacerda et al. [17], a DSR combina rigor científico com relevância prática, utilizando a experimentação como forma de avaliar a aplicabilidade de soluções tecnológicas. Neste trabalho, o artefato é a biblioteca de modelos de simulação — conjunto de dois modelos parametrizáveis de Simulação de Eventos Discretos (SED) aplicados à execução de fundações rasas e profundas —, concebida para apoiar o planejamento e o controle de obras em contextos de elevada variabilidade operacional.

Inicialmente, realizou-se o levantamento bibliográfico com foco em dois eixos: simulação computacional aplicada à construção civil e execução de fundações. Foram abordados os fundamentos da Simulação de Eventos Discretos (SED) e sua aplicação ao planejamento e controle de obras, bem como os aspectos técnicos relacionados às fundações rasas (sapata isolada) e profundas (estaca hélice contínua), incluindo etapas executivas, recursos envolvidos e interdependências. Como apoio à estruturação dos processos, elaborou-se um Projeto do Sistema de Produção (PSP), permitindo a definição da sequência executiva das atividades, a identificação de suas relações de dependência e o dimensionamento dos recursos envolvidos. O PSP, aqui adotado de forma simplificada com base em Schramm [8], abrangeu três frentes: (a) definição da sequência de execução das atividades, identificando quais tarefas condicionam o início de outras; (b) pré-dimensionamento dos recursos de produção — mão de obra, equipamentos e materiais — necessários para cada unidade construtiva; e (c) estudo dos fluxos de trabalho e identificação de gargalos. Para a sapata isolada, o fluxo definido seguiu encadeamento essencialmente sequencial (locação → escavação → regularização de fundo → armação → fôrmas → concretagem → cura → desfôrma → impermeabilização → reaterro), com possibilidade de execução paralela por frentes de trabalho independentes. Para a estaca hélice contínua, o processo foi estruturado em ciclos repetitivos conduzidos pela perfuratriz (posicionamento → perfuração com extração de solo → concretagem simultânea → limpeza → colocação de armadura → cura → arrasamento), identificando como principal gargalo a disponibilidade contínua de concreto usinado e a integridade do equipamento de perfuração.

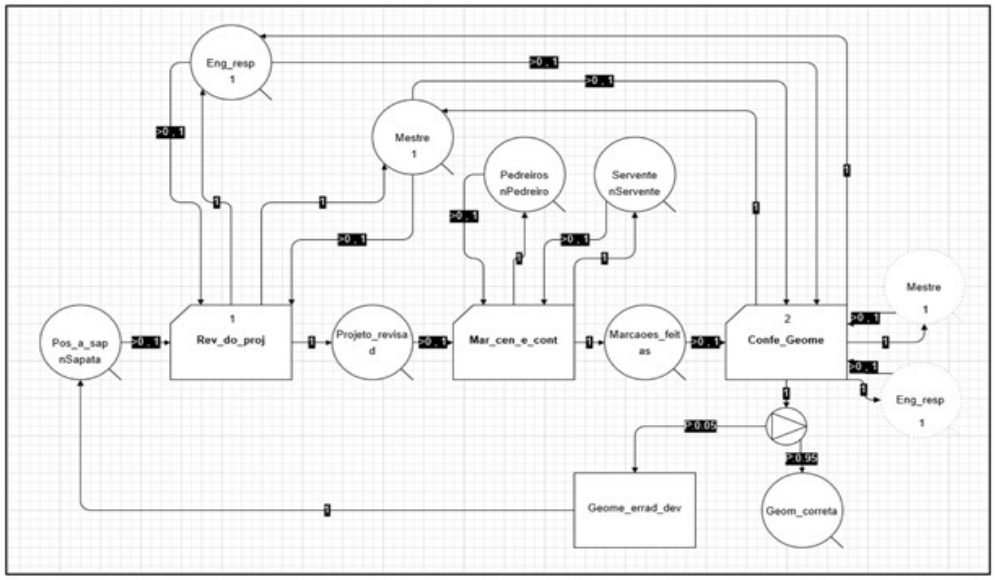
A modelagem dos processos foi realizada por meio do *software* Microsoft Visio® no qual foram construídos diagramas representativos das etapas construtivas, recursos e sequências operacionais — isto é, a ordenação das atividades no processo produtivo, os recursos associados a cada etapa e as relações de dependência entre elas —,

traduzindo a lógica do PSP para uma linguagem visual compatível com o *Stroboscope*. Os modelos foram elaborados com base em referências técnicas da literatura especializada, complementadas por visita de observação em obra, que subsidiou a definição das sequências executivas e a composição das equipes, buscando representar processos construtivos típicos de obras de pequeno e médio porte, sem associação a um empreendimento específico. As durações das atividades foram representadas por distribuições de probabilidade triangulares — definidas pelos valores otimista, mais provável e pessimista —, com parâmetros obtidos da literatura técnica nacional, em consonância com a abordagem adotada por Schramm [8] e com os dados de referência de Sarturi, Zanetti e Correia [18] (para sapata isolada) e de Azevedo Filho [19] (para estaca hélice contínua). Para as atividades cujas durações não constavam nas fontes de referência, estas foram representadas apenas graficamente no diagrama, sem contabilização no tempo total de execução, de modo a não introduzir valores arbitrários que comprometessem a coerência dos resultados.

Posteriormente, os modelos gráficos foram implementados no *software* Stroboscope (*software* acadêmico de distribuição gratuita, desenvolvido pela Universidade de Michigan), ferramenta de simulação baseada em eventos discretos. A modelagem considerou elementos como filas (Queues), atividades condicionais (Combi Activities), atividades normais (Normal Activities), elementos de decisão probabilística (Forks) e conexões (Links), conforme ilustrado na Figura 1 e no Quadro 1. Cada elemento cumpre um papel específico na lógica do modelo: as Queues armazenam recursos disponíveis (operários, equipamentos, unidades em processamento); as Combi Activities representam atividades que só se iniciam quando todos os recursos necessários estão simultaneamente disponíveis nas filas de entrada; as Normal Activities são atividades encadeadas que se iniciam automaticamente ao término da etapa anterior; os Links representam as conexões lógicas entre os elementos, definindo o fluxo do processo; e os Forks introduzem bifurcações probabilísticas — empregadas, por exemplo, para representar a possibilidade de retrabalho em etapas de conferência e inspeção, com probabilidade de 1% de reprovação do serviço executado. As durações das atividades foram representadas por distribuições de probabilidade, permitindo a incorporação da variabilidade inerente aos processos construtivos.

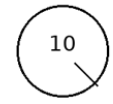
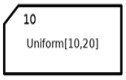
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8961

Figura 1: Modelo de simulação no Stroboscope — Módulo 1 (Locação) da sapata isolada



Fonte: adaptado de [20].

Quadro 1: Elementos utilizados na modelagem com o Stroboscope

Elemento	Função no modelo
	Fila de espera que armazena recursos disponíveis (operários, equipamentos, unidades em processamento) até serem requisitados por uma atividade.
	Atividade condicional: inicia somente quando todos os recursos necessários estão simultaneamente disponíveis nas filas de entrada.
	Atividade encadeada: inicia automaticamente ao término da etapa anterior, recebendo os recursos liberados.
	Bifurcação probabilística: direciona o fluxo para um dos caminhos sucessores conforme probabilidades definidas.
	Conexão lógica entre elementos, definindo o fluxo de recursos e a sequência do processo.

Fonte: adaptado de [13].

Para garantir a confiabilidade dos resultados, o número de simulações foi definido com base no método dos intervalos de confiança. Para isso, calculou-se o desvio padrão (S) das réplicas, conforme a Equação (1), cujo valor foi utilizado na determinação da margem de erro e na verificação da estabilidade estatística das médias obtidas.

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(x_i-\mu)^2}{n}} \quad (1)$$

$S \rightarrow Desvio\ padrão$
$x_i \rightarrow cada\ valor\ do\ conjunto$
$\mu \rightarrow média\ dos\ valores$
$n \rightarrow número\ de\ dados$

A função desta etapa foi determinar se o número de simulações era suficiente para garantir que a média da variável de resposta (tempo de execução ou produtividade) fosse estatisticamente estável.

A calibração dos modelos foi realizada por meio da comparação dos resultados simulados com dados de produtividade da literatura técnica, permitindo verificar a coerência dos modelos e ajustar seus parâmetros. Foram utilizadas duas referências empíricas: para a sapata isolada, o artigo de Sarturi, Zanetti e Correia [18], que registra tempos e composições de equipe para a execução de 20 sapatas em obra real no Paraná; e para a estaca hélice contínua, o trabalho de Azevedo Filho [19], que apresenta dados de produtividade em diferentes condições de solo. A adoção dessas referências específicas garantiu rastreabilidade ao processo de verificação do artefato, em consonância com os requisitos metodológicos da DSR.

A análise dos resultados baseou-se na comparação entre valores simulados e dados de referência, utilizando métricas de acurácia e dispersão. Para isso, calculou-se o semi-intervalo (h), conforme a Equação (2), utilizado na verificação do erro relativo.

$$h=t_{\alpha/2,n-1}*\left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right) \quad (2)$$

$h \rightarrow erro\ (margem)\ do\ intervalo\ de\ confiança$
$t_{\alpha/2,n-1} \rightarrow valor\ da\ distribuição$
$S \rightarrow Desvio\ padrão$
$n \rightarrow número\ de\ dados$

Já o Coeficiente de Variação (CV) foi empregado para medir a dispersão dos resultados, conforme a Equação (3).

$$\gamma_{atual}=\frac{h}{|X|} \quad (3)$$

$\gamma_{atual} \rightarrow coeficiente\ ou\ erro\ relativo$
$h \rightarrow erro\ (margem)\ do\ intervalo\ de\ confiança$
$|X| \rightarrow valor\ medido\ (em\ módulo,\ para\ evitar\ sinal\ negativo)$

Sendo assim, a Equação (3) corresponde, em termos práticos, à aplicação da Equação (4).

$$erro\,relativo = \frac{erro\,absoluto}{valor} \quad (4)$$

Diferente do Erro Percentual Simples, o Erro Percentual Absoluto (EPA), calculado de forma análoga ao MAPE (Erro Percentual Absoluto Médio), utiliza o valor absoluto da diferença entre valor estimado e real, impedindo que os erros se anulem entre si. Nesse viés, a interpretação da acurácia foi realizada com base na escala apresentada no Quadro 2.

Quadro 2: Escala de Lewis para Interpretação da MAPE

MAPE (%)	Interpretação
<10,00	Previsão muito precisa
10,00 - 20,99	Boa previsão
21,00 - 50,00	Previsão razoável
> 50,00	Previsão imprecisa

Fonte: adaptado de [21].

Dessa forma, a análise dos resultados buscou verificar a coerência e o comportamento produtivo dos modelos em relação aos dados de referência, sem o objetivo de validação empírica em campo. Ao final, esperava-se que os modelos desenvolvidos contribuíssem para estimativas mais precisas de tempo e produtividade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das simulações realizadas permitiram avaliar o desempenho dos modelos desenvolvidos para fundações rasas e profundas, considerando critérios de precisão, variabilidade e aderência aos dados de referência. Nesse contexto, foram executadas 25 simulações por cenário, número considerado estatisticamente suficiente, com níveis de confiança entre 95% e 99%, garantindo a estabilidade das médias obtidas. Os indicadores estatísticos demonstraram elevada confiabilidade dos modelos, com EPA inferior a 0,13% e CV variando entre 0,83% e 2,72%, evidenciando baixa dispersão dos resultados e alta estabilidade dos processos simulados.

No caso das sapatas isoladas, o modelo estruturado em macro etapas sequenciais (incluindo escavação, regularização, montagem de armaduras, execução de formas, concretagem, cura, retirada de formas, impermeabilização e reaterro) apresentou comportamento produtivo estável e coerente com os dados de referência. A utilização de elementos probabilísticos — Forks de aprovação/reprovação e durações amostradas de distribuições triangulares — permitiu incorporar falhas e possíveis retrabalhos ao modelo, sem comprometer sua consistência geral. Os resultados indicaram baixa variabilidade, ainda que superior à observada em processos mecanizados, o que pode ser explicado pela maior dependência de mão de obra e pelo caráter artesanal das atividades. A análise dos resultados também evidenciou que etapas como escavação, concretagem e cura exercem maior influência sobre o tempo

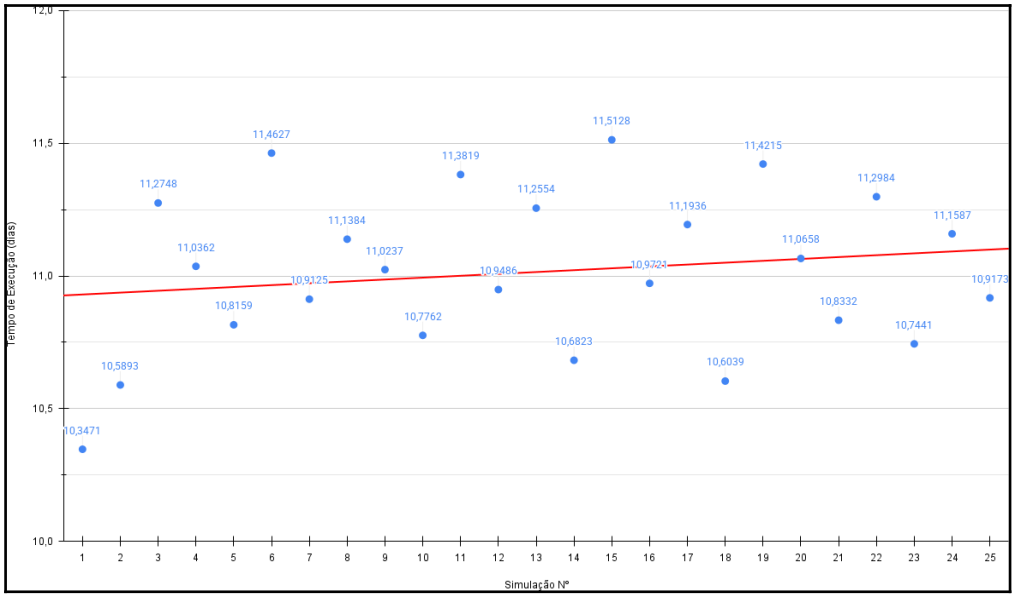
total de execução, configurando-se como pontos críticos para o planejamento. Na Tabela 1 e na Figura 2, estão representados os resultados para Sapatas Isoladas.

Tabela 1: Resultados de sapata isolada

QUANTIDADE DE SIMULAÇÕES	TEMPO DE EXECUÇÃO (dias)	DESVIO PADRÃO
25	10,9173	0,0095
MÉDIA (dias)		11,01
DESVIO PADRÃO		0,3001
ERRO PERCENTUAL ABSOLUTO (%)		0,13
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)		2,72

Fonte: os autores.

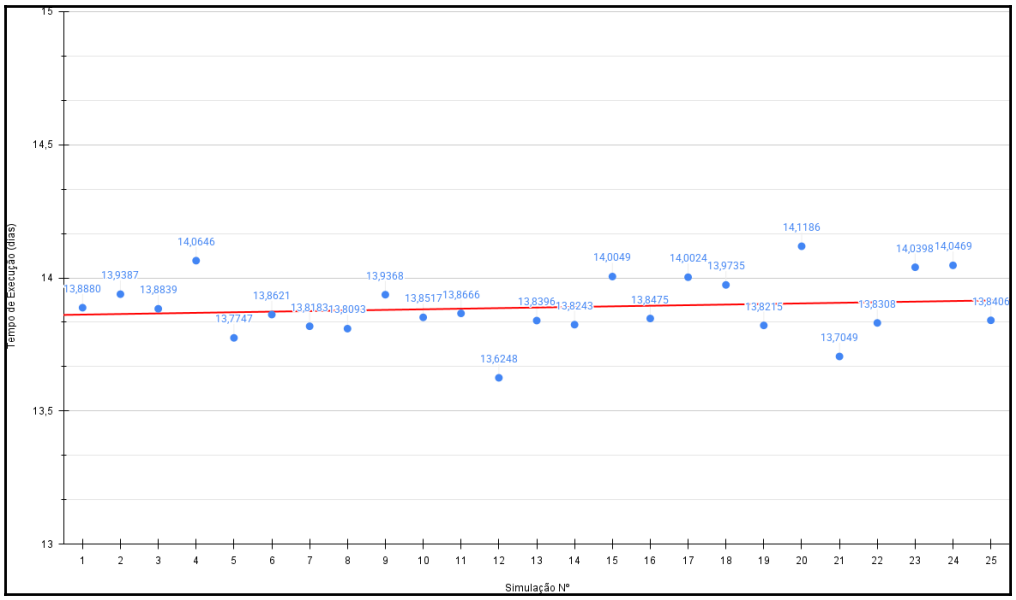
Figura 2: Resultados das simulações de sapata isolada - Tempo de execução



Fonte: os autores.

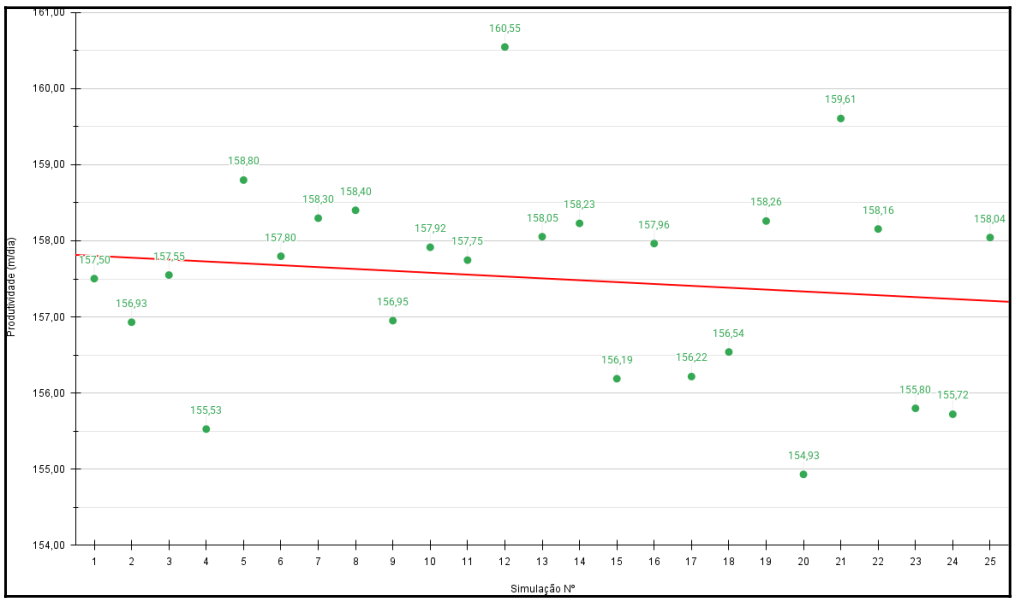
Para as estacas hélice contínua, foram realizadas 25 simulações para cada tipo de solo, número considerado estatisticamente suficiente, com erro relativo dentro dos critérios estabelecidos ($\gamma \leq 0,05$ para 95% de confiança). Os resultados das simulações obtidas para o solo 1 (arenoso) estão consolidados nas Figuras 3 e 4; para o solo 2 (argila orgânica), os resultados podem ser visualizados nas Figuras 5 e 6. O modelo apresentou comportamento distinto em relação às sapatas, caracterizado por maior estabilidade e menor variabilidade, devido à forte dependência de equipamentos mecanizados e à natureza repetitiva do processo.

Figura 3: Resultados das simulações de hélice contínua (solo 1) - Tempo de execução



Fonte: os autores.

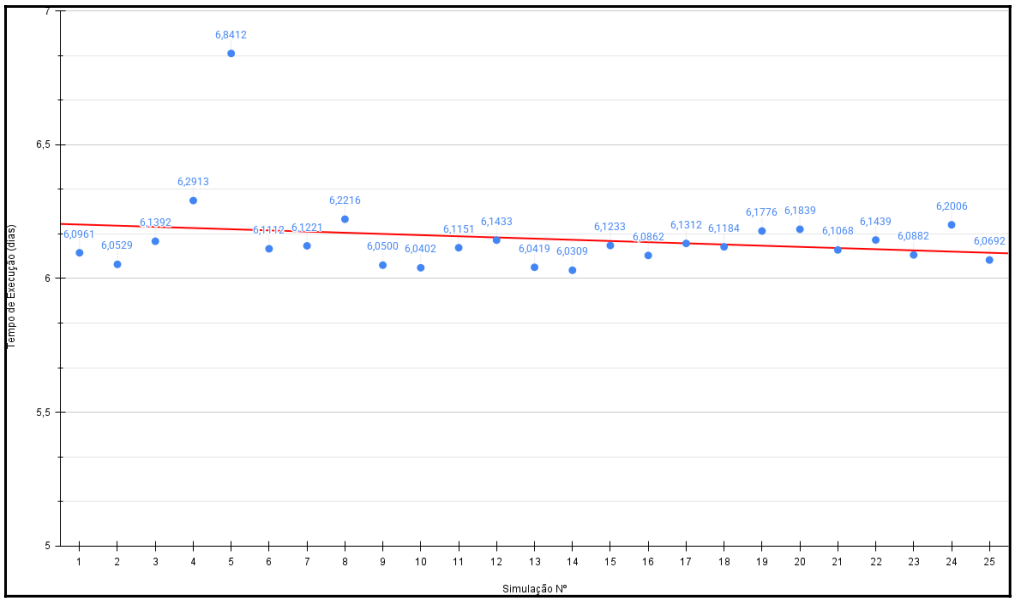
Figura 4: Resultados das simulações de hélice contínua (solo 1) - Produtividade



Fonte: os autores.

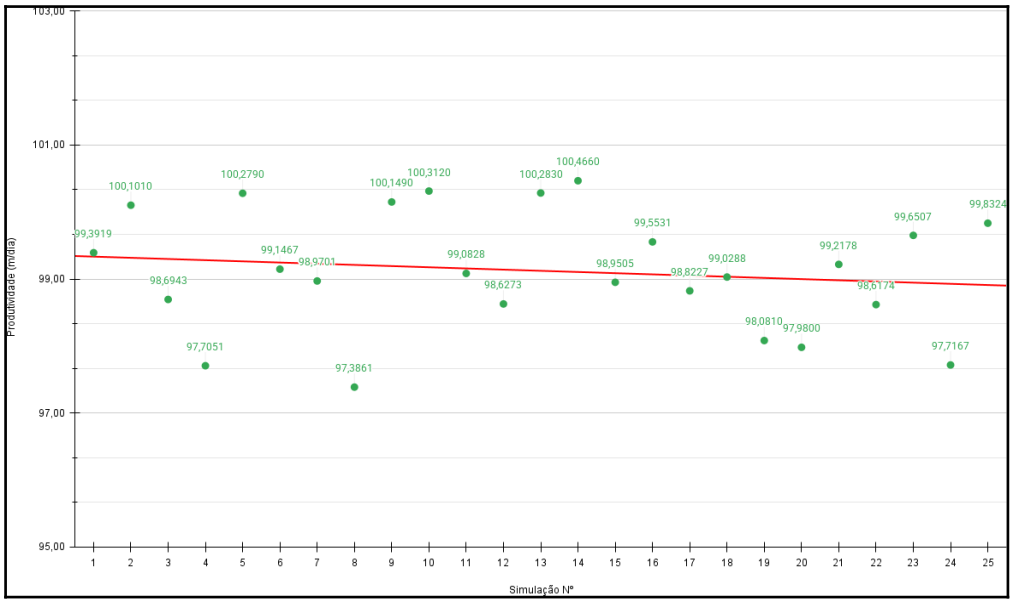
Figura 5: Resultados das simulações de hélice contínua (solo 2) - Tempo de execução

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8961



Fonte: os autores.

Figura 6: Resultados das simulações de hélice contínua (solo 2) - Produtividade



Fonte: os autores.

Os resultados do solo 1 apresentaram EPA de 0,80% e 0,81% para tempo de execução e produtividade, respectivamente, enquadrando-se na categoria de previsão muito precisa segundo a escala de Lewis [21], com CV de 0,83%, indicando alta estabilidade entre as réplicas. Para o solo 2, os EPAs de 2,48% e 1,84% mantiveram-se igualmente dentro da faixa de previsão muito precisa, embora com valores superiores aos do solo 1, o que era esperado dado o maior tempo de perfuração em solo argiloso. O CV do tempo de execução do solo 2 (2,55%) foi superior ao do solo 1 (0,83%), comportamento atribuído à maior sensibilidade do processo às variações nas propriedades geotécnicas, especialmente na camada de argila orgânica, que elevou o tempo médio de perfuração e ampliou a dispersão entre as réplicas.

A comparação entre os valores simulados e os dados de referência [19] indicou boa aderência do modelo: no solo 1, a simulação reproduziu uma produção de 156,24 m/dia, alinhada ao desempenho observado em campo; no solo 2, o modelo registrou 100,98 m/dia, coerente com o cenário de menor velocidade de perfuração do trado. Esses resultados confirmam que o modelo de hélice contínua representa satisfatoriamente o processo executivo em diferentes condições geotécnicas.

Esses resultados convergem com a literatura sobre simulação aplicada à construção: a aderência obtida está em linha com o potencial apontado por AbouRizk [7] para o uso de SED no planejamento e controle de obras, e os indicadores de precisão para a hélice contínua são compatíveis com os reportados por Azevedo Filho [19] para o mesmo tipo de fundação. Em relação à estruturação dos processos, a organização das atividades a partir do PSP, na linha de Schramm [8], mostrou-se igualmente aplicável a fundações, ampliando o escopo de uso dessa ferramenta — originalmente voltada a empreendimentos habitacionais — para a etapa de fundações.

Entre os dois modelos, destacaram-se diferenças relevantes no comportamento dos processos. As sapatas isoladas apresentaram maior variabilidade relativa, associada à execução manual e à segmentação das atividades, enquanto as estacas hélice contínua demonstraram maior estabilidade operacional, decorrente da mecanização do processo e da natureza cíclica das operações de perfuração, concretagem e arrasamento. Ainda assim, ambos os modelos apresentaram elevada aderência aos dados de referência, indicando que a abordagem de simulação adotada foi capaz de representar de forma satisfatória o comportamento real dos processos construtivos.

De forma geral, os resultados demonstraram que os modelos desenvolvidos apresentam alta precisão, baixa variabilidade e consistência interna, sendo capazes de reproduzir adequadamente o comportamento produtivo das fundações analisadas. A simulação mostrou-se uma ferramenta eficaz para identificar variáveis críticas, avaliar cenários operacionais e apoiar o planejamento e controle de obras, contribuindo para a otimização dos processos construtivos.

Na prática, a biblioteca permite que o planejador estime prazos e produtividade de uma nova obra ao informar os parâmetros específicos do cenário — durações de referência, tipo de solo, composição de equipe e quantidade de elementos —, sem a necessidade de reconstruir o modelo. Essa parametrização viabiliza ainda a identificação prévia de gargalos (como a disponibilidade de concreto usinado na hélice contínua ou a sequência escavação–concretagem–cura na sapata), subsidiando decisões de programação e alocação de recursos antes do início da execução.

A partir dos modelos desenvolvidos, estruturou-se a biblioteca proposta, composta por dois modelos parametrizáveis — sapata isolada e estaca hélice contínua — que compartilham a mesma lógica de construção (filas, atividades condicionais e bifurcações probabilísticas), sintetizada no Quadro 3. Essa estrutura comum permite reutilizar e ajustar os modelos a diferentes cenários de obra sem reconstrução integral, sendo essa capacidade de parametrização e reuso o que caracteriza o conjunto como biblioteca, e não como modelos pontuais.

Quadro 3: Estrutura da biblioteca de modelos de simulação

Aspecto	Sapata isolada	Hélice contínua
Tipologia	Fundação rasa	Fundação profunda
Etapas modeladas	10 (locação a reaterro)	7 (posicionamento a arrasamento)
Parâmetros ajustáveis	Durações, equipe, nº de sapatas	Durações, tipo de solo, nº de estacas
Distribuição de durações	Triangular (otimista, mais provável, pessimista)	Triangular (otimista, mais provável, pessimista)
Elemento probabilístico	Fork (1% de reprovação)	Fork (1% de reprovação)
Referência de calibração	Sarturi, Zanetti e Correia [18]	Azevedo Filho [19]

Fonte: os autores.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma biblioteca de modelos de simulação — composta por dois modelos parametrizáveis de SED para fundações rasas e profundas — aplicada à execução de fundações, utilizando os *softwares* Microsoft Visio® e Stroboscope como ferramentas complementares de modelagem e análise. A abordagem adotada possibilitou a representação estruturada dos processos construtivos de sapatas isoladas e estacas hélice contínua, permitindo a análise do comportamento produtivo e das variações de desempenho entre diferentes cenários.

Os resultados evidenciaram que a modelagem computacional constitui uma ferramenta eficaz para o planejamento e controle de processos na construção civil, especialmente quando associada a dados reais de produtividade. Observou-se maior variabilidade nos tempos de execução das sapatas isoladas, influenciada por fatores relacionados à mão de obra e às condições de execução, enquanto as estacas hélice contínua apresentaram maior estabilidade operacional devido à mecanização do processo.

A análise estatística confirmou a consistência dos modelos e permitiu a identificação de gargalos produtivos e oportunidades de melhoria nos processos estudados. Além disso, a compatibilidade entre os resultados simulados e dados de referência reforça a aplicabilidade prática da metodologia proposta.

Conclui-se que o uso integrado das ferramentas adotadas representa uma alternativa viável para a modelagem de processos construtivos, contribuindo para o aprimoramento do planejamento executivo. A biblioteca desenvolvida apresenta potencial de expansão para outras tipologias de fundações e etapas construtivas, ampliando sua contribuição para a gestão da produção na engenharia civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial de Engenharia Civil, ao Centro de Tecnologia e à Universidade Federal de Alagoas pelo apoio institucional essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE USO DA IA

Durante a preparação deste artigo, o segundo, terceiro, quarto e quinto autores utilizaram o Claude (Anthropic) para a interpretação e resumo do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) utilizado como base do texto. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Transformação digital na construção: o papel do BIM e do portal de normas técnicas**. 2024. Disponível em: https://cbic.org.br/transformacao-digital-na-construcao-o-papel-do-bim-e-do-portal-de-normas-tecnicas/. Acesso em: 16 abr. 2026.

[2] MOTA, Alan Fernandes da. A inovação e gestão na construção de edificações comerciais e residenciais: desafios e soluções na engenharia civil. **Revista FT**, v. 26, n. 107, 2025. Disponível em: https://revistaft.com.br/a-inovacao-e-gestao-na-construcao-de-edificacoes-comerciais-e-residenciais-desafios-e-solucoes-na-engenharia-civil/. Acesso em: 16 abr. 2026.

[3] GROHMANN, Márcia Zampieri. Redução do desperdício na construção civil: levantamento das medidas utilizadas pelas empresas de Santa Maria. *In*: encontro nacional de engenharia de produção, 18., 1998, Niterói. **Anais [...]**. Niterói: ABEPRO, 1998. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep1998_art302.pdf. Acesso em: 16 abr. 2026.

[4] AZEVEDO, Paulo de Tarso de. **Desperdício de materiais na construção civil: análise e proposta de boas práticas para a gestão sustentável dos resíduos**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6139/tde-24102023-190326/pt-br.html. Acesso em: 16 abr. 2026.

[5] FIREMAN, Marcus Costa Tenorio. **Proposta de método de controle integrado entre produção e qualidade com mensuração de perdas por *making-do* e pacotes informais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/142711. Acesso em: 16 abr. 2026.

[6] SILVEIRA, Amanda. **Diretrizes para estabilização da produção em processos produtivos da construção civil por meio da ferramenta trabalho padronizado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil, Faculdade IMED, Passo Fundo, 2019. Disponível em:

https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=8697383. Acesso em: 16 abr. 2026.

[7] ABOURIZK, Simaan. Role of Simulation in Construction Engineering and Management. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 136, n. 10, p. 1140-1153, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000220. Acesso em: 16 abr. 2026.

[8] SCHRAMM, Fábio Kellermann. **O projeto do sistema de produção na gestão de empreendimentos habitacionais de interesse social**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7243. Acesso em: 16 abr. 2026.

[9] GONÇALVES, Bruna Milán; CORRÊA, Fabiano Rogerio. Planejamento na construção civil: panorama brasileiro e adoção de novas tecnologias. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2024. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/6097. Acesso em: 16 abr. 2026.

[10] SAKURADA, Nelson; MIYAKE, Dario Ikuo. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 1, p. 25-43, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/gp/a/wkVR4Vw4cV9CN8zqrZHCrFj/?lang=pt. Acesso em: 16 abr. 2026.

[11] SOUZA, Tiago Francioli. **A simulação a eventos discretos como ferramenta de apoio à tomada de decisão em empresas do ramo de mineração: aplicação em uma unidade da Yamana Gold**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/items/8eff7121-64f4-4fb7-a60c-e071242004ba. Acesso em: 16 abr. 2026.

[12] IOANNOU, Photios G.; MARTINEZ, Julio César. Animation of complex construction simulation models. *In*: CONGRESS ON COMPUTING IN CIVIL ENGINEERING, 3., 1996, Anaheim. **Anais [...]**. Reston: ASCE, 1996. Disponível em: https://doi.org/10.7302/26741. Acesso em: 16 abr. 2026.

[13] MARTINEZ, Julio César. EZStrobe – general-purpose simulation system based on activity cycle diagrams. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 33., 2001, Arlington. **Anais [...]**. New York: IEEE, 2001. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/977485/. Acesso em: 16 abr. 2026.

[14] BRITO, Bruno Leão de. **Estimativas de custo em fases iniciais de projetos a partir de modelos BIM e programação generativa**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/handle/ri/29202. Acesso em: 16 abr. 2026.

[15] COSTA, Eli Antônio da. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/6150. Acesso em: 16 abr. 2026.

[16] BALLESTEROS-PÉREZ, Pablo. *et al.* Weather-wise: a weather-aware planning tool for improving construction productivity and dealing with claims. **Automation in Construction**, v. 84, p. 81-95, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319352343_Weather-wise_A_weather-aware_planning_tool_for_improving_construction_productivity_and_dealing_with_claims. Acesso em: 16 abr. 2026.

[17] LACERDA, Daniel Pacheco; DRESCH, Aline; PROENÇA, Adriano; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000014. Acesso em: 16 abr. 2026.

[18] SARTURI, Francis Diego Moretto; ZANETTI, Anny Caroline de Farias; CORREIA, Consuelo Xavier. Análise de viabilidade econômica entre fundações rasas e profundas na região Nordeste de Curitiba (PR). **Revista Eletrônica Multidisciplinar – UNIFACEAR**, v. 3, n. 10, 2024. Disponível em: https://revista.unifacear.edu.br/rem/article/view/528. Acesso em: 16 abr. 2026.

[19] AZEVEDO FILHO, Francelino Prazeres de. **Comparação do tempo e produtividade no estaqueamento de obras com fundação em estacas hélice contínua, metálicas e pré-moldadas de concreto**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46371. Acesso em: 16 abr. 2026.

[20] OLIVEIRA, Bruna Souza. **Geração de uma biblioteca de modelos de simulação para execução de fundações**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2025.

[21] LEWIS, Colin David. **Industrial and business forecasting methods: a practical guide to exponential smoothing and curve fitting**. London: Butterworth-Heinemann, 1982.