



**INSTITUTO FEDERAL
MINAS GERAIS**
Campus Formiga

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS

Bacharelado em Ciência da Computação

Disciplina: Introdução à Simulação

Viabilidade de Projetos de Construção via Monte Carlo

Professor: Diego Mello da Silva

Formiga-MG
2 de novembro de 2025

Sumário

1	Introdução	1
2	Situação Problema	2
2.1	Métrica: Valor Médio de Multa por Atraso	2
2.2	Métrica: Custo Total do Projeto	3
2.3	Métrica: Probabilidade de Prejuízo	3
3	Descrição do Processo de Construção	3
3.1	Preparação do Terreno	4
3.2	Fundaçāo	4
3.3	Laje	6
3.4	Alvenaria	6
3.5	Acabamento Interno	7
3.6	Pintura Externa	8
4	Notação	9
5	Cenários	11
5.1	Cenário 1: construção de um edifício	11
5.2	Cenário 2: construção de um galpão logísticos	12
5.3	Cenário 3: construção de um centro de saúde	13
6	Problema: Apoio a Tomada de Decisão	13

1 Introdução

A indústria da construção civil opera em um ambiente de alta competitividade, frequentemente caracterizado pela celebração de contratos de preço e prazos fixos. Tais contratos, embora ofereçam previsibilidade ao cliente, transferem um risco substancial para a construtora.

A viabilidade financeira de um projeto depende de uma estimativa precisa de custos e prazos, uma tarefa intrinsecamente complexa devido à multiplicidade de fontes de incerteza, como a volatilidade nos preços de materiais, a variabilidade na produtividade da mão de obra e as condições climáticas, os imprevistos geológicos e as falhas na cadeia de suprimentos.

A consequência direta dessa exposição ao risco é a alta incidência de projetos que ultrapassam o orçamento previsto, resultando em prejuízos financeiros, ou que não cumprem o cronograma, levando a penalidades contratuais e danos à reputação da empresa. Métodos de planejamento determinísticos, que se baseiam em estimativas de valor único, são inadequados para capturar a natureza estocástica desses fenômenos, oferecendo uma visão incompleta do risco agregado do projeto.

Para lidar com essa complexidade, recorre-se a métodos computacionais capazes de modelar a incerteza. A Simulação de Monte Carlo é uma dessas técnicas, que fornece soluções aproximadas para uma variedade de problemas matemáticos por meio da realização de experimentos de amostragem estatística em um computador.

O princípio fundamental do método é simples: em vez de resolver um conjunto complexo de equações, o sistema é simulado repetidamente. Em cada simulação, os valores das variáveis incertas (como o tempo para concluir uma tarefa ou o custo de um insumo) são sorteados de suas respectivas distribuições de probabilidade. Ao final de um grande número de simulações, obtém-se uma distribuição de possíveis resultados, que pode ser analisada estatisticamente.

Neste trabalho prático cada grupo de alunos deverá implementar um modelo de simulação para tomada de decisão sobre aceitar ou não um dado contrato de construção civil com prazo e preços fixos. Para tal, devem considerar todo o conteúdo ministrado sobre o tema variáveis aleatórias, distribuições de probabilidade, geração de números aleatórios e simulação de Monte Carlo.

O problema tratado neste trabalho caracteriza-se como uma *simulação estocástica estática*, pois busca estimar medidas de desempenho (como o custo e o prazo total de execução) a partir de um modelo probabilístico cujos parâmetros permanecem fixos durante cada execução da simulação. Diferentemente de uma simulação dinâmica, não há evolução temporal explícita do sistema nem interações contínuas entre entidades; cada iteração representa uma possível realização completa do projeto, obtida por meio do sorteio independente das variáveis aleatórias associadas às fases da construção. Assim, o objetivo é analisar a distribuição estatística dos resultados agregados do projeto, permitindo inferir probabilidades e valores esperados sem a necessidade de modelar o comportamento contínuo do processo ao longo do tempo.

2 Situação Problema

Assuma que o grupo de alunos da disciplina consiste na *equipe de avaliação quantitativa de projetos* de uma grande construtora que gerencia e executa a construção de edificações de médio e grande porte, como armazéns, galpões e edifícios. Este grupo tem por objetivo apoiar as decisões estratégicas da construtora, indicando casos em que é viável participar ou não de um projeto. Entenda por viabilidade situações em que a empresa tem lucro na empreitada.

O objetivo deste trabalho é, portanto, desenvolver um modelo computacional para a análise quantitativa de risco em um projeto de construção que será usado pelo grupo para determinar qual será a proposta que será encaminhada para o contratante com base no risco de prejuízo e no valor de multa média. Em seguida, o grupo deverá usar o modelo para tomar decisão sobre 3 cenários hipotéticos propostos, cujos valores de preço e prazo fixos de contrato são dados, assim como as distribuições de probabilidade para os custos, tempos e demais riscos inerentes à construção civil.

Para esta empresa, um projeto é viável se ele tiver pouca chance de prejuízo e se os custos com as multas por atraso estiverem dentro dos limites aceitáveis da empresa.

Utilizando a Simulação de Monte Carlo, será criada uma ferramenta capaz de modelar as incertezas fundamentais do projeto, gerando uma distribuição de probabilidades para o *Custo Total da Obra* e a *Duração Total da Obra*. A análise dessa distribuição permitirá fundamentar a decisão estratégica de aceitar ou recusar uma proposta de contrato segundo a definição de viabilidade dada acima. Um contrato só deve ser aceito se for viável.

2.1 Métrica: Valor Médio de Multa por Atraso

Esta métrica pretende responder a seguinte pergunta: *considerando apenas os cenários em que o projeto vai atrasar, qual será o valor médio da multa que teremos de pagar?* Observe que este valor não é a multa média geral do projeto (isto é, aquele em que se dilui o valor médio pelos muitos cenários em que o projeto termina no prazo – e cuja a multa é zero). Esta métrica foca especificamente no dano financeiro quando o risco de atraso se concretiza de fato, ou seja, quando a duração final do projeto estoura o prazo contratual.

Como calcular: Após rodar N simulações, separar aquelas em que a *duração total* excede o *prazo contratual*. Calcula a multa, dada por um valor proporcional à diferença entre a *duração total* e o *prazo contratual*. Some as multas e divida a soma pelo total de cenários em que ocorreram atrasos.

2.2 Métrica: Custo Total do Projeto

Esta métrica computa o custo total do projeto considerando (i) materiais, (ii) mão de obra, (iii) custos adicionais por retrabalho, incerteza geológica, etc, e (iv) multas por atraso no cronograma de entrega.

Como calcular: Para cada rodada independente da simulação, somar os custos totais com a multa por atraso.

2.3 Métrica: Probabilidade de Prejuízo

A probabilidade de prejuízo é a chance, em porcentagem, de o custo total para executar o projeto ser maior do que o valor que o cliente irá pagar por ele, fixo em contrato.

Como calcular: para calculá-la, a simulação compara o *custo total* de cada iteração com o *preço fixo do contrato*. Ela é obtida pela razão entre o número de replicações do modelo de simulação cujo custo do projeto excede o valor do contrato (incluindo multa) dividido pelo número de replicações executadas N .

3 Descrição do Processo de Construção

Para a análise, o projeto de edificação é decomposto em um processo sequencial, composto por fases macro executadas de maneira sequencial (ver Figura 1). Além disso, são identificados eventos de risco discretos que podem impactar o andamento e os custos do projeto. A seguir, detalha-se o escopo de cada uma delas.

A simulação de uma rodada completa é feita mediante a geração de variáveis aleatórias a partir das distribuições de probabilidade que caracterizam os riscos e as incertezas. O objetivo é gerar, ao final de uma rodada completa de simulação, qual foi (i) o prazo final do projeto (de onde pode-se calcular a existência ou não de multas) e (ii) o custo final do projeto (de onde iremos determinar a ocorrência de prejuízo ou não).

Os custos e prazos de cada rodada são obtidos somando-se os custos e prazos correspondentes de cada uma das fases. A simulação de uma quantidade grande de replicações/rodadas independentes será usada, portanto, para determinar a probabilidade de prejuízo e a distribuição da multa média, quando ocorre.

3.1 Preparação do Terreno

Esta é a fase inicial e fundamental que prepara o local para a construção. As atividades incluem o levantamento topográfico para mapear as elevações do terreno, a limpeza da área com remoção de vegetação e detritos, e a demarcação precisa dos limites da edificação.

Em seguida, realiza-se a terraplanagem, que consiste na movimentação de terra (cortes e aterros) para nivelar o terreno conforme as especificações do projeto.

A mão de obra é composta principalmente por operadores de máquinas pesadas (tratores, escavadeiras) e topógrafos. Os custos de materiais são relativamente baixos, concentrando-se em combustível e insumos para marcação, mas a duração é altamente sensível a condições climáticas, como chuvas intensas. A caracterização das probabilidades é dada como segue, e os custos e prazos da fase são determinadas pelo Pseudocódigo 1.

- Duração: $T_1 \sim \text{PERT}(o_1, m_1, p_1)$.
- Custo de material: $CM_1 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,1}, \sigma_{M,1})$.
- Custo de mão de obra: $CMO_1 \sim \text{Normal}(\mu_{L,1}, \sigma_{L,1})$.

Pseudocódigo 1 Simulação da Fase de Preparação do Terreno

- 1: **Entrada:** $o_1, m_1, p_1, \mu_{M,1}, \sigma_{M,1}, \mu_{L,1}, \sigma_{L,1}$
 - 2: **Saída:** Duração total T_{terreno} , custo total C_{terreno}
 - 3: Sortear $T_1 \sim \text{PERT}(o_1, m_1, p_1)$ {Sorteia a duração da fase}
 - 4: Sortear $CM_1 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,1}, \sigma_{M,1})$ {Sorteia o custo de material}
 - 5: Sortear $CMO_1 \sim \text{Normal}(\mu_{L,1}, \sigma_{L,1})$ {Sorteia o custo de mão de obra}
 - 6: $T_{\text{terreno}} \leftarrow T_1$
 - 7: $C_{\text{terreno}} \leftarrow CM_1 + CMO_1$
 - 8: **Retornar:** $(T_{\text{terreno}}, C_{\text{terreno}})$
-

3.2 Fundação

Etapa crítica que transfere as cargas da edificação para o solo, garantindo sua estabilidade. O processo envolve a escavação de valas ou sapatas, a montagem de fôrmas (estruturas de madeira ou metal) e a instalação das armaduras de aço (vergalhões).

Posteriormente, realiza-se a concretagem para formar os elementos da fundação, como sapatas, blocos e vigas baldrames. Os materiais predominantes são concreto (cimento, areia, brita), aço para armadura e madeira para fôrmas.

A mão de obra é especializada, incluindo pedreiros, armadores e carpinteiros, sendo uma das fases mais comumente terceirizadas. É aqui que reside o risco geológico,

pois solos com resistência inferior à esperada podem exigir reforços onerosos e não planejados.

As incertezas da fase de Fundação são determinadas pela escolha de qual das duas empresas terceirizadas, A ou B, que prestam serviços recorrentes para a construtora, irão executar a fase (E_F) e pela possibilidade de ocorrência de um evento geológico adverso dependente da mecânica do solo (G). Ambas as variáveis são modeladas por ensaios de Bernoulli¹ independentes. A escolha da empresa define os parâmetros de duração e custo da fase, enquanto a ocorrência de eventos geológicos adiciona custos e atrasos fixos para a correção do projeto. O tempo e custo da fase de fundação podem ser computados seguindo o Pseudocódigo 2.

- $E_F \sim \text{Bernoulli}(p_A)$ — escolha da empresa terceirizada.
- $G \sim \text{Bernoulli}(p_G)$ — evento geológico adverso.
- Duração: $T_2 \sim \text{PERT}(o_2, m_2, p_2)$ (condicionada à empresa escolhida).
- Custo de material: $CM_2 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,2}, \sigma_{M,2})$.
- Custo de mão de obra: $CMO_2 \sim \text{Normal}(\mu_{L,2}, \sigma_{L,2})$.

Pseudocódigo 2 Simulação da Fase de Fundação

```

1: Entrada:  $o_2^A, m_2^A, p_2^A, \mu_{M,2}^A, \sigma_{M,2}^A, \mu_{L,2}^A, \sigma_{L,2}^A, o_2^B, m_2^B, p_2^B, \mu_{M,2}^B, \sigma_{M,2}^B, \mu_{L,2}^B, \sigma_{L,2}^B, p_A, p_G$ 
2: Saída: Duração total  $T_{\text{fund}}$ , custo total  $C_{\text{fund}}$ 

3: Sortear  $E_F \sim \text{Bernoulli}(p_A)$                                      {Escolha da empresa terceirizada}

4: if  $E_F = 1$  then
5:   Sortear  $T_2 \sim \text{PERT}(o_2^A, m_2^A, p_2^A)$ 
6:   Sortear  $CM_2 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,2}^A, (\sigma_{M,2}^A))$ 
7:   Sortear  $CMO_2 \sim \text{Normal}(\mu_{L,2}^A, (\sigma_{L,2}^A))$ 
8: else
9:   Sortear  $T_2 \sim \text{PERT}(o_2^B, m_2^B, p_2^B)$ 
10:  Sortear  $CM_2 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,2}^B, (\sigma_{M,2}^B))$ 
11:  Sortear  $CMO_2 \sim \text{Normal}(\mu_{L,2}^B, (\sigma_{L,2}^B))$ 
12: end if

13: Sortear  $G \sim \text{Bernoulli}(p_G)$                                      {Evento geológico adverso}

14: if  $G = 1$  then
15:    $T_{\text{fund}} \leftarrow T_2 + T_{\text{geo}}$ 
16:    $C_{\text{fund}} \leftarrow CM_2 + CMO_2 + C_{\text{geo}}$ 
17: else
18:    $T_{\text{fund}} \leftarrow T_2$ 
19:    $C_{\text{fund}} \leftarrow CM_2 + CMO_2$ 
20: end if

21: Retornar:  $(T_{\text{fund}}, C_{\text{fund}})$ 

```

¹Experimento aleatório que possui apenas dois resultados discretos: sucesso (1) e fracasso (0).

3.3 Laje

Esta fase cria as estruturas horizontais que servem como piso para os andares superiores e como cobertura. O processo típico inclui a montagem de um sistema de escoramento e fôrmas, o posicionamento das armaduras de aço (malhas e vergalhões) e a instalação prévia de conduítes para as futuras redes elétrica e hidráulica.

A concretagem da laje é uma operação coordenada e de grande porte. Utilizam-se materiais como concreto, aço, e elementos de enchimento como blocos de cerâmica ou EPS (isopor). A mão de obra envolve carpinteiros, armadores, eletricistas e bombeiros hidráulicos. A incerteza reside na logística da concretagem e no tempo de cura do concreto, que pode ser afetado pela temperatura e umidade. Os tempos e prazos são calculados segundo o Pseudocódigo 3.

- Duração: $T_3 \sim \text{PERT}(o_3, m_3, p_3)$.
- Custo de material: $CM_3 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,3}, \sigma_{M,3})$
- Custo de mão de obra: $CMO_3 \sim \text{Normal}(\mu_{L,3}, \sigma_{L,3})$

Pseudocódigo 3 Simulação da Fase de Laje

- 1: **Entrada:** $o_3, m_3, p_3, \mu_{M,3}, \sigma_{M,3}, \mu_{L,3}, \sigma_{L,3}$
 - 2: **Saída:** Duração total T_{laje} , custo total C_{laje}
 - 3: Sortear $T_3 \sim \text{PERT}(o_3, m_3, p_3)$ {Sorteia a duração da fase}
 - 4: Sortear $CM_3 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,3}, \sigma_{M,3})$ {Sorteia o custo de material}
 - 5: Sortear $CMO_3 \sim \text{Normal}(\mu_{L,3}, \sigma_{L,3})$ {Sorteia o custo de mão de obra}
 - 6: $T_{\text{laje}} \leftarrow T_3$
 - 7: $C_{\text{laje}} \leftarrow CM_3 + CMO_3$
 - 8: **Retornar:** $(T_{\text{laje}}, C_{\text{laje}})$
-

3.4 Alvenaria

Consiste na construção das paredes externas e das divisórias internas, que dão forma à edificação. Esta fase envolve o assentamento de tijolos (cerâmicos ou de concreto) ou blocos, unidos por argamassa. Durante o processo, são criadas as aberturas para portas e janelas, sobre as quais são instaladas vergas e contravergas para a distribuição de cargas.

A mão de obra principal é composta por pedreiros e seus assistentes (serventes). Os materiais principais são os blocos/tijolos e a argamassa (cimento, cal, areia). A qualidade da execução é crucial, pois paredes fora de prumo ou de esquadro resultam em custos adicionais de correção na fase de acabamento, sendo este o principal alvo do risco de inspeção. Os custos e riscos associados com a fase são calculados segundo a lógica do Pseudocódigo 4.

- Risco de Inspeção: $R \sim \text{Bernoulli}(p_R)$ — necessidade de retrabalho
- Duração: $T_4 \sim \text{PERT}(o_4, m_4, p_4)$.
- Custo de material: $CM_4 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,4}, \sigma_{M,4})$.
- Custo de mão de obra: $CMO_4 \sim \text{Normal}(\mu_{L,4}, \sigma_{L,4})$.

Pseudocódigo 4 Simulação da Fase de Alvenaria

```

1: Entrada:  $o_4, m_4, p_4, \mu_{M,4}, \sigma_{M,4}, \mu_{L,4}, \sigma_{L,4}, p_R, C_{\text{retrabalho}}, T_{\text{retrabalho}}$ 
2: Saída: Duração total  $T_{\text{alvenaria}}$ , custo total  $C_{\text{alvenaria}}$ 

3: Sortear  $T_4 \sim \text{PERT}(o_4, m_4, p_4)$                                 {Sorteia a duração base da fase}
4: Sortear  $CM_4 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,4}, \sigma_{M,4})$                 {Sorteia o custo de material}
5: Sortear  $CMO_4 \sim \text{Normal}(\mu_{L,4}, \sigma_{L,4})$                   {Sorteia o custo de mão de obra}

6: Sortear  $R \sim \text{Bernoulli}(p_R)$                                      {Sorteia a ocorrência de retrabalho}

7: if  $R = 1$  then
8:    $T_{\text{alvenaria}} \leftarrow T_4 + T_{\text{retrabalho}}$ 
9:    $C_{\text{alvenaria}} \leftarrow CM_4 + CMO_4 + C_{\text{retrabalho}}$ 
10: else
11:    $T_{\text{alvenaria}} \leftarrow T_4$ 
12:    $C_{\text{alvenaria}} \leftarrow CM_4 + CMO_4$ 
13: end if

14: Retornar:  $(T_{\text{alvenaria}}, C_{\text{alvenaria}})$ 

```

3.5 Acabamento Interno

Esta é uma fase longa e complexa, que transforma a estrutura bruta em um espaço habitável. Engloba múltiplos serviços executados em paralelo ou em sequência: aplicação de chapisco e reboco nas paredes, instalação de contrapiso, assentamento de revestimentos (pisos e azulejos), instalação de esquadrias (portas e janelas), passagem da fiação elétrica e da tubulação hidráulica, instalação de forros de gesso, e por fim, a pintura interna.

A variedade de materiais é imensa, e a mão de obra é altamente diversificada e especializada (eletricistas, encanadores, gesseiros, azulejistas, pintores). As principais fontes de incerteza são a coordenação logística entre as múltiplas equipes e a disponibilidade de materiais específicos. Tempos e custos podem ser calculados de acordo com Pseudocódigo 5.

- Duração: $T_5 \sim \text{PERT}(o_5, m_5, p_5)$.
- Custo de material: $CM_5 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,5}, \sigma_{M,5})$.
- Custo de mão de obra: $CMO_5 \sim \text{Normal}(\mu_{L,5}, \sigma_{L,5})$.

Pseudocódigo 5 Simulação da Fase de Acabamento Interno

- 1: **Entrada:** $o_5, m_5, p_5, \mu_{M,5}, \sigma_{M,5}, \mu_{L,5}, \sigma_{L,5}$
 - 2: **Saída:** Duração total $T_{\text{acabamento}}$, custo total $C_{\text{acabamento}}$
 - 3: Sortear $T_5 \sim \text{PERT}(o_5, m_5, p_5)$ {Sorteia a duração da fase}
 - 4: Sortear $CM_5 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,5}, \sigma_{M,5})$ {Sorteia o custo de material}
 - 5: Sortear $CMO_5 \sim \text{Normal}(\mu_{L,5}, \sigma_{L,5})$ {Sorteia o custo de mão de obra}
 - 6: $T_{\text{acabamento}} \leftarrow T_5$
 - 7: $C_{\text{acabamento}} \leftarrow CM_5 + CMO_5$
 - 8: **Retornar:** $(T_{\text{acabamento}}, C_{\text{acabamento}})$
-

3.6 Pintura Externa

A etapa final de finalização da fachada, responsável pela proteção contra intempéries e pela estética da edificação. As atividades incluem a montagem de andaimes, o tratamento da superfície (limpeza, lixamento e aplicação de selador ou fundo preparador) e a aplicação de múltiplas demãos de tinta ou revestimentos texturizados. Assim como a fase de fundação, empresas A e B terceirizadas são selecionadas para realizar a etapa.

Os materiais principais são tintas, seladores e argamassas de revestimento. A mão de obra é especializada em trabalhos em altura. A duração desta fase é extremamente vulnerável às condições climáticas, podendo demorar mais ou menos para ser concluída a depender do tempo no momento em que a etapa ocorre. Custos e tempos são computados seguindo as regras do Pseudocódigo 6.

- Escolha da Terceirizada: $E_P \sim \text{Bernoulli}(p_{E_P})$ — afeta custos e duração.
- Condição Climática: $W \sim \text{Bernoulli}(p_W)$ — afeta apenas a duração.
- Duração: $T_6 \sim \text{PERT}(o_6, m_6, p_6)$ — condicionada por E_P e W .
- Custo de material: $CM_6 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,6}, \sigma_{M,6})$ — condicionado por E_P .
- Custo de mão de obra: $CMO_6 \sim \text{Normal}(\mu_{L,6}, \sigma_{L,6})$ — condicionado por E_P .

Pseudocódigo 6 Simulação da Fase de Pintura Externa

1: **Entrada:** $p_{EP}, p_W, (\mu_{M,6}^A, \sigma_{M,6}^A, \mu_{L,6}^A, \sigma_{L,6}^A, o_6^{A,bom}, m_6^{A,bom}, p_6^{A,bom}, o_6^{A,chuva}, m_6^{A,chuva}, p_6^{A,chuva})$,
 $(\mu_{M,6}^B, \sigma_{M,6}^B, \mu_{L,6}^B, \sigma_{L,6}^B, o_6^{B,bom}, m_6^{B,bom}, p_6^{B,bom}, o_6^{B,chuva}, m_6^{B,chuva}, p_6^{B,chuva})$.
2: **Saída:** Duração total $T_{pintura}$, custo total $C_{pintura}$

3: Sortear $E_P \sim \text{Bernoulli}(p_{EP})$ {Escolha da empresa terceirizada}
4: Sortear $W \sim \text{Bernoulli}(p_W)$ {Determina a condição climática}

5: **if** $E_P = 1$ **then**
6: Sortear $CM_6 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,6}^A, (\sigma_{M,6}^A))$
7: Sortear $CMO_6 \sim \text{Normal}(\mu_{L,6}^A, (\sigma_{L,6}^A))$
8: **if** $W = 1$ **then**
9: Sortear $T_6 \sim \text{PERT}(o_6^{A,chuva}, m_6^{A,chuva}, p_6^{A,chuva})$
10: **else**
11: Sortear $T_6 \sim \text{PERT}(o_6^{A,bom}, m_6^{A,bom}, p_6^{A,bom})$
12: **end if**
13: **else**
14: Sortear $CM_6 \sim \text{LogNormal}(\mu_{M,6}^B, (\sigma_{M,6}^B))$
15: Sortear $CMO_6 \sim \text{Normal}(\mu_{L,6}^B, (\sigma_{L,6}^B))$
16: **if** $W = 1$ **then**
17: Sortear $T_6 \sim \text{PERT}(o_6^{B,chuva}, m_6^{B,chuva}, p_6^{B,chuva})$
18: **else**
19: Sortear $T_6 \sim \text{PERT}(o_6^{B,bom}, m_6^{B,bom}, p_6^{B,bom})$
20: **end if**
21: **end if**
22: $T_{pintura} \leftarrow T_6$
23: $C_{pintura} \leftarrow CM_6 + CMO_6$

24: **Retornar:** $(T_{pintura}, C_{pintura})$

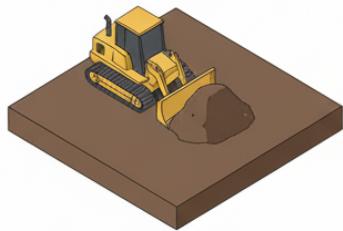
4 Notação

A Tabela 1 detalha a notação padrão dos parâmetros utilizados para cada distribuição de probabilidade no modelo, a fim de evitar ambiguidades.

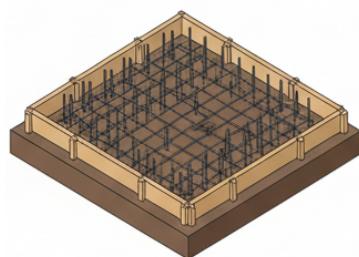
Tabela 1: Notação das Distribuições de Probabilidade

Distribuição	Parâmetro	Descrição
PERT(o, m, p)	o	O valor otimista (mínimo).
	m	O valor mais provável (moda).
	p	O valor pessimista (máximo).
Normal(μ, σ)	μ	A média da distribuição.
	σ	O desvio padrão da distribuição).
LogNormal(μ_{\ln}, σ_{\ln})	μ_{\ln}	A média do logaritmo natural da variável.
	σ_{\ln}	O desvio padrão do logaritmo natural da variável.
Bernoulli(p)	p	A probabilidade de sucesso (ocorrência do evento = 1).

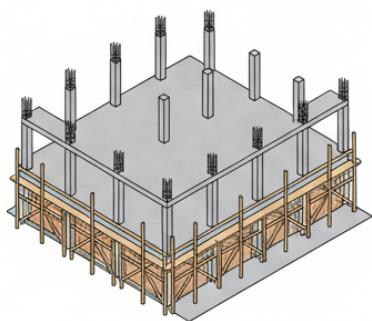
1. Preparação do Terreno



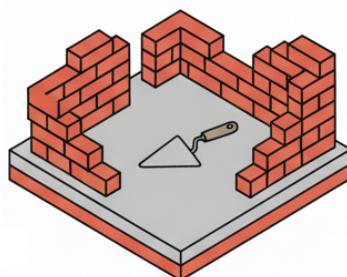
2. Fundação



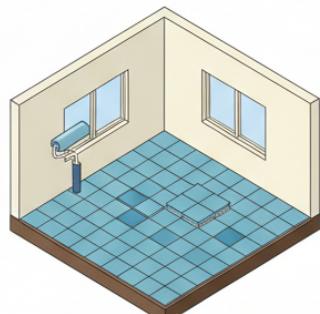
3. Laje



4. Alvenaria



5. Acabamento Interno



6. Pintura Externa



Figura 1: Etapas do Projeto de Construção Civil Hipotético

5 Cenários

5.1 Cenário 1: construção de um edifício

Este cenário representa a construção de um edifício residencial de médio porte em área urbana, com estrutura em concreto armado e padrão de acabamento intermediário. Os valores monetários são expressos em reais (R\$) e as durações em dias corridos.

Segundo a diretoria de finanças da empresa, este projeto é considerado viável se a probabilidade de prejuízo for inferior a **30%**, e se a multa média for inferior a **R\$ 200.000,00**. Sabe-se que o preço fixo do contrato é de **R\$ 19.000.000,00**, com prazo contratual de **360 dias**, e multa de **R\$ 3.000,00** por dia de atraso.

Pelo histórico, a equipe estima que os tempos e custos das fases em edificações verticais são representados de maneira realística pelas distribuições dadas a seguir, na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros — Cenário 1 (Edifício Residencial)

#	Fase	Duração (dias)	Custo Material (R\$)	Custo Mão de Obra (R\$)
1	Prep. Terreno	PERT(10, 14, 20)	LogNormal(120.000, 30.000)	Normal(150.000, 35.000)
2	Fundação A	PERT(30, 40, 55)	LogNormal(2.700.000, 300.000)	Normal(2.300.000, 250.000); $p_A = 0,6$; $C_{geo} = 700.000$; $T_{geo} = 25$; $p_G = 0,18$
2	Fundação B	PERT(25, 34, 48)	LogNormal(3.000.000, 350.000)	Normal(2.100.000, 260.000); $p_A = 0,6$; $C_{geo} = 700.000$; $T_{geo} = 25$; $p_G = 0,18$
3	Laje	PERT(80, 100, 130)	LogNormal(2.400.000, 300.000)	Normal(1.800.000, 200.000)
4	Alvenaria	PERT(60, 75, 95)	LogNormal(900.000, 120.000)	Normal(1.600.000, 200.000); $p_R = 0,12$, $C_{retrabalho} = 300.000$, $T_{retrabalho} = 12$
5	Acab. Interno	PERT(80, 110, 150)	LogNormal(2.500.000, 350.000)	Normal(2.500.000, 400.000)
6	Pintura A	PERT(12, 16, 22); PERT(16, 20, 28)	LogNormal(300.000, 50.000)	Normal(280.000, 40.000); $p_{EP} = 0,6$, $p_W = 0,2$
6	Pintura B	PERT(10, 14, 18); PERT(14, 18, 24)	LogNormal(320.000, 60.000)	Normal(260.000, 45.000); $p_{EP} = 0,6$, $p_W = 0,2$

5.2 Cenário 2: construção de um galpão logísticos

Este cenário descreve a construção de um galpão logístico com estrutura metálica e piso industrial de alta resistência.

Trata-se de uma obra de baixa complexidade arquitetônica, com cronograma mais curto e menor variabilidade de custos. Os valores estão expressos em reais (R\$) e os prazos em dias corridos.

A obra é considerada viável se a probabilidade de prejuízo for inferior a **25%**, sendo o custo de contrato dado por **R\$ 4.300.000,00** com prazo contratual de **150 dias**. A cada dia de atraso cobra-se uma multa de **R\$ 5.000,00**.

A caracterização de tempos e custos para este projeto é dado na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros — Cenário 2 (Galpão Logístico)

#	Fase	Duração (dias)	Custo Material (R\$)	Custo Mão de Obra (R\$)
1	Preparação do Terreno	PERT(5, 7, 12)	LogNormal(50.000, 12.000)	Normal(80.000, 18.000)
2	Fundação A	PERT(18, 22, 30)	LogNormal(1.200.000, 180.000)	Normal(700.000, 120.000); $p_A = 0,7$; $C_{geo} = 200.000$; $T_{geo} = 10$; $p_G = 0,08$
2	Fundação B	PERT(15, 19, 25)	LogNormal(1.300.000, 200.000)	Normal(650.000, 110.000); $p_A = 0,7$; $C_{geo} = 200.000$; $T_{geo} = 10$; $p_G = 0,08$
3	Laje	PERT(18, 24, 32)	LogNormal(1.000.000, 150.000)	Normal(600.000, 100.000)
4	Alvenaria	PERT(8, 10, 14)	LogNormal(125.000, 25.000)	Normal(160.000, 30.000); $p_R = 0,05$, $C_{retrabalho} = 60.000$, $T_{retrabalho} = 4$
5	Acabamento	PERT(14, 18, 26)	LogNormal(200.000, 35.000)	Normal(300.000, 50.000)
6	Pintura A	PERT(6, 7, 9); PERT(8, 9, 12)	LogNormal(40.000, 7.000)	Normal(50.000, 8.000); $p_{EP} = 0,5$, $p_W = 0,3$
6	Pintura B	PERT(5, 7, 8); PERT(7, 8, 11)	LogNormal(45.000, 8.000)	Normal(45.000, 7.000); $p_{EP} = 0,5$, $p_W = 0,3$

5.3 Cenário 3: construção de um centro de saúde

Este cenário representa a construção de um centro de saúde municipal, com dois pavimentos, instalações sanitárias e elétricas complexas e exigência de controle de qualidade superior.

Há maior risco geotécnico e maior variabilidade nos custos indiretos. Os valores estão em reais (R\$) e os prazos em dias corridos. Tempos e custos estão na Tabela 4.

Os custo e prazo de contrato são dados, respectivamente, por **R\$ 12.500.000,00** e **300 dias**. A diretoria financeira aceita o risco de executar o contrato se a probabilidade de prejuízo for menor do que **15%**, e a multa média não exceder **R\$ 50.000,00**. Multa diária é de **R\$ 4.000,00**.

Tabela 4: Parâmetros — Cenário 3 (Centro de Saúde)

#	Fase	Duração (dias)	Custo Material (R\$)	Custo Mão de Obra (R\$)
1	Prep. Terreno	PERT(8, 12, 18)	LogNormal(90.000, 20.000)	Normal(120.000, 25.000)
2	Fundação A	PERT(28, 36, 48)	LogNormal(1.800.000, 220.000)	Normal(1.400.000, 180.000); $p_A = 0,5$; $C_{geo} = 800.000$; $T_{geo} = 30$; $p_G = 0,25$
2	Fundação B	PERT(25, 32, 44)	LogNormal(1.900.000, 260.000)	Normal(1.350.000, 170.000); $p_A = 0,5$; $C_{geo} = 800.000$; $T_{geo} = 30$; $p_G = 0,25$
3	Laje	PERT(30, 40, 55)	LogNormal(1.200.000, 170.000)	Normal(900.000, 120.000)
4	Alvenaria	PERT(50, 65, 85)	LogNormal(600.000, 90.000)	Normal(1.300.000, 160.000); $p_R = 0,15$, $C_{retrabalho} = 400.000$, $T_{retrabalho} = 15$
5	Acab. Interno	PERT(70, 95, 130)	LogNormal(2.000.000, 300.000)	Normal(2.200.000, 300.000)
6	Pintura A	PERT(10, 13, 16); PERT(14, 18, 22)	LogNormal(120.000, 20.000)	Normal(100.000, 18.000); $p_{EP} = 0,4$, $p_W = 0,25$
6	Pintura B	PERT(9, 12, 15); PERT(12, 16, 20)	LogNormal(130.000, 22.000)	Normal(95.000, 16.000); $p_{EP} = 0,4$, $p_W = 0,25$

6 Problema: Apoio a Tomada de Decisão

Dado a especificação acima, o grupo deve atuar no apoio a tomada de decisão implementando (i) os geradores de números aleatórios de cada distribuição envolvida (pesquisar que técnica usar, mas não pode usar bibliotecas prontas); (ii) uma simulação de uma rodada completa do modelo de construção, determinando-se os tempos e custos das fases, incluindo multas, atrasos e retrabalhos; (iii) a replicação do modelo uma quantidade N grande de vezes, para gerar as distribuições de tempos e custos da obra; (iv) gerar gráficos e tabelas com os resultados (grupo deve investigar por conta própria quais são as melhores formas de apresentar os resultados) e, por fim (v) dar suporte à decisão recomendando decisão à diretoria financeira da empresa.