

Estudo da variabilidade no tempo de execução de projetos na construção civil: uma análise do planejamento estrutural em um estádio de futebol

Study of variability in the timing of execution of projects in construction: an analysis of structural planning in a football stadium

Eduardo Klein Couto, Mateus Meneghini, Michel José Anzanello, Guilherme Vazquez Etcheverry, Alessandro Kahmann

Palavras chave: simulação de Monte Carlo, variabilidade em projetos, PERT

Key Words: Monte Carlo simulation, project variability, PERT

RESUMO

O planejamento de processos na construção civil tipicamente está sujeito a variabilidades por conta de imprevistos. A identificação e modelagem de tal variabilidade permite identificar etapas críticas que exijam monitoramento, visto que seus atrasos podem comprometer os prazos de conclusão do projeto. Este artigo analisa o efeito da variabilidade dos tempos de execução de tarefas na construção de um estádio de futebol através da integração da técnica PERT (Program Evaluation and Review Technique) à simulação de Monte Carlo. Objetiva-se avaliar a probabilidade de sucesso de conclusão das etapas do projeto frente às datas previamente acordadas quando diferentes níveis de variabilidade dos tempos de execução são

considerados. As probabilidades calculadas foram consideradas realistas por especialistas de processo.

ABSTRACT

Process planning in construction sites is typically subjected to variability due to unforeseen circumstances. The modeling of such variability allows the identification of critical steps that require close monitoring. This article proposes a framework for assessing how the variability on tasks execution time affects building stages in a soccer stadium through PERT (Program Evaluation and Review Technique) and Monte Carlo simulation. It is aimed at evaluating the probability of successful completion of project stages when strict due dates are considered. Results were evaluated as realistic by process experts.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil brasileira vem enfrentando profundas mudanças e tendências neste século. Cada ano revela números mais altos e significativos, tornando-se um elemento forte no que diz respeito ao crescimento do PIB brasileiro. O setor encerrou 2011 com um aumento de 7,46% no número de contratações, isto é, cerca de 200 mil novos empregos foram criados, o que deve sustentar a previsão de crescimento de 4,8% do setor no PIB no ano em questão (SINDUSCON - Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, 2011).

Conforme El Debs (2000), pode se comparar a construção civil a uma indústria, apresentando características que podem incluir baixa produtividade, baixo controle de qualidade, alto desperdício de material e ociosidade dos recursos. Assim, novas metodologias organizacionais e sistemas de construção têm sido utilizados para otimizar o processo de edificação, com o intuito de acirrar ainda mais a competitividade do mercado e dar forma ao conceito de "industrialização da construção civil". Dentre os sistemas construtivos que reforçam esse padrão está a peça pré-moldada feita de concreto armado (Pigozzo et al., 2005), cujo uso enumera diversas vantagens relacionadas a

aspectos estruturais, construtivos e econômicos (Menezes e El Debs, 2009).

Todavía, a industrialização da construção civil não está restrita somente à fabricação de pré-moldados. Os processos de transporte, montagem, inspeção e controle, criação de novos processos e impactos destes ao meio ambiente também fazem parte do conceito (Serra et al., 2005). Conforme Canova (2005), o processo deve ser integralmente monitorado, começando pela compra da matéria-prima e terminando na entrega do produto final, passando pela apropriada manufatura de componentes e cumprimento de prazos estabelecidos entre os diversos setores do processo. Este artigo analisa o efeito da variabilidade no planejamento da construção de um estádio de futebol através da integração da técnica PERT (Program Evaluation and Review Technique) à Simulação de Monte Carlo (SMC). Para tanto, é gerada uma análise de diferentes cenários do processo em questão, estudando o impacto de ações pontuais sobre o prazo de término estipulado. Objetiva-se avaliar a probabilidade de sucesso de conclusão das etapas do projeto frente às datas previamente acordadas. A análise permite ao gestor entender as etapas que devem ser atentamente monitoradas na construção do estádio, visto que atrasos nas mesmas podem comprometer os prazos de conclusão do projeto. De tal forma, a hipótese do presente estudo reside na possibilidade de integração das ferramentas PERT e SMC e aspectos de aprendizado como facilitadores da análise da variabilidade nos tempos de execução de um projeto.

O artigo espera ainda contribuir com o meio acadêmico através da integração de duas ferramentas tipicamente analisadas de forma separada: a simulação de Monte Carlo e a técnica PERT. O artigo ainda inova ao incluir aspectos de aprendizado no contexto da análise.

A gestão de projetos na construção civil e ferramentas para auxílio do planejamento

O planejamento das atividades em projeto de engenharia surge como elemento fundamental para que o binômio qualidade e produtividade seja alcançado. Segundo Monteiro e Santos (2010), o

processo construtivo, formado por um conjunto de atividades multidisciplinares integrantes de um cronograma, muitas vezes não se torna prático devido à existência de contratempos, aumentando a complexidade do projeto.

A existência de variabilidade nas tarefas normalmente desempenhadas em uma obra não pode ser negligenciada. O planejamento da maioria das construções é realizado com base em valores determinísticos, tornando-o pouco realista. Além disso, as frentes de serviços procuram englobar a tendência de problemas (com bases históricas ou por experiência do gestor), contudo, isso não possibilita uma análise probabilística. O estudo da probabilidade da ocorrência de intempéries, acidentes, erros, dentre outros problemas comuns nesse setor, é pouco abordado. Se o estudo analisasse a probabilidade de cada atividade terminar com êxito ou não, a confiabilidade de um prazo seria maior. Koskela (1999) classifica em três as penalidades básicas oriundas dessa negligência: buffer no fluxo de materiais e no fluxo de trabalho, menor utilização de recursos e menor produção. Isso ocorre por conta da variabilidade inerente às atividades a serem executadas. Uma análise ampla, entendendo que as construções ocorrem em um ambiente cheio de variáveis, exibem cenários pessimistas e otimistas.

Ballard e Howell (1998) observam que as variabilidades provêm dos fluxos existentes no canteiro de obra. São exemplos de atividades variáveis ou imprevisíveis: o fluxo de materiais e fluxos de montagem (buffers de tempo e espaço entre equipes e produção), estoques de matérias, manipulação múltipla, perda de material devido a roubo e chuva, dentre outros. Um planejamento geral das atividades será mais coeso se considerar ou minimizar essas variáveis. Para Koskela et al. (1997), a construção civil ainda é muito carente de gerenciamento, sendo uma área em que existe demasiada improvisação. O resultado de uma má gestão no setor de planejamento e controle da produção acarreta atrasos e, por consequência, multas ou gastos excessivos com incremento de capacidade, contratações emergenciais (ou horas extras) para aumentar rendimento ou mesmo a

negligência de problemas ainda inerentes ao processo da construção. Por fim, Musetti (1998) coloca que a complexidade do gerenciamento de projetos não está somente no planejamento e programação das tarefas, mas sim na agilidade de reprogramação e replanejamento quando novas variáveis são introduzidas no processo.

Dentre as ferramentas para auxílio do planejamento de projetos, destaca-se o PERT, ou método do caminho crítico, um método de planejamento que contempla um conjunto de processos e técnicas para o gerenciamento de um empreendimento, operação ou projeto cuja característica principal é a análise de todas as sequências operacionais e indicação daquela que tem a maior duração (ABNT, 1972; Hillier e Lieberman, 2001; Pinedo, 2008). Segundo Araújo (2007), o PERT pode ajudar na análise decisória, visto que revela as diversas possibilidades de situações e, assim, atua de modo a minimizar os efeitos da ocorrência não prevista ou acidental das mesmas durante o projeto. Desse modo, a ferramenta mune o gerenciador com subsídios para tomada de decisão, contudo deve estar aliada a outros fatores para auxiliar as decisões. Alencar (2003) cita que as redes PERT possibilitam melhorias substanciais e evitam que as tomadas de decisão ocorram ao acaso. Os resultados extraídos dessa análise são mais confiáveis, pois contemplam a incorporação de diferentes cenários passíveis de ocorrência. Diversas distribuições probabilísticas podem ser utilizadas na modelagem dos processos em análise, como a normal e a exponencial (Hirschfeld, 1978).

METODOLOGÍA

Segundo Silva e Menezes (2001), essa pesquisa é classificada como aplicada, uma vez que propõe a criação de conhecimentos com o intuito de resolver problemas específicos. Utiliza uma abordagem quantitativa, devido ao envolvimento de ferramentas estatísticas. Com relação aos objetivos, a pesquisa é exploratória, já que se deseja criar uma maior familiaridade com o problema e assim torná-lo explícito.

A Simulação de Monte Carlo (SMC), por sua vez, auxilia no estudo das variabilidades descritas pelo PERT em projetos. Segundo Rodrigues e Soares (2005), a SMC vem sendo utilizada com sucesso em problemas da engenharia, visto que relaciona um grande número de cenários para avaliar a probabilidade da ocorrência de um evento. A generalidade da ferramenta é tida como vantajosa, pois pode atingir níveis satisfatórios de aproximação de fenômenos característicos de diversas áreas (Kroese et al., 2011). Por relacionar simulação computacional com estatística, a SMC é uma ferramenta de simulação estocástica (Rodrigues, 2002). Conforme Costa e Azevedo (1996), essa ferramenta é muito importante para a pesquisa e o planejamento, pois com o avanço das tecnologias computacionais ela fornece uma alta velocidade de cálculo, poder de armazenar dados e capacidade de tomar decisões lógicas.

Em termos de sua operacionalização, o método gera repetidas simulações, usando em cada uma delas um conjunto particular de valores de variáveis aleatórias criadas em conformidade com as respectivas distribuições de probabilidade que descrevem os fenômenos analisados. Assim, é obtido um conjunto de soluções após n simulações, no qual cada uma correspondendo a um diferente conjunto de valores das variáveis aleatórias (Paliga, 2008). Tal geração aleatória de valores, associada a uma modelagem adequada, permite a reprodução fiel de um processo e o teste de cenários associados a esse processo (Buseti e Marcucci, 2013).

O método de trabalho está dividida em quatro etapas. São elas: análise da demanda por etapas na execução do projeto, observação e coleta de dados, aplicação da SMC e teste de diferentes cenários. Essas etapas são detalhadas na sequência.

Análise da demanda

Inicialmente, realiza-se a análise da demanda dos produtos (e, por consequência, das etapas), com o objetivo de definir o problema-foco a ser abordado

nessa pesquisa. Para tal, é reconhecido o local de estudo, seguido pelo entendimento do produto e processos ali realizados via entrevista informal com especialistas. Os questionamentos acontecem em formato de brainstorming com o intuito de gerar diversas possibilidades de trabalho. O grupo de especialistas é composto por quatro engenheiros civis responsáveis de produção. Os questionamentos consistem de perguntas abertas abordando tópicos de planejamento e produção. Os especialistas apontam os pontos mais problemáticos e que oferecem oportunidades de pesquisa e melhoria. Assim, é selecionado um processo a ser analisado.

Observação e coleta de dados

Na segunda etapa, é realizada a observação e a coleta de dados. Em primeira instância, são observadas e mapeadas as atividades através do acompanhamento diário dos processos executados em uma parte do projeto (tal parte foi indicada pela equipe gestora do projeto). O entendimento da obra é facilitado pela análise do cronograma disponibilizada em MS Project. Assim, pode-se discutir com o grupo de engenheiros e gestores do projeto as etapas e estruturar os dados que, posteriormente, serão estatisticamente analisados. As etapas analisadas foram indicadas por gestores do projeto. Na sequência, é construída uma rede de atividades baseada no método do PERT (ver Figura 1). Segundo Fitzsimmons e Fitzsimmons (2004), as etapas são representadas por círculos chamados de nós, os quais são conectados por arcos, o que proporciona uma representação visual da sequência das atividades.

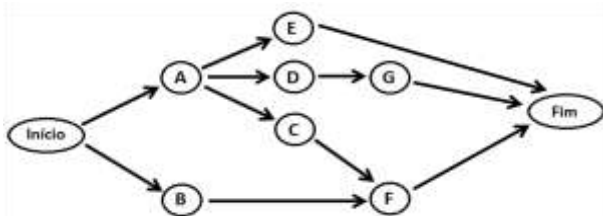


Figura 1. Exemplo de Rede de Atividades

Posteriormente, com a apresentação da malha obtida, coletam-se tempos de execução de cada tarefa do processo em análise, permitindo gerar uma curva normal para cada atividade (e suas

respectivas médias e desvios-padrão). Esses valores são alimentados na SMC. A confiabilidade da modelagem está aliada ao número de dados de cada amostra, portanto deve-se atentar para que seja atendido um número mínimo de coletas (Montgomery, 2010).

Aplicação da Simulação de Monte Carlo

Nesta etapa, com base nos dados coletados na etapa anterior, aplica-se a Simulação de Monte Carlo (Busetti e Marcucci, 2013). Essa ferramenta possibilita estimar o tempo de conclusão do processo submetido à variabilidade no tempo de execução das tarefas que o constituem e indicar quais as chances do mesmo ser finalizado na data estipulada. Para cada atividade, é calculada a média dos tempos de execução coletados, o desvio-padrão e a variância. Para a aplicação da simulação utiliza-se a distribuição normal padronizada. Conforme Spiegel et al. (2004), existe uma variável padronizada Z correspondente a um valor aleatório X na distribuição normal, onde μ é a média da amostra e σ o desvio padrão da amostra, onde Z indica a quantidade de desvios-padrão que a variável X se encontra da média. A variável reduzida permite estimar a probabilidade de um valor qualquer ser inferior a X .

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Em sua operacionalização, a SMC gera valores aleatórios para o tempo de conclusão de cada sequência de tarefas baseado no tempo médio de execução e no desvio-padrão das atividades que a compõem. Assim, é fixada a data de entrega (DE) como sendo X , a média μ será o valor gerado pela simulação e o desvio padrão σ será a raiz da variância (VAR) do caminho em estudo (dada pela soma das variâncias das atividades correspondentes a esse caminho). Tal relação, baseada na equação (1) é apresentada em (2).

$$Z_n = \frac{DE - TC_n}{\sqrt{VAR}} \quad (2)$$

Cada tempo de conclusão (TC) gerado pela simulação corresponde a uma nova iteração, o que gera um novo Z e, através da distribuição normal, leva a uma probabilidade $P(Z)$ de $TC < DE$ (ou seja, a tarefa é concluída antes do prazo de entrega),

informações essas compiladas na Tabela 1. Quanto maior o número de iterações, maior a precisão da simulação (BUSETTI e MARCUCCI, 2013). A probabilidade de conclusão do caminho é a média das probabilidades das iterações. A Tabela 1 ilustra a SMC em planilha eletrônica.

Tabela 1 – Iterações da Simulação de Monte Carlo

Iteração	Tempo de conclusão (simulação)	Distribuição Normal	Probabilidade de Conclusão
1	TC1	Z1	P1 (Z1)
2	TC2	Z2	P2 (Z2)
3	TC3	Z3	P3 (Z3)
n	TC4	Zn	Pn (Zn)

Probabilidade de conclusão	Média das probabilidades
----------------------------	--------------------------

Teste de diferentes cenários

Após a validação da probabilidade de conclusão de um processo padrão, são testadas variações neste cenário. Três testes são realizados: variação na data de entrega, redução no tempo de execução das tarefas e na sua variabilidade, e redução do tempo médio de execução decorrente de aprendizado.

1 Variação na data de entrega

Nesse cenário, datas alternativas de conclusão são testadas. O objetivo consiste em analisar a

flexibilidade do processo, isto é, estimar até que ponto pode-se negociar o prazo de início do processo seguinte. Logo, são simuladas antecipações e atrasos no prazo de término.

2 Redução de variabilidade e tempo médio de execução

Para essa etapa são analisadas as atividades tidas como fundamentais dentro do processo, as quais precedem diversas outras e possuem um tempo médio de execução longo. São testadas hipóteses de redução de variabilidade e de tempo médio de execução destas, e seus impactos na probabilidade de conclusão do processo. O objetivo é apontar a importância de uma maior padronização dessas tarefas.

3 Influência de aprendizado

Tarefas que envolvem certa especialização foram estudadas, uma vez que os operadores ganham destreza à medida que um maior número de repetições é executado. Dessa forma, são alterados os tempos médios de execução e a variabilidade conforme as atividades são realizadas e observado o grau de influência do aprendizado na agilidade do processo.

RESULTADOS

A empresa em estudo figura entre as cinco maiores empresas de infra-estrutura no Brasil e na América Latina. Dentre seus projetos constam os mais diferenciados modelos de obras da engenharia, partindo dos tradicionais prédios residenciais até refinarias, estradas e estádios de futebol.

O estudo desenvolvido está relacionado com um projeto da empresa na cidade de Porto Alegre. Trata-se da construção de um estádio de futebol em formato de arena cuja superestrutura é de concreto armado e composta, em sua maioria, por peças pré-moldadas (lajes alveolares, vigas perfis "T" e "L", Vigas Arquibancada e Degrau). O estádio, que tem uma capacidade planejada para aproximadamente 60 mil espectadores, engloba uma área total de 110 mil metros quadrados.

A primeira parte do trabalho foi conhecer o local de estudo. Analisaram-se os diferentes processos

desenvolvidos na obra e, depois de conversas informais com engenheiros e mestres de obra, concluiu-se que não havia padronização na execução de atividades associadas a pré-moldados. A variabilidade não era contabilizada e a manobra padrão para incrementar a agilidade da construção era aumentar o número de trabalhadores para cumprir o prazo estipulado.

Tendo em vista a complexidade da construção, o processo em análise demandou simplificações. O estádio é composto de 10 setores, sendo que cada um deles é uma estrutura isolada das demais, unidas por juntas de dilatação. O presente trabalho retratou apenas um dos setores, desenvolvendo o gerenciamento das atividades pertinentes ao mesmo. Foi estipulado que uma frente de serviços estaria executando as atividades e estas não ocorreriam concomitantemente, à exceção da

fabricação das peças pré-moldadas. O questionamento-chave foi planejar o tempo necessário para liberar o setor para a próxima etapa (montagem da cobertura metálica por uma empresa terceirizada).

A coleta de dados ocorreu com o fornecimento do planejamento total da obra pelos engenheiros responsáveis. A rede PERT (ver Figura 2) foi construída através da análise de informações em uma planilha da empresa que possuía dados sobre as atividades, como precedências e prazos de término das mesmas. A partir de reuniões e também de visitas técnicas, acompanharam-se processos de montagem dos pré-moldados com gravações e entrevistas com os encarregados, e assim analisaram-se as dificuldades do processo. Isso ajudou a mensurar os tempos e saber se estavam coerentes com o planejado. O estrutural (parte de concreto armado) do setor em estudo tem seis níveis. As instalações hidráulicas, elétricas e condicionamento de ar foram desprezadas nesse momento. O foco é saber o prazo para liberação do

estrutural para a próxima etapa do projeto (colocação da cobertura).

As entrevistas foram dirigidas de maneira a englobar os diversos setores da obra, visando incorporar as possíveis variabilidades existentes. Os tempos de execução das tarefas em questão foram coletados das planilhas de atividades anteriormente mencionadas, as quais continham um número adequado de repetições que permitiram estimar médias e desvios da distribuição normal característica. Tais dados foram corroborados por especialistas de processo, os quais mencionaram ainda fatores subjetivos que afetam os prazos de execução, como intempéries e mão-de-obra pouco especializada. Com chuvas, por exemplo, as tarefas de estacas e blocos são mais prejudicadas do que as armações de pilares. Dessa forma, os valores variaram de acordo com a cautela ou agressividade do entrevistado. As médias e desvios padrão coletados são apresentados na Tabela 2.

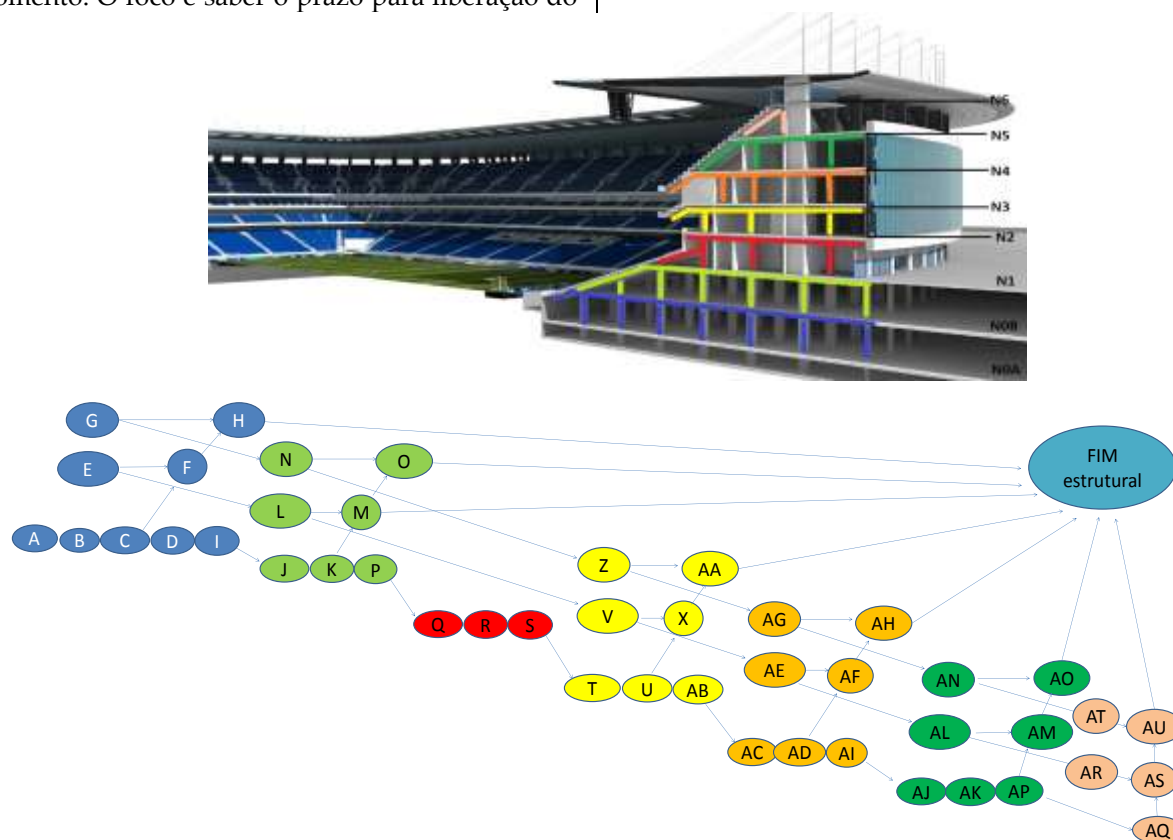


Figura 2. Rede de atividades e corte indicativo do setor estudado

Tabela 2 – Médias e desvios padrão (em dias) das atividades do estrutural do setor em estudo

Nivel	No. Pçs	Malha	tarefas	Tempo (dias)	
				Média	Desvio- padrão
Nivel OA		A	Estacas	45,5	14,0
		B	Blocos	31,7	2,7
		C	POA-POB	20,5	4,0
Nivel OB		D	Vigas OB	26,0	4,6
		E	F. VA	16,3	3,3
		F	M. VA	10,3	2,5
		G	F. Degraus	26,7	5,7
		H	M. Degrau	6,2	2,8
		I	Lajes OB	29,7	4,0
		J	POB-P1	42,7	11,2
Nivel 1	52	K	Vigas N1	22,0	4,0
	48	L	F.VA	67,8	9,0
		M	M. VA	10,2	4,3
	159	N	F. degraus	46,6	5,6
		O	M. Degrau	12,1	3,4
	343	P	Lajes N1	22,2	3,4
Nivel 2		Q	P1-P2	17,3	2,5
	41	R	Vigas N2	12,0	3,0
	239	S	Lajes N2	12,2	2,8
Nivel 3		T	P2-P3	17,2	3,8
	16	U	Vigas N3	12,8	3,8
	16	V	F. VA	22,9	4,4
		X	M. VA	3,2	1,8
	28	Z	F. Degraus	8,9	2,8
		AA	M. Degrau	2,0	1,0
	258	AB	Lajes N3	12,2	2,8
Nivel 4		AC	P3-P4	17,3	3,5
	16	AD	Vigas N4	12,3	3,5
	17	AE	F. VA	23,3	4,0
		AF	M. VA	3,2	1,8
	65	AG	F. Degraus	18,7	3,3
	190	AH	M. Degrau	5,0	2,8
Nivel 5		AI	Lajes N4	12,8	4,3
		AJ	P4-P5	17,3	4,5
	16	AK	Vigas N5	9,7	2,5
	16	AL	F. VA	21,5	4,1
		AM	M. VA	4,0	2,6
	48		F. Degraus	12,7	3,3
Nivel 6		AO	M. Degrau	3,5	2,6
	112	AP	Lajes N4	9,5	3,3
		AQ	P5-P6	16,7	2,5
		AR	F. VA	22,2	4,0
	AS	M. VA	3,8	2,4	
	AT	F. Degraus	12,8	3,4	
	AU	m. Degrau	3,8	2,0	

Legenda:

F. VA	Fabricação de Viga Arquebancada
M. VA	Montagem de Viga Arquebancada
F. Degraus	Fabricação de Degraus
M. Degraus	Montagem de Degraus
Px-Py	Fabricação e Montagem in loco dos pilares entre os níveis x e y
Estacas	Colocação de estacas
Blocos	Colocação de blocos
Vigas x	Montagem de Viga no nível x
Lajes x	Montagem de Lajes no nível x

Após estudo da rede PERT, percebeu-se que a caminho crítico para esse setor é o A, B, C, D, I, J, K, P, Q, R, S, T, U, AB, AC, AD, AI, AJ, AK, AP, AQ, AS, AU. Dentre os demais caminhos, apenas outros dois foram considerados na análise (uma

vez que são os únicos a terem seu tempo médio de conclusão próximo ao do caminho crítico e sua variância trazer chances de ultrapassar o mesmo). São eles: A, B, C, D, I, J, K, P, Q, R, S, T, U, AB, AC, AD, AI, AJ, AK, AP, AM, AO e A, B, C, D, I, J, K, P, Q, R, S, T, U, AB, AC, AD, AF, AH (por simplicidade, o primeiro caminho será chamado de AO e o segundo de AH). Os demais não terão sua probabilidade de conclusão calculada por possuírem um tempo médio de execução muito inferior aos acima citados e uma variância insuficiente para ameaçarem a data de entrega.

A cobertura deveria começar a ser colocada depois de 450 dias do princípio da obra, portanto, este foi a data base de entrega (conclusão) do projeto. Através de 3.000 interações, a SMC varreu a distribuição normal e gerou uma probabilidade de término no prazo de 76% para o caminho crítico, de 89% para o caminho AO e de 99% para o caminho AH (Tabela 3). Na sequência, foram testados cenários contemplando a antecipação e o atraso do prazo de término, conforme a Tabela 3. Com a redução de 50 dias no prazo final, a obra dificilmente será finalizada, enquanto que o aumento do mesmo número de dias na data de entrega praticamente elimina chances de atraso.

Tabela 3 – Probabilidade de conclusão dos caminhos para distintas datas de entrega

Tempo de conclusão (dias)	Caminho Crítico	Caminho AO	Caminho AH
400	21,52%	38,50%	88,96%
420	43,31%	61,86%	96,89%
440	65,24%	81,76%	99,26%
460	84,11%	93,19%	99,88%
480	94,47%	98,23%	99,99%
500	98,49%	99,64%	100,00%

A colocação de estacas (tarefa A) e a fabricação in loco dos pilares – o que envolve execução de forma, ferragem, concretagem, desforma e cura – do nível 0B para o nível 1 (tarefa J) são as tarefas mais longas dos caminhos em estudo e possuem um desvio padrão razoavelmente alto. Além disso, são tarefas essenciais para a estruturação do setor e bom andamento do restante da obra. Dessa forma, foram testados cenários de redução de variabilidade para tais tarefas, mantendo-se o prazo de entrega original de 450 dias. Isso pode ser

alcançado com uma maior padronização na execução das atividades que, pela análise feita no local, é bastante precária e sem controle rígido na sequência de realização das operações. Reduzindo à metade seu desvio padrão, há um aumento de aproximadamente 7% de probabilidade de término do caminho crítico e do caminho AH, como indica a Tabela 4.

Tabela 4 – Probabilidade de conclusão dos caminhos com a redução da variabilidade das tarefas A e J

Redução DV	DV Tarefa A	DV Tarefa J	Caminho Crítico	Caminho AH	Caminho AO
10%	12,57	10,12	77,76%	89,68%	99,89%
20%	11,17	8,99	77,97%	91,29%	99,92%
30%	9,78	7,87	79,42%	92,22%	99,97%
40%	8,38	6,74	80,80%	93,19%	99,99%
50%	6,98	5,62	82,69%	94,23%	99,99%

A Tabela 5 ilustra um cenário com variação do tempo médio e do desvio padrão. Numa hipótese otimista, porém realista (na qual se reduzem ambos os tempos médios para 40 dias e os desvios padrão para 10 e 9 dias para as tarefas A e J, respectivamente), verifica-se um acréscimo de 11% na probabilidade de conclusão do caminho crítico em 450 dias.

Tabela 5 – Probabilidade de término dos caminhos com variação no tempo médio e no desvio padrão

Tempo Médio Tarefa A (dias)	Desvio Padrão Tarefa A	Tempo Médio Tarefa J (dias)	Desvio Padrão Tarefa J	Caminho Crítico	Caminho AH	Caminho AO
40,0	13,97	42,67	11,24	80,60%	91,31%	86%
45,5	13,97	40,00	11,24	77,48%	89,75%	80%
40,0	13,97	40,00	11,24	82,36%	92,40%	88%
40,0	10,00	40,00	9,00	86,08%	95,40%	98%

Por fim, testou-se a influência de consideração de aprendizado dos trabalhadores sobre os tempos de execução e sua variabilidade. As tarefas de fabricação e montagem *in loco* dos pilares têm o mesmo tempo médio de execução para cada pilar, conforme o planejamento da obra. Entretanto, verifica-se um ganho de destreza na realização dessa tarefa, visto que é a única em que ocorre a fabricação e montagem no próprio local. Testou-se um aprendizado mais elástico na tarefa J – segunda tarefa de montagem de pilares – e um acréscimo de 10% em relação ao aprendizado inicial para as tarefas subsequentes (Tabela 6). Tais patamares de aprendizado foram estimados com auxílio de especialistas de processo. Para uma redução do tempo médio de execução de 2,5% da primeira para a segunda tarefa de montagem de pilar (compressão tida como plausível pelos especialistas) há um incremento de probabilidade de término no prazo de quase 5% para 450 dias.

Tabela 6 – Probabilidade de conclusão com aprendizado na montagem de pilares

Aprendizado						Probabilidade		
J	Q	T	AC	AJ	AQ	Caminho Crítico	Caminho AH	Caminho AO
2,5%	2,75%	3%	3,25%	3,5%	3,75%	79,54%	90,07%	99,78%
5%	5,5%	6%	6,5%	7%	7,5%	82,30%	91,73%	99,86%
7,5%	8,25%	9%	9,75%	10,5%	11,25%	85,80%	93,39%	99,90%

Ao final dos testes de diferentes cenários, ressalta-se a importância da padronização na execução das tarefas. Observou-se que a contratação de mais trabalhadores é a solução usual, porém mais custosa para concluir um processo no prazo. Reduzir a variabilidade e o tempo médio é possível

com treinamento e capacitação de pessoal. Alternativamente, a simulação mostrou que investir em recrutamento ou contratação de mão-de-obra experiente asseguram resultados satisfatórios, elevando a probabilidade de conclusão dentro dos prazos estipulados.

CONCLUSÕES

O estudo da variabilidade é de fundamental importância em processos industriais e de

construção, permitindo minimizar atrasos na entrega de projetos. Tal variabilidade está associada ao não cumprimento no fornecimento das matérias-primas necessárias no projeto, a

variações nos tempos de execução das tarefas decorrentes da não-padronização e a fatores de difícil controle, como aspectos climáticos.

No presente trabalho, a SMC foi integrada a uma rede PERT para obter-se um planejamento acerca da probabilidade de conclusão do segmento estrutural de um estádio de futebol. Foram analisados diversos cenários tidos como factíveis pelos especialistas de processo. Tais cenários focaram-se na redução do tempo de execução das tarefas tidas como primordiais e mais propensas a problemas, bem como na variabilidade das mesmas. Por fim, avaliou-se o impacto na probabilidade de conclusão do projeto quando aprendido é considerado. Os resultados mostraram-se coerentes quando avaliados por especialistas de processo, os quais concordaram que programas de treinamento e capacitação de pessoal são fundamentais para assegurar o

cumprimento dos prazos acordados no projeto analisado. Além disso, os gestores avaliaram a sistemática proposta como simples em termos de sua fundamentação e de fácil operacionalização, podendo facilmente ser estendida para outras aplicações e setores. De tal forma, comprova-se a hipótese da possibilidade de integração das ferramentas PERT e SMC e aspectos de aprendizado como facilitadores da análise da variabilidade nos tempos de execução de um projeto.

Estudos futuros contemplam a inserção de variáveis de custo e ociosidade em projetos da construção civil, visto que atrasos e retrabalhos impactam diretamente no custo de uma obra. Com um planejamento mais coeso, pretende-se padronizar etapas tidas como críticas, colaborando para o cumprimento dos prazos estipulados.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1972). Terminologia do PERT/COM. Anteprojeto da Norma Brasileira. Rio de Janeiro: ABNT.
- Alencar, L. (2003). Avaliação e gestão de projetos na construção civil com o apoio do método multicritério promethee. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.
- Araújo, T. (2007). Análise dos processos de planejamento de execução de uma laje nervurada com utilização de ferramentas computacionais. Monografia (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de fora-MG.
- Ballard, G.; Howell, G. (1998). Shielding Production: Essential Step in Production Control. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124 (1), 11-17.
- Buseti, F., Marcucci, J. (2013). Comparing forecast accuracy: A Monte Carlo investigation. *International Journal of Forecasting*, 29 (1), 13-27.
- Canova, F. (2005). A aplicação da mentalidade enxuta numa indústria de pré-fabricados de concreto. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo-SP.
- Costa, L.; Azevedo, M. (1996). Análise Fundamentalista. Rio de Janeiro: FGV/EPGE.
- El Debs, M. (2000). *Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações*. São Carlos, SP: Publicação EESC-USP.
- Fitzsimmons, J. A.; Fitzsimmons, M. A. (2004). *Administração de Serviços: Operações, Estratégias Tecnologia da Informação*, 4ed. Brasil: Bookman.
- Hillier, F.; Lieberman, G. (2001). *Introduction to Operations Research*, 7th ed.. Boston: McGraw-Hill.
- Hirschfeld, H. (1978). *Planejamento com PERT/CPM e análise do desempenho: Método manual e por computadores eletrônicos aplicados a todos os fins*, 6ª ed. São Paulo: Atlas.
- Koskela, L. (1999). Management of production in construction: A theoretical view. *Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, University of California, Berkeley, CA, USA.
- Koskela, L.; Ballard, G.; Tanhuanpaa, V. (1997). Towards lean design management. *5th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-5)*. Queensland, Austrália, 1-12.
- Kroese, D. P.; Taimre, T.; Botev, Z.I. (2011). *Handbook of Monte Carlo Methods*. New York: John Wiley & Sons.
- Menezes, C. M. T.; El Debs, M. K. (2009). Estudo de consolos e dentes de concreto moldados em etapas distintas para ligações de concreto pré-moldado. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, 11 (53), 13-16.
- Monteiro, A.; Santos, R. (2010). *Planejamento e controle na construção civil, utilizando alvenaria estrutura*. Monografia (Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – CCET, Belém.

- Montgomery, D. (2010). *Design and Analysis of Experiments: Minitab Companion*. Estados Unidos: Wiley & Sons.
- Musetti, M. A. (1998). *Planejamento e Controle de Projetos. Gerenciamento na Construção Civil*. São Carlos: EES/USP.
- Paliga, C. M. (2008). *Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão através do método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos*. Tese de doutorado em engenharia civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Pigozzo, B.N.; Serra, A.M.B.; Ferreira, M.A. (2005). A industrialização na construção e o estudo de uma rede de empresas em obra de pré-fabricados em concreto armado. *Anais XII SIMPEP*, Bauru SP.
- Pinedo, M. (2008). *Scheduling: Theory, Applications and Systems*. New York: Springer.
- Rodrigues, V. V.; Soares, C. A. P. (2005). Metodologia para aplicação da simulação de Monte Carlo no Gerenciamento de custos de projetos de construção. In: *7th Simpósio de Engenharia de Produção*, Baurú-SP.
- Rodrigues, V.V. (2002). The Use of Monte Carlo Simulation to Appraise the Risk of not Fulfilled Costs Previously Established for a Project. In: *National Conference With International Participation – In Situ Behavior of Constructions*, 14 Th Edition, Galatzi, Bucuresti, România, Conference's Book, 227-235.
- Serra, S. M. B.; Ferreira, M. A.; Pigozzo, B. N. (2005). Evolução dos Pré-Fabricados de Concreto. In: *1th Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em concreto pré-moldado*. São Carlos – SP.
- Silva, E. L; Menezes, E. M. (2001). *Metodologia da Pesquisa e Elaboração da Dissertação*, 3ed. Laboratório de Ensino à distância da UFSC. Florianópolis-SC.
- Sinduscon, N. (2011). Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo <http://www.sindusconsp.com.br/> (Acesso em 20/10/2011).
- Spiegel, M. R.; Schiller, J.; Srinivasan, R. A. (2004). *Probabilidade e Estatística*, 2ed. Brasil: Bookman.

Autores

Eduardo Klein Couto. Graduando em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), realiza pesquisa aplicada em gestão de projetos, cadeia de suprimentos, riscos, variabilidade e simulação. Desempenha atividade como consultor de gestão e operacional nas distintas áreas do conhecimento.

E-mail: kleincouto@gmail.com

Mateus Meneghini. Graduando em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), realiza pesquisa no tema previsão de demanda aplicada a setores alimentícios.

E-mail: mateusmeneghini91@gmail.com

Michel José Anzanello. Professor do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PhD em Industrial Engineering pela Rutgers (USA). Desenvolve pesquisa em controle multivariado de processos, gestão da produção e data mining.

E-mail: michel.anzanello@gmail.com

Guilherme Vásquez Etcheverry. Doutorando do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mestre em Engenharia de Produção. Desenvolve pesquisa em programação de tarefas (scheduling).

E-mail: guilherme_etcheverry@yahoo.com.br

Alessandro Kahmann. Mestrando do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mestre em Engenharia de Produção. Desenvolve pesquisa em métodos multivariados para controle de processos.

E-mail: alessandro.kahmann@ufrgs.br

Recibido: 28/08/2013

Aceptado: 15/12/2013