



APLICAÇÃO DIDÁTICA DE SIMULAÇÃO E PROTOTIPAGEM NO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP) NA CONSTRUÇÃO CIVIL

STUDY OF SIMULATION AND PROTOTYPING IN PRODUCTION PLANNING AND CONTROL (PPC) IN CIVIL CONSTRUCTION

Camila Isaton¹, Joao Paulo Maciel de Abreu², Diego Antonio Custódio³,
Fernanda Fernandes Marchiori⁴, Antonio Edésio Jungles⁵

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v44p491-506.2025

RESUMO: Os atores envolvidos em projetos de construção civil, inclusive estudantes dos cursos de Engenharia Civil e de Arquitetura, frequentemente têm dificuldades em compreender os produtos que serão gerados e acabam se equivocando quanto ao Planejamento e Controle da Produção (PCP). Mecanismos visando mudar esse fato são, por vezes, caros e difíceis de implementar. Diante disso, o objetivo da presente pesquisa foi propor um mecanismo acessível de simulação de PCP, por meio de prototipagem, utilizando materiais de baixo custo. O método de pesquisa envolveu a prototipagem da execução de edificações unifamiliares em escala reduzida e a medição de tempo na execução dos protótipos. Observou-se que a prototipagem contribuiu para o processo de aprendizagem, o que resultou na melhoria do tempo bem como no ganho de qualidade dos protótipos construídos na simulação. Como contribuição, a pesquisa destaca a combinação da prototipagem e simulação para o aperfeiçoamento, aprendizagem e comunicação dos envolvidos na concepção do PCP dos empreendimentos na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: prototipagem; Planejamento e Controle da Produção; simulação; construção civil.

ABSTRACT: The stakeholders involved in civil construction projects, including students of Civil Engineering and Architecture courses, often have difficulty understanding the products that will be generated and end up making mistakes regarding Production Planning and Control (PPC). Mechanisms created at changing this fact are sometimes expensive and difficult to implement. In view of this, the aim of this research was to propose an accessible PPC mechanism, through prototyping using low-cost materials. The research method involved prototyping the execution of single-family residential buildings on a reduced scale and measuring the time taken to execute the prototypes. It was observed that prototyping contributed to the learning process, which resulted in improved time as well as improved quality of the prototypes built in the simulation. As a contribution, the research highlights the combination of prototyping and simulation for the improvement, learning and communication of those involved in the design of the PPC of Civil Construction projects.

KEYWORDS: prototyping; Production Planning and Control; simulation; civil construction.

¹ Professora do Magistério Superior, Dr^a, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, camilaisaton@utfpr.edu.br

² Professor Substituto, Dr., Universidade Federal de Santa Catarina, joaopaulojpma@hotmail.com

³ Professor do Magistério Superior, Dr., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, custodio@utfpr.edu.br

⁴ Professora do Magistério Superior, Dr^a, Universidade Federal de Santa Catarina, fernanda.marchiori@ufsc.br

⁵ Professor Titular Colaborador, Dr., Universidade Federal de Santa Catarina, ajungles@gmail.com



INTRODUÇÃO

Os *stakeholders* envolvidos na construção civil, com suas diferentes perspectivas e níveis de envolvimento, podem perceber as atividades de Planejamento e Controle da Produção (PCP) de forma igualmente distinta, gerando problemas ao longo do projeto (Olivieri, 2016). Falhas de percepção sobre PCP podem ocorrer, inclusive, entre profissionais das áreas de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), o que exige que mecanismos visando reverter essas falhas sejam desenvolvidos e aplicados como recursos de aprendizagem desde a graduação (Araújo *et al.*, 2024), podendo ser replicados em empresas construtoras.

Um recurso para compreender melhor sobre PCP nas diferentes indústrias é o uso da prototipagem, isto é, a construção de um modelo que reflete um exemplar do produto final (Müller e Saffaro, 2011; Hansen *et al.*, 2020). Apesar disso, em razão da natureza única dos produtos de construção, uma pré-produção a cada projeto se torna difícil, ou mesmo impossível, devido à impossibilidade de reprodução fiel e em escala real do produto (Saffaro, 2007).

A partir desse contexto, o objetivo desta pesquisa foi propor um mecanismo acessível de simulação de PCP, por meio de prototipagem utilizando materiais de baixo custo. Ao longo do desenvolvimento do protótipo, que simula a execução real, foram coletados dados relevantes e realizadas análises, as quais serão descritas detalhadamente nas seções de metodologia e de resultados do presente artigo.

REFERENCIAL TEÓRICO

Estudos de tempos

A racionalização do uso do recurso laboral partiu de diferentes pesquisas, tais como a de Frederick Winslow Taylor (1856-1915), que trata dos tempos e movimentos em ambientes fabris. Na indústria da construção civil, não apenas a distribuição de tempos, mas também o grau de especialização e de polivalência, bem como a ordem de execução das atividades, têm ensejado pesquisas voltadas à melhoria do PCP (Abreu *et al.*, 2023).

Em um estudo de tempos e de métodos, são desenvolvidos um sistema de trabalho e um método preferido. Este é padronizado e, então, verifica-se o tempo



gasto por uma pessoa qualificada para executá-lo e orientar um trabalhador na aplicação desse método (Barnes, 1977; Correa, 2023). Esse tempo pode ser classificado como **básico**, quando se refere a uma ampla gama de condições, ou como **padrão**, quando definido mediante um método específico de realização de trabalho (Slack, Chambers e Johnston, 2002). O método atualmente adotado na produção, quando se inicia o estudo de tempos, é tomado como método-padrão (Toledo Júnior, 2004).

Como ferramentas, utiliza-se cronômetros para medições de tempos, feitas no local de trabalho ou realizadas por meio de vídeos das tarefas executadas. A representatividade estatística das medidas é alcançada com o aumento do número de medições aliado aos cuidados com a confiabilidade dos equipamentos utilizados e ao respeito aos tempos de folga do operador (Davis, Aquilano e Chase, 2001; Ricci, 2013). Com a finalização do estudo de tempos cronometrados é possível estabelecer padrões para as programações de produção, permitindo assim o PCP, utilizando recursos fabris com eficácia (Rocha Júnior, 2014).

Prototipagem e simulação

Para Ulrich e Eppinger (2012), um protótipo é a aproximação do produto ou parte dele. Esses autores afirmam que formas diversas de representação podem ser empregadas, desde esboços, modelos matemáticos por meio de simuladores e até mesmo a pré-produção total do produto. A atividade de desenvolver um protótipo, ou seja, a prototipagem, é aplicada durante as etapas do desenvolvimento do produto e tem como objetivo reduzir a incerteza associada ao produto e ao seu processo de produção (Saffaro, 2007). Para fins educacionais, a prototipagem proporciona recursos funcionais, os quais podem ser de baixo custo, adequados ao contexto educacional no campo das Engenharias – como no ensino de um empreendimento de construção civil ou de um sistema elétrico de potência, por exemplo (Revoredo, 2025; Carvalho, Ferreira e Garcia, 2023).

Uma importante propriedade da prototipagem é a sua natureza experimental, a qual permite diversas tentativas para a produção do protótipo, bem como avaliação e correção, até que sejam atingidas as perspectivas do cliente (Beynon, Tudhope e Mackay, 1999). Outro benefício, segundo Grimm (2004), é a melhoria na transmissão de informações entre os agentes envolvidos no desenvolvimento do produto, entre os quais podem ser citados os clientes, os investidores, os diretores, os projetistas, os fornecedores e os responsáveis pela produção. O mesmo autor



destaca que, entre essas informações a serem transmitidas, incluem-se falhas e erros que venham a existir no produto.

Observa-se que os princípios da prototipagem supracitados, utilizados para justificar o uso dos protótipos, aplicam-se a contextos que, ao buscarem se beneficiar pelo emprego desse recurso, objetivam atingir a redução de riscos, diminuir as incertezas e atender aos prazos. Segundo Grimm (2004) e Canciglieri Júnior, Selhorst Júnior e Sant'Anna (2015), os critérios para a escolha da tecnologia de prototipagem a ser empregada devem levar em conta aspectos técnicos, de custo e de tempo de resposta.

A prototipagem em projetos de engenharia possibilita o atendimento de vários propósitos, sendo os mais comuns a verificação e a validação de pressupostos, cálculos e decisões durante o desenvolvimento do produto, além de possibilitar a obtenção de resposta a duas questões fundamentais: “Isso funcionará?” e “Quão bem ele atende ao que o cliente precisa?” (Ulrich e Eppinger, 2012). Ressalta-se que, para além da validação de ideias, a prototipagem pode ser usada também para estimular a imaginação (Hargadon, 1997) ou como uma ferramenta cujo intuito é “construir para pensar” (Brown, 2009).

Segundo Silva *et al.* (2016), a simulação deve ser compreendida como a reprodução de uma operação ou de um processo pertencente ao mundo real. Ainda segundo esses autores, a simulação reproduz uma história artificial de um sistema visando a análise de suas características operacionais. Essa simulação pode se dar quanto à reprodução de tarefas ou elementos ou de um conjunto numérico para fins de validações de modelos matemáticos (Isaton *et al.*, 2023). Por fim, para Gramigna (2008), a simulação é caracterizada por uma situação em que o cenário simulado é representado por modelos reais, sendo possível a reprodução do cotidiano.

METODOLOGIA

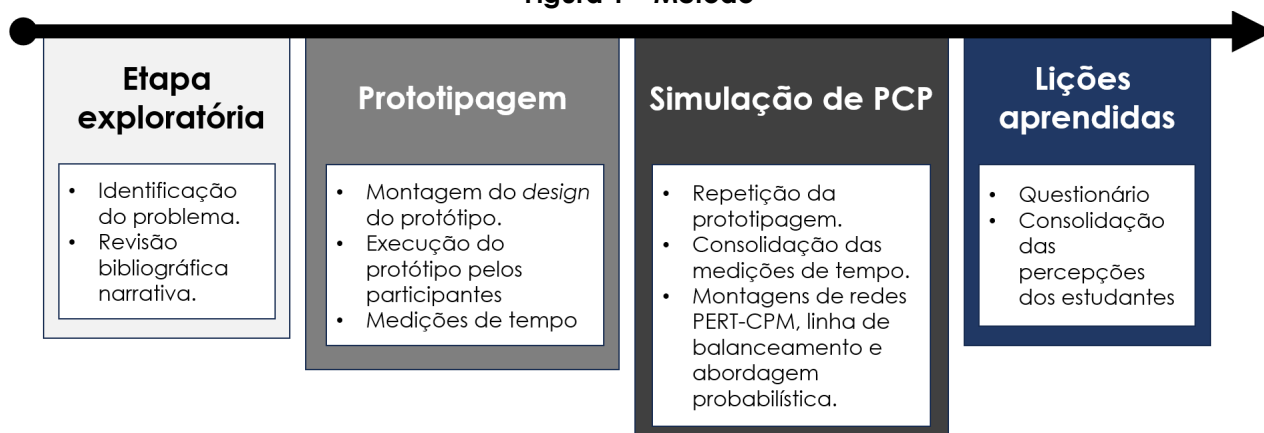
A presente pesquisa pode ser classificada como aplicada (Silva e Menezes, 2005), por tratar de um problema prático, o ensino de PCP em projetos de construção civil. Emprega-se abordagens **qualitativa**, ensino e significados; **quantitativa**, à medida que são utilizados instrumentos matemáticos de planejamento; e **experimental**, pois foi estabelecido um modelo de prototipagem e simulação, a partir do qual é verificada a aprendizagem dos alunos. Para seu



desenvolvimento, foram realizadas as etapas indicadas na **Figura 1**, as quais serão descritas nos parágrafos a seguir.

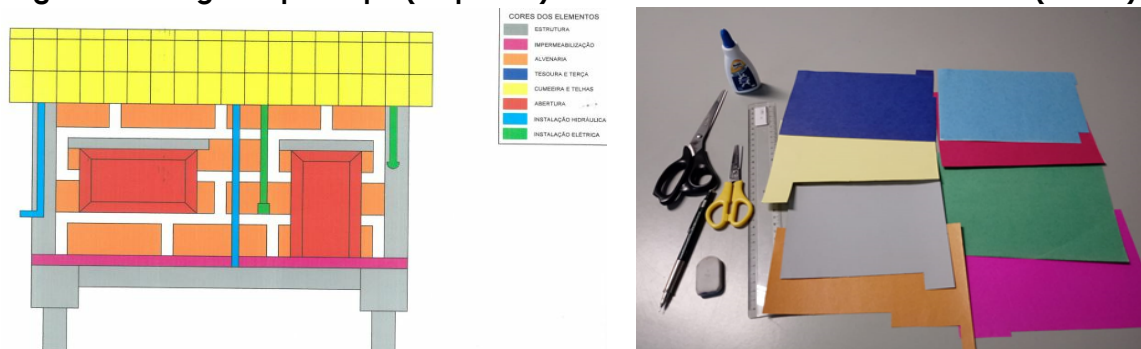
A primeira etapa, denominada exploratória, contemplou a identificação do problema relativo ao entendimento de alunos e de *stakeholders* da construção civil quanto ao PCP. Essa identificação, bem como a compreensão de potenciais ferramentas de apoio, ocorreu por meio de uma revisão bibliográfica narrativa – isto é, sem critério sistemático ou rígido/documentado na escolha de referências (Botelho, Cunha e Macedo, 2011).

Figura 1 – Método



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

A etapa seguinte, de prototipagem, envolveu a definição do *design* do protótipo, realizada no grupo de pesquisa dos autores. Foi definido que o protótipo seria uma residência unifamiliar térrea, com paredes e esquadrias retas e cobertura em telhado com beirais aparentes – correspondente ao modelo mais simplificado de edificação, mas que ainda assim permitiria o estudo do PCP. O *design* constou em um caderno, contendo os elementos de fachada, estrutura, paginação de alvenaria, cobertura, esquadrias, instalações e a visão do protótipo montado (**Figura 2**), configurando especificações equivalentes ao *design* de um produto real, com as devidas adaptações aos materiais e aos instrumentos do protótipo. Os materiais utilizados foram simples e de baixo custo, conforme ilustrado na **Figura 2** (à direita).

Figura 2 – Design do protótipo (esquerda) e materiais de baixo custo utilizados (direita)

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Dez participantes, estudantes de Pós-Graduação em Engenharia Civil, foram divididos em equipes de dois alunos executores, um medidor de tempos e um gerente geral, totalizando três equipes. Em um primeiro momento, todas as equipes, independentemente das habilidades manuais ou das aptidões de cada uma, teriam de montar um protótipo cada uma, com todas as atividades. Dentro de um estudo de tempos, essa etapa corresponde ao período inicial de definir o método de trabalho e conhecê-lo (Rocha Júnior, 2014).

Antes de iniciar, houve a criação de uma Estrutura Analítica de Projeto (EAP). Com a execução das unidades, foram medidos os tempos de execução. Diferentemente de uma obra real, não existiam dados históricos de execução da edificação do protótipo, sendo necessário o conhecimento do tempo de execução para o método de trabalho inicial. Os tempos de execução variam, sendo necessária a abordagem estatística para o planejamento futuro. Desses três tempos, atribuiu-se o maior à duração pessimista (P), o intermediário à duração mais provável (M) e o melhor tempo à duração otimista (O). Esses três tempos, em média ponderada, foram usados para cálculo da duração esperada (E), atribuindo-se peso $1/6$ para P e para O, e $2/3$ para M, o que corresponde à abordagem probabilística de durações no planejamento de obras (Mattos, 2010).

Com o devido conhecimento do produto, na forma do protótipo, as equipes passaram à etapa de simulação de PCP. Essa subdivisão permite reforçar para os alunos a importância do conhecimento do produto, das etapas de produção e dos tempos envolvidos para subsídio ao planejamento, não sendo possível prosseguir sem esses dados. Com isso, foram realizados:

- i) elaboração do diagrama de flechas e blocos;
- ii) nova execução de protótipos, baseando-se na técnica de linha de balanceamento, em que são considerados conceitos como folgas e ritmos, sendo estabelecida uma duração total (DT) de 11.000 s para planejamento. Foram



consideradas seis equipes (quatro equipes com dois membros e outras duas com dois membros) responsáveis por pacotes de trabalho específicos. Tempos foram medidos por cronômetros e dados registrados em papel e/ou planilhas eletrônicas para tratamento estatístico. A definição das equipes considerou a disponibilidade de alunos no dia de execução da pesquisa.

Essa etapa de simulação de PCP também considera as fases previstas em um estudo de tempos. Da bibliografia sobre gestão de obras, a técnica de linha de balanceamento é conhecida como um método melhorado de planejamento, permitindo a obtenção do tempo padrão (definido para um método específico) (Rocha Júnior, 2014). Finalizadas as novas etapas de execução de protótipos e simulações de técnicas de planejamento, os experimentos findam com uma etapa de lições aprendidas. Os alunos responderam a um questionário estruturado e foram estimulados a exporem suas dificuldades e aprendizados.

RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados referentes à simulação e à prototipagem realizadas, inicialmente destacando-se aspectos relativos à execução dos protótipos físicos e à simulação de PCP. Na sequência, são registradas as lições aprendidas, observadas na presente pesquisa.

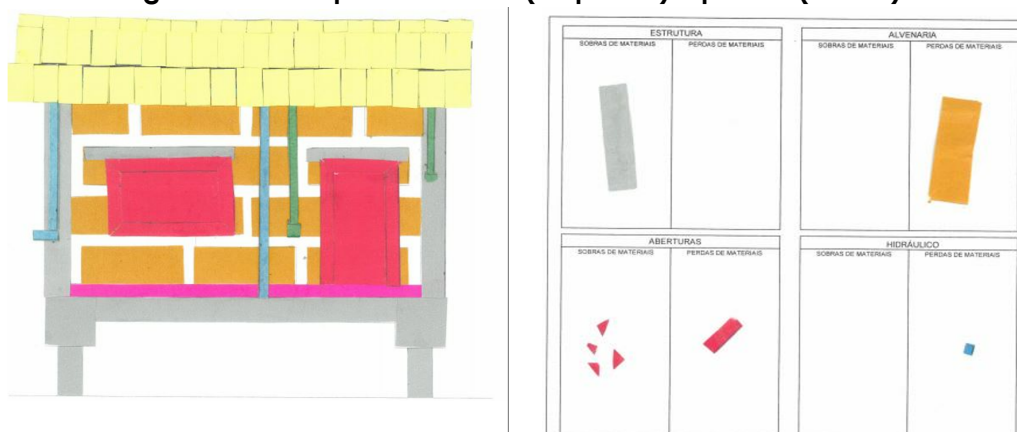
Aspectos na prototipagem das unidades habitacionais e simulação de PCP

Além de possibilitar a prototipagem com materiais baratos e de simples confecção, outros benefícios puderam ser observados, como a possibilidade de demonstrar aspectos de qualidade e geração de resíduos (**Figura 3**). Outro aspecto de gestão trabalhado se refere à complexidade de execução do protótipo. Apesar de existir uma grande sequência de atividades manuais sequenciais na execução de uma edificação real, não seria viável ou adequado considerar todas essas atividades na execução de um protótipo, ou mesmo no planejamento. Simplifica-se a sequência de atividades em grandes grupos, o que permitiu explicar aos alunos o conceito de níveis de planejamento e pacotes de trabalho.

Os pacotes de trabalho que compõem a EAP e as durações obtidas por uma das equipes são apresentados no **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Nas durações obtidas, tem-se medidas com ordem de grandeza compatível com o tempo de aula, diferentemente do que seria possível em uma situação de obra

real, cujas durações possuem ordem de grandeza de dias a meses. Isso também qualifica a prototipagem e a simulação realizadas como instrumento didático. Caso seja necessário tempo menor para execução em aula, o experimento pode ser replicado apenas a partir de sua segunda parte (de simulação de PCP), utilizando-se os dados do **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para fins de planejamento inicial.

Figura 3 – Protótipo executado (esquerda) e perdas (direita)



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

O conceito de especialização do trabalho é abordado em duas etapas do experimento. Na etapa de prototipagem, na forma de equipes com pessoas em atividades operacionais, medição de tempos e gestão. Considerando o aspecto operacional, a diferença de habilidades manuais entre equipes foi favorável ao experimento, visto que permitiu a ocorrência de cenários distintos para a abordagem probabilística.

Quadro 1 – EAP e durações probabilísticas para um dos protótipos

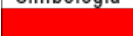


















EAP			Casas			Tempo [s]				Desvio- -padrão
Item	Atividade	Predecessoras	1	2	3	O	M	P	E	
1	Infra e supraestrutura									
1.1	Estacas	-	91	192	184	91	184	192	169,80	16,83
1.2	Blocos de coroamento	1.1	93	132	125	93	125	132	120,80	6,50
1.3	Vigas de baldrame	1.2	91	217	171	91	171	217	165,30	21,00
1.4	Pilares	2.1	133	198	284	133	198	284	201,50	25,17
1.5	Vigas de cinta	1.4	139	134	118	118	134	139	132,20	3,50
2	Impermeabilização									
2.1	Impermeabilizações	1.3	127	211	184	127	184	211	179,00	14,00
3	Vedações verticais									
3.1	Alvenaria	1.5	605	601	618	601	605	618	606,50	2,83
3.2	Vergas e contravergas	1.5	175	164	159	159	164	175	165,00	2,67
4	Estrutura de telhado									
4.1	Treliças (tesouras)	6.2	298	224	189	189	224	298	230,50	18,17
4.2	Terças	4.1	188	299	365	188	299	365	291,50	29,50

EAP			Casas			Tempo [s]				Desvio- -padrão
Item	Atividade	Predecessoras	1	2	3	O	M	P	E	
4.3	Cumeeiras	4.2	656	859	687	656	687	859	710,50	33,83
4.4	Telhamento	4.3	210	256	179	179	210	256	212,50	12,83
5	Esquadrias									
5.1	Portas	3.1	175	295	160	160	175	295	192,50	22,50
5.2	Vistas/alizares/molduras	5.1	495	777	689	495	689	777	671,30	47,00
5.3	Janelas	3.1	52	88	210	52	88	210	102,30	26,33
6	Instalações hidrossanitárias									
6.1	Tubulações	3.1; 3.2	665	799	1268	665	799	1268	854,80	100,50
6.2	Reservatório	6.1	165	152	37	37	152	165	135,00	21,33
7	Instalações elétricas									
7.1	Eletrodutos e pontos elétricos	3.1; 3.2	366	406	400	366	400	406	395,30	6,67
7.2	Luminárias	7.1; 4.3	42	192	100	42	100	192	105,70	25,00

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Partindo-se dessas durações, todos os participantes realizaram a montagem do diagrama PERT-CPM da execução de uma unidade. Então, com o início da etapa de simulação de PCP, técnicas de gestão da produção na construção civil foram aplicadas. Partindo do conceito de planejamento, foram calculados os ritmos (*Tang alfa*) de execução das atividades (**Figura 4**) e estabelecida uma linha de balanceamento planejada.

Figura 4 – Ritmos planejados

Simbologia	Tang. Alfa	Simbologia	Tang. Alfa
 Estaca	0,0032	 Telhas	0,0007
 Bloco de coroamento	0,0041	 Cumeeiras	0,0021
 Viga Baldrame	0,0041	 Portas	0,0024
 Pilar	0,0026	 Vistas	0,0007
 Viga	0,0034	 Janelas	0,0054
 Impermeabilização	0,0028	 Instalações Hidraulicas	0,0006
 Alvenaria	0,0008	 Caixa d'Agua	0,0031
 Vergas	0,0027	 Instalações Eletricas	0,0012
 Tesoura	0,0018	 Interruptores	0,0055
 Terças	0,0018		

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

A linha de balanceamento se baseia em atividades sendo executadas consecutivamente em diferentes unidades repetitivas. A simulação realizada, portanto, seguiu esse conceito, e o experimento foi assim conduzido. As seis



equipes formadas executaram pacotes de trabalho (**Quadro 2**), havendo medições de tempo na execução de um total de seis novos protótipos.

Quadro 2 – Pacotes de trabalho por equipes na execução de unidades repetitivas usando linha de balanceamento

EAP			Equipes					
Item	Atividade	Predecessoras	1	2	3	4	5	6
1	Infra e superestrutura							
1.1	Estacas	-						
1.2	Blocos de coroamento	1.1						
1.3	Vigas de baldrame	1.2						
1.4	Pilares	2.1						
1.5	Vigas de cinta	1.4						
2	Impermeabilização							
2.1	Impermeabilizações	1.3						
3	Vedações verticais							
3.1	Alvenaria	1.5						
3.2	Vergas e contravergas	1.5						
4	Estrutura de telhado							
4.1	Treliças (tesouras)	6.2						
4.2	Terças	4.1						
4.3	Cumeeiras	4.2						
4.4	Telhamento	4.3						
5	Esquadrias							
5.1	Portas	3.1						
5.2	Vistas/alizares/molduras	5.1						
5.3	Janelas	3.1						
6	Instalações hidrossanitárias							
6.1	Tubulações	3.1; 3.2						
6.2	Reservatório	6.1						
7	Instalações elétricas							
7.1	Eletrodutos e pontos elétricos	3.1; 3.2						
7.2	Luminárias	7.1; 4.3						

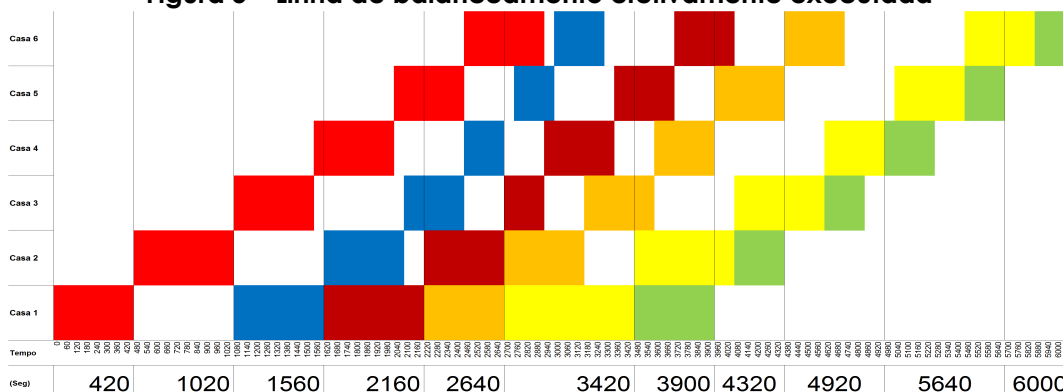
Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Na execução desses seis novos protótipos, a especialização das equipes e a formação dos pacotes de trabalho geraram uma linha de balanceamento efetiva (controle) com 6.180 s de duração total (**Figura 5**). Cada um foi consultado quanto às suas habilidades e devidamente alocado com base nessa informação. Nisso, os alunos puderam observar o efeito positivo da especialização e dos pacotes de trabalho, o que gerou uma redução de prazo em relação à duração total estimada de 11.000 s, além de protótipos de melhor qualidade. Apesar disso, ainda havia oportunidades de aprimoramento, pois as diferenças de ritmo geraram períodos ociosos na execução realizada pelos alunos. Em razão de se tratar de um recurso visual, os alunos facilmente perceberam as oportunidades de aprimoramento assim que a linha de balanceamento efetiva foi plotada.



A execução dos protótipos para estimativas iniciais de durações e a abordagem probabilística, bem como, na sequência, a adoção das técnicas de pacotes de trabalho e linha de balanceamento, com uso de instrumentos simples como materiais de papelaria, planilhas em papel ou eletrônicas, permitiram a todos os alunos a consolidação de conhecimentos sobre PCP de forma acessível. Um ponto de aprimoramento no experimento, cuja necessidade se observou após a sua execução, diz respeito à padronização do uso dos cronômetros pelos diferentes responsáveis pela medição de tempos. Como alguns operadores adotaram medições cumulativas e outros medições a cada atividade, foi necessário um trabalho maior para consolidação dos tempos necessários e cálculo da linha de balanceamento efetiva. Sugere-se, portanto, na replicação desse experimento educacional, que se faça capacitação dos alunos em termos do produto a executar (protótipo) e do cronômetro como ferramenta.

Figura 5 – Linha de balanceamento efetivamente executada



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Lições aprendidas

Os dez alunos participantes do experimento haviam estudado PCP anteriormente e conheciam as ferramentas de gestão então aplicadas. Eles não conheciam o protótipo a ser gerado e quais seriam os passos adotados durante esse experimento. Diante desses dois pontos, suas percepções foram coletadas por meio de questionário estruturado, logo após a finalização das atividades de montagem da linha de balanceamento efetiva (**Quadro 3**).



Quadro 3 – Lições aprendidas durante o experimento sobre PCP

Pergunta	Respostas de alunos (compiladas)
Montagem do protótipo	
Qual o nível de dificuldade na montagem do protótipo?	Fácil em alguns serviços e complexo em outros, como, por exemplo, em instalações devido ao pequeno tamanho das peças.
Quais as principais vantagens observadas durante a montagem do protótipo?	A visualização da ordem dos serviços, a interação entre os participantes e o entendimento de forma mais concreta dos conceitos de PCP.
Quais as principais melhorias para a montagem do protótipo?	Ele não representa a realidade como um modelo virtual, é mais simples e com escala reduzida, e instalações elétricas e hidrossanitárias apresentam-se difíceis de serem executadas na escala reduzida.
PERT-CPM, linha de balanceamento e prototipagem	
Quais as vantagens em se analisar o PERT-CPM por meio da prototipagem?	A observação da sequência dos serviços na prototipagem é evidenciada pelo conhecimento tácito, assim como a visualização dos tempos O, M e P mostra-se de forma notória e a prototipagem também favorece a identificação dos serviços que vão compor o caminho crítico.
Quais as vantagens em se analisar a linha de balanço associada à prototipagem?	Pré-visualizar o ritmo da obra de uma forma simplificada, identificação de ociosidade das equipes, consideração da organização das equipes conforme as frentes de trabalho.
Quais as limitações em se analisar o PERT-CPM associado à prototipagem?	Alguns serviços ficam com o tempo muito curto devido à redução de escala, ou seja, dificuldade de adaptação de visualização dos serviços em segundos.
PCP e prototipagem	
Qual a relação percebida entre prototipagem e PCP?	A prototipagem com a reprodução do produto (edificação) em escala reduzida melhora as reflexões quanto às decisões para a elaboração do PCP.
Que melhorias a prototipagem ocasionou para o PCP?	Aperfeiçoamento da percepção das atividades a serem realizadas, o sequenciamento dos serviços da obra e a aplicação das ferramentas do PCP.
Que limitações a prototipagem trouxe para o PCP?	Dificuldade na exequibilidade dos serviços com os tempos reduzidos a poucos segundos.
Prototipagem e comunicação	
De que forma a prototipagem impactou na comunicação?	A prototipagem evidenciou que a falta de comunicação entre as equipes prejudica o fluxo de trabalho dos serviços da obra.
Quais as vantagens quanto à comunicação durante a prototipagem?	Maior interação entre os participantes das equipes, redução da distância entre as equipes, comunicação visual entre as equipes quanto ao progresso da execução dos protótipos.
Quais as limitações quanto à comunicação durante a prototipagem?	Pouco tempo para <i>feedbacks</i> entre os participantes em serviços com curta duração, em segundos.
Cenários por meio da prototipagem e simulação	
Como a criação de cenários por meio da prototipagem e simulação impacta no PCP?	A prototipagem e a simulação associadas criam os cenários que possibilitam a elaboração de um PCP condizente com a mão de obra disponível e as condições de prototipagem (materiais, espaço e tempo).



Pergunta	Respostas de alunos (compiladas)
Quais as vantagens da criação de cenários por meio da prototipagem e simulação na análise do PCP?	Antecipação de problemas bem como a identificação de ganho de produtividade e fluidez dos serviços.
Quais as limitações quanto à criação de cenários?	A influência direta do impacto da qualidade e produtividade da mão de obra das equipes o que reproduz cenários com variabilidade devido ao fator humano associado à falta de treinamento dessa mão de obra.

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Observa-se, a partir do Quadro 3, que os alunos reconheceram a importância da prototipagem no contexto do experimento, bem como a necessidade de uma comunicação eficaz entre as equipes executoras e as de planejamento – facilitada pelo fato de estarem em uma mesma sala, porém mais difícil em um ambiente amplo de canteiro de obras –, da capacitação da mão de obra para compreensão do produto a ser entregue e do reconhecimento de que partes pequenas ou tempos curtos dificultam a exequibilidade e afetam o PCP.

Do ponto de vista do processo de ensino, é relevante que esses aspectos estejam contidos dentro do experimento e, por isso, não se sugere, em replicações futuras, que haja alterações, visto que um experimento visa fortalecer o senso crítico e não tornar o processo perfeito. A percepção de uma peça pequena na prototipagem é similar à da escolha de um bloco para vedação na concepção de um produto imobiliário, ou mesmo à substituição de tubulações e peças pequenas em obra pela fabricação de *hacks* com instalações para ambientes molhados. Em uma escala reduzida, o experimento foi capaz de induzir a reflexão dos alunos quanto ao PCP, importante característica de aprendizado esperada em disciplinas de gestão da construção.

CONCLUSÕES

A presente pesquisa cumpre com o objetivo de propor um mecanismo acessível de simulação de PCP, por meio de prototipagem, utilizando materiais de baixo custo. Ao longo deste artigo, demonstrou-se qualidades do experimento realizado, como a possibilidade de explorar conceitos de qualidade, a necessidade de boas especificações do produto, controle de perdas, importância da qualificação de mão de obra e comunicação em campo.

O efeito da especialização não foi explorado em todas as partes do experimento. Esse aspecto, porém, ajustou-se às necessidades dos dados para as



primeiras estimativas de tempo por abordagem probabilística e, depois, pelas otimizações de PCP oferecidas na técnica de linha de balanceamento. Outros aspectos relativos ao experimento também tiveram finalidade didática de contribuir à visão crítica dos alunos, tais como tempos de execução muito apertados ou peças de tamanho reduzido.

A construção da linha de balanceamento efetiva foi um recurso didático similar ao que seria obtido com dados numéricos de outras fontes, porém com a possibilidade de criar memórias de aprendizado, importante para alunos que aprendem por experiências. Na linha de balanceamento obtida no experimento, por mais que a duração total tenha sido inferior à planejada, ainda foram nítidas oportunidades de melhoria de planejamento, observadas pelos alunos.

Com base nas limitações do estudo realizado, sugere-se que todos os cronômetros utilizados durante a realização do experimento sejam iniciados ao mesmo tempo, tendo como marco “zero” a primeira atividade realizada, independente da equipe a ser medida estar ou não atuando. Dessa forma, os valores obtidos serão todos fornecidos em formato cumulativo e “amarrados” ao prazo global do experimento, facilitando sua utilização e dentro de uma única linha temporal. Isso evita, ao contrário do que ocorreu no presente experimento de ensino, que seja necessário realizar conversões numéricas para unir as atividades na linha de balanceamento efetiva e torna o experimento mais célere.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se um aperfeiçoamento nos *templates* utilizados, especialmente os destinados à coleta de dados. Isso permitiria aperfeiçoar a formatação, indicando as instruções e critérios que devem ser observados, com vistas a evitar possíveis interpretações variadas pelos aferidores, e, por conseguinte, dados incoerentes ou incompletos. Também se sugere a replicação do experimento em mais grupos de alunos, contemplando graduação e mesmo em equipes de planejamento em empresas construtoras, visando seu aprimoramento, dentro de um contexto de pesquisa do tipo *Design Science Research* (DSR).

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.



REFERÊNCIAS

- ABREU, J. P. M. *et al.* Mão-de-obra polivalente: uma discussão desse elo perdido da lean construction em empresas brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 4, p. 7-23, 2023.
- ARAÚJO, F. B. F. *et al.* "Canteiro de obras enxuto": jogo didático para aprendizado dos princípios enxutos. **Anais... Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 20, 2024, p. 1-13. Porto Alegre: Antac, 2024.
- BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos: projeto e medida de trabalho**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- BEYNON, B.; TUDHOPE, D., MACKAY, H. Information systems prototyping in practice. **Journal of Information Technology**, v. 14, p. 107-120, 1999.
- BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. de A.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**. v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.
- BROWN T. **Change by design**, New York, Harper Business, 2009.
- CANCIGLIERI JÚNIOR, O.; SELHORST JÚNIOR, A.; SANT'ANNA, A. M. O. Método de decisão dos processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 2, p. 345-355, 2015.
- CARVALHO, M. de S.; FERREIRA, C.C.; GARCIA, E. D. Desenvolvimento de uma maquete do sistema elétrico de potência para fins educacionais. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 42, p. 288-299, 2023.
- CORREA, L.E.A. Estudo de tempos e movimentos. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, v. 11, n. 19A, p. 22-42, 2023.
- DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentos da Administração da Produção**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- GRAMIGNA, M. R. M. **Jogos de empresa e técnicas de vivência**. São Paulo, Makron Books, 2008.
- GRIMM, T. **User's guide to rapid prototyping**. Society of Manufacturing Engineers, 2004.
- HANSEN, C. A. *et al.* Fostering prototyping mindsets in novice designers with the prototyping planner. **Proceedings... International Design Conference**, 2020, p. 1725-1734. Cambridge, 2020.
- HARGADON, A. **Technology brokering and innovation in a product development firm**. Administrative Science Quarterly, 1997.
- ISATON, C. *et al.* Estimativa paramétrica de custos de esquadrias para obras prisionais utilizando Simulação de Monte Carlo. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 3, p. 63-82, 2023.
- MATTOS, A. D. **Planejamento e Controle de Obras**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2010.
- MÜLLER, A. L.; SAFFARO, F. A. A prototipagem virtual para o detalhamento de projetos na construção civil. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 1, p. 105-121, 2011.
- OLIVIERI, H. **Integração de sistemas de Planejamento e Controle da Produção para Empreendimentos da Construção Civil**. 2016. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.



- REVOREDO, T. C. Simulação e prototipagem de baixo custo como apoio ao ensino de Engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 44, p. 15-34, 2025.
- RICCI, M. **Estudo de Tempos e Métodos**. UBC, 2013.
- ROCHA JÚNIOR, A. H. da. **Estudo de tempos e movimentos como ferramenta para a melhoria da produtividade nas obras**. 2014. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- SAFFARO, F. A. **Uso da prototipagem para gestão do processo de produção da construção civil**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- SILVA, E. L. da.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed., Florianópolis: UFSC, 2005.
- SILVA, R. R. L. *et al.* O uso de jogos e simulação como métodos alternativos de ensino em Engenharia no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Espacios**, v. 37, n. 5, p e-03, 2016.
- SLACK, N; CHAMBERS, S; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 6. Ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- TOLEDO JÚNIOR, I. F. B. **Cronoanálise – Base da racionalização da produtividade da redução de custos**, 2004.
- ULRICH, K.T.; EPPINGER, S.D. **Product Design and Development**. 5. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2012.