XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022
Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Análise de variabilidades e suas implicações: o caso da execução de um muro externo de alvenaria

Variability and its underlying implications: the case study of construction activity on external masonry

Fabrício Borges Cambraia
Universidade Federal de juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil | fabricio.cambraia@engenharia.ufjf.br
Helena Utzig
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre | Brasil | helenautzig@gmail.com
Dimas Rodrigues de Sena
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre | Brasil | dimas.r.s@hotmail.com
Gabriel Donati
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre | Brasil | gabrieldonati@outlook.com.br
Iamara Rossi Bulhões
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre | Brasil | iamara.bulhoes@ufrgs.br

Resumo
Sob o prisma de elementos da teoria da complexidade, este estudo objetiva avaliar as variabilidades e suas implicações em um processo construtivo corriqueiro em obras. Para isso, foi selecionado o processo de execução de um muro externo em alvenaria e pilaretes de concreto de um empreendimento residencial. Usando-se o método FRAM, um modelo foi construído de forma iterativa e participativa por um grupo de cinco profissionais. O principal resultado foi o entendimento das implicações da combinação das variabilidades e da necessidade de construção de estratégias para sua gestão, como a definição de recursos slack e redução do tamanho do lote.

Palavras-chave: Canteiro de obra. FRAM. Complexidade. Variabilidade.

Abstract
In the light of complexity theory, this study assesses variabilities and its implications related to a common activity in construction sites. In order to support this discussion, the execution of external masonry wall and concrete pillars was selected as an applied example. The Functional Resonance Analysis Method (FRAM) has been applied and developed in an iterative and participatory way by a group of five professionals. This study outlines the potential of variability combination and its implications in daily performance at construction sites. Also, results point out the need of management strategies for inherent variability, such as defining slacks and reducing batch size.

Keywords: Site construction. FRAM. Complexity. Variability.

CAMBRAIA, F. B.; UTZIG, H.; SENA, D. R. de; DONATI, G.; BULHÕES, I. R. Análise de variabilidades e suas implicações: o caso da execução de um muro externo de alvenaria. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-8.

INTRODUÇÃO

A construção civil pode ser caracterizada como um sistema sociotécnico (SST), que é composto por quatro subsistemas (técnico, social, organização do trabalho e ambiente externo) que interagem entre si e não possuem limites rigidamente definidos [1]. Essa caracterização pode ser explicada, por exemplo, pela grande diversidade e quantidade de elementos (trabalhadores, equipamentos, materiais etc.), grande número de interações dinâmicas (troca de informações e fluxos de materiais, por exemplo), influência da variabilidade externa (clima, fornecedores, macroeconomia, entre outros) e interdependências entre processos construtivos. Um ambiente diferente desse poderia ser classificado como simples, ou seja, um ambiente estável e de alta previsibilidade, em que o controle seria facilitado pela inexistência ou pelo baixo impacto das variabilidades.

De fato, a complexidade torna a construção civil bastante suscetível às variabilidades, o que contribui para distanciar o trabalho como realizado (*work-as-done* - WAD) do trabalho como imaginado (*work-as-imagined* - WAI) [2]. As variabilidades imprevistas atribuídas à complexidade (por exemplo, clima, fornecedores e acidentes) geram uma lacuna propícia ao surgimento de fenômenos emergentes [3]. Diante disso, ajustes de desempenho são sempre necessários [2]. A compreensão entre a diferença do WAI e o WAD é fundamental para entender quando e como ocorrem os ajustes de desempenho, que passa pela identificação de possíveis fontes de variabilidades e como elas se propagam entre diferentes tarefas.

O Método de Análise de Ressonância Funcional (*Functional Resonance Analysis Method* - FRAM), desenvolvido por [3], vem sendo utilizado em diferentes estudos para apoiar a compreensão entre o WAD e WAI, entender a propagação de variabilidades e o surgimento de fenômenos emergentes [4]. Além disso, possibilita a modelagem de sistemas sociotécnicos complexos, permitindo obter uma visão sistêmica e elementos de complexidade inerente ao sistema [3]. O método utiliza fundamentos teóricos de sistemas complexos e engenharia de resiliência [5].

Com base nisso, este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da propagação de variabilidades e entender fatores de complexidade em processos construtivos percebidos socialmente como tradicionais, de tecnologia construtiva de emprego rotineiro em canteiros de obra, como é o caso de um muro de alvenaria e pilaretes de concreto armado.

MÉTODO

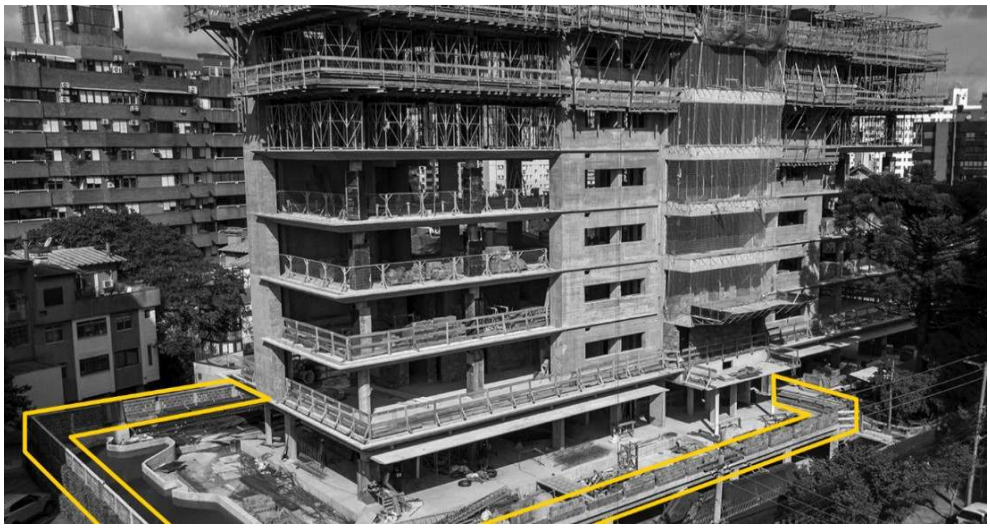
O método utilizado neste estudo é composto de quatro etapas: definição do processo construtivo em um empreendimento residencial com características tradicionais; aplicação do FRAM como ferramenta para modelagem e suporte da avaliação; ajustes e validação do modelo e análise dos efeitos das variabilidades e dos efeitos da complexidade no processo construtivo avaliado.

O estudo foi realizado em um empreendimento residencial de alto padrão, composto por treze pavimentos, com sistema construtivo em estrutura de concreto armado

moldado *in-loco* e vedações verticais em alvenaria. Os dados foram obtidos especialmente por meio de um dos autores desse estudo (designado como gerente a partir de então), que fazia parte do quadro gerencial do empreendimento e atuou ativamente no processo de planejamento e controle da produção.

Para a primeira etapa do estudo, foram definidos critérios para a seleção do processo construtivo a ser estudado: (a) fazer uso de tecnologias de construção socialmente difundidas (tradicionais), (b) não pertencer ao caminho crítico da obra conforme definido pelo planejamento mestre do empreendimento e (c) utilizar materiais e equipamentos de construção de emprego difundido e de fácil acesso. Com base nos critérios supracitados, foi selecionado o processo de execução dos muros de alvenaria e pilaretes no entorno do segundo pavimento da obra, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1: Detalhe da configuração do processo selecionado pelo estudo



Fonte: Site da empresa construtora (adaptado pelos autores, 2021).

Na segunda etapa, o processo selecionado foi modelado através do FRAM, pois se entende que o método é adequado para os propósitos deste estudo, já que possibilita entender como a variabilidade pode se propagar no sistema, a identificar atividades emergentes e a capturar as características fundamentais do trabalho real. O FRAM foi aplicado segundo as quatro fases principais descritas por [3]: (i) identificação e descrição das principais funções do sistema, como também a caracterização de seus seis aspectos base (*input*, *output*, pré-condições, recursos, tempo e controle), (ii) caracterização da variabilidade real do cenário e da variabilidade potencial das funções, (iii) indicação da possibilidade de ressonância funcional (interação não esperada de variabilidades) através da análise do acoplamento das funções e suas variabilidades potencial e real e (iv) proposição de contramedidas para monitorar e influenciar a variabilidade.

Na fase (i) foram usadas especialmente três fontes de evidência para a modelagem das funções e seus aspectos: observação participante do gerente, entrevistas abertas com profissionais envolvidos e análise de documentos (registros de planejamento de curto prazo, instruções de trabalho, projetos arquitetônicos e registros fotográficos). As três fases subsequentes (ii, iii e iv) foram construídas por meio de um processo

iterativo participativo, que envolveu quatro pesquisadores e o gerente (grupo executor do modelo), e foi desenvolvido por meio de quatro reuniões de aproximadamente duas horas. Após cada reunião, era designado um responsável para inserir as principais decisões do grupo no *software* de modelagem.

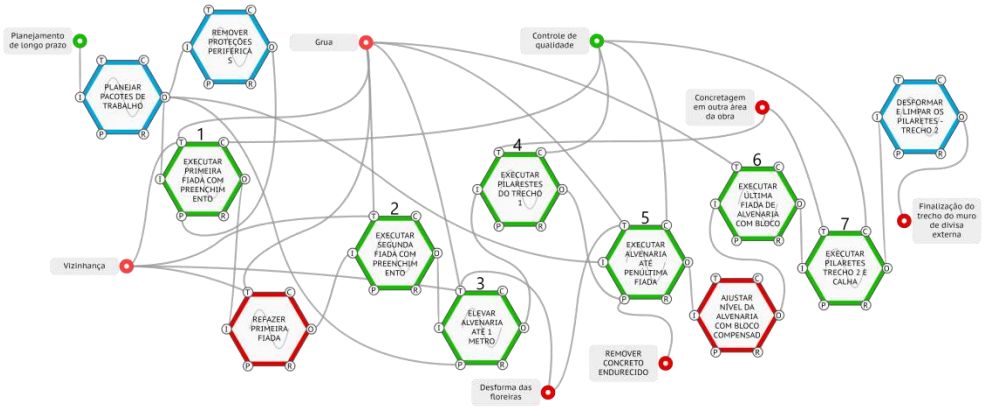
Com o modelo base definido, a terceira etapa consistiu em sua validação. O grupo executor do modelo identificou diferentes necessidades de refinamentos, que ocorreram ao longo de seis reuniões com duração aproximada de três horas cada. Como um modelo é sempre uma representação simplificada da realidade, a diversidade de perspectivas possibilitou novas leituras do modelo que resultaram em refinamentos. Por exemplo, foi revisada a sequência entre as etapas do processo de execução do muro, os fatores que potencializaram as variabilidades ocorridas e aqueles que contribuíram para as diferenças entre o WAI e WAD no contexto modelado. Todo o processo de modelagem até a versão final totalizou aproximadamente de 32 horas de trabalho, divididas entre entrevistas e reuniões para compreensão do problema, modelagem, validação do modelo e análises.

Por fim, na última etapa foram analisadas as variabilidades identificadas e principalmente os efeitos da combinação das mesmas no trabalho como realizado, o que, por sua vez, evidenciou os efeitos de elementos de complexidade do sistema modelado.

MURO DE ALVENARIA: VARIABILIDADES E IMPLICAÇÕES

A Figura 2 apresenta o modelo FRAM final do processo estudado, que resultou na definição de vinte funções, sendo oito classificadas como funções de borda e doze como funções específicas do processo. As funções de borda foram definidas de modo a restringir os limites do sistema e são representadas no modelo pelas geometrias retangulares (planejamento de longo prazo, vizinhança e controle da qualidade, etc.). Já as funções ilustradas por hexágonos representam as atividades planejadas ou que surgiram da necessidade de adaptação dos trabalhadores frente às variabilidades do sistema. Os seis aspectos das funções são representados pelos círculos em cada uma das extremidades dos hexágonos e definem a forma pela qual se relacionam com um ou mais aspectos de outras funções.

Figura 2: Modelo FRAM para o processo de execução do muro externo de alvenaria



Fonte: os autores (2021).

Cabe destacar ainda que a representação de uma onda no interior de alguns hexágonos indica a presença de variabilidades na saída da função, podendo ser classificadas como variabilidades de tempo, de precisão ou ambos. A linha entre as funções representa os acoplamentos, ou seja, a forma como duas funções se relacionam entre si, sendo um caminho possível para propagação da variabilidade no sistema.

As doze funções específicas do processo modelado foram classificadas por meio de três cores (azul, verde e vermelho), que denotam similaridades entre elas. As funções em azul representam atividades de planejamento ou de suporte para a execução do muro, isto é, são atividades que não modificam o produto em si. As funções em verde representam atividades de conversão, sendo etapas prescritas para a execução do muro externo de alvenaria na empresa (WAI). Essas funções foram numeradas de 1 a 7, seguindo a ordem cronológica de execução. Já as funções em vermelho representam atividades não inicialmente previstas, mas que emergiram pela combinação de variabilidades, salientando-se que só foram identificadas a partir da modelagem do WAD. Com base em [6], por analogia, essas atividades (ou funções) podem ser chamadas de atividades (ou funções) que não agregam valor.

A primeira função cujas variabilidades se combinaram de forma a resultar em uma saída não satisfatória foi a função 1 (executar a primeira fiada com preenchimento). Isso pode ter ocorrido devido à combinação das variabilidades de tempo e de precisão. Por exemplo, a primeira variabilidade (de tempo) pode ter sido causada pela paralisação dessa atividade para operação da lança da grua na área de execução do serviço e também pela necessidade de acelerar a execução do muro para reduzir o tempo de exposição dos trabalhadores aos riscos de queda de altura, o que foi intensificado após denúncias dos vizinhos que perceberam tais riscos após a remoção das proteções periféricas para a execução das primeiras fiadas do muro. Além disso, a dificuldade de sincronizar as atividades da equipe de segurança da obra, responsável por todas as demais proteções periféricas da obra, com as atividades da equipe de alvenaria pode também ter influenciado a variabilidade de tempo. Já a segunda variabilidade (de precisão) ocorreu especialmente em decorrência dos desvios dimensionais das vigas de borda (sobre as quais são assentados os blocos do muro) e da decisão de se executar a marcação da primeira fiada de alvenaria esticando a linha guia entre dois pontos distantes entre si, o que ocasionaria uma espessa camada de revestimento para correção do problema. Em virtude da combinação dessas variabilidades, optou-se pela correção do problema identificado após a marcação da primeira fiada do muro por meio da função “refazer primeira fiada”, especialmente reduzindo-se o lote de execução e, consequentemente, a espessura de revestimento a ser executado posteriormente. Essa decisão também possibilitou uma menor área de exposição ao risco de queda de altura, uma vez que as proteções foram removidas também em lotes menores.

As decisões relativas ao fornecimento de concreto para as funções de concretagem de elementos estruturais também repercutiram nas variabilidades de tempo. O concreto utilizado para a função 4, por exemplo, era decorrente de sobras de outras concretagens realizadas, em função do volume necessário para o serviço ser muito

pequeno em comparação às demais concretagens que ocorriam na obra. Os efeitos da variabilidade no fornecimento do concreto foram evidenciados por meio de uma determinada situação na qual foi entregue a sobra de concreto próximo do horário de almoço, o que resultou na perda de trabalhabilidade do material, ocasionando necessidade de retrabalhos para a quebra e transporte do concreto endurecido até a caçamba de resíduos da obra.

A função 5 (executar alvenaria até penúltima fiada) também apresentou resultados não satisfatórios. Dentre as variabilidades de tempo, pode-se citar a não consideração do tempo necessário para a desforma das floreiras em concreto armado próximas à área de execução da alvenaria do muro e novamente as pausas necessárias para a operação da grua. Em relação à precisão, observou-se a necessidade de ajustes em função da variabilidade dimensional introduzida pela presença de uma viga invertida, que somada à carência de conhecimento pleno dos profissionais envolvidos no serviço da elevação de alvenaria, os levaram a cortar os blocos da primeira fiada para manter o mesmo nível nos dois lotes da alvenaria nas primeiras fiadas (sobre laje e sobre a viga). No entanto, essa tomada de decisão resultou no atingimento incorreto do nível de projeto para os muros na penúltima fiada, conforme mostra a Figura 3. Como solução, fez-se uso de blocos compensadores disponíveis no canteiro para outros processos, o que acarretou em uma nova função não imaginada (ajustar nível da alvenaria com bloco compensador).

Figura 3: Variabilidade de precisão na função "executar alvenaria até penúltima fiada"



Fonte: os autores (2021).

O modelo desenvolvido como meio para avaliar a simplicidade do processo de execução do muro de alvenaria externa indica que, mesmo um processo com tecnologia difundida e etapas aparentemente simples sofre os efeitos das variabilidades, sejam estas previstas ou não. Isso sublinha que o pensamento sob a perspectiva apenas do sistema técnico é bastante limitador. Elementos do contexto e, sobretudo, do ambiente externo e suas interdependências são fontes de variabilidade, o que faz com os resultados obtidos só façam sentido a partir de uma leitura pela ótica de sistemas sociotécnicos. Embora seja possível reduzir os impactos da variabilidade, é impossível eliminá-la.

Por exemplo, embora formalmente planejado como um pacote de trabalho, a execução e os resultados obtidos na execução do muro externo se mostraram altamente dependentes de recursos e fatores não controlados ou monitorados pela

equipe operacional diretamente responsável pela execução. A falta de um planejamento e controle sobre a operação da grua, a dependência de uma equipe externa para a remoção das proteções periféricas, as influências do ambiente externo (no caso, denúncia de vizinhos), as falhas no controle de trabalhos predecessores e a dependência de um controle da qualidade são exemplos de fatores de gatilho que resultaram na necessidade de refazer a primeira fiada.

Contudo, o estudo indica que estratégias para redução dos reflexos negativos das variabilidades podem ser planejadas, como, por exemplo, o uso de recursos *slack* e o aprendizado a partir de pequenos lotes. Segundo [7], o *slack* é um recurso sobressalente de qualquer natureza que esteja disponível e que são idealmente projetados para lidar com a variabilidade. O uso de blocos compensadores é um exemplo positivo de *slack* identificado nesse estudo. Embora não tenham sido pensados para uso nesse processo em particular, a disponibilidade desse material no canteiro em quantidade adicional evitou a paralisação da atividade.

A redução do tamanho do lote também é uma estratégia discutida na literatura [8], visto que possibilita, por exemplo, aprendizado e ajustes no desempenho para os demais ciclos. O modelo indicou que a redução do tamanho do lote contribui para aliviar a variabilidade de precisão na execução da primeira fiada, como também mitigar riscos aos profissionais em relação à segurança do trabalho nas frentes de produção.

Além disso, decisões de *trade-off* em sistemas sociotécnicos complexos são comuns e buscam, sempre que possível, minimizar os reflexos negativos no sistema como um todo. Contudo, os efeitos colaterais de uma decisão em sistemas complexos nunca são totalmente conhecidos, seja por limitações de recursos ou mesmo pela natureza de difícil previsão das possibilidades de interação. Por exemplo, a concretagem com sobras de concreto oriundas de outros processos da obra representou uma fonte de variabilidade para o processo modelado, embora tenha sido uma decisão de *trade-off* com vistas ao aproveitamento de recursos disponíveis e de curto prazo de validade.

Por fim, a avaliação realizada, em certa medida, traz evidências empíricas de elementos da complexidade da construção (incertezas, proximidade física entre processos e compartilhamento de recursos entre processos, por exemplo) e da propagação da variabilidade de um processo construtivo percebido socialmente como tradicional e de tecnologia construtiva tida como simples. Todavia, quando esse processo é investigado sob a perspectiva de sistemas sociotécnico complexo, as nuances contextuais e as especificidades locais (representadas pelo WAD) mostram que o WAI representa apenas um modelo simplificado de uma realidade com fins de se obter certo controle.

CONCLUSÕES

Este estudo apresenta uma avaliação dos efeitos de variabilidades, sua propagação entre funções e implicações na gestão da execução de um processo construtivo

tradicional, no caso específico de um muro de alvenaria com pilaretes de concreto. Por meio do uso do FRAM para a modelagem do processo de execução foram identificados fatores que agregaram complexidade ao processo através de funções emergentes do sistema: solicitações da vizinhança, operação da grua e desforma das floreiras. As variabilidades dessas funções emergentes, quando combinadas com as variabilidades de tempo e precisão inerentes às funções do trabalho como imaginado, evidenciaram a necessidade de adaptação do sistema para que a execução do muro pudesse ser finalizada. Por exemplo, a função "ajustar nível da alvenaria com bloco compensador" tornou-se necessária para corrigir os efeitos da combinação de variabilidades de precisão, conforme modelado no trabalho como executado.

Deste modo, sob a perspectiva de um sistema sociotécnico complexo, até as atividades mais simples apresentam variabilidades, cujas consequências podem ocasionar em perdas no processo construtivo e impactos prejudiciais ao sistema como um todo. Os efeitos negativos das variabilidades, por sua vez, podem ser mitigados por meio de ações gerenciais, como a redução do tamanho do lote e a adoção de recursos *slacks*.

Destaca-se a importância do desenvolvimento de mais estudos com o objetivo de avaliar a aplicação de ferramentas no gerenciamento de obras, as quais promovam a redução das variabilidades presentes no contexto da construção civil, bem como desenvolvam mecanismos para mitigar os efeitos negativos das variabilidades nos canteiros de obra.

REFERÊNCIAS

[1] HENDRICK, H. W.; KLEINER, B. M. **Macroergonomics: an introduction to work system design**. Santa Monica: Human Factors and Ergonomics Society, 2001.

[2] HOLLNAGEL, E.; HOUNSGAARD, J.; COLLIGAN, L. **FRAM - The Functional Resonance Analysis Method - a handbook for the practical use of the method**. Centre for Quality. Region of South Denmark, 2014.

[3] HOLLNAGEL, E. **FRAM: the Functional Resonance Analysis Method: Modelling Complex Socio-technical Systems**. Burlington, Ashgate, 2012.

[4] RICCARDO, P.; GRAVIO, G.D.; PINTO, G.D.; COSTANTINO, F. **FRAM for Systemic Accident Analysis: A Matrix Representation of Functional Resonance.** International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering v. 25, n. 1, p. 1850001, 2017.

[5] HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D.; LEVESON, N. **Resilience engineering: Concepts and precepts.** Ashgate Publishing, 2006.

[6] KOSKELA, L. **Application of the new production philosophy to construction.** Stanford: Stanford University, 1992.

[7] SAURIN, T.A; WERLE, N.B. **A framework for the analysis of slack in socio-technical systems**. Reliability Engineering and Systems Safety, 167, p. 439-451, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.06.023

[8] RECK, R. H.; BATAGLIN, F. S.; FORMOSO, C. T.; BARTH, K. B.; DIEPENBRUCK, T.; ISATTO, E. L. **Diretrizes para a definição de lotes de montagem de sistemas pré-fabricados de concreto do tipo Engineer-to-order**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 105-127, 2020. https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000100365