Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]GRAFOS MATEMÁTICOS NA ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DA CONSTRUÇÃO NO FORMATO IFC

Mathematical Graphs in the Analysis of Digital Construction Models in IFC Format

Francisco Weslley Paiva Castelo
Universidade de São Paulo | São Paulo, São Paulo | fwpc_eng@usp.br

Bruna Bezerra Vieira
Universidade de São Paulo | São Paulo, São Paulo | brubvieira@usp.br

RESUMO

Este artigo explora a aplicação de grafos matemáticos na análise de modelos digitais da construção no formato IFC (*Industry Foundation Classes*), com foco em projetos de engenharia e infraestrutura. A crescente complexidade dos modelos BIM gera uma volumosa quantidade de dados que, muitas vezes, dificultam a visualização e a interpretação eficiente das relações entre os elementos do projeto. Nesse contexto, os grafos surgem como uma estrutura matemática capaz de representar componentes (vértices) e suas interações (arestas), oferecendo novas possibilidades de análise topológica, organização de dados e verificação de dependências. O estudo apresenta os fundamentos teóricos dos grafos e sua classificação, abordando aplicações práticas na engenharia, como redes de transporte, sistemas estruturais e redes de energia. Em seguida, discute-se como os modelos IFC podem ser convertidos em grafos, permitindo a visualização das relações espaciais e funcionais entre os elementos de um projeto. A utilização dessa abordagem contribui para a otimização do projeto, maior eficiência na coordenação entre disciplinas e melhor entendimento das estruturas interconectadas, fortalecendo a integração de dados e a colaboração em ambientes BIM.

Palavras-chave: BIM; IFC; Grafos matemáticos; Análise de modelos; Engenharia.

ABSTRACT

This paper explores the application of mathematical graphs in the analysis of construction information models in the IFC (Industry Foundation Classes) format, focusing on engineering and infrastructure projects. The increasing complexity of BIM models generates a large volume of data that often hinders the efficient visualization and interpretation of relationships among project elements. In this context, graphs emerge as a mathematical structure capable of representing components (nodes) and their interactions (edges), offering new possibilities for topological analysis, data organization, and dependency verification. The study presents the theoretical foundations of graphs and their classifications, addressing practical applications in engineering such as transportation networks, structural systems, and energy distribution. It then discusses how IFC models can be converted into graphs, allowing the visualization of spatial and functional relationships between project elements. This approach contributes to design optimization, greater efficiency in interdisciplinary coordination, and a better understanding of interconnected structures, thus strengthening data integration and collaboration in BIM environments.

Keywords: *BIM; IFC; Mathematical graphs; Model analysis; Engineering.*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a integração de grafos matemáticos na engenharia tem mostrado grandes avanços, principalmente ao se combinar com sistemas de modelagem da informação da construção (BIM) como o IFC (*Industry Foundation Classes*) (Souza, 2024). O uso de grafos para representar relacionamentos e estruturas interligadas tem uma aplicação significativa no setor da construção, especialmente quando se fala em análise de dados complexos gerados durante a construção e operação de grandes infraestruturas, como ferrovias e rodovias (Wu et al., 2022).

O BIM, e em particular o esquema IFC, oferecem uma representação detalhada de todos os aspectos de um projeto de construção, incluindo os componentes físicos e as suas interações. No entanto, esses modelos geram uma quantidade imensa de dados, muitas vezes difíceis de serem analisados ou visualizados de maneira eficiente (Sacks, 2021). A aplicação de técnicas de grafos para tratar esses dados, especialmente em projetos de grande escala, oferece uma solução inovadora e poderosa, permitindo não só a visualização das

[1]CASTELO, F. W. P.; VIEIRA, B. B. Grafos Matemáticos na Análise de Modelos Digitais da Construção no Formato IFC. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2025.

interações entre os diferentes elementos, mas também a análise de sua topologia e comportamento.

Este artigo aborda a aplicação de grafos matemáticos na análise de dados provenientes de modelos .ifc, abordando como essa ferramenta entende as conexões e dependências entre os elementos de um projeto de construção. Visa aprimorar a análise e tomada de decisão em projetos de infraestrutura e edificações.

2 O QUE SÃO GRAFOS MATEMÁTICOS?

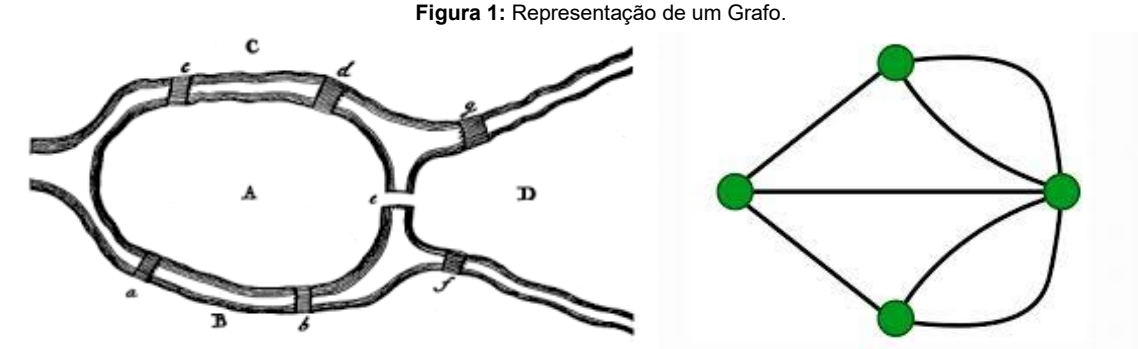
A Teoria dos Grafos tem uma origem relativamente recente na história da Matemática, surgindo no século XVIII. Seu desenvolvimento ganhou destaque no século XX, especialmente devido às suas inúmeras aplicações em outras áreas da ciência e em diversos ramos da própria Matemática. De forma simples, um grafo pode ser compreendido como um conjunto de pontos, chamados vértices, e um conjunto de pares desses pontos, chamados arestas. Cada aresta conecta dois vértices (ou extremos). A forma mais comum de representação de um grafo é por meio de desenhos, onde linhas (arestas) ligam pontos (vértices) sobre um plano.

O termo grafo foi utilizado pela primeira vez por James Joseph Sylvester em um artigo publicado em 1877, na revista Nature. Apesar dessa primeira referência ao termo “grafo” e da formalização do conceito ter ocorrido apenas no século XX, considera-se que a primeira publicação relacionada à Teoria dos Grafos foi a solução de Leonhard Euler para o Problema das Pontes de Königsberg, publicada em 1736.

O problema está relacionado à cidade de Königsberg (na época território da Prússia, hoje chamada Kaliningrado), atravessada pelo rio Prególia. Havia duas grandes ilhas no rio, conectadas entre si e às margens por sete pontes, formando um sistema complexo.

Atualmente, apenas duas das pontes originais ainda existem e são da época de Leonhard Euler.

Figura 1: Representação de um Grafo.



Fonte: Autor

Na cidade de Königsberg, discutia-se a possibilidade de cruzar todas as sete pontes sem repetir nenhuma. A ideia se popularizou e virou uma espécie de lenda local — até que, em 1736, Leonhard Euler demonstrou matematicamente que não era possível realizar esse trajeto, aplicando um raciocínio muito simples e engenhoso. Ele representou os caminhos por retas (arestas) e as regiões da cidade por pontos de interseção (vértices), criando assim o que é considerado o primeiro grafo da história.

Em sua análise, Euler percebeu que para atravessar uma ponte uma única vez, seria necessário que cada ponto (vértice) do grafo tivesse um número par de ligações (arestas) — com exceção, no máximo, de dois pontos: um para início e outro para fim do percurso. Esses dois pontos poderiam ter grau ímpar (número ímpar de arestas). Isso porque:

- Ao entrar por uma ponte, é necessário sair por outra (pares de ligações).
- Um ponto com grau ímpar só pode ser o início ou o fim, pois há um desequilíbrio entre entradas e saídas.

Assim:

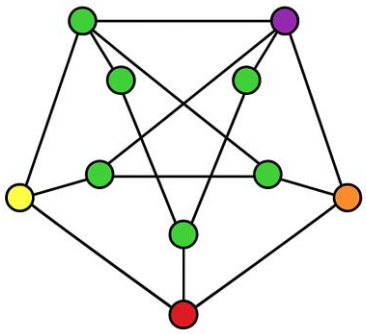
- Se **todos os vértices** têm grau **par**, é possível iniciar e terminar no mesmo ponto.
- Se **dois vértices** têm grau **ímpar**, pode-se começar em um e terminar em outro.
- Se houver **mais de dois vértices com grau ímpar**, **não há caminho** possível que passe por todas as pontes uma única vez.

No caso de Königsberg, todos os vértices tinham grau ímpar, o que torna impossível o percurso proposto e assim resolvendo o grande mistério da época.

Um grafo pode ser classificado de várias maneiras, dependendo de suas características:

- Grafos dirigidos: Quando as arestas possuem uma direção, ou seja, uma aresta de um vértice A para um vértice B é diferente de uma aresta de B para A.
- Grafos não dirigidos: Quando as arestas não possuem direção, ou seja, a relação entre dois vértices é bidirecional.
- Grafos ponderados: Quando as arestas têm um peso associado, representando a força ou custo da relação entre dois vértices.
- Grafos não ponderados: Quando as arestas não possuem pesos.

Figura 2: Representação de um Grafo.



Fonte: Autor

Essas estruturas matemáticas são fundamentais em muitas disciplinas, incluindo ciência da computação, redes de comunicação, biologia, economia, e, claro, na engenharia.

2.1 APLICAÇÕES DOS GRAFOS NA ENGENHARIA

Os grafos têm uma ampla gama de aplicações práticas em engenharia, especialmente quando se trata de modelagem e análise de sistemas complexos. A engenharia moderna lida com sistemas multifacetados e interconectados, como redes de transporte, redes de energia e até mesmo a infraestrutura de edifícios. Aqui estão algumas das aplicações mais relevantes Segundo Wu et al. (2022):

1. Redes de transporte e infraestrutura: Na engenharia civil e na engenharia de transportes, os grafos são usados para modelar redes de transporte, como estradas, ferrovias, redes de metrô e rotas aéreas. Cada vértice representa um ponto de interesse (como uma estação de trem ou uma interseção de ruas), e as arestas representam as conexões ou rotas possíveis entre esses pontos. Com isso, é possível otimizar o fluxo de tráfego, determinar rotas eficientes e até prever congestionamentos ou falhas na infraestrutura.

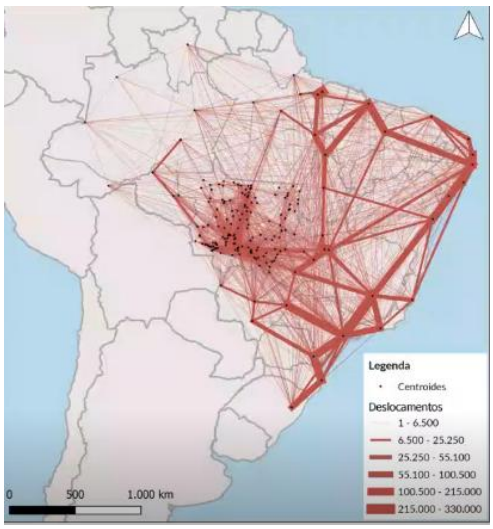
Figura 3: Representação de um Grafo Do Metô de São Paulo



Fonte: Metrô São Paulo

2. Redes de comunicação: Em engenharia de telecomunicações, os grafos são usados para modelar redes de comunicação, onde os vértices representam dispositivos ou terminais de comunicação e as arestas representam os links de comunicação entre esses dispositivos. A análise de grafos ajuda a entender a topologia da rede, identificar os pontos críticos e otimizar a distribuição de dados para garantir a eficiência da comunicação.

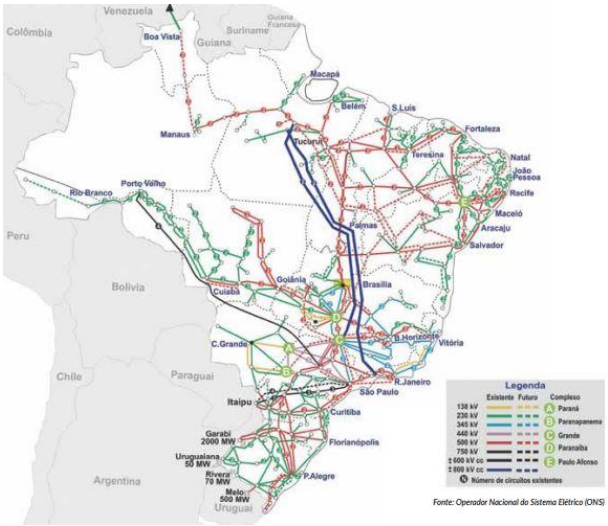
Figura 4: Representação de um Grafo de redes de Comunicação.



Fonte: Systra Brasil, Autor

3. Sistemas de energia: Os grafos ponderados são frequentemente usados para modelar redes de distribuição de energia elétrica, onde os vértices representam as subestações ou transformadores, e as arestas representam as linhas de transmissão. A análise desses grafos permite identificar gargalos, otimizar a distribuição de energia e prever falhas na rede, aumentando a confiabilidade do sistema

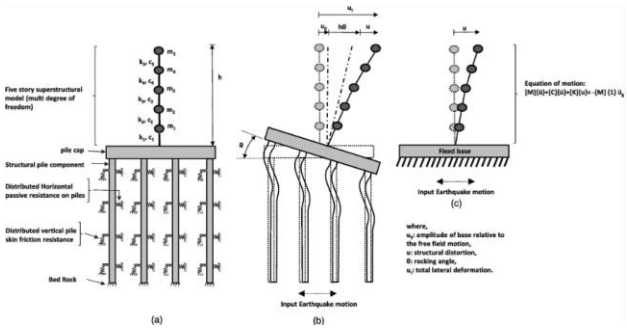
Figura 5: Mapa do sistema de transmissão no Brasil



Fonte: AEAARP Brasil

4. Análise estrutural e design de edifícios: No contexto de engenharia civil e arquitetura, grafos podem ser aplicados para analisar a estrutura de edifícios. Cada vértice pode representar um componente estrutural, como uma parede ou pilar, e as arestas representam as relações de suporte ou dependência entre esses componentes. A análise de grafos ajuda a identificar componentes críticos, otimizar o uso de materiais e garantir a integridade estrutural do edifício.

Figura 6: Representação de um Grafo.



Fonte: compraco.com.br

2.2 **A CONEXÃO ENTRE GRAFOS MATEMÁTICOS E BIM**

No contexto da engenharia de construção e, mais especificamente do BIM, os grafos matemáticos oferecem uma nova abordagem para lidar com a complexidade dos modelos e melhorar a eficiência do processo de projeto e construção. O esquema .ifc representa todos os componentes de um edifício e suas interações. Ou seja, cada componente (como paredes, portas e sistemas de encanamento) é representado por dados digitais, e o IFC descreve como esses dados estão relacionados no modelo.

A aplicação de grafos matemáticos em modelos BIM em formato .ifc, permite que as interações e dependências entre esses componentes sejam analisadas de forma mais eficiente. Por exemplo:

- Vértices: Representam os componentes do edifício (como pilares, vigas, portas).

- Arestas: Representam as relações espaciais e funcionais entre esses componentes, como a conexão de uma parede com o piso ou a relação de suporte entre um pilar e a viga.

Através da análise de grafos, podemos identificar as interações entre os componentes mais críticos e otimizar o design do edifício, garantindo que a estrutura seja eficiente e que os materiais sejam usados da maneira mais econômica possível. Além disso, a visualização de grafos pode melhorar a colaboração entre equipes, pois permite uma compreensão mais clara de como os diferentes elementos do edifício estão interconectados.

3 VISÃO GERAL DO IFC E SUA IMPORTÂNCIA NO CONTEXTO DE BIM

O IFC (*Industry Foundation Classes*) é um esquema aberto e padronizado para representar dados de construção em ambientes BIM. Ele foi desenvolvido pela *buildingSMART*, uma organização internacional que visa promover a interoperabilidade entre diferentes softwares e plataformas no setor de construção. O IFC serve como uma linguagem comum para descrever todos os aspectos de um projeto de construção, desde geometria e propriedades dos materiais, até as relações espaciais entre os diferentes elementos de um edifício.

Um dos principais benefícios do IFC é que ele é independente de plataforma, ou seja, pode ser utilizado por diferentes softwares de BIM, permitindo a troca de dados entre plataformas distintas, sem a perda de informações vitais. Isso é crucial em projetos colaborativos onde várias partes envolvidas (arquitetos, engenheiros, empreiteiros) utilizam diferentes ferramentas de software. O IFC garante que todos possam acessar, modificar e entender os mesmos dados sem problemas de compatibilidade (Wang, 2023).

O IFC organiza os dados de um projeto em uma estrutura hierárquica e baseada em classes. As classes são agrupadas em entidades que representam diferentes componentes de um projeto de construção, como paredes, portas, janelas, estruturas, sistemas, rodovias, ferrovia etc. Cada uma dessas entidades pode ter atributos que descrevem suas propriedades, como dimensões, materiais, localização, entre outros. Além disso, o IFC também descreve as relações entre essas entidades, como as ligações entre as paredes e o teto de um edifício ou a relação de suporte entre um pilar e uma viga.

A principal vantagem dessa estrutura hierárquica é que ela permite uma representação detalhada de todos os aspectos de um edifício ou empreendimento e de como esses aspectos se inter-relacionam. Ao mesmo tempo, a padronização do IFC facilita a integração de dados entre diferentes ferramentas, tornando a colaboração entre diferentes equipes de projeto mais eficiente (Wu et al., 2022).

O BIM não se limita à modelagem geométrica, mas também envolve a gestão de informações sobre o ciclo de vida do empreendimento seja ele um edifício ou uma obra de Infraestrutura, incluindo sua construção, operações e manutenção. Dentro desse contexto, o IFC é fundamental para garantir que todas as informações do projeto sejam bem-organizadas e possam ser compartilhadas e reutilizadas de maneira eficiente. O IFC oferece uma maneira de padronizar as informações do modelo, permitindo que elas sejam compartilhadas entre diferentes plataformas de software, como ferramentas de arquitetura, engenharia estrutural, engenharia elétrica, projetos de infraestruturas viária ou ferroviária, entre outras. Isso permite uma colaboração fluida entre as equipes envolvidas no projeto e, ao mesmo tempo, garante que todos os dados sejam integrados de forma coerente e sem redundâncias.

Além disso, o IFC é essencial para a gestão de informações ao longo de todo o ciclo de vida do edifício. Ele pode ser usado para fornecer informações detalhadas durante a fase de construção e após a conclusão do edifício, para gerenciamento e manutenção contínuos. O uso do IFC em todas as fases do ciclo de vida do projeto ajuda a garantir que as informações sobre o edifício sejam consistentes, precisas e disponíveis para todas as partes interessadas (Zhu et al., 2023).

3.1 DESAFIOS E LIMITAÇÕES DO IFC

Apesar das suas vantagens, o IFC não é isento de desafios. Alguns dos principais obstáculos ao uso do IFC incluem:

1. Complexidade dos modelos: À medida que os projetos de construção se tornam mais complexos, o modelo IFC pode crescer significativamente em tamanho e complexidade. Isso pode tornar o manuseio e a análise de grandes modelos IFC desafiador, exigindo soluções computacionais mais robustas.

2. IFC: Embora o IFC seja um padrão aberto, a interoperabilidade entre ferramentas de software ainda

pode ser um problema. Alguns softwares podem não suportar todos os recursos do IFC ou interpretá-lo de maneira diferente, o que pode causar perda de dados ou inconsistências durante a troca de informações.

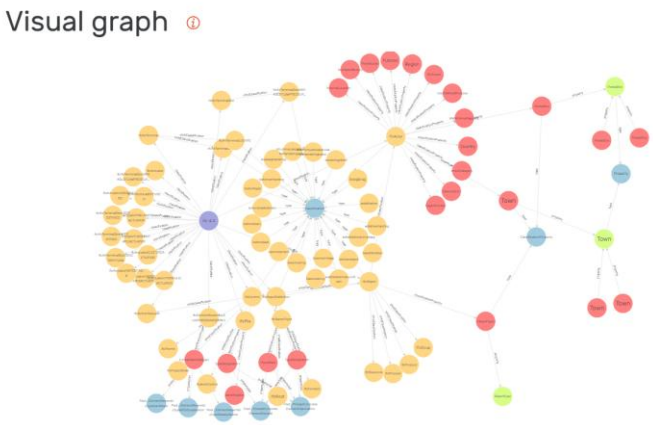
3. Falta de adoção universal: Embora o IFC seja amplamente adotado em muitas regiões, alguns países e empresas ainda não o utilizam de forma consistente, o que pode dificultar a colaboração global em projetos de grande escala.

Esses desafios podem ser mitigados com o uso de ferramentas de análise avançada, como Redes Neurais de Grafos (GNNs) e análise automatizada, que podem ajudar a processar e analisar modelos IFC de forma mais eficiente e eficaz (Wu et al., 2022).

4 APLICAÇÃO DE GRAFOS EM MODELOS IFC

A conversão de um modelo IFC em um grafo matemático envolve transformar os dados do modelo digital de construção em uma estrutura de grafo composta por vértices e arestas. Cada componente do edifício representado no modelo IFC se torna um vértice, e as relações entre esses componentes são representadas por arestas que conectam esses vértices. Esse processo de transformação permite que as ferramentas tradicionais de análise de grafos, como o cálculo de centralidade ou caminhos mínimos, sejam aplicadas ao modelo BIM.

Figura 7: Representação de um Grafo



Fonte: Autor usando o visualizador graphDB.

Este modelo de grafo oferece uma nova forma de visualizar e analisar as interações entre os componentes de um edifício, permitindo detectar pontos críticos, dependências e redundâncias que poderiam passar despercebidos em uma análise tradicional (Wang, 2023).

4.1 ANÁLISE DE CENTRALIDADE PARA IDENTIFICAÇÃO DE COMPONENTES CRÍTICOS

A análise de centralidade em grafos é uma das ferramentas mais poderosas quando aplicada a modelos IFC. Ela permite identificar os componentes mais influentes ou críticos dentro da rede de relacionamentos do edifício. No contexto de um modelo IFC, a centralidade pode ser usada para entender quais componentes estruturais são mais centrais para a estabilidade do edifício ou para a distribuição de energia.

Existem várias formas de calcular a centralidade de um grafo:

- Centralidade de Grau: Mede a quantidade de conexões diretas de um vértice. Um componente com uma alta centralidade de grau é um componente altamente interconectado, como uma coluna central ou um sistema de distribuição de energia.

- Centralidade de Proximidade: Mede a distância média entre um vértice e todos os outros vértices do

grafo. Componentes com alta centralidade de proximidade são comunicações chave ou conexões vitais dentro da rede.

- Centralidade de Intermediação: Mede o número de vezes que um vértice serve como uma ponte entre outros dois vértices. Em um modelo de construção, isso pode representar, por exemplo, um sistema de transporte de energia ou sistemas de segurança que conectam várias partes do edifício.

Esses cálculos ajudam a identificar quais componentes têm maior influência no sistema como um todo, o que pode ser crucial para decisões de *design*, manutenção ou até mesmo em avaliações de risco.

4.2 VISUALIZAÇÃO DE GRAFOS PARA ANÁLISE DE MODELOS IFC

A visualização dos grafos do IFC em plataformas interativas é uma ferramenta poderosa para engenheiros e arquitetos. Ao representar um modelo de construção como um grafo, os profissionais podem facilmente explorar a topologia do sistema, observar as conexões entre os componentes e identificar áreas que necessitam de mais atenção. Ferramentas como *Plotly* ou Neo4j permitem criar visualizações interativas onde o usuário pode:

- Explorar a estrutura: Navegar por diferentes partes do modelo, fazer zoom e analisar as interações entre os componentes.

- Analisar falhas: Identificar pontos de falha estrutural ou sobrecarregados, observando as áreas do grafo com maior centralidade de grau ou com arestas ponderadas que indicam alto risco.

- Tomada de decisões: Usar a visualização para tomar decisões informadas sobre o design do edifício, como otimizar a distribuição de carga ou melhorar a eficiência energética.

Essas visualizações ajudam a comunicar claramente a estrutura do modelo e suas interdependências, facilitando a colaboração entre diferentes equipes de engenharia e arquitetura.

5 APLICAÇÃO EM PROJETOS DE INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA

Em um projeto de infraestrutura ferroviária, a aplicação de grafos matemáticos pode ser usada para representar a rede de trilhos, as estações e as infraestruturas de suporte. Cada estação pode ser representada como um vértice, e as conexões ferroviárias entre as estações seriam as arestas. Além disso, o grafo ponderado pode ser utilizado para calcular o fluxo de tráfego, otimizar roteiros de transporte e até mesmo prever problemas de congestionamento em momentos críticos.

Com a aplicação de Redes Neurais de Grafos (GNN), é possível aprender automaticamente padrões de tráfego e prever falhas na infraestrutura com base em dados históricos e em tempo real, melhorando a eficiência da operação da ferrovia.

5.1 PREPARAÇÃO E LEITURA DO ARQUIVO IFC

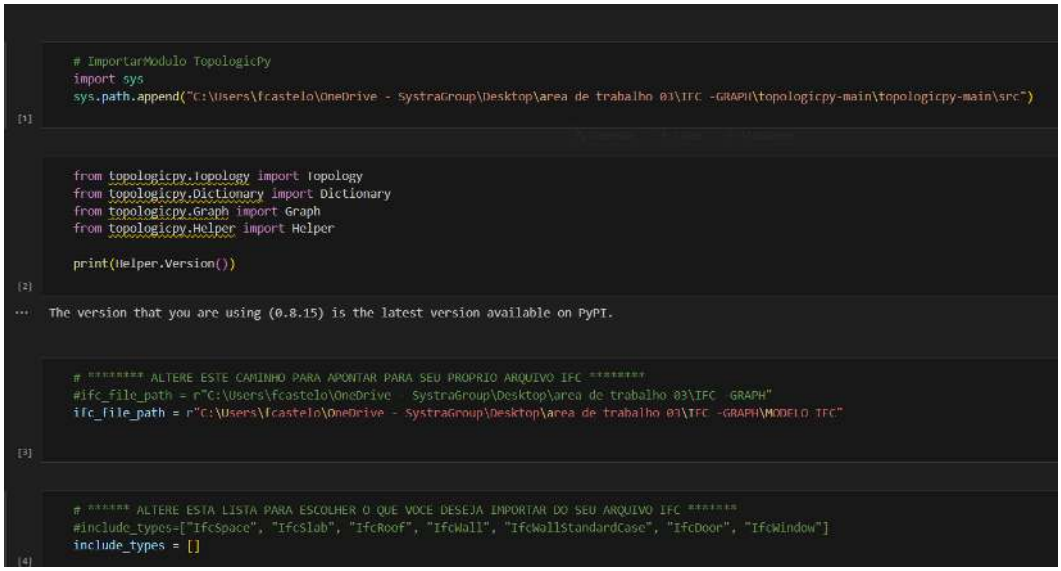
O primeiro passo na aplicação de grafos matemáticos aos modelos IFC é a leitura e extração dos dados do arquivo IFC. Para isso, utilizamos bibliotecas como ifcopenshell ou TopologicPy, que são ferramentas específicas para trabalhar com dados BIM e podem interpretar arquivos no formato IFC.

- Leitura do Arquivo IFC: A biblioteca *ifcopenshell* permite carregar o arquivo IFC e acessar suas entidades internas, como paredes, portas, janelas, sistemas de ventilação, entre outros.

- Extração de Dados: Após a leitura do arquivo, os dados são extraídos e processados para identificar as entidades do modelo. As propriedades geométricas, como dimensões e localização, também são extraídas e associadas a cada componente do edifício.

Para garantir que a estrutura do modelo seja mantida e que as informações sejam extraídas corretamente, é necessário verificar a coerência dos dados e realizar a limpeza de qualquer informação redundante ou malformada presente no arquivo IFC.

Figura 8: Amostragem Inicial do Código usado para gerar os Grafos.



```
# ImportarModulo TopologicPy
import sys
sys.path.append("C:\\Users\\fcastelo\\OneDrive - SystraGroup\\Desktop\\area de trabalho 03\\IFC -GRAPH\\topologicpy-main\\topologicpy-main\\src")

[1]

from topologicpy.Topology import Topology
from topologicpy.Dictionary import Dictionary
from topologicpy.Graph import Graph
from topologicpy.Helper import Helper

print(Helper.Version())

[2]

... The version that you are using (0.8.15) is the latest version available on PyPI.

# ******* ALTERE ESTE CAMINHO PARA APONTAR PARA SEU PROPRIO ARQUIVO IFC *******
#ifc_file_path = r"C:\Users\fcastelo\OneDrive - SystraGroup\Desktop\area de trabalho 03\IFC -GRAPH"
ifc_file_path = r"C:\Users\fcastelo\OneDrive - SystraGroup\Desktop\area de trabalho 03\IFC -GRAPH\MODELO IFC"

[3]

# ****** ALTERE ESTA LISTA PARA ESCOLHER O QUE VOCE DESEJA IMPORTAR DO SEU ARQUIVO IFC ******
#include_types=["IfcSpace", "IfcSlab", "IfcRoof", "IfcWall", "IfcWallStandardCase", "IfcDoor", "IfcWindow"]
include_types = []

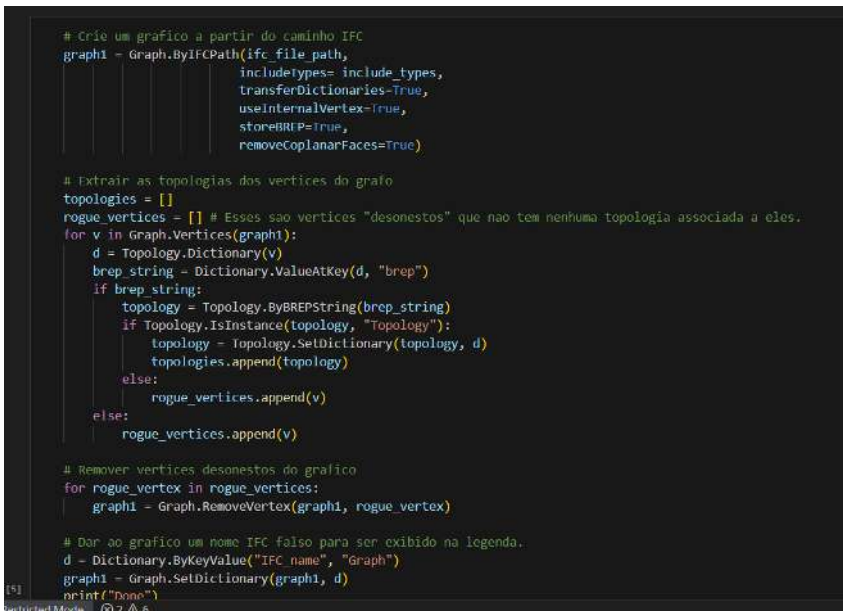
[4]
```

Fonte: Autor, utilizando código disponibilizado pelo professor Wassim Jabi.

5.2 **CRIAÇÃO DO GRAFO A PARTIR DO MODELO IFC**

Depois de extrair os dados do modelo IFC, o próximo passo é a construção do grafo, para isso foi criado um código em python. Cada componente do edifício será representado por um vértice do grafo, e as relações entre os componentes serão representadas por arestas. O processo de conversão envolve os seguintes passos:

Figura 9: Grafos e Modelo BIM.



```
# Crie um grafico a partir do caminho IFC
graph1 = Graph.ByIFCPath(ifc_file_path,
                         includeTypes= include_types,
                         transferDictionaries=True,
                         useInternalVertex=True,
                         storeBREP=True,
                         removeCoplanarFaces=True)

# Extrair as topologias dos vertices do grafo
topologies = []
rogue_vertices = [] # Esses sao vertices "desonestos" que nao tem nenhuma topologia associada a eles.
for v in Graph.Vertices(graph1):
    d = Topology.Dictionary(v)
    brep_string = Dictionary.ValueAtKey(d, "brep")
    if brep_string:
        topology = Topology.ByBREPString(brep_string)
        if Topology.IsInstance(topology, "Topology"):
            topology = Topology.SetDictionary(topology, d)
            topologies.append(topology)
        else:
            rogue_vertices.append(v)
    else:
        rogue_vertices.append(v)

# Remover vertices desonestos do grafico
for rogue_vertex in rogue_vertices:
    graph1 = Graph.RemoveVertex(graph1, rogue_vertex)

# Dar ao grafico um nome IFC falso para ser exibido na legenda.
d = Dictionary.ByKeyValue("IFC_name", "Graph")
graph1 = Graph.SetDictionary(graph1, d)
print("Done")

[5]
```

Fonte: Autor, utilizando código disponibilizado pelo professor Wassim Jabi

- Definição dos Vértices: Cada componente do edifício identificado no modelo IFC (como paredes, portas, vigas) será convertido em um vértice. As propriedades desses componentes (como dimensões, material e localização) serão associadas aos vértices. (Figura 10).

- Estabelecimento das Arestas: As arestas do grafo representarão as relações entre os diferentes componentes. Por exemplo, se uma parede está conectada a uma porta, haverá uma aresta entre os vértices correspondentes. Além disso, se um componente estrutural suporta outro (como uma viga

que suporta uma parede), isso também será representado por uma aresta. (Figura 10).

- Arestas Ponderadas: Para alguns tipos de grafos, as arestas podem ser ponderadas, o que significa que a força ou a importância da conexão pode ser representada por um valor numérico. No contexto de um modelo IFC, isso pode ser útil para representar a força de suportes estruturais ou fluxos de energia.(Figura 10).

O uso de grafos ponderados permite uma análise mais rica das interações entre os componentes, ajudando a identificar os pontos críticos do modelo, como componentes supercarregados ou desbalanceados (Figura 6).

Figura 10: Grafos e Modelo BIM.



Fonte: Autor, utilizando a Biblioteca Topology

5.3 **IMPLEMENTAÇÃO DE ANÁLISE DE GRAFOS**

Uma vez que o grafo esteja construído, diversas técnicas de análise de grafos podem ser aplicadas para entender melhor a estrutura do modelo IFC e identificar possíveis melhorias no design. Algumas das principais análises que podem ser realizadas incluem:

- Centralidade de Grau: A centralidade de grau mede a quantidade de conexões de cada vértice. Em um modelo de construção, um vértice com alta centralidade de grau pode representar um componente crítico para o funcionamento do edifício, como um pilar central ou um sistema de distribuição de energia.

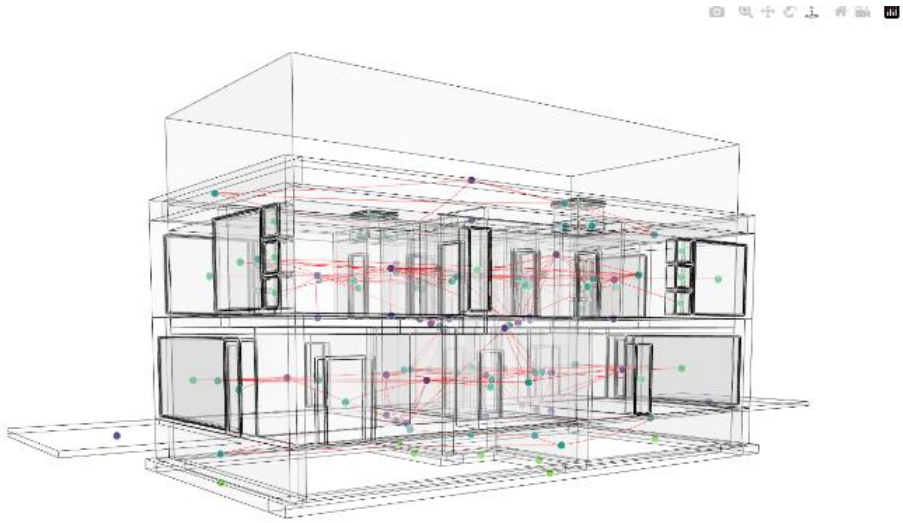
A análise de centralidade de grau é especialmente útil para identificar componentes essenciais que, se falharem, podem comprometer a integridade do sistema como um todo. Por exemplo, um pilar com alta centralidade de grau pode ser essencial para a estabilidade estrutural do edifício.

- Centralidade de Proximidade: Mede a distância média de um vértice para todos os outros vértices do grafo. Componentes com alta centralidade de proximidade são aqueles que estão em posições estratégicas no sistema e podem ser responsáveis por otimizar o fluxo de materiais ou energia através do edifício.

A centralidade de proximidade pode ser aplicada, por exemplo, para analisar a distribuição de energia em um edifício e entender como os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC) estão interconectados.

- Centralidade de Intermediação: A centralidade de intermediação mede o número de vezes que um vértice serve como uma ponte entre outros dois vértices. Isso é especialmente relevante em sistemas de transporte ou fluxo de materiais, onde um componente (como uma estação ou um ponto de transferência de carga) pode ser essencial para a conectividade do sistema.

Figura 11: Grafos e Modelo BIM.



Fonte: Autor, utilizando a Biblioteca Topology

5.4 **VISUALIZAÇÃO DO GRAFO E INTERATIVIDADE**

A visualização interativa dos grafos é um passo crucial para ajudar engenheiros e arquitetos a entender as interações entre os componentes do modelo. Ferramentas como Plotly, Gephi e Neo4j podem ser utilizadas para criar visualizações gráficas interativas dos modelos de grafos.

- Exploração do Grafo: A visualização interativa permite que os usuários explorem o modelo de diferentes ângulos, façam zoom nos vértices mais relevantes e analisem as conexões entre os componentes.

- Identificação de Padrões: é possível identificar padrões e anomalidades no projeto, como áreas com alta concentração de componentes críticos ou sistemas de suporte sobrecarregados.

- Análise de Dados: A visualização também pode ser usada para análise de dados em tempo real, como o monitoramento do consumo de energia ou o fluxo de tráfego em uma rede de transporte ferroviário, rodoviário e Portuário.

Além disso, a visualização pode ser utilizada para facilitar a colaboração entre as diferentes equipes de projeto, ajudando a comunicar de forma mais clara a estrutura e as interações do modelo.

5.5 **FERRAMENTAS E TECNOLOGIAS UTILIZADAS**

A metodologia de aplicação de grafos em modelos IFC envolve o uso de várias ferramentas e tecnologias. Algumas das mais importantes incluem:

- Python: Linguagem de programação utilizada para processar os dados do modelo IFC, construir o grafo e realizar as análises. Bibliotecas como *ifcopenshell* e *TopologicPy* são essenciais para lidar com arquivos IFC e transformá-los em grafos.

- Plotly e Gephi: Ferramentas de visualização que permitem criar gráficos interativos e explorar os resultados da análise de grafos.

- Neo4j: Plataforma de grafos oferecem uma maneira eficiente de armazenar e consultar grandes volumes de dados de grafos. Pode ser utilizada para armazenar a representação de um modelo IFC e realizar consultas complexas.

6 DISCUSSÃO

A aplicação de grafos matemáticos em modelos IFC para projetos de infraestrutura oferece uma abordagem inovadora e poderosa para melhorar a análise, otimização e gestão desses sistemas complexos. A transformação de dados de modelos BIM em grafos permite uma visualização clara das interações entre os componentes, além de possibilitar a aplicação de técnicas de análise, como centralidade, para identificar pontos críticos na rede.

A visualização interativa dos grafos também desempenha um papel fundamental na comunicação das interações entre os componentes de infraestrutura, permitindo que engenheiros, arquitetos e gestores de projeto identifiquem rapidamente gargalos, pontos de falha e áreas de melhoria. A combinação de Redes Neurais de Grafos (GNNs) com modelos de infraestrutura oferece um potencial significativo para prever comportamentos futuros, otimizar fluxos de tráfego, distribuição de energia, e melhorar a eficiência operacional de grandes redes de transporte e sistemas de infraestrutura crítica.

O estudo demonstrou que os grafos matemáticos não só ajudam na otimização de sistemas existentes, mas também oferecem uma nova maneira de planejar e operar infraestruturas de maneira mais inteligente e eficiente. Essa abordagem permite uma análise preditiva mais precisa e facilita a tomada de decisões em tempo real, oferecendo benefícios significativos para empresas de construção, governos e operadores de infraestruturas públicas.

7 CONCLUSÃO FINAL

A integração de grafos matemáticos e Redes Neurais de Grafos (GNNs) com modelos IFC tem o poder de transformar a forma como as infraestruturas são projetadas, otimizadas e gerenciadas. Com a evolução das tecnologias de computação, espera-se que a adoção dessa metodologia se torne cada vez mais acessível e eficiente, permitindo maior colaboração entre as equipes de projeto, tomada de decisões informadas e melhoria contínua no desempenho de sistemas de infraestrutura. O futuro da engenharia de infraestrutura inteligente está indiscutivelmente ligado à integração de tecnologias emergentes, como grafos e IA, que ajudam a tornar os projetos mais inteligentes, sustentáveis e eficientes.

O uso de grafos matemáticos em projetos de infraestrutura tem um potencial imenso, mas ainda existem desafios que precisam ser superados para que essa abordagem seja amplamente adotada e integrada aos fluxos de trabalho de engenharia.

REFERÊNCIAS

SOUZA, Douglas Lopes de. Processamento de linguagem natural de normas técnicas da construção civil: estudo da NBR 15.575. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2024. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br. Acesso em: 20 fev. 2025.

WU, Lingfei; CUI, Peng; PEI, Jian; ZHAO, Liang (ed.). Graph neural networks: foundations, frontiers, and applications. Singapore: Springer Nature, 2022. ISBN 978-981-16-6053-5. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-6054-2.

SACKS, Rafael; EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; LISTON, Kathleen. Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Tradução de Cervantes Gonçalves Ayres Filho et al. Porto Alegre: Bookman, 2021. 500 p. ISBN 978-85-8260-117-4.

WANG, Zijian; SACKS, Rafael; OUYANG, Bowen. Graph-based inter-domain consistency maintenance for BIM models. Automation in Construction, v. 154, p. 104979, 2023. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104979.

WANG, Zijian. Graph Representation of Building Information Models. 2023. Tese (Doutorado) – Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, 2023. Disponível em: https://www.technion.ac.il/. Acesso em: 20 fev. 2025.

EDGE, Darren et al. From local to global: A GraphRAG approach to query-focused summarization. arXiv preprint, 2024. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2404.16130. Acesso em: 20 fev. 2025.