

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS

NATAN HENRIQUE MANNRICH HUBER

REQUISITOS DE INFORMAÇÃO IFC PARA CARACTERIZAÇÃO DE CICLO DE
VIDA BIM INTEROPERÁVEL POR MEIO DE ONTOLOGIA

CURITIBA

2019

NATAN HENRIQUE MANNRICH HUBER

**REQUISITOS DE INFORMAÇÃO IFC PARA CARACTERIZAÇÃO DE CICLO DE
VIDA BIM INTEROPERÁVEL POR MEIO DE ONTOLOGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Rocha Loures

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos

CURITIBA

2019

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Luci Eduarda Wielganczuk – CRB 9/1118

Huber, Natan Henrique Mannrich

H877 Requisitos de informação IFC para caracterização de ciclo de vida BIM
2019 interoperável por meio de ontologia / Natan Henrique Mannrich Huber ;
orientador: Eduardo Rocha Loures ; coorientador: Eduardo Alves Portela
Santos. – 2019.
141 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2019

Bibliografia: f. 136-141

1. Modelagem de informação da construção. 2. Construção civil.
3. Concreto armado. I. Loures, Eduardo Rocha. II. Santos, Eduardo Alves
Portela. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. VI. Título.

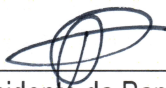
CDD 22. ed. – 670. 0285

TERMO DE APROVAÇÃO

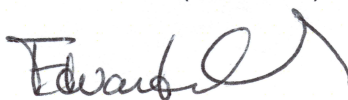
NATAN HENRIQUE MANNRICH HUBER

REQUISITOS DE INFORMAÇÃO IFC PARA CARACTERIZAÇÃO DE CICLO DE VIDA BIM INTEROPERÁVEL POR MEIO DE ONTOLOGIA.

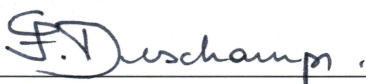
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



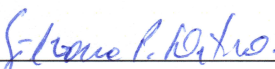
Presidente da Banca
Prof. Dr. Eduardo Rocha Loures
(Orientador)



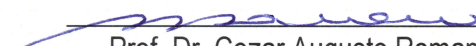
Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos
(Coorientador)



Prof. Dr. Fernando Deschamps
(Membro Interno - PPGEPS/PUCPR)



Prof.ª Dra. Silvana Pereira Detto
(Membro Externo – DEP/UFPR)



Prof. Dr. Cezar Augusto Romano
(Membro Externo - PPGEPS/UFPR)

Curitiba, 25 de junho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a equipe do PPGEPS pelo acolhimento e assistências em todas as matérias que presenciei. Ao profissionalismo dos professores nesta instituição que com amor repassam seu conhecimento com exatidão. Agradeço ao Grupo BIM pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho, bem como testes pilotos de Ontologia e BIM, como o trabalho desenvolvido pela Drielli. Um muito obrigado ao Prof Dr. Yongxin Liao por apresentar o software Protegé ao nosso grupo de pesquisa e nos inserir no ambiente de Ontologias.

À Prof. Msc. Marina F. Muller, por me apresentar ao PPGEPS e me convidar para ser sua colega acadêmica, dividindo artigos, trabalhos de conclusões de curso, e parte de sua tese comigo. Ao Prof. Dr. Eduardo Rocha Loures por me orientar, me mostrar o caminho de trabalhos de alto nível, acreditar em meu potencial e ser um incentivador nato. Ao Prof. Dr. Eduardo Portela por ser meu co-orientador, aumentando a qualidade de meu trabalho, mostrando melhorias e aconselhamentos. À Prof. Dra. Silvana Pereira Detro, por me ajudar com Ontologias, me apresentar ao SWRL, por aceitar o convite de compor esta banca avaliadora e dispor de tempo para o mesmo. Aos demais membros desta banca, obrigado pela atenção. Ao Prof. Dr. Cezar Augusto Romano por aceitar prontamente o convite de avaliar este trabalho, mesmo com tempo reduzido.

Aos amigos, agradeço a parceria de longa data ao mestrando e padrinho Filipe Esmanioto Meira pela empreitada conjunta acadêmica. À família, por me motivar e compreender momentos em que não pude estar presente. À minha esposa Bruna Paiano Cadorin Huber, por me apoiar em todos os momentos e ser minha base. À Deus por se fazer sempre presente.

*“São as perguntas que não sabemos responder
que mais nos ensinam. Elas nos ensinam a pensar.*

*Se você dá uma resposta a um homem, tudo que
ganha é um fato qualquer. Mas, se você lhe der uma
pergunta, ele procurará suas próprias respostas”*

PATRICK ROTHFUSS

RESUMO

O BIM (Building Information Modeling) pretende ser um sistema completo de início ao fim de uma edificação, representando de maneira virtual a realidade. Porém, problemas de interoperabilidade entre o arquivo padrão de troca de informações do BIM, o IFC (Industry Foundation Classes), são frequentemente abordados na literatura. Para melhorar a interoperabilidade do arquivo, faz-se necessário primeiro saber quais são as informações que o IFC deve estruturar para que o ciclo de vida de uma edificação esteja completo e amparado em requisitos semânticos dentro um domínio, neste caso, estruturas de concreto armado. Apresenta-se no presente trabalho uma revisão sistemática da literatura dos temas IFC, Ontologia, Ciclo de Vida BIM e Interoperabilidade de forma a identificar lacunas e oportunidades científicas e industriais. Nesta direção, em um primeiro momento, propõe-se a extração de uma Ontologia diretamente do Arquivo IFC, mapeando as informações encontradas. Na sequência, uma ontologia com base em Normas Brasileiras de Concreto Armado é desenvolvida para gerenciar a informação e apontar os dados necessários em todo ciclo de uma edificação. Estes dados são comparados par a par com os requisitos de dados encontrados na documentação do IFC, apresentando quais dados precisam ser incorporados para garantir uma maior interoperabilidade entre os softwares BIM, minimizando a perda de dados e garantindo a preservação da informação durante a utilização da informação. A abordagem mostra-se pertinente quanto a utilização de ontologia para identificar falta de informações dentro do IFC, apresentando possíveis melhorias ao BIM.

Palavras-chave: *Building Information Modeling (BIM)*. Industry Foundation Classes (IFC). Interoperabilidade. Ontologia. Informação. Dados.

ABSTRACT

BIM (Building Information Modeling) aims to be a complete system from the beginning to the end of a building, representing virtual reality. However, interoperability issues between the standard BIM information exchange file, the Industry Foundation Classes (IFC), are often addressed in the literature. In order to improve file interoperability, it is necessary first to know what information IFC must structure so that the life cycle of a building is complete and supported by semantic requirements within a domain, in this case, reinforced concrete structures. This paper presents a systematic review of the literature on IFC, Ontology, BIM Life Cycle and Interoperability in order to identify scientific and industrial gaps and opportunities. In this direction, it is initially proposed to extract an Ontology directly from the IFC File, mapping the information found. Following, an ontology based on Brazilian Standards of Armed Concrete is developed to manage the information and to point out the necessary data in every cycle of a building. These data are compared on a par with the data requirements found in the IFC documentation, presenting which data need to be incorporated to ensure greater interoperability between BIM softwares, minimizing data loss and ensuring the preservation of information while using the information. The approach is pertinent to the use of ontology to identify lack of information within the IFC, presenting possible improvements to BIM.

Key-words: Building Information Modeling (BIM). Industry Foundation Classes (IFC). Ontology. Information. Data.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Escopo Geral do Grupo de Pesquisa BIM na PUCPR.....	19
Figura 2 Etapas do Documento.....	22
Figura 3 Fases do método Ordinatio de RSL	25
Figura 4 Gráfico de Pizza dos Principais Periódicos	28
Figura 5 Nuvem de Palavras que mais se repetem	31
Figura 6 Nós - arquivos e referências	32
Figura 7 gráfico Hierárquico comparando o número de referências codificadas.....	33
Figura 8 Evolução do IFC até 2007 - Adaptado de KIVINIEMI(2008)	40
Figura 9 Os três pilares de normatização do IFC	41
Figura 10 Estrutura de camadas do IFC.....	44
Figura 11 Estrutura de interoperabilidade empresarial (três dimensões básicas)	51
Figura 12 As camadas da Web Semântica	53
Figura 13 Marcos técnicos do gerenciamento de informações	55
Figura 14 Ciclo de vida BIM e Normas	58
Figura 15 Diagrama IDEF0 - metodologia de pesquisa	61
Figura 16 Diagrama EXPRESS-G - Reforço estrutural.....	67
Figura 17 PredefinedType - ReinforcingBarTypeEnum	68
Figura 19 Modelagem de estrutura de concreto armado em um software BIM.....	71
Figura 20 Roteiro de experimento	72
Figura 21 Ontograph do IFC4 de Estruturas de concreto armado	73
Figura 22 Indivíduos por Classe - Protégé - IFC4	74
Figura 23 Classes de resistências de concretos estruturais	77
Figura 24 Classe Abatimento e Aplicações típicas	77
Figura 25 Protégé - Classes e Hierarquia	78
Figura 26 Protégé - Propriedades de dados - Concreto	79
Figura 27 Protégé - SWRL - NBR 8953/2015.....	80
Figura 28 Protégé - Ligação entre Indivíduos e classes - C30_S160	81
Figura 29 Protégé - Indivíduos - C30_S160	81
Figura 30 Protégé - OntoGraph - NBR 8953/2015	82
Figura 31 Classes de agressividade ambiental (CAA).....	83
Figura 32 Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.....	84

Figura 33 Protégé - Classes e Hierarquia	85
Figura 34 Protégé - Propriedades de dados - Projeto	87
Figura 35 Protégé - Propriedades de dados – Projeto 2.....	88
Figura 36 Protégé - Propriedades de dados – Projeto 3.....	89
Figura 37 Protégé - SWRL - NBR 6148/2014.....	91
Figura 38 Protégé - Indivíduos - NBR 6148/2014.....	91
Figura 39 Protégé - OntoGraph - NBR 6148/2014	92
Figura 40 Protégé - Classes e Hierarquia – Execução	93
Figura 41 Protégé - Propriedades de dados – Execução	94
Figura 42 Tolerâncias dimensionais para o comprimento de elementos estruturais lineares	95
Figura 43 SWRL - execução	95
Figura 44 Protégé – Indivíduo Viga – Tolerância de dimensão	96
Figura 45 Protégé - OntoGraph – Execução	96
Figura 46 Protégé - Classes e Hierarquia – Manutenção e Operação.....	98
Figura 47 Protégé - Propriedades de dados – Manutenção e Operação.....	99
Figura 48 Protégé – Indivíduo Viga1	100
Figura 49 Protégé - OntoGraph – Manutenção e Operação	101
Figura 50 Protégé - Classes e Hierarquia	102
Figura 51 Protégé - Propriedades de dados - Demolição.....	103
Figura 52 Protégé – Laje1 com Sobrecarga.....	104
Figura 53 IfcStructuralElementsDomain (1/4).....	106
Figura 54 IfcStructuralElementsDomain (2/4).....	109
Figura 55 IfcStructuralElementsDomain (3/4).....	111
Figura 56 IfcStructuralElementsDomain (4/4).....	112
Figura 57 IfcStructuralAnalysisDomain (1/4)	114
Figura 58 IfcStructuralAnalysisDomain (2/4)	118
Figura 59 IfcStructuralAnalysisDomain (3/4)	119
Figura 60 IfcStructuralAnalysisDomain (4/4)	120
Figura 61 Propriedade de dados em Ontologias de Normas	122
Figura 62 Tipos de Coeficiente presentes em Projetos - Ontologia.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação das Palavras Chaves.....	26
Tabela 2 Termos pesquisados na Base de Dados	26
Tabela 3 Fator de Impacto Scimago SJR do banco de dados.....	27
Tabela 4 Classificação dos artigos InOrdinatio.....	29
Tabela 5 Classificação dos Autores conforme publicações	30
Tabela 6 Evolução do IFC4 até IFC5	42
Tabela 7 Requisitos de Dados presentes na Documentação do IFC4 add2	121
Tabela 8 Tabela comparativa Norma x IF4 - Conceito	125
Tabela 9 Tabela comparativa Norma x IF4 – Projeto	125
Tabela 10 Tabela comparativa Norma x IF4 – Execução	128
Tabela 11 Tabela comparativa Norma x IF4 – Operação e Manutenção	129
Tabela 12 Tabela comparativa Norma x IF4 – Demolição	130

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	16
1.2	OBJETIVOS DE PESQUISA	16
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	18
1.5	ESCOPO DE PROJETO DE PESQUISA BIM	18
1.6	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1	REVISÃO SISTEMÁTICA – MÉTODO ORDINATIO	23
2.2	BIM.....	33
2.3	IFC (INDUSTRY FOUNDATION CLASSES)	35
2.3.1	Evolução do IFC	36
2.3.2	Organização de dados IFC.....	43
2.4	CICLO DE VIDA BIM	46
2.4.1	Design/Projeto/Planejamento	46
2.4.2	Construção.....	47
2.4.3	Operação e Manutenção	48
2.4.4	Demolição/Desconstrução	50
2.5	INTEROPERABILIDADE	51
2.5.1	Interoperabilidade semântica	52
2.6	ONTOLOGIA	55
2.6.1	ORGANIZAÇÃO DE DADOS DE UMA ONTOLOGIA.....	56
2.7	CONCRETO ARMADO	57
2.8	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA.....	59
3	ABORDAGEM METODOLÓGICA	61
3.1	PARTE 1 – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	63
3.2	PARTE 2 – EXTRAÇÃO DE ONTOLOGIA DO IFC	63
3.3	PARTE 3 – ONTOLOGIAS DE BASE FUNDAMENTADAS NA NORMA	64
3.4	PARTE 4 – EXTRAÇÃO DE DADOS DO IFC4.....	66
3.5	PARTE 5 – ESTRUTURA CONCEITUAL COMPARATIVA.....	69
4	DESENVOLVIMENTO.....	70
4.1	EXTRAÇÃO DE ONTOLOGIA DO IFC.....	70

4.2	DESENVOLVIMENTO DAS ONTOLOGIAS CONFORME AS NORMAS.....	75
4.2.1	NBR 8953/2015 – Concreto para fins Estruturais	76
4.2.2	NBR 6148/2014 v3 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento	82
4.2.3	NBR 14931/2004 - Execução de estruturas de concreto – Procedimento	92
4.2.4	NBR 5674/2012 - Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção	97
4.2.5	NBR 5682/1977 DEMOLIÇÃO	101
4.3	EXTRAÇÃO DE DADOS DO IFC 4	104
4.3.1	Domínio de Elementos Estruturais	105
4.3.2	Domínio de Análise Estrutural.....	113
5	RESULTADOS.....	122
5.1	COMPARAÇÃO ONTOLOGIAS X IFC4 ADD2	123
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	130
6	CONCLUSÕES	134
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
7	REFERENCIAL TEÓRICO	137

1 INTRODUÇÃO

O Mercado de construção civil representa 6,2% do PIB do Brasil (FIBRA, 2018). O concreto é atualmente o material de construção mais utilizado no mundo, em função de diversos fatores, dentre eles, o principal, sua facilidade de conformação (CARVALHO, 2008). A possibilidade de projetar edificações com menor custo, mais rápidas, mais duráveis e com maior segurança fez com que os profissionais da Engenharia, Arquitetura e Construção (AEC) se adaptem às novas tecnologias do mercado.

Diante deste cenário, muitos softwares foram criados a fim de suprir as demandas do mercado em diferentes frentes do conhecimento. Muitos desses softwares não se comunicam entre si, ou ainda, quando ocorre transferência de dados entre eles, uma grande quantidade de dados é perdida ou enviada de maneira errada. Problemas de interoperabilidade são amplamente estudados na construção civil (SACKS *et al*, 2010) (KARAN *et al*, 2015) (EASTMAN *et al*, 2015) (YANG, 2006). A existência de um modelo comum, onde todos os envolvidos em um mesmo projeto possam acessar e modificar conforme a necessidade de cada profissional, é fundamental para a sinergia e eficiência na execução de um projeto (EASTMAN, 2008).

Uma das premissas do sistema BIM (*Building Information Modeling*) é ser uma arquitetura interoperável, proporcionando uma maneira segura de armazenamento, transmissão, acesso e uso de informações do projeto. Isso proporciona que os processos do ciclo de vida de uma edificação sejam baseados em documentos e informações extraídas de modelos computacionais. Além disso, o BIM possibilita inserir informação diretamente em elementos modelados no projeto, buscando ser a fidelização da realidade. Segundo Eastman (2008), os modelos BIM permitem retratar digitalmente uma edificação real.

O modelo padrão de troca de informação BIM entre agentes envolvidos é através do Arquivo IFC. Hoje o IFC é publicado, mantido e atualizado pela aliança buildingSMART, instituição aberta e sem fins lucrativos (buildSMART, 2019). No campo de Concreto Armado, existem muitos softwares que possuem a possibilidade de transferir arquivos em IFC - apenas softwares de cálculo estrutural são 34 softwares citados no site da buildingSMART. Porém, pesquisas como de Muller *et al*. (2015) mostram que elementos de concreto armado modelados em BIM, quando são

transferidos através de IFC, possuem perda de dados significativa. Outros estudos (VANDECASTEELE, 2017) mostram que os dados BIM são incompletos ou fragmentado para suprir o ciclo de vida BIM como um todo. Desta maneira, para melhorar a interoperabilidade é inicialmente necessário conhecer os dados que são transferidos através do arquivo IFC.

Sob esta demanda de interoperabilidade, a Ontologia surge como uma ferramenta de tratativa semântica para representar, trocar e reutilizar conceitos de domínio, relações entre conceitos e regras, além de organizar informação (MA, Z., & LIU, Z., 2018). Assim, no presente trabalho, uma ontologia é criada a partir de um arquivo IFC com variados elementos estruturais modelados em BIM, através de uma ferramenta de conversão direta. Esta ontologia gerada automaticamente com base no arquivo IFC, não possui completude estrutural¹, sendo o motivador do desenvolvimento de um método de criação de novas ontologias de forma manual.

Para saber se as informações contidas no IFC são suficientes para uma edificação poder ser concebida, calculada, executada, operada e demolida, as ontologias são propostas com base na Norma Brasileira de Concreto Armado. Cada fase do ciclo de vida do concreto armado possui informações específicas e normas que especificam e conceituam o mesmo. Por conta disso, foram mapeadas todas as normas utilizadas durante a vida útil de uma estrutura em concreto armado, e cada ontologia foi produzida a fim de possibilitar extrair os dados necessários de maneira sistemática.

Com o mapeamento dos dados e conhecimento necessários das normas através das ontologias, assim como o mapeamento dos dados IFC através da documentação (base do esquema do IFC4 ADD2, disponível no site da buildSMART, é possível comparativamente analisar se hoje o arquivo IFC possui referencial informacional amplo e semântico que supra as ontologias construídas, considerando todo ciclo de vida da edificação.

¹ Ontologia que não possui conectores semânticos, é apresentada sem haver critérios hierárquicos e todos os elementos modelados são expressos com suas propriedades misturadas em uma única instância, não havendo ligação entre as classes.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

No sistema BIM, para minimizar a perda de dados e garantir a preservação da informação durante a sua utilização, um único arquivo deve ser utilizado do início ao fim de uma edificação. Assim, quais são as informações que o arquivo IFC deve estruturar no domínio de concreto armado para que o ciclo de vida de uma edificação esteja amparado em requisitos semânticos de interoperabilidade?

1.2 OBJETIVOS DE PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa é estruturar, através de base ontológica, os requisitos conceituais de dados de estruturas de concreto armado, com base na Norma Brasileira, para identificar as informações necessárias que o Arquivo IFC precisa possuir para ser interoperável em todo ciclo de vida BIM de uma edificação.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Realizar uma Revisão sistemática da literatura sobre Ontologia e BIM, caracterizando o estado da arte;
- ii. Modelar em software BIM estruturas de concreto armado de forma a exportar em IFC e extrair uma ontologia através do arquivo IFC (método conhecido na literatura);
- iii. Desenvolver um método de extração de Ontologia no domínio de concreto armado para cada Norma Brasileira de Concreto Armado utilizada em cada fase do ciclo de vida de uma edificação;
- iv. Definir quais são as informações necessárias para cobrir todo ciclo de vida de uma edificação e verificar se o IFC é interoperável quanto aos requisitos para suprir todo ciclo de vida de uma edificação.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para evitar perda de informação durante as trocas de arquivos entre os profissionais envolvidos no ciclo de vida de uma edificação em concreto armado, é

necessário que o arquivo IFC possua todas as informações necessárias para que possa ser um modelo único da concepção até a demolição/desconstrução.

Porém, através da revisão sistemática da literatura nota-se que não há trabalhos na literatura que abordem o mapeamento de informações de normas técnicas e formalização do conhecimento envolvido através de ontologia, nem a apresentação sobre a capacidade de informações suportadas no IFC4 quanto a concreto armado, ou outro domínio de estruturas/materiais.

Por sanar essa lacuna de conhecimento, este trabalho irá explorar o IFC4 add2, pois é a última versão disponível ao público pela buildingSMART, e o padrão oficial de extensão interoperável BIM.

No Brasil, o BIM é obrigatório em projetos públicos, conforme Decreto nº 9.377, de 17 de maio de 2018, que tem como finalidade promover um ambiente adequado ao investimento em BIM e sua difusão no País.

Como ferramenta para mapear as informações necessárias foi escolhido a Ontologia, pois é um modelo de representação do conhecimento que possibilita descrever formalmente conteúdos informacionais dentro de um domínio previamente determinado, neste caso, Concreto Armado. Além disso, através dela é possível identificar regras de relações associativas e permite o compartilhamento de conhecimento e a sua reutilização em diferentes aplicações, facilitando trabalhos futuros.

Concreto Armado representa o campo de atuação deste trabalho, pois é um tipo de estrutura que possui cada fase de seu ciclo de vida bem definido e separado em diferentes normas. De acordo com uma pesquisa da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) em 2013, o Concreto também é o produto mais consumido no mundo depois da água, com perspectiva de ser o material mais utilizado no mundo em 2025.

Como base de extração dos requisitos de informação foi utilizada a Norma Brasileira de concreto armado, pois foi atestada pela ISO (International Organization for Standardization, ISO/TC71/SC4/2015)[13] como uma das normas técnicas que atendem exigências internacionais e, por isso, pode ser utilizada em qualquer local do mundo para projetos de estruturas de concreto.

Ao desenvolver um método de extração de requisitos de informação para ontologia através da norma brasileira em todo ciclo de vida de uma edificação e comparar com os requisitos presentes na documentação do IFC, apresenta como

resultado que para o IFC ser um arquivo de extensão BIM interoperável entre todos os profissionais e fases da edificação todos os requisitos da Ontologia precisam estar presentes no IFC.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho irá abordar os requisitos de informação da coleção de Normas Brasileiras de Concreto Armado (ABNT NBR 14931:2004, ABNT NBR 6118:2014, ABNT NBR 5674:2012, ABNT NBR 8953:2015 e ABNT NBR 5686:1977), estabelecendo requisitos básicos exigíveis para o projeto de estruturas de concreto simples, armado, excluindo aquelas em que se empregam concreto leve, pesado, protendido ou outros especiais.

O objetivo das ontologias será prover de maneira ordenada e taxonômica as informações para representar o conhecimento de um domínio (concreto armado). Em outras palavras, a ontologia de domínio representa o conhecimento sobre um tópico, que pode servir de base para trabalhos futuros realizarem uma ontologia de aplicação, que representa a habilidade de aplicar esse conhecimento para resolver problemas em diferentes situações. Sendo assim, não serão utilizadas as Ontologias para inferências de conhecimento, sendo que o objetivo delas nesse trabalho é representação do conhecimento.

O trabalho utiliza a versão do IFC conhecido com IFC4 add2, tendo em vista que é a versão mais recente do IFC. Esse trabalho é replicável com outras versões futuras.

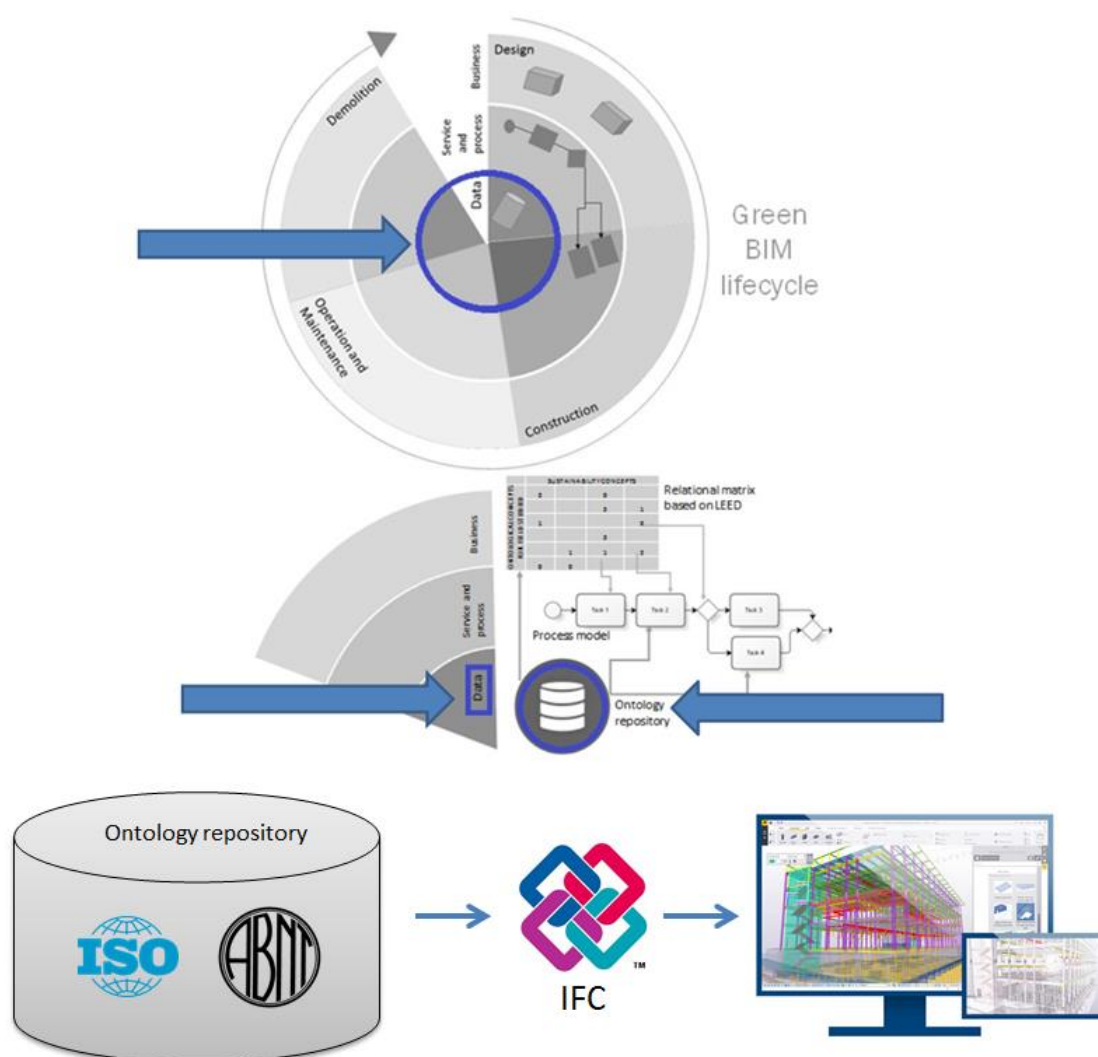
1.5 ESCOPO DE PROJETO DE PESQUISA BIM

A PUCPR iniciou a adoção do BIM em três áreas principais: capacitação de pessoal, cultura de pesquisa e estratégias de ensino. Esta dissertação é parte das iniciativas do grupo BIM na PUCPR, especialmente no campo do desenvolvimento da cultura de pesquisa. Há um escopo geral de pesquisa onde há presença de ontologia, processos, sustentabilidade e arquitetura de sistemas a qual faz parte da tese de Marina Figueiredo Muller, que tem como título “Interoperability for Sustainability in the Construction Industry – a BIM based Framework”. A tese de

Muller tem o objetivo de desenvolver uma estrutura conceitual para a interoperabilidade do BIM em um ciclo de vida sustentável baseado em uma estrutura de dados ontológicos e propor uma aplicação para estruturas de concreto.

Como apresentando na Figura 1 o escopo geral do grupo de pesquisa, enquanto os destaques mostram as fatias onde este trabalho está inserido. A ontologia estará associada ao banco de dados no qual cada etapa do processo de ciclo de vida de uma edificação de concreto armado poderá acessar e buscar informações afim de suprir a demanda de informação necessária.

Figura 1 Escopo Geral do Grupo de Pesquisa BIM na PUCPR



Fonte 1 O autor (2018)

O escopo específico deste trabalho é dividido em revisão da literatura, exposição e explicação dos termos principais desta pesquisa. A extração de uma

ontologia com base em modelagem de estruturas de concreto armado em BIM e exportação em IFC4, assim como a criação de novas Ontologias com base em Normas de Concreto Armado para cada fase do ciclo de vida BIM são elementos centrais.

A subsequente comparação dos resultados da Ontologia com a documentação padrão do IFC4 permite a conclusão quanto a possíveis melhorias do IFC4 no domínio de requisitos de concreto armado. A metodologia aplicada em cada etapa será detalhada no capítulo 03 - Abordagem metodológica, após o conhecimento e entendimento do espaço de pesquisa e termos técnicos – Capítulo 02. O detalhamento de cada capítulo é descrito a seguir.

1.6 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esta pesquisa está dividida em 06 capítulos. O primeiro sintetiza o trabalho, apresentando uma introdução ao tema, abordando o problema de pesquisa, estabelecendo os objetivos de pesquisa e seus objetivos específicos. Além disso, justificou-se a presente dissertação.

O segundo capítulo aborda a Revisão sistemática da Literatura dos tópicos de interesse, mostrando a metodologia aplicada na mesma. Durante este ato também são abordados o domínio de conhecimento desta pesquisa, como BIM, Ontologia e Concreto Armado. Este capítulo cumpre o item i. da lista de objetivos específicos da pesquisa.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia de pesquisa e como, passo a passo, será realizado o desenvolvimento do trabalho, abordando os softwares utilizados, as bases de dados, a coleta de informação e os métodos. Para isso foi realizado um modelo em IDEF0.

No quarto capítulo é dedicado ao desenvolvimento do presente trabalho, subdividido em três subcapítulos. O primeiro subcapítulo discorre sobre o processo de extração de uma Ontologia através do IFC, envolvendo a construção de um modelo de concreto armado em BIM, sua exportação no formato IFC e, através deste, extraído uma ontologia com auxílio de ferramenta de geração automática de Ontologia para BIM. Este capítulo cumpre o item ii. da lista de objetivos específicos.

No segundo subcapítulo do desenvolvimento, através do mapeamento das Normas Brasileiras de Estruturas de Concreto armado, utilizadas em cada fase do

ciclo de vida de uma edificação, é desenvolvida uma ontologia para cada norma. Este capítulo cumpre o item iii. da lista de objetivos específicos.

No terceiro e ultimo subcapítulo são catalogadas as informações que o IFC4 possui sobre Concreto Armado, através da busca do gráficos EXPRESS-G presentes na documentação do site da buildingSMART. Este capítulo cumpre parcialmente o item iv. da lista de objetivos específicos.

No quinto capítulo é realizada uma análise de dados das informações das Ontologias construídas, determinando os dados necessários para o ciclo de vida de uma estrutura em concreto armado. As ontologias são comparadas item a item com as informações extraídas da documentação do IFC4. As informações faltantes no IFC4 são analisadas e explicadas o motivo. Este capítulo termina de cumprir o item iv. da lista de objetivos específicos.

No último capítulo é realizada uma conclusão sobre o tema, explanando se o Arquivo IFC possui todos os requisitos para suprir todo ciclo de vida de uma edificação, mostrando, assim, se os objetivos e objetivos específicos foram atingidos. Também neste ato são apresentadas sugestões para trabalhos futuros. Todos os capítulos deste trabalho estão representados na Figura 2, mostrando as etapas de pesquisa contempladas no documento.

Figura 2 Etapas do Documento



Fonte: O autor (2019)

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é relatada a revisão sistemática da literatura pelo método Ordinatío (PAGANI et. al 2015) para identificação do espaço de pesquisa, filtrando material aderente e de qualidade ao tema de pesquisa. Com base nesta identificação, os artigos encontrados na revisão são utilizados como base de dados para abordar os elementos centrais: BIM - IFC, Ciclo de Vida BIM, Interoperabilidade – Ontologia.

2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA – MÉTODO ORDINATIO

Uma revisão sistemática da literatura é uma metodologia utilizada para identificar, avaliar e interpretar pesquisa relevante para uma determinada área temática, questão de pesquisa ou fenômeno de interesse. Existem três razões principais para realizar uma revisão da literatura: resumir as evidências em um tópico, identificar lacunas no estado da arte para propor áreas investigação e fornecer um quadro para posicionar adequadamente as novas atividades de investigação (KITCHENHAM e CHARTERS, 2007). Estas três razões se aplicam ao estudo de Ontologias e BIM.

Para garantir a qualidade de informação deste trabalho, foi organizado, quantificado, ranqueado e qualificado de maneira sistemática todos os artigos encontrados na base ScienceDirect. Esse portal foi escolhido por possui uma busca avançada dos termos de pesquisa, que possibilita a filtragem da informação, além de possuir a maior base de dados com o tema pesquisado.

O método escolhido para esta revisão sistemática da literatura é o Methodi Ordinatío (PAGANI et. al 2015), que é uma metodologia para selecionar e classificar artigos científicos relevantes, incluindo o fator de impacto, número de citação e ano de publicação. Esse método é uma variação do método ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist) do Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão (LabMCDA) (ENSSLIN et al. 2010).

Criada em 2010 por três pesquisadores nacionais na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) (PAGANI et. al 2015), o método Ordinatío tem a estratégia metodológica de selecionar, coletar, classificar e interpretar

sistematicamente trabalhos científicos publicados em periódicos, através de 03 critérios: o ano de publicação, o número de citações e o fator de impacto. A Fórmula utilizada para classificação dos artigos dentro do método é descrita abaixo:

$$InOrdinatio = (IF/1000) + \alpha * [10 - (Ano deste trabalho - Ano de publicação do artigo)] + CITAÇÕES$$

Sendo,

IF = Fator de impacto obtido Scimago SJR

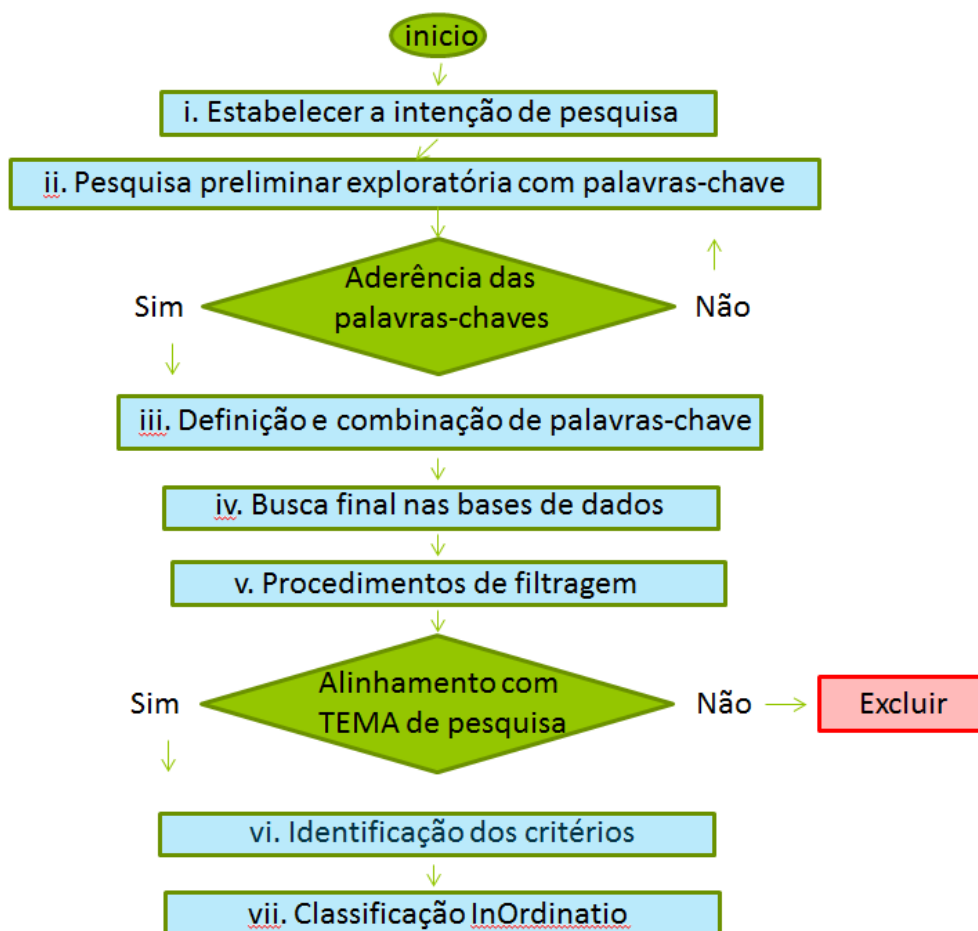
alpha = Valor de 1 a 10 com peso na importância do tempo.

$\sum Ci$ = Somatório de Citações

A sequência de atividades da metodologia InOrdinatio (Figura 3) é dividida em 09 fases, sendo elas:

- i. Estabelecer a intenção de pesquisa;
- ii. Pesquisa preliminar exploratória com palavras-chave em bases de dados;
- iii. Definição e combinação de palavras-chave e bases de dados;
- iv. Busca final nas bases de dados;
- v. Procedimentos de filtragem;
- vi. Identificação do fator de impacto, ano de publicação e número de citações;
- vii. Classificar os artigos usando o InOrdinatio.

Figura 3 Fases do método Ordinatio de RSL



Fonte: Adaptação de Pagani et. al (2015)

Na primeira fase foram escolhidas como palavras-chaves da intenção de pesquisa BIM e Ontologia. Esses termos foram pesquisados preliminarmente no Portal Science Direct. No Science Direct, utilizando filtro avançado para encontrar somente em títulos, resumos e palavras-chaves os termos BIM e Ontologia no mesmo documento, obteve-se como resultado de pesquisa 47 artigos, sendo estas publicações a partir 2009.

A totalidade dos 47 artigos foi armazenada na íntegra em formato digital em PDF e catalogados todas as palavras-chaves presentes em cada artigo em lista com o auxílio do software Microsoft Excel. Ao todo 180 palavras-chaves diferentes apareceram na pesquisa desta base de dados. As palavras-chaves que mais apareceram podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 Classificação das Palavras Chaves

Classificação	Palavra-chaves	Quantidade
1	Ontology	29
2	BIM	14
3	Building information modeling	9
4	Building Information Modeling (BIM)	9
5	Interoperability	8
6	Semantic web	7
7	IFC	6
8	Industry Foundation Classes (IFC)	6
9	Linked data	5
10	Building Information Modelling	3

Fonte: O Autor (2019)

Como resultado da seleção das palavras-chaves constatou-se que a palavra *Modelling* possui duas formas corretas de ser escrita, uma no padrão americano e outra no dicionário da Inglaterra.

Mesmo sendo o domínio de aplicação dessa pesquisa, o concreto armado não foi adicionado como uma palavra chave de pesquisa, pois limitaria a quantidade de artigos. Em testes anteriores, somente 04 artigos com as palavras ontologia e concreto armado foram encontrados.

Com a união desses novos termos, dois clusters foram criados, um de ontologia e outro de BIM, onde ao iniciar os motores de buscas do portal, pelo menos uma palavra-chave deve ser pesquisada, como apresentado na tabela 2.

Tabela 2 Termos pesquisados na Base de Dados

("Building information modeling" OR "BIM" OR "Building Information Modelling" OR "IFC" OR "Industry Foundation Classes") AND ("ontology" OR "Ontologies" OR "Linked data" OR "Semantic" OR "OWL")	
BIM	ONTOLOGIA
Building information modeling	ontology
BIM	Ontologies
Building Information Modelling	Linked data
IFC	Semantic
Industry Foundation Classes	OWL

Fonte: O Autor (2019)

Como apresentado, na quarta fase é realizada a pesquisa novamente no portal. Com o maior número de termos, aumentou-se o número de artigos encontrados, totalizando 130 resultados de pesquisa.

A quinta e sexta fases foram realizadas simultaneamente, ao passo que eram abertos os artigos para identificação do periódico e ano de publicação também era realizada uma leitura dos resumos e títulos dos artigos. Neste momento também foi removido os artigos de medicina inseridos dentro da base de dados. Os resultados de medicina apareceram, pois o termo BIM na comunidade acadêmica médica pode significar tanto Biobank Information Management System (BIMS) quanto Body-inspired metaphor (BIM) e os termos de ontologia também são amplamente utilizados na medicina para organizar informação. Foram excluídos 09 artigos fora do tema de pesquisa.

Os artigos de conferência também foram excluídos da lista de artigos, visto que não possuem qualidade comprovada como os de *Journals*, e, além disso, não possuem Fatores de Impacto necessários para essa revisão sistemática da literatura. Foram excluídos 14 artigos de conferência da base dados.

Nessa fase foram catalogados todos os Autores, *Journals* e Ano de publicação. No final foi estruturada uma lista de Journals e foi pesquisado no site da Scimago o fator de impacto de 2017 (último possível) de cada *Journal*. A lista quantificada dessa base de dados está conforme tabela 3.

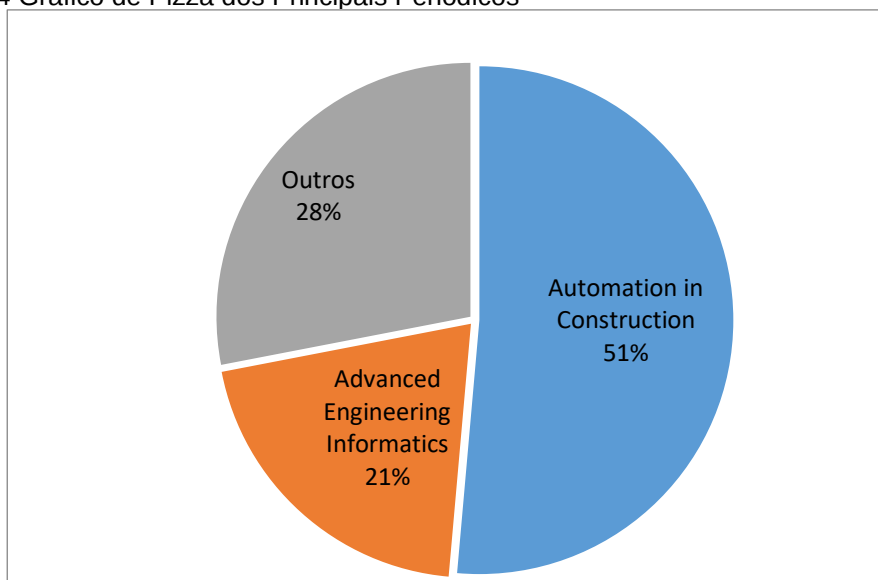
Tabela 3 Fator de Impacto Scimago SJR do banco de dados

nº	Journals (Alfabético)	Nº Artigos	SJR (2017)
1	Advanced Engineering Informatics	22	1,167
2	Advances in Engineering Software	1	1,159
3	Automation in Construction	55	1,613
4	Building and Environment	5	2,169
5	Computer Vision and Image Understanding	1	0,100
6	Computer-Aided Design	5	1,025
7	Computers in Industry	4	1,028
8	Computers, Environment and Urban Systems	2	1,271
9	Energy and Buildings	1	2,061
10	Engineering Science and Technology	1	0,225
11	Expert Systems with Applications	2	1,271
12	Fire Safety Journal	1	0,789
13	Journal of Building Engineering	1	0,753
14	Journal of Cultural Heritage	2	0,562
15	Land Use Policy	1	1,348
16	Renewable and Sustainable Energy	1	3,036
17	Safety Science	1	1,113
18	Simulation Modelling Practice and Theory	1	0,684

Fonte: O autor (2019)

O periódico que possui maior fator de impacto de acordo com SJR é o “Renewable and Sustainable Energy”. O Journal “Automation in Construction” possui 51% de todos os arquivos de nossa base de dados, esse periódico possui um Qualis de classificação A1 em Engenharia 01. O segundo periódico com maior quantidade de artigos é o “Advanced Engineering Informatics”, que com 22 artigos ficou com a segunda maior fatia do gráfico de pizza indicado na Figura 4.

Figura 4 Gráfico de Pizza dos Principais Periódicos



Fonte: O Autor (2019)

Para assegurar a qualidade de informação neste trabalho, todos os artigos com fator de impacto abaixo de 1,00 foram removidos, ou seja, 07 artigos, resultando em 100 artigos para serem ranqueados.

Na última fase do método ocorre a classificação através do cálculo InOrdinatio, onde neste trabalho usamos alfa com o valor de 10, pois quanto mais nova a pesquisa, mais relevante são os resultados. Percebe-se que tanto o BIM quanto Ontologia são tecnologias que evoluíram muito nos últimos anos, sendo assim, novas ferramentas e atualizações estão disponíveis dentro dos softwares facilitando a vida do usuário e corrigindo erros do passado.

O cálculo ocorreu através do Microsoft Excel, onde os 100 artigos remanescentes da filtragem foram classificados conforme nota InOrdinatio, mostradas na tabela 4 os 25 primeiros.

Tabela 4 Classificação dos artigos InOrdination

Classificação	Artigos	InOrdination
1	Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders	926,613
2	Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs	659,613
3	Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data	325,613
4	A review and outlook for a 'Building Information Model' (BIM): A multi-standpoint framework for technological development	271,167
5	A semantic rule checking environment for building performance checking	152,613
6	A framework for proactive construction defect management using BIM, augmented reality and ontology-based data collection template	142,613
7	An investigation into the applicability of building information models in geospatial environment in support of site selection and fire response management processes	131,167
8	Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema	129,167
9	An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part II: Implementation of the DNAS framework using na XML schema	128,169
10	Linking building data in the cloud: Integrating cross-domain building data using linked data	118,167
11	The Rosewood experiment — Building information modeling and interoperability for architectural precast facades	117,613
12	BIM and ontology-based approach for building cost estimation	113,613
13	Building a project ontology with extreme collaboration and virtual design and construction	109,167
14	An assessment of the current state of product data technologies	106,025
15	Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA)	105,613
16	A BIM-Oriented Model for supporting indoor navigation requirements	100,271
17	EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology	97,613
18	Patterns and trends in Building Information Modeling (BIM) research: A Latent Semantic Analysis	92,613
19	A distributed multi-model-based Management Information System for simulation and decision-making on construction projects	89,167
20	The IFC-based path planning for 3D indoor spaces	85,167
21	Semantic interoperability in building design: Methods and tools	82,025
22	Past, present and future of information and knowledge sharing in the construction industry: Towards semantic service-based e-construction?	79,025
23	The use of a BIM-based framework to support safe facility management processes	67,613
24	Vision-based material recognition for automated monitoring of construction progress and generating building information modeling from unordered site image collections	67,167
25	Extending BIM interoperability to preconstruction operations using geospatial analyses and semantic web services	61,613

Fonte: O Autor (2019)

Através do InOrdinatio foi possível estabelecer uma ordem de leitura dos artigos, sendo que, para este trabalho acadêmico os primeiros 25 foram lidos na íntegra e os demais 75 foram armazenados para pesquisas direcionadas durante o presente trabalho.

Dos 293 autores que escreveram esses 100 artigos, podemos destacar Charles M. Eastman com maior produção de artigos neste tema, com 06 artigos de sua autoria. Obter Eastman como autor principal nessa seleção de artigos mostra que a filtragem alcançou um alto nível de publicações, pois ele é autor de livros em BIM de grande impacto na sociedade acadêmica, recebeu prêmios da buildingSMART (instituição por trás do IFC) em 2006 e vários prêmios de periódicos por sua contribuição em BIM, base de dados em engenharia, interoperabilidade e modelos paramétricos (BuildingSMART, 2006). Os demais autores com maiores produções acadêmicos nessa base de dados estão na tabela 5.

Tabela 5 Classificação dos Autores conforme publicações

Classificação	Autor	Publicações
1	Charles M. Eastman	6
2	Christophe Nicolle	4
3	Thomas Krijnen	4
4	Yong-Cheol Lee	4
5	Abbas Rajabifard	3
6	Ge Gao	3
7	Jack C.P. Cheng	3
8	Jakob Beetz	3
9	Jochen Teizer	3
10	Mohsen Kalantari	3
11	Pieter Pauwels	3
12	Rafael Sacks	3
13	Sijie Zhang	3
14	Yacine Rezgui	3
15	Yu-Shen Liu	3
16	Žiga Turk	3
17	Jung-Ho Yu	3

Fonte: O Autor (2019)

Para obter o resultado apresentando na tabela 5 foi necessário analisar nome a nome, pois em diferentes artigos um mesmo nome pode estar escrito de maneiras

diferentes, como foi o caso do Autor com 03 publicações Jung-Ho Yu, que possui seu nome escrito das seguintes maneiras: “Jungho Yu”, “Jung-Ho Yu” “JungHo-Yu”.

Os artigos selecionados foram analisados com o auxílio de um software QDA (Qualitative Data Analysis), o Nvivo (QSR Internacional, 2019). A primeira análise realizada no Software Nvivo, foi a pesquisa por frequência de palavras de nossa base de dados; a quantificação dessa pesquisa ocorre ao longo de todo texto dos artigos. Como resultado é possível ver na Figura 5 uma nuvem de palavras que apresenta os termos muito semelhantes aos termos de busca que foram extraídas na fase 3 da RSL.

Figura 5 Nuvem de Palavras que mais se repetem



Fonte: O Autor (2019)

Nós de suporte à categorização no software foram adicionados de maneira a formar duas vertentes de pesquisa, uma de ontologia e outra de BIM, conforme descrito na fase iii (Figura 3) da metodologia RSL Ordinatio. Um nó é uma marca criada pelo sistema, para auxiliar a análise e a quantificação. Os sub-nós de pesquisa foram as palavras chaves utilizadas nos motores de busca do portal ScienceDirect.

E para entender a distribuição dos artigos com relação ao ciclo de vida BIM, também foram adicionadas as palavras Design, Construction, Operation,

Maintenance e Demolition, que serão melhor abordadas durante o decorrer deste trabalho. Conforme exemplificado na Figura 6 o supracitado.

Figura 6 Nós - arquivos e referências

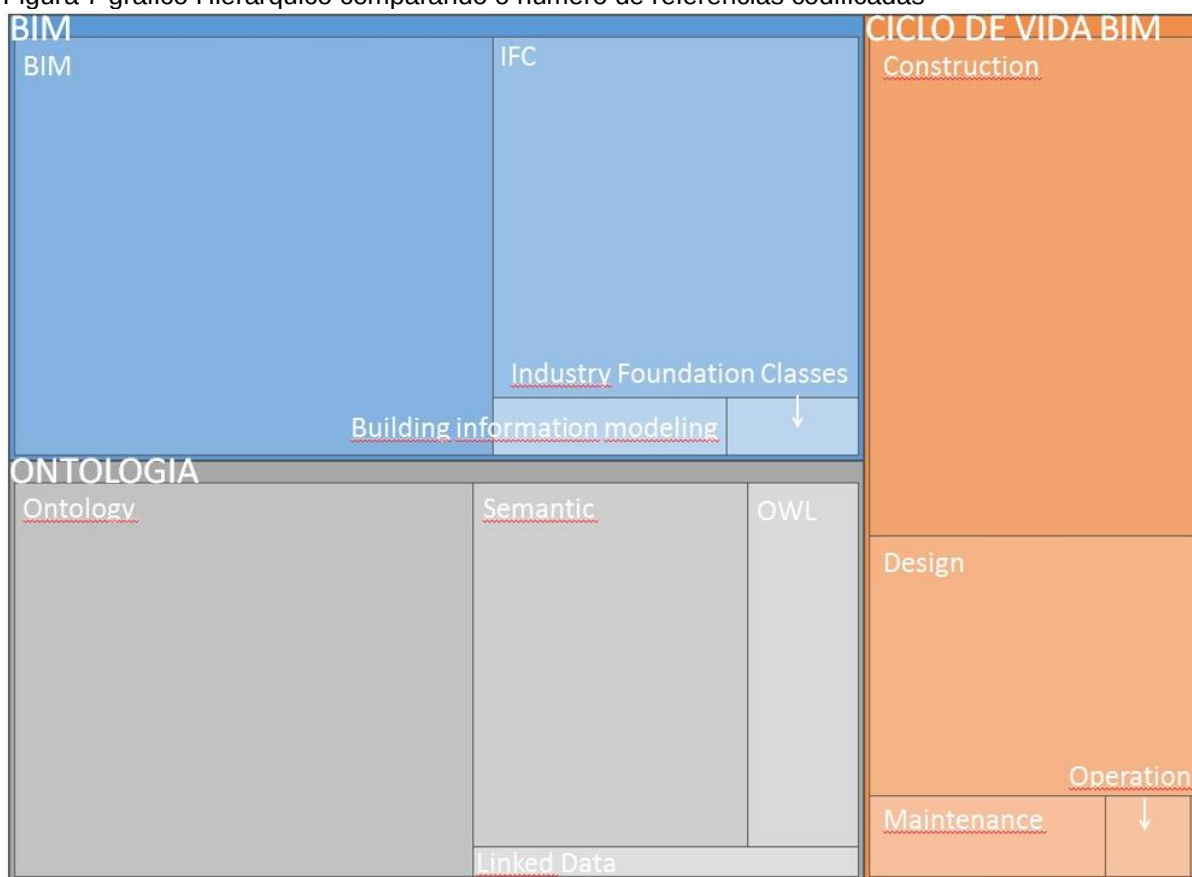
Nome	Arquivos	Referências
BIM	0	0
BIM	100	6358
Building information modeling	89	427
IFC	99	4186
Industry Foundation Classes	87	233
Ciclo de Vida BIM	0	0
Construction	100	5162
Demolition	10	19
Design	100	2683
Maintenance	56	600
Operation	61	216
Ontologia	0	0
Linked data	31	370
Ontology	74	5756
OWL	57	1277
Semantic	100	3185

Fonte: O Autor (2019)

O conhecimento em torno de BIM e Ontologia concentra-se nos estágios de Construção e Design do ciclo de vida BIM, enquanto a fase de demolição/desconstrução é citada em somente 10% dos artigos e mencionada pouquíssimas vezes.

Com a quantificação de palavras presente na Figura 6, um gráfico Hierárquico comparando o número de referências codificadas pode ser criado, resultando na Figura 7, onde a proporção de cada retângulo tem correlação ao número de vezes que a palavra aparecer em todos os artigos.

Figura 7 gráfico Hierárquico comparando o número de referências codificadas



Fonte: O Autor (2018)

Alguns artigos foram adicionados a essa pesquisa, além dos catalogados em nossa base de dados. Como o próprio autor da RSL InOrdinationio cita, alguns trabalhos são "clássicos" em seu campo, uma vez que foram citados um grande número de vezes ao longo dos anos e, portanto, não devem ser deixados de lado.

Nos próximos subitens deste capítulo serão abordadas análises dos termos de busca dos 03 subgrupos supracitados na Figura 7 (BIM - IFC, Ciclo de Vida BIM, Interoperabilidade - Ontologia), onde cada uma destas palavras viraram subtítulo dos capítulos subsequentes, e o subtítulo foi utilizado como termo de busca em um banco de dados composto por todos os 100 artigos classificados no ordinationio, e artigos essenciais ao tema.

2.2 BIM

O conceito de modelagem da informação da construção foi proposta inicialmente em 1975 por Eastman¹³⁷ através da expressão Building Description System (BDS) para caracterizar os CADs (Computer-Aided Design) que se

baseavam em estruturas de dados contendo informação geométrica associada a atributos diversos, capazes de representar mais adequadamente os elementos de projeto com o objetivo de visualizar e quantificar análises de projetos de construção e melhorar a eficiência da construção.

O BIM pode ser descrito como um conjunto de políticas interativas, processos e tecnologias que geram uma metodologia para gerência do design e das informações do projeto, em formato digital.

Para Meza (2014, apud EASTMAN), um modelo BIM deve ser um agregador dos dados necessários para a construção, incluindo desenhos, pastas, tabelas, relatórios, documentos, etc.

Para evitar confusão entre fabricantes de software descrevendo as funcionalidades e exaltando as qualidades de seus produtos, Eastman *et al.* (2008), caracteriza como **não** sendo BIM:

- a) Modelos que contêm apenas dados em 3D, e nenhum ou poucos atributos de objetos;
- b) Modelos que não têm suporte à inteligência paramétrica;
- c) Modelos que são compostos por diversas referências 2D que precisam ser combinadas para definir uma edificação;
- d) Modelos nos quais alterações em dimensões em uma vista não são automaticamente refletidas em outras.

Muller (2011) apud a (BIAGINI, 2007) explica que sistemas paramétricos permitem um reajuste das transformações em um modelo, de forma que todos os objetos conectados a ele se modifiquem corretamente e de acordo. Esta capacidade tem grande impacto no gerenciamento de projetos arquitetônicos, pois possibilita a utilização de um sistema integrando as várias áreas da construção.

Ou seja, uma alteração em uma parte do modelo todas as outras vistas/cortes são atualizadas. Além de o modelo ser paramétrico na questão da sua geometria, outros pontos como custos, quantitativos, análises, tabelas, documentos e relatórios são alteradas instantaneamente, não tendo a necessidade revisar todo o projeto a fim de atualizá-lo manualmente.

Por conta disso, uma das questões que o BIM pretende solucionar são os problemas de interoperabilidade que existem entre as diversas disciplinas da AEC, pois todas elas podem ser representadas em um único modelo. Adicionalmente, pode-se trabalhar paralelamente no mesmo modelo, o que facilita a identificação de

pontos de conflito, sendo esse um ponto em que se aumenta a produtividade do projeto (LEE *et al*, 2016). Com isso surge uma mudança de paradigma nas trocas de informações e relações entre as diversas áreas da AEC, resultando na diminuição de preço, tempo e aumento da qualidade em todo o ciclo de vida da construção.

Assim sendo, é possível dizer que é BIM é um grande avanço, assim como o CAD foi em sua época, devido as suas diversas e integradas aplicações. Existe, entretanto, ainda um longo caminho a percorrer no sentido de que mesmo entre os profissionais que já adotam o BIM como sua forma principal de trabalho, há limitações como à falta de interoperabilidade e integridade na transmissão das informações entre os softwares que existem no mercado (LEE & EASTMAN, 2015) (MULLER, 2011).

Neste sentido, com o grande volume de dados que são trocados entre os profissionais da área, é necessário garantir que as informações referentes aos objetos sejam interoperáveis entre um software e outro de forma correta em todo ciclo de vida da edificação. E esta ainda é uma barreira na aplicabilidade do BIM, uma vez que a interoperabilidade entre os aplicativos se mostra insuficiente para gerar segurança na troca de informações (MULLER *et al*.,2017).

O arquivo padrão para trocar de informações BIM é o IFC. O IFC é atualmente considerado o esquema mais adequado para melhorar a troca de informações e a interoperabilidade no setor de construção (MACIT *et al*, 2017).

2.3 IFC (INDUSTRY FOUNDATION CLASSES)

Buscando criar soluções para a interoperabilidade BIM, o grupo Building SMART desenvolveu o IFC (Industry Foundation Classes), um modelo de arquivo neutro que pode ser lido em diferentes softwares da indústria AEC, além de poder ser usado no planejamento, no projeto, na construção e gerenciamento do edifício durante todo o seu ciclo de vida (LEE *et al*, 2016).

De acordo com a buildingSMART (2018), o IFC é o padrão aberto internacional (não sendo controlado por um único fornecedor ou grupo de fornecedores) e estável para o intercâmbio de dados BIM. O IFC é suportado por cerca de 150 aplicativos de software em todo o mundo para permitir melhores fluxos de trabalho para o setor de AEC. No campo de Concreto Armado, são conhecidos

pelo menos 34 softwares que tem a capacidade de se comunicar com os demais softwares através do IFC.

Com a implementação do modelo de arquivo IFC, projetos que anteriormente eram constituídos de aplicativos que não se comunicavam entre si, por falta de similaridade no padrão de troca de informação (EASTMAN, 2008)[7], hoje podem utilizar o modelo IFC para melhorar a comunicação entre os profissionais da área.

O IFC é constituído de um banco de dados de objetos e definições de propriedade, que servem de base para representar o projeto de uma edificação ou auxiliar na interpretação de uma informação do edifício, que será abordado no item 2.3.3. O IFC é uma extensão aberta presente desde 1994 e suas extensões e aditivos são atualizadas com frequência anuais, conforme ocorre a evolução do mesmo.

2.3.1 Evolução do IFC

O modelo IFC surge em 1994 como uma iniciativa da IAI (International Alliance for Interoperability) com vista à criação de um standard de representação para a construção baseada no padrão ISO 10303 (STEP) (Standard for Exchange of Product Model Data) (Petrinja *et al*, 2007)[50]. O ISO-STEP tinha como principal produto a linguagem EXPRESS. O IFC se baseia nos conceitos da ISO-STEP EXPRESS para o desenvolvimento e a definição dos modelos.

Laakso & Kiviemi (2012), em sua análise histórica do IFC, mostram que a IAI, que mesmo preservando a sigla (inicialmente se chamava Industry Alliance for Interoperability), foi fundada pela aliança de doze empresas norte-americanas (incluindo Autodesk, Primavera, Softdesk, AT&T) em setembro de 1995, abrindo o consórcio para que outras empresas colaborassem com o desenvolvimento do padrão. Tinham como objetivo o desenvolvimento de um padrão aberto para dar suporte à tecnologia de modelagem da informação da construção.

Como visão, a IAI afirmou buscar a interoperabilidade de software na indústria da construção e, como missão, “Definir, promover e publicar uma especificação para compartilhamento de dados no ciclo de vida do projeto, globalmente, através das disciplinas e através das aplicações técnicas” (IAI, 1999)[52].

O IAI foi fundado nos seguintes valores (IAI 1999: 4):

- a) Organização Industrial do setor sem fins lucrativos;

- b) Afiliação aberta a qualquer empresa que trabalhe na indústria de AEC / FM;
- c) Ação orientada: Aliança vs. Associação;
- d) Tomada de decisão baseada em consenso;
- e) Entrega incremental em vez de estudo prolongado;
- f) Solução global;
- g) Profissionais da indústria de AEC / FM que trabalham com profissionais de software para definir a especificação padrão;
- h) Especificação a ser aberta para implementação e uso por todos os fornecedores de software;
- i) Especificação para Design a ser extensível;
- j) Especificação irá evoluir ao longo do tempo.

Entende-se então que o IFC é um padrão aberto de especificações de propriedades e definições, que tem como objetivo unir programadores com profissionais AEC, com livre acesso aos fornecedores de software, que tem a ideia de ter atualizações incrementais a fim de evoluir ao longo do tempo.

Com esse pensamento, a primeira versão IFC a existir foi o IFC 1.0 que foi formalmente lançado em setembro de 1995 e publicado em janeiro de 1997. Com escopo limitado, concentrou-se principalmente na parte arquitetônica do modelo de construção, incorporando cinco processos para arquitetura, dois para projeto de HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*), dois para gerenciamento de construção e um para gerenciamento de instalações. A primeira versão do IFC foi uma versão de testes iniciais, onde seu maior objetivo era criar estabilidade para IFC 1.5 (LAAKSO & KIVINIEMI, 2012)[51] .

O IFC 1.5 foi lançado em 1997 e por motivos de instabilidade do modelo, logo seu sucessor, o IFC 1.5.1, foi lançado para corrigir esses erros em julho 1998. Junto com ele foram lançados o Guia de Arquitetura do Modelo de Objeto da IFC e o Guia de Desenvolvimento de Especificações. Estes documentos foram divulgados ao público para aumentar o potencial de desenvolvimento colaborativo do padrão e foram de grande valia quanto a padronização da IFC (LAAKSO APUD KIVINIEMI, 2012). O IFC 1.5.1 foi o primeiro a ser suportado por software BIM comerciais.

O desenvolvimento do IFC 2.0 começou em dezembro de 1996 e lançado abril de 1999. Ou seja, lançamentos quase que anuais entre o IFC 1.0, IFC 1.5, IFC

1.5.1 e IFC 2.0 conforme previsto inicialmente pela IAI. Esse lançamento adicionava processos para estimativa de custos, planejamento e construção.

O IFC 2x é lançado em outubro de 2000 e neste ano o consórcio decide abrir o padrão para a implementação gratuita onde antes somente membros da organização poderiam. A fim de aumentar a legitimidade da norma, conseguir que a ISO publicasse a norma tornou-se uma prioridade dentro do consórcio. Em 2005 o núcleo estável da IFC 2x atingiu o status ISO / PAS16739. O escopo principal deste lançamento foi a padronização através da ISO (LAAKSO & KIVINIEMI, 2012). Problemas com o lançamento inicial do IFC2x foram corrigidos no lançamento do IFC2x Addendum 1, publicado em novembro de 2001. O lançamento do Adendo IFC2x 1 foi necessário para implementação e certificação da ISO (BUILDINGSMART, 2018).

O lançamento inicial do IFC2x2 foi publicado em maio de 2003 como o primeiro sucessor da nova plataforma IFC 2x. Introduziu muitas extensões para melhor suportar o serviço de execução da construção e o domínio estrutural, por exemplo, contém o primeiro submodelo da IFC para análise estrutural e detalhamento estrutural e muitas extensões para definições de controle elétrico, hidráulico e predial. Além disso, a inclusão de conteúdo 2D no espaço do modelo de um modelo BIM (linha, texto, símbolos) e informações de apresentação (cor, hachura, propriedades de superfície, como sombreado e renderização) são novas no IFC2x2. O IFC 2x2 também teve um aditivo chamado de Addendum 1, publicado em 2004 (BUILDINGSMART, 2018) (LAAKSO & KIVINIEMI, 2012).

Oficializado em 11 de janeiro de 2008 e iniciado em 2006, o IAI mudou seu nome para buildingSMART para refletir melhor a natureza e os objetivos da organização. A organização se adapta para crescer e servir além da indústria da construção civil para atender também à indústria de infraestrutura. A organização passa a ter como objetivo inteligência, interoperabilidade e trabalho em equipe para projetar, construir e operar o ambiente construído.

A buildingSMART passa a se preocupar mais com todo ciclo de vida da edificação e passa a operar em todos os aspectos ligados a construção. A buildSmart passa a oferecer serviços de certificação de softwares compatíveis e certificação conformidade de pessoas para acelerar a adoção de padrões openBIM (BUILDINGSMART, 2018).

Esse período marcou uma mudança em relação ao passado, aumentando o foco em métodos minimalistas de maneira estreitar as trocas de dados da IFC em trocas gerenciáveis, previsíveis e especificações implementáveis, com sua abordagem geral de padronização. Um resultado da abordagem minimalista emergente da padronização é o conceito de Information Delivery Manuals (IDM), cuja especificação foi introduzida em 2007 como um elemento oficial da padronização da IFC. Os IDMs visam atender às necessidades de implementação técnica de desenvolvedores de software e fornecer fluxos de trabalho de processo baseados em função para usuários finais, apoiando, assim, um processo de construção integrado. O IDM estabelece um subconjunto do esquema IFC necessário para satisfazer uma ou várias trocas de informações do setor de AEC (BUILDINGSMART, 2018).

Um IDM deve ser uma referência integrada para processos e dados exigidos pelo BIM e deve especificar onde um processo se encaixa; porque é relevante; quem são os atores criando, consumindo e se beneficiando da informação; qual é a informação; e como as soluções de software devem suportar essas informações (LAAKSO & KIVINIEMI, 2012).

Outro resultado da abordagem de padronização minimalista é o MVD (Model View Definition Format) da IFC, cujo objetivo declarado era “encontrar um equilíbrio útil entre os desejos dos usuários e as possibilidades dos desenvolvedores de software e documentar o resultado claramente” (LAAKSO & KIVINIEMI, 2012 apud HIETANEN 2006).

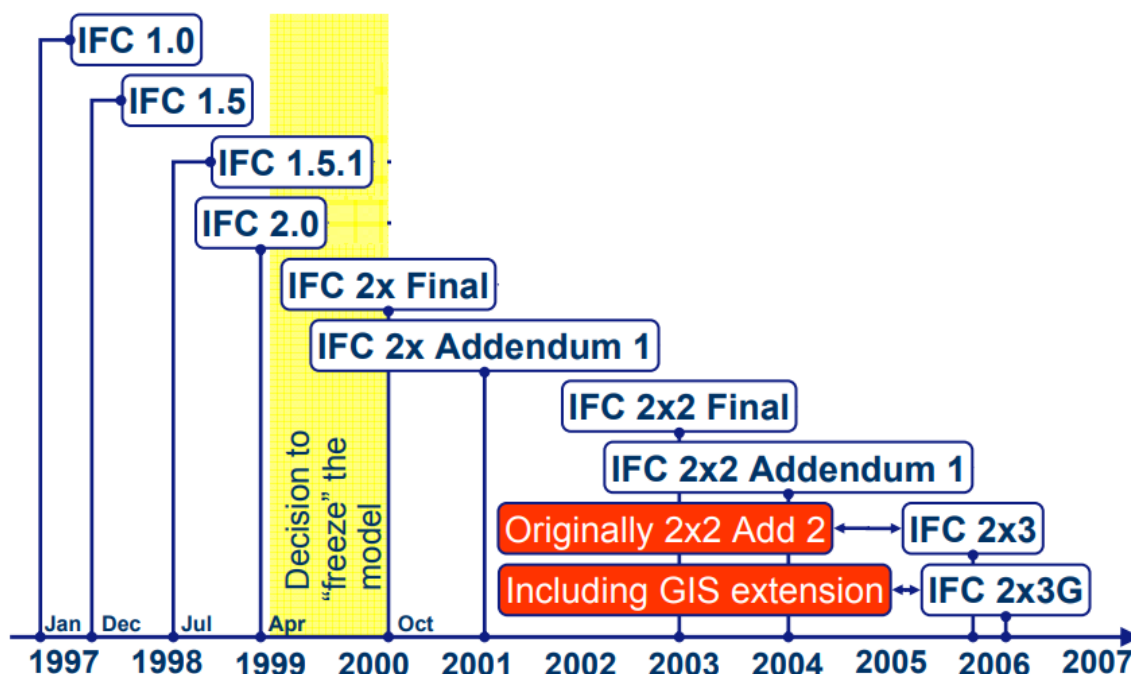
Embora o objetivo principal de um MVD seja especificar um conjunto de necessidades de informações dentro de um cenário de troca de informações específico, autores (KOCH *et al.*, 2017) citam esse conceito para especificar quais informações são necessárias e devem ser acessadas para executar um determinado aplicativo.

Conforme a buildingSMART, o lançamento do IFC2x3 foi publicado em fevereiro de 2006 como um sucessor do IFC2x2 Edition 2. Ele logo foi estabelecido como o ponto comum das implementações do IFC, combinando os threads de implementação anteriores do IFC2x e do IFC2x2. O IFC2x3 é principalmente um lançamento de aprimoramento de qualidade que não adiciona escopo, mas aprimora o IFC2x2. Em julho de 2007, a liberação do IFC2x3 foi substituída pelo addendum 1 do

IFC2x3 com melhorias principalmente na documentação e ficou conhecida como IFC2X3G.

Na Figura 8 é apresentado a evolução do IFC 1.0 até o IFC 2X3G, com os meses e anos na parte inferior das mesmas.

Figura 8 Evolução do IFC até 2007 - Adaptado de KIVINIEMI(2008)



Fonte: O autor adaptado de KIVINIEMI(2008)

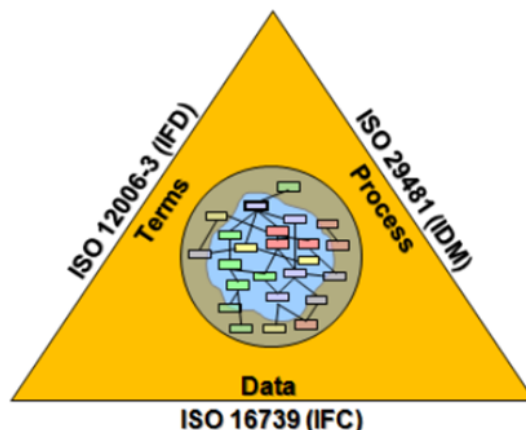
Em abril de 2008, marcado com o terceiro pilar da normatização do IFC, o IFD (International Framework for Dictionaries) é um dicionário aberto, onde conceitos e termos semânticos são armazenados, possuindo um identificador único, o GUID (Globally Unique ID).

O IFD descreve o que cada objeto é, quais são suas partes, propriedades, unidades e valores, a definição do seu conceito e toda informação necessária para comunicação entre os envolvidos flua uniformemente, independente de país ou língua.

Os autores Lee, Eastman e Solihin(2018) concordam que o IFD é imprescindível para suportar uma tecnologia integrada e para beneficiar a troca de dados de modelo de construção, fornecendo dados generalizados orientados a objeto em todos os domínios do setor da AEC. Sendo assim o IFC é “como transferir informação”; o IDF seria “O que você está transferindo”, o IDM “qual informação e

quando” e o MVD faz a ponte entre eles conforme pode ser melhor observado na Figura 9 .

Figura 9 Os três pilares de normatização do IFC



DESCRIÇÃO	NOME	NORMA
Descreve Processos	IDM Information Delivery Manual	ISO 29481-1 ISO 29481-2
Transporta Informação/ Dados	IFC Industry Foundation Class	ISO 16739
Mapa de Termos	IFD International Framework for Dictionaries	ISO 12006-3 buildingSMART Data Dictionary
Transforma processos em requisitos técnicos	MVD Model View Definitions	buildingSMART MVD

Fonte: O autor modificado de buildingSMART

O IFC4 (anteriormente nomeado de IFC2x4) foi lançado como a nova plataforma IFC desde março de 2013 até os tempos atuais, sendo a atual plataforma do IFC (com os devidos addendums). Ele incorpora várias extensões da IFC na construção, construção de áreas estruturais e de serviços, aprimoramentos de geometria e outros componentes de recursos e inúmeras melhorias de qualidade, totalmente integradas às especificações ifcXML e um novo formato de documentação (BUILDINGSMART, 2018).

Além disso, permite inúmeros novos fluxos de trabalho BIM - incluindo trocas de modelos 4D e 5D, bibliotecas de produtos, interoperabilidade BIM e GIS, simulações térmicas aprimoradas e avaliações de sustentabilidade. Melhora a legibilidade e a facilidade de acesso à documentação com vários conceitos de

implementação e exemplos totalmente vinculados, contém o esquema ifcXML4, totalmente integrado à especificação IFC, além do esquema EXPRESS.

É totalmente integrado com a nova tecnologia mvdXML e permite a fácil definição de serviços de validação de dados para envios de dados IFC4, corrige problemas técnicos encontrados desde o lançamento do IFC2x3, permite a extensão da IFC à infraestrutura e outras partes do ambiente construído. Além disso ele incorpora as definições de propriedade multilíngues vinculadas ao dicionário de dados buildingSMART (IFD). (BUILDINGSMART, 2018)

O primeiro adendo do IFC4 (IFC4 addendum 1) foi lançado em julho de 2015, incorporando as melhorias necessárias que foram identificadas durante as implementações piloto e as atividades de desenvolvimento para as primeiras definições do MVD (BUILDINGSMART, 2018). O segundo adendo do IFC4 (IFC4 addendum 2) foi lançado em julho de 2016, e é a última versão disponível do IFC. A principal alteração é relacionada a melhorias na geometria. Também foi atualizada porque a versão do MVD passa ser 1.1 (BUILDINGSMART, 2018).

O IFC5 está atualmente na fase inicial de planejamento e espera-se que inclua suporte completo para vários domínios de infraestrutura e mais recursos paramétricos. Não há previsão ainda de lançamento (BUILDINGSMART, 2018). A evolução do IFC4 pode ser sintetizada na Tabela 6

Tabela 6 Evolução do IFC4 até IFC5

Arquivo	Data de publicação	Descrição
IFC4	Março de 2013	Integração com ifcXML, melhora a capacidade de especificações em elementos. Novos recursos geométricos e paramétricos. Exportação de dados 4D e 5D. Simulações térmicas e avaliações de sustentabilidade. Melhora a interoperabilidade entre BIM e GIS. Vinculação com Dicionários multilíngue IFD
IFC4 ADD1	Julho de 2015	Correções técnicas do IFC4 e melhorias necessárias que foram identificadas durante as implementações piloto e as atividades de desenvolvimento para as primeiras definições do MVD
IFC4 ADD2	Julho de 2016	Atualização do MVD para MVD1.1 . Melhorias geométricas e de representação
IFC5	sem previsão	Suposição de suporte completo para vários domínios de infraestrutura e mais recursos paramétricos

Fonte: O autor (2019)

A evolução do IFC mostra que até então todas as versões lançadas tiveram aditivos (*addendums*), ou seja, não são a prova de falhas e tem potencial de evoluir.

Por exemplo os domínios que serão tratados nesta dissertação, `IfcStructuralAnalysisDomain` e `IfcStructuralElementsDomain`, foram adicionados versão 2x2 do IFC, porém, todas as versões subsequentes tiveram implementação e melhorias nesses domínios. Com isso, o presente trabalho pretende mostrar novas informações ainda não presentes no IFC no domínio de concreto armado para que em uma futura atualização do IFC, ela possa estar completa quanto ao seu ciclo de vida.

2.3.2 Organização de dados IFC

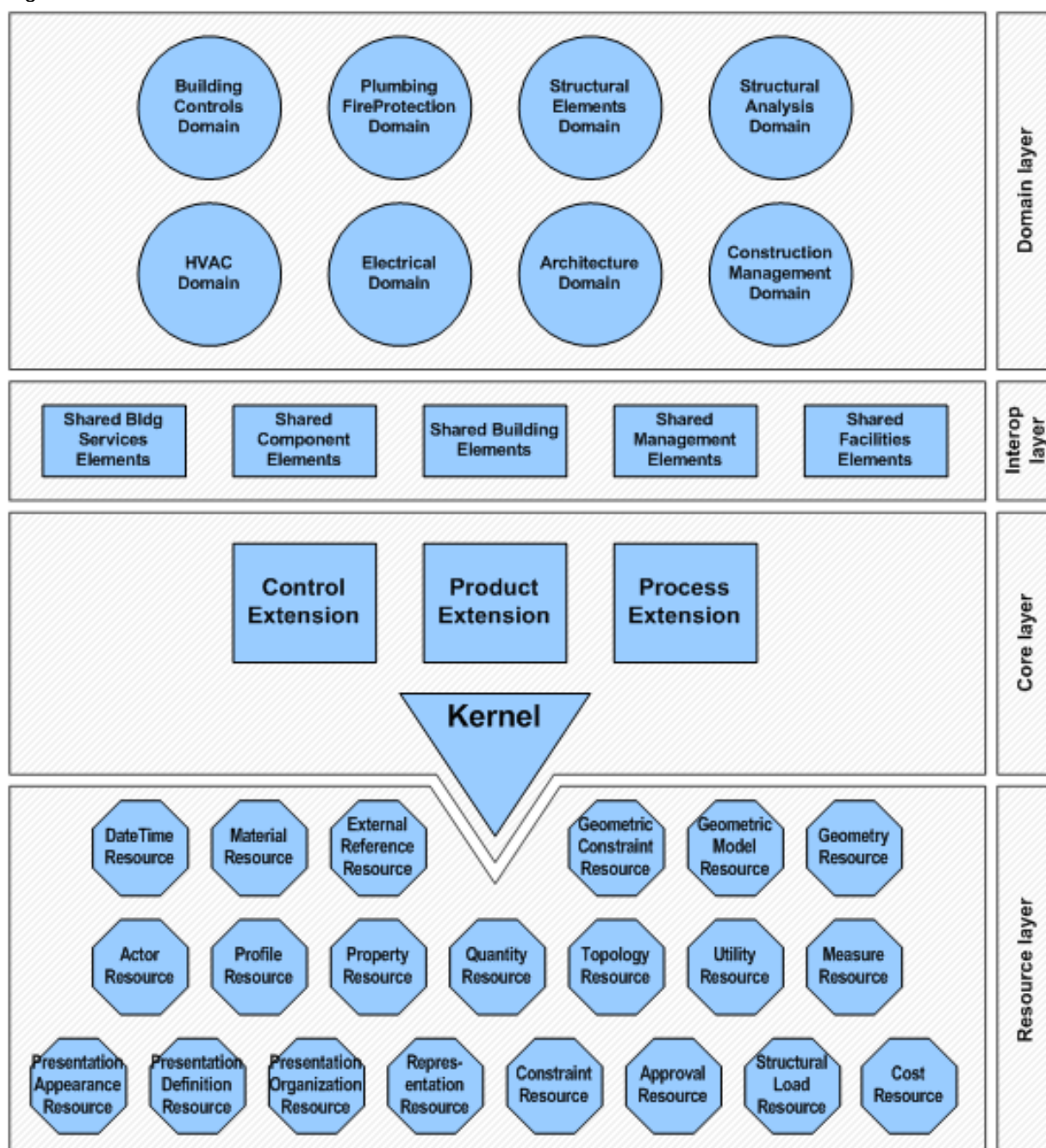
Conforme já visto, a linguagem utilizada para o desenvolvimento do IFC foi a EXPRESS, empregada também no padrão STEP, e regida pela ISO 10303-11. A linguagem EXPRESS é uma linguagem orientada a objetos, onde possui uma vertente em forma de representação gráfica, chamada EXPRESS-G e uma forma textual chamada EXPRESS. A linguagem consiste em elementos que permitem uma definição de dados não ambígua e especificação de restrições nos dados definidos (ISO 10303-11:2004).

O EXPRESS foi originalmente desenvolvido para fornecer um meio formal, e processável por computador, de definir os dados necessários para descrever um produto (qualquer coisa desde um microchip até um navio de guerra) ao longo de seu ciclo de vida, desde a concepção até a hora do descarte (Wilson, 1998).

Por conta disso, no tocante à estrutura de dados do arquivo IFC, segundo Monteiro & Martins (2011), existem três tipos de entidade fundamentais no modelo IFC: objetos, relações e propriedades. O modelo IFC apresenta uma estrutura hierárquica por módulos. Cada módulo agrupa uma série de entidades onde são definidos conceitos.

O Core Schema, presente na documentação HTML do IFC4.0, estabelecem a camada mais geral na arquitetura do esquema IFC, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 Estrutura de camadas do IFC



Fonte: BUILDSMART(2018)

Na documentação do IFC4 (presente no site da buildingSMART, 2018) existe um campo de introdução que apresenta as camadas do IFC. Na base da arquitetura do IFC, ou seja, na camada de recursos onde as entidades definidas nessa camada podem ser referenciadas e especializadas por todas as entidades acima na hierarquia. Nessa primeira camada estão as entidades comuns a vários objetos da AEC como custo, materiais, geometria, representação, medidas, data e hora. A camada nuclear, também conhecida como camada central fornece a estrutura

básica, os relacionamentos fundamentais e os conceitos comuns para todas as camadas. Todas as entidades definidas na camada do núcleo e acima derivam de um `IfcRoot`, tendo identificação, nome, descrição e informação únicas de controle de mudanças.

A organização de todas as entidades do modelo IFC, como proveniências da entidade `IfcRoot`, foi pensada de modo a criar uma superestrutura estável que possibilite a conciliação das novas entidades que vão sendo incluídas no Modelo.

A terceira camada, camada dos elementos compartilhados, é composta por objetos e/ou conceitos comuns a dois ou mais domínios. Essa camada também é conhecida como camada de interoperabilidade pois ela que faz a ponte entre objetos comuns a diferentes domínios.

A capa superior, nomeada de camada de domínio, organiza as definições de acordo com as 08 disciplinas do setor. As entidades definidas nesta camada são independentes e não podem ser referenciadas por nenhuma outra camada. Dentro desta camada estão presentes duas disciplinas abordadas no presente trabalho: `IfcStructuralAnalysisDomain` e `IfcStructuralElementsDomain`.

O `IfcStructuralAnalysisDomain` descreve o modelo de análise estrutural para integrar o domínio de engenharia estrutural. Ele utiliza as definições de elemento de construção e estrutura espacial existente e associa as suposições estruturais a ele. O foco é garantir que as informações de engenharia estrutural sejam capturadas e tornadas visíveis para outros domínios relacionados. Esse domínio será detalhado e analisado profundamente durante o decorrer do trabalho.

O esquema `IfcStructuralElementsDomain` fornece a capacidade de representar diferentes tipos de elementos de construção e modelar partes de elementos que, em geral, são de natureza estrutural. Além dos elementos de construção geralmente usados já definidos no esquema `IfcSharedBuildingElements`, o esquema contém entidades para representar partes de fundação, como fundações e estacas, bem como algumas subpartes estruturais importantes incluídas em outros elementos de construção, como diferentes tipos de peças de reforço estrutural e recursos e tratamentos estruturais. O esquema também inclui uma classe (`IfcReinforcementDefinitionProperties`) para definir os requisitos de armadura. Esse domínio também será detalhado e analisado profundamente durante o decorrer do

trabalho. Ambos os esquemas precisam ter informações suficientes para suportar todo o ciclo de vida BIM.

2.4 CICLO DE VIDA BIM

O ciclo de vida de um edifício tende a ser mais complexo do que qualquer outro produto, já que leva muitos anos para chegar ao ponto em que é demolido e, posteriormente, reciclado. Esse ciclo de vida estendido apresenta, então, necessidades especiais e documentação, e todos os estágios podem ser acompanhados por meio do BIM (WONG; ZHOU, 2015).

Consequentemente, a modelagem da informação de um edifício durante seu ciclo de vida aborda o problema da heterogeneidade de informações trocadas entre os atores. Isso demonstra a necessidade de homogeneizar a representação dessas trocas com a construção do conhecimento ao longo de todo o seu ciclo de vida (PITTET *et al*, 2014).

O BIM é comumente utilizado como compartilhamento de dados e recursos de conhecimento para suportar atividades de planejamento/projeto, construção, gerenciamento, utilização/operação, revitalização/ manutenção e demolição/desconstrução (KOCH, 2017). Cada etapa será abordada e contextualizada a seguir.

2.4.1 Design/Projeto/Planejamento

Para haver uma boa interoperabilidade BIM no estágio de projeto, algumas especificações devem ser atendidas. Em primeiro lugar, os sistemas devem permitir o mapeamento e a leitura de dados de formatos internos para formatos externos (como IFC, Extensible Markup Language - XML, planilhas ...). Em seguida, as plataformas devem incluir recursos para aplicar atributos de objeto e permitir que funções de mapeamento sejam vinculadas a dados numéricos e textuais. Além disso, deve suportar modificação de geometria.

A plataforma também deve permitir que esses recursos acessem e incluam dados de diferentes fontes (bibliotecas de propriedades de materiais, tabelas de latitude / longitude etc.). Por fim, uma plataforma deve ser capaz de ler os resultados da análise dos aplicativos e exibir informações e sugestões de design. Outro fato

importante é que, dependendo do nível de desenvolvimento do modelo, as informações necessárias na análise podem ser padronizadas para valores normativos. Se a informação existe, pode substituir os padrões (SANGUINETTI *et al.*, 2012).

Mas as primeiras fases do projeto raramente são suportadas e o BIM não é explorado em todo o seu potencial. As fases iniciais do projeto são caracterizadas por um processo iterativo de busca de soluções plausíveis (LANGENHAN *et al.*, 2013). Através da padronização normativa de Sanguinetti e o estudo de melhoria de tomadas de decisão em fases iniciais de projeto, entende-se que mapeando a norma de estruturas de concreto armado e adicionando informação no modelo, seria possível diminuir e automatizar as iterações necessárias no estágio inicial do projeto, facilitando encontrar soluções para o modelo estrutural.

Os Autores Costa & Madrazo (2015), citam evolução no tema com o catálogo digital de componentes de concreto pré-fabricados da fabricante BAUKOM, onde diferentes serviços podem ser desenvolvidos para melhorar as funcionalidades do software BIM. Um deles é um serviço implementado como um plug-in para o Autodesk Revit que facilita a busca de produtos estruturais pré-moldados no processo de sua montagem para criar estruturas de modelagem de edifícios com esses componentes, de maneira que, depois de lançar as estruturas pré-moldadas de pilares e vigas, e adicionar as informações pertinentes, onde o próprio software indica soluções possíveis de lajes.

2.4.2 Construção

O maior objetivo de desenvolver e promover o BIM são realizar construções com o menor custo possível, além de minimizar o consumo de recursos na operação e construção (WANG; ZHAI, 2016). Isso pode ser resultado tanto de um projeto bem realizado, quanto por uma execução rica em informações, evitando erros e perdas de material.

Estudos de interoperabilidade como de Huber & Esmanioto (2013), revelam que a má interoperabilidade de elementos estruturais com os demais projetos complementares resulta em uma perda de tempo e aumento de custo superior a 7% do valor global da obra. Como exemplo, os autores citam as furações de vigas, que são realizadas após a concretagem dos elementos estruturais, onde em um

ambiente integrado BIM já estariam previstos em projetos e realizados durante a concretagem, evitando perdas de resistência estrutural e aumentando a produtividade.

Em uma pesquisa de ZHANG *et al* (2018), investigou-se uma nova abordagem de BIM para o planejamento do local de construção em nível de atividade que pode melhorar proativamente a segurança da construção. O método apresentado estabelece a modelagem do espaço de trabalho em BIM, usando tecnologias de sensoriamento remoto e modelagem de espaço de trabalho como parte integrante do planejamento de segurança de construção.

Como estudo de caso do referido artigo, foram utilizados uma equipe de trabalho que constrói colunas de concreto armado moldadas no local. Portanto, melhora a base de como as decisões são tomadas relacionadas à segurança do canteiro de obras, bem como seu impacto potencial em um ambiente de trabalho produtivo e desobstruído.

Neste sentido, KARAN *et al* (2015) mostra também que o bom planejamento do local do canteiro de obras, como equipamentos, escritórios e áreas de montagem, ajudam a minimizar o tempo de deslocamento e os custos de movimentação dos recursos e melhora a produtividade da operação.

Outro ponto positivo da Modelagem em BIM para execução é a possibilidade de representar as classes de dados como camadas separadas na plataforma. Isso permite ter visões em 3D do ambiente interno com diferentes níveis de detalhes ajustados aos requisitos do executor, ligando e desligando a visibilidade de várias camadas e ajustando a transparência e a ampliação através do zoom (TASHAKKORI *et al*, 2015).

2.4.3 Operação e Manutenção

De acordo com os autores CHEN *et al* (2018), do ponto de vista da operação das instalações, os pesquisadores e técnicos estão preocupados com a condição de construção (fornecimento de eletricidade, gás, água quente e fria), condição de ativos físicos (máquinas de laboratório e equipamentos especiais) e localização e disponibilidade de equipamentos especiais, ferramentas (por exemplo, escadas, carrinhos). O gerente de operações está mais interessado em garantir a

funcionalidade e a confiabilidade do ambiente de construção (por exemplo, sistemas HVAC, Estrutura de concreto armado), bem como analisar o modelo de informações da construção para planejar renovações e organizar novas instalações de equipamentos e melhoria.

Especialmente na construção de indústrias, os documentos de projeto geralmente construídos são incompletos ou falhos. Isso resulta em problemas operacionais, uma vez que a fábrica é transferida da construção para a operação. Para melhorar esta situação, os conhecimentos de planejamento de operação e de dispositivos sensoriais de controle de qualidade podem ajudar os usuários a lidar com um ambiente de operação dinâmica (CHI *et al.*, 2015).

Alguns modelos e sistemas são especialmente limitados na fase de operação, porque representam apenas atividades de construção. Assim, métodos podem ser desenvolvidos para permitir a vinculação automática das atividades de construção e operação por meio do BIM (KIM *et al.* 2015).

No desenvolvimento de melhoria nesta área, o IFC tem sido cada vez mais utilizado na cibernética da fase operacional, como na gestão de energia de edifícios inteligentes e na otimização do consumo de energia em edifícios através de uma abordagem baseada no histórico da edificação. (HOWELL *et al.*, 2017)

Conforme artigo presente na 10ª posição do Ordinato, a manutenção de instalações é um problema de múltiplos domínios que engloba contabilidade financeira, manutenção predial, gerenciamento de instalações, recursos humanos, gerenciamento de ativos e conformidade de código, afetando diferentes partes interessadas de diferentes maneiras (CURRY *et al.*, 2013). Além disso, normalmente, a equipe que projeta e constrói o edifício final, não é a mesma que realiza manutenção no edifício.

Por conta disso, um sistema colaborativo baseado em uma ontologia evolutiva que descreve o conhecimento dos recursos de gerenciamento de edifícios e instalações (ontologia BIM) pode automatizar essa tarefa ao longo de todo o ciclo de vida do edifício (PITTET *et al.*, 2014). A atualização do modelo ao longo da construção da edificação, também conhecido como projeto As-build, é necessária visto que muitas vezes o modelo inicial não corresponde ao modelo de design do edifício devido a alterações de construção ou renovações (BASSIER *et al.*, 2018).

Esforços foram feitos para estender o uso da modelagem de informações prediais além de seus primeiros projetos e construções, principalmente na busca de

soluções que fornecessem informações precisas sobre o edifício e também fossem adequadas para manutenção e suporte. Neste momento, há esforços significativos para aplicar o padrão IFC em várias partes do mundo. O autor Čuš Babič *et al.* (2014) cita Singapura, Austrália, Estados Unidos da América e Noruega com presença de artigos sendo publicados com relação a manutenção e suporte.

2.4.4 Demolição/Desconstrução

A reutilização de componentes de construção e a desmontagem têm inúmeras vantagens em relação à demolição e/ou reciclagem tradicionais. As atividades de desconstrução incluem demolição de concreto, quebra de pedaços menores, remoção de barras de reforço e componentes de aço, transporte de entulho para usinas de reciclagem de aço e concreto e, finalmente, o próprio processo de reciclagem.

A adoção de estratégias de desconstrução mais sustentável como reutilização e reciclagem também podem resultar em economia e economia de energia, eliminando a necessidade de demolição tradicional e aterro de entulho. Com o auxílio do BIM, esse custo pode ser estimado calculando o tamanho do trabalho necessário, usando os atributos que atribuem a atividade aos componentes e multiplicando-os pelo custo unitário (inserido manualmente pelo usuário ou importado das bibliotecas de dados) (AKBARNEZHAD *et al.*, 2014).

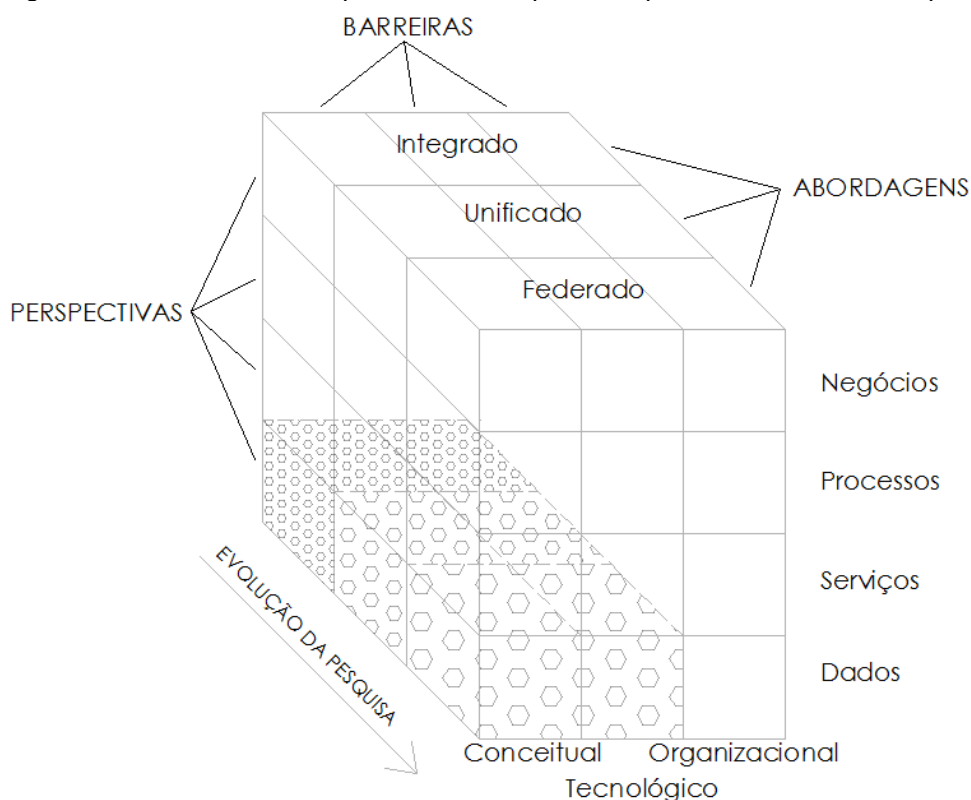
A vida primária de um edifício é envolvida pelo ciclo de vida tradicional (design até a extração de matérias-primas até a demolição). No entanto, a vida secundária começa quando o concreto/aço é reciclado e usado em uma nova construção (WU *et al.* 2014). A reutilização representa que há uma nova edificação iniciando, porém, com características já definidas anteriormente (como relação água/cimento do concreto, resistência, quantidade), repassando todas as fases descritas acima novamente.

Por conta disso, existir um único arquivo BIM/IFC que tenha informações necessárias para suprir todo o ciclo de vida BIM é indispensável para assegurar a interoperabilidade de dados.

2.5 INTEROPERABILIDADE

Autores como (CHEN, 2008) interpretam a interoperabilidade através de três eixos de uma estrutura em cubo indicada na Figura 11: perspectivas, barreiras e abordagens. Abordagens podem ser entendidas como níveis de interoperabilidade, sendo elas: integradas, unificadas ou federadas. O próximo eixo consiste em barreiras de interoperabilidade, podendo elas serem conceituais, técnicas ou organizacionais. Isso significa que há mais dimensões na interoperabilidade do que sistemas e questões técnicas. Finalmente, o eixo final apresenta perspectivas de interoperabilidade: negócios, processos, serviços e dados.

Figura 11 Estrutura de interoperabilidade empresarial (três dimensões básicas)



Fonte: O Autor (2019) adaptado de CHEN 2008

O presente trabalho aborda questões de níveis de interoperabilidade de uma forma evolutiva – de um sistema integrado para federado. Na camada federada temos preocupações mais semânticas, obtidas com a evolução da ontologia e do arquivo IFC, busca-se transformar o arquivo IFC em um formato comum para todos os modelos em BIM, sendo considerado Integrado. Conforme Chen (2008) este formato deve ser tão detalhado quanto os modelos. O formato comum não é

necessariamente um padrão, mas deve ser acordado por todas as partes para elaborar modelos e construir sistemas.

No campo de barreiras, esta pesquisa está enquadrada tanto no eixo conceitual quanto no eixo técnico. No eixo Conceitual, através das Ontologias, conceituam-se as diferenças sintáticas e semânticas das informações a serem trocadas. No eixo técnico, esta barreira diz respeito a padrões para apresentar, armazenar, trocar, processar e comunicar os dados através do uso de computadores.

No último eixo, as preocupações deste trabalho estão localizadas em Dados, que compreende trabalhar em diferentes modelos de informações, que possam ser transmitidos entre bancos de dados ou sistemas sem perda de dados. Na Figura 11 os cubos em hachuras circulares representam onde esta dissertação está enquadrada.

A interoperabilidade de dados pode ocorrer através da extensão IFC (Industry Foundation Classes), que é um modelo de dados e também representa a especificação de dados padrão para troca de informações durante todo o ciclo de vida de um edifício.

Sheth (1999) sugere que as soluções de interoperabilidade dos sistemas estão em diferentes níveis, as quais podem apresentar diferenças sintáticas, estruturais ou semânticas. A questão sintática diz respeito ao uso de diferentes modelos ou linguagens; a questão estrutural está relacionada a divergências entre as estruturas de dados adotadas por cada sistema; a questão semântica remete a adoção de interpretações divergentes para a informação intercambiada entre os sistemas.

2.5.1 Interoperabilidade semântica

Interoperabilidade semântica é a capacidade de comunicação de informação entre dois ou mais softwares e ter essas informações corretamente interpretada pelo sistema receptor, com coerência nas suas representações de acordo com o contexto de uso, como previsto pelo sistema transmissor.

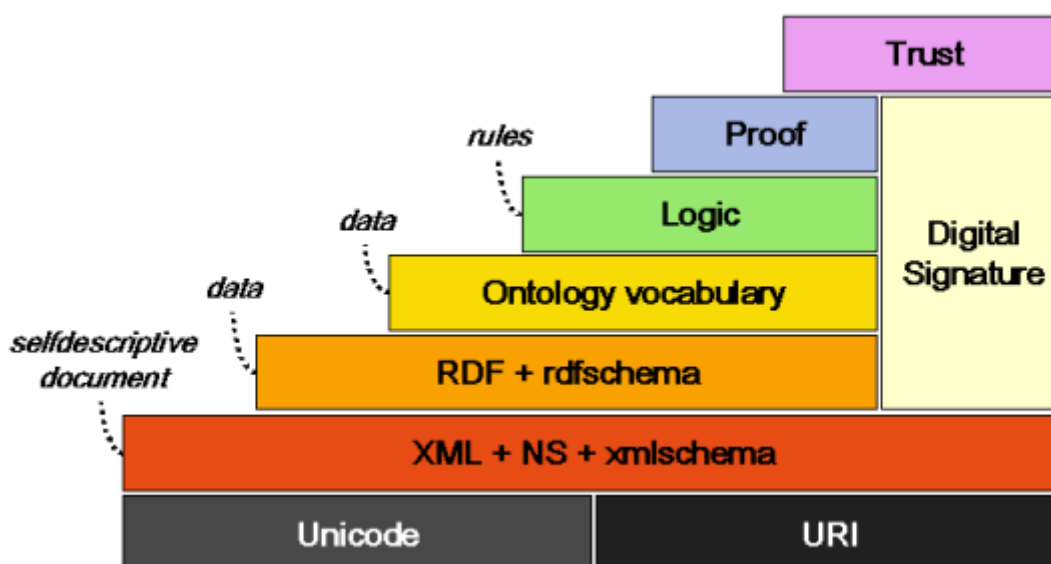
As relações semânticas são definidas como “associações significativas entre dois ou mais conceitos, entidades ou conjuntos de entidades” (GUO et al, 2018 apud KHOO et al, 2006)[79]. Como os conceitos, as relações semânticas desempenham um papel crítico na representação do conhecimento.

Assim como a buildingSMART está para padronização do IFC, a W3C está para a padronização da organização da informação na WEB. A World Wide Web Consortium (W3C) é a principal organização de padronização da World Wide Web (www). Consiste em um consórcio internacional com quase 400 membros, agrega empresas, órgãos governamentais e organizações independentes com a finalidade de estabelecer padrões para a criação e a interpretação de conteúdos para a Web.

Os princípios da Web Semântica são implementados nas camadas de tecnologias e padrões da Web, sendo que uma das ferramentas da Web semântica para representar dados em um domínio é a ontologia, que será utilizada como ferramentas neste trabalho. As camadas apresentadas por Miller (2001) e aceitas pela W3C podem ser vistas na Figura 12.

As camadas Unicode e URI garantem o uso de conjuntos de caracteres internacionais e fornecem meios para identificar os objetos na Web Semântica. A camada XML com definições de namespace e esquemas garante a integração das definições da Web Semântica com os outros padrões baseados em XML. Com RDF [RDF] e RDFSchema [RDFS] é possível fazer declarações sobre objetos com URIs e definir vocabulários que podem ser referenciados pelos URIs. A camada de Ontologia suporta a evolução dos vocabulários, pois pode gerenciar e definir as relações entre os diferentes conceitos.

Figura 12 As camadas da Web Semântica



A camada de Lógica apresenta as regras entre os conceitos, ou seja, as relações entre os diferentes elementos na ontologia, que são definidas em termos da Linguagem de Regras da Web Semântica (SWRL , Semantic Web Rule Language). As camadas superiores, Prova e verdade, validam as regras e tentam gerar conhecimento a partir das mesmas.

Autores de “Semantic material name matching system for building energy analysis” (KIM et al, 2013), que ocupa a posição 56 da RSL realizada, descrevem que para usar relacionamentos de dados baseados em BIM em um procedimento de inferência semântica, pesquisadores convertem arquivos IFC para OWL (Web ontology language) para entrada em aplicativos da Web Semântica. Também conhecido com ifcOWL, esta ontologia é gerada automaticamente a partir do esquema EXPRESS do 'IFC4' usando o conversor 'IFC-to-RDF' desenvolvido por Pieter Pauwels[37], artigo de nº 17 da classificação do Ordinatio. Essa técnica será desenvolvida neste trabalho.

Neste sentido, Mignard *et al.* (2014) apresenta que o BIM semântico é o uso de ontologias para gerenciar modelos. As ontologias unificam o conhecimento gerado durante cada etapa do ciclo de vida do edifício. Para este propósito, os usuários descrevem elementos do mundo real e suas interações entre si no modelo.

De acordo com Pieter Pauwels (2016), uma ontologia do IFC, ou ifcOWL, são exploradas e pesquisadas pois permitem:

- a) Utilizar o já consolidado padrão IFC para representar dados de construção,
- b) Explorar os softwares de tecnologias semânticas da Web em termos de distribuição de dados, extensibilidade do modelo de dados, consulta e raciocínio.
- c) Reutilizar implementações de software para fins gerais para armazenamento de dados, verificação de consistência e inferência de conhecimento.

Os autores (KIM et al, 2018) também mostram através de um gráfico (Figura 13) a evolução do gerenciamento da informação, da modelagem da informação (BIM) e da Semântica Web culminando em 2012 no ifcOWL, e em 2016 resultando na integração do gerenciamento BIM usando web semântica.

Figura 13 Marcos técnicos do gerenciamento de informações



Fonte:2 (KIM et al, 2018)

Emergindo da pesquisa na Web Semântica, linked data, já presente na buildingSMART, os protocolos abertos existentes e os padrões W3C da arquitetura da Web para compartilhar dados estruturados na Web são aproveitados. Dados vinculados propõem uma abordagem para interoperabilidade de informações baseada na criação de um espaço global de informações; também conhecida como Nuvem de Dados Vinculados. Dados vinculados fornecem um mecanismo através do qual os silos de informação podem existir em um formato homogêneo (CURRY et al., 2013).

2.6 ONTOLOGIA

Ontologia é uma das tecnologias da web semântica para representar, trocar e reutilizar conceitos de domínio, relações entre conceitos e regras. A ontologia começou a ser usada na área de AEC para representação de conhecimento,

interoperação de informação e raciocínio baseado em regras devido a sua melhor adaptabilidade e eficiência (MA *et al.*, 2018)[11].

Existem muitas definições presentes na RSL, porém, o 13^a artigo classificado na lista do *ordinatio* apresenta o termo ontologia variando de Aristóteles: 'a ciência que estuda o ser' e para a prática: 'definição de conceitos com significado semântico acordado e aceito em um domínio e a relação entre conceitos' e 'especificação de uma conceptualização' (GARCIA *et al.*, 2004). Na Filosofia, ontologia é um ramo da Metafísica que diz respeito às quais categorias de entidades existem e estão relacionadas.

As ontologias são usadas para documentar a compreensão de vários conceitos de maneira formal e explícita (PETRINJA *et al.*, 2007). Porém, do ponto de vista dos autores, a melhor definição de que a captura é a essência de uma ontologia é a dada por Gruber: "uma ontologia é uma especificação formal e explícita de uma conceituação compartilhada" (REZGUI *et al.*, 2011).

2.6.1 ORGANIZAÇÃO DE DADOS DE UMA ONTOLOGIA

Para o guia de criação de ontologias de Noy (2000), uma ontologia é uma descrição formal explícita de conceitos (concepts) em um domínio de discurso (classes, às vezes chamadas conceitos), propriedades de cada conceito que descreve vários atributos e atributos do conceito (slots, às vezes chamados papéis (roles) ou propriedades) e restrições em slots (facetas (facets), às vezes chamadas de restrições de função).

Uma ontologia junto com um conjunto de instâncias individuais de classes constitui uma base de conhecimento. Na realidade, existe uma linha tênue onde a ontologia termina e a base de conhecimento começa (NOY *et al.*, 2000).

Na tese de doutorado de Detro(2018) apud Corcho, Fernandez-López, Gómez-Pérez(2007), mostra-se que existe uma organização de dados comum a todas as ontologias mesmo variando a forma de representação do conhecimento e a linguagem correspondente. São 04 elementos comuns:

- **Classes:** representam conceitos que são usados para representar objetos e relações em um domínio descrito. Geralmente organizado em taxonomias (forma de agrupar conceitos comuns em conjunto) através das quais mecanismos de herança

podem ser aplicados. Metaclasses também podem ser definidos no paradigma de representação de conhecimento e estabelecem diferentes camadas de classes na ontologia onde são definidas.

- **Relações:** representam um tipo de associação entre os conceitos em um domínio. Relações em ontologias são geralmente binárias. O primeiro argumento é conhecido como o domínio (domain) da relação e o segundo é o intervalo (range).

- **Axiomas formais:** sentença de modelo que são sempre verdadeiras. Normalmente, usado para representar o conhecimento que os outros componentes não podem definir formalmente. Eles são úteis para inferir novos conhecimentos, para verificar a consistência da própria ontologia ou a consistência do conhecimento armazenado em uma base de conhecimento.

- **Instâncias:** representam elementos ou indivíduos em uma ontologia

2.7 CONCRETO ARMADO

São necessárias partes resistentes em uma edificação para que esta possa cumprir o seu propósito. É chamado de estrutura o conjunto de partes resistentes de uma construção que são capazes de suportar estados limites estabelecidos, e garantir a segurança daquele edifício (FUSCO, 1930).

Diferentes tipos de peças estruturais são empregados para atender as complexidades de cada edificação em particular, que por sua vez devem ser combinadas de maneira a garantir um conjunto resistente. Este trabalho trata especialmente de estruturas em concreto armado.

As primeiras aplicações desta combinação aconteceram em 1849 com a ajuda de Monier que empregou o uso de armaduras em aço devido a necessidade de aumento na resistência à tração em estruturas de concreto (FUSCO, 1930).

Segundo a NBR 6118:2014, elementos de concreto armado são aqueles que, para adquirir a resistência necessária para um desempenho estrutural adequado, dependem da aderência entre o concreto e a armadura, tendo os alongamentos iniciais aplicados somente depois da materialização da união dos insumos.

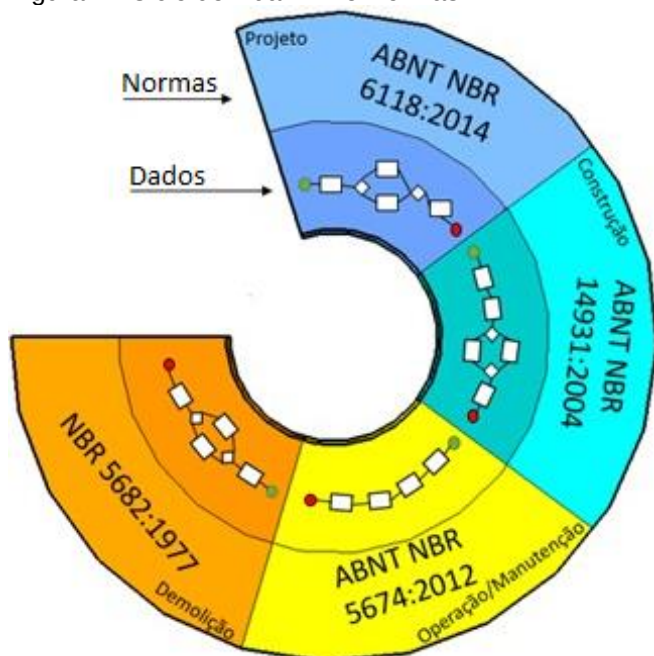
Ao projetar uma estrutura de concreto armado além da atenção referente à armadura, cimbramento e fôrmas, é necessário estudar elementos constituintes do próprio concreto, como por exemplo: as propriedades dos materiais constituintes, a dosagem da mistura e a execução da concretagem. Todos esses pontos devem ser

levados em consideração na execução do projeto para que a estrutura não venha a ter problemas.

No BIM, todas as informações de concreto armado devem estar representadas nos objetos modelados de estruturas de concreto no Arquivo IFC. Cada informação referente ao Concreto armado está associada à uma fase do ciclo de vida BIM, como por exemplo, informações de análises estruturais são consumidas na fase de projeto, quantitativos e detalhamentos geométricos são utilizados na fase de execução/construção, controle de qualidade como fissuramento, recalque e desempenho são itens ligados a fase de Manutenção/Operação, e na fase de desconstrução, todos os itens anteriores devem ser levados em consideração para garantir a segurança da equipe executora.

Os critérios utilizados para basear o conhecimento em estruturas de concreto armado seguiram padrões estabelecidos pela Norma Brasileira NBR. Cada fase do ciclo de vida BIM possui uma NBR específica para atender seus requisitos, conforme Figura 14.

Figura 14 Ciclo de vida BIM e Normas



Fonte: O autor 2019

No Brasil a principal norma de projeto de estruturas de concreto armado é a ABNT NBR 6118, que em 2015 foi reconhecida pela ISO (International Organization

for Standardization), como uma norma técnica que cumpre exigências internacionais, podendo ser utilizada em qualquer lugar do mundo.

A norma brasileira vigente para a construção de estrutura de concreto é a ABNT NBR 14931:2004. Essa norma detalha os requisitos necessários para a execução de uma estrutura de concreto e seu processo. A norma de execução de estruturas de concreto era antigamente, contemplada dentro da norma de projetos, depois da atualização de 2003 da ABNT NBR 6118, passou a ser exclusivamente de projetos, e, então, sendo criada a presente norma para a execução de estruturas de concreto.

As manutenções das edificações são normatizadas pela ABNT NBR 5674:2012. Ela define o escopo para o processo de manutenção dos elementos das edificações sendo então inclusa as estruturas das mesmas. A norma define que é importante superar a cultura de que com a entrega da obra encerra-se o processo construtivo, já que as edificações e a própria estrutura dela, são feitas para atender os usuários durante muitos anos, atendendo os serviços e resistindo aos agentes ambientais.

A ABNT NBR 5682 de dezembro de 1977 fixa condições para contratação e licenciamento de trabalhos de demolição, providências e precauções a serem tomadas antes e depois dos trabalhos, e métodos de demolição. Essa norma ficou vigente até novembro de 2008 e então foi cancelada, com promessas de adoção da norma americana, mais completa, porém sem sucessora até o presente momento.

2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA

O BIM pode ser descrito como um conjunto de políticas interativas, processos e tecnologias que geram uma metodologia para gerência do design e das informações do projeto, em formato digital. O grupo buildingSMART desenvolveu o IFC (Industry Foundation Classes), que hoje está na versão IFC4 add2, um modelo de arquivo neutro de troca de informações BIM que pode ser lido em diferentes softwares da indústria AEC, além de poder ser usado no planejamento, no projeto, na construção e gerenciamento do edifício durante todo o seu ciclo de vida.

O ciclo de vida de um edifício tende a ser mais complexo do que qualquer outro produto, já que leva muitos anos para chegar ao ponto em que é demolido e,

posteriormente, reutilizado. Para representar um elemento da construção civil que passa por todas as fases do ciclo de vida da edificação foi determinado o concreto armado como foco de aplicação deste trabalho.

Elementos de concreto armado permitem serem reutilizados depois de demolidos, o que representa que há uma nova edificação iniciando, porém, com características já definidas anteriormente (como relação água/cimento do concreto, resistência, quantidade), repassando todas as fases descritas acima novamente. Por conta disso, existir um único arquivo BIM/IFC que tenha informações necessárias para suprir todo o ciclo de vida BIM é indispensável para assegurar a interoperabilidade de dados.

Essas informações de concreto armado estão presentes dentro do IFC nos domínios `IfcStructuralAnalysisDomain` (Análise estrutural) e `IfcStructuralElementsDomain` (Elementos Estruturais). Esses domínios estão descritos dentro da documentação do IFC add2, em formato gráfico EXPRESS-G e serão explorados no capítulo 3 e 4. Para saber se as informações contidas dentro desses domínios são suficientes, foram mapeadas as informações constantes na norma brasileira para cada fase do ciclo de vida.

Para formalizar o conhecimento das Normas técnicas, a ferramenta utilizada neste trabalho é a Ontologia, que é uma das tecnologias oficiais da web semântica para representar, trocar e reutilizar conceitos de domínio, relações entre conceitos e regras. Há na literatura ontologia de extração de informações a partir do IFC, presente no artigo classificado na revisão da literatura chamado “The IFC to Linked Building Data Converter”, de Boundel (2018), que será abordado e replicado nos capítulos 3 e 4. Porém, não há na literatura o caminho inverso, onde uma Ontologia é realizada com base em normas para alimentar o IFC.

Além de manter os dados íntegros, a ontologia tem capacidade de organizar semanticamente o conhecimento, que assegura a comunicação de informação entre dois ou mais softwares e ter essas informações corretamente interpretada pelo sistema receptor.

Como resultado desta revisão sistemática os termos, ferramentas e conceitos de identificação do espaço de pesquisa foram apresentados e referenciados, sendo que no próximo capítulo será abordada a estratégia de pesquisa, isto é, a definição de quais procedimentos são utilizados para a coleta e para a análise dos dados levantados.

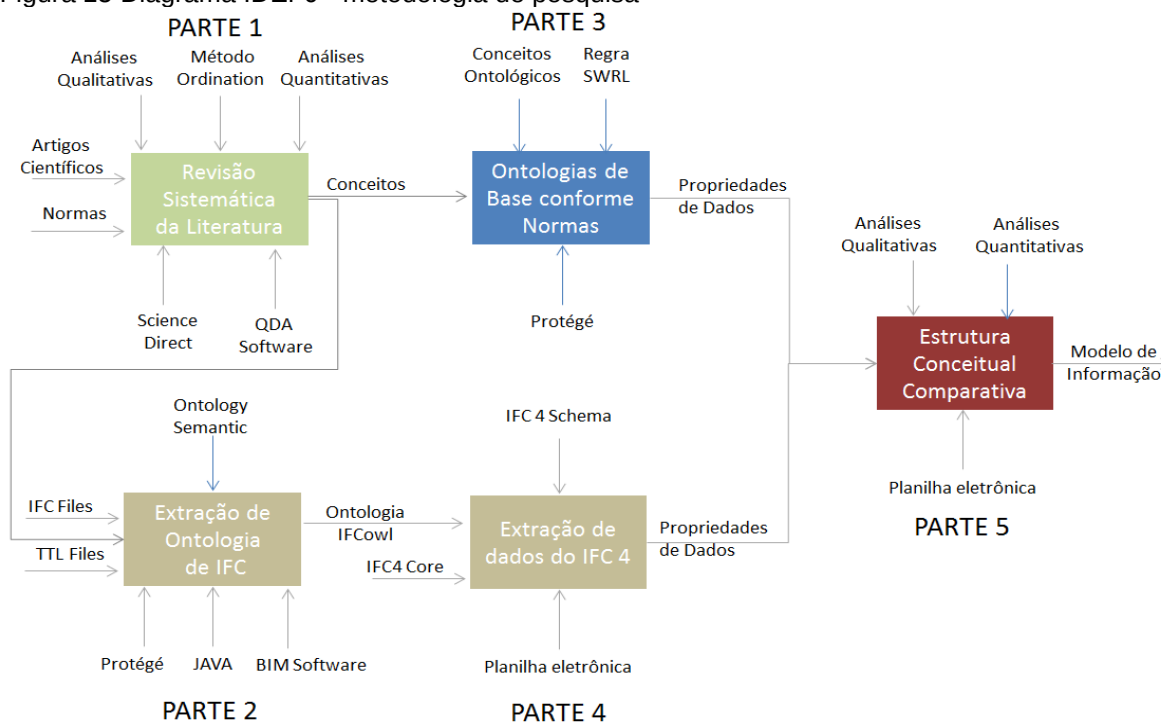
3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A abordagem metodológica é desenvolvida em cinco partes, descritas na Figura 15. Essas partes são estruturadas em um diagrama IDEF0. IDEF0 é uma ferramenta de modelagem funcional, sendo um subconjunto da Técnica de Análise e Projeto estruturados (Structured Analysis and Design Technique - SADT) (Marca e MCGOWAN,1987).

As setas da esquerda para direita representam as entradas de informação, as setas superiores são os controles (planos, especificações, métodos, regras..), as setas inferiores são os mecanismos (pessoas, softwares, ferramentas) e do lado direito de cada quadro são saídas de cada parte, conforme apresentando na Figura 15.

De maneira geral, o resultado desta dissertação depende da comparação das propriedades de dados presentes nas Normas de Concreto Armado e as propriedades de dados presentes dentro do IFC4 add2, e como resultado é apresentando se a estrutura de informação do IFC4 consegue suprir todas as propriedades de dados necessárias em todo ciclo de vida de uma edificação de concreto armado.

Figura 15 Diagrama IDEF0 - metodologia de pesquisa



Fonte:3 O Autor (2019)

Detalhando o diagrama presente na Figura 15, representa-se o caminho desta dissertação que pretende verificar se o arquivo IFC4 add2 possui nativamente todas as informações necessárias sobre Concreto Armado para sanar o ciclo de vida de uma edificação.

Iniciando com a revisão sistemática da literatura já apresentada, é constatado que há na literatura uma maneira de extrair uma ontologia a partir do arquivo IFC, ocorre esta experimentação na PARTE 02 deste trabalho, porém, como o resultado não apresenta nada dentro “data properties”, que são os requisitos de informação do sistema e intenção da criação desta ontologia, uma nova proposta foi desenvolvida na PARTE 4, onde esses requisitos são extraídos manualmente de dentro da documentação do IFC4 add2, através dos gráficos G-EXPRESS.

Paralelamente a PARTE 2 e PARTE 3 foram desenvolvidas ontologias com base em normas técnicas de concreto armado, uma de cada parte do ciclo de vida, a fim de extrair também os requisitos de dados para verificar se todas as informações presentes nestas normas estão presentes no arquivo IFC4. Essa comparação ocorre na PARTE 05 deste trabalho.

Em outras palavras, a PARTE 1 consiste na revisão sistemática da literatura já apresentada. Com os conceitos e direcionamento de pesquisa, na PARTE 02 utiliza-se um conversor de arquivos para gerar uma ontologia diretamente de um arquivo IFC com modelagens de Estruturas de concreto Armado.

Também através dos conceitos da Revisão Sistemática da Literatura, na PARTE 03 uma ontologia com metodologia baseada em sete-passos são propostas para obter as propriedades de dados de cada Norma.

Para extrair as Propriedades de Dados do Arquivo IFC4, na PARTE 04, realiza-se uma extração manual da documentação presente do arquivo na buildingSMART tendo em vista o domínio de concreto armado.

Por último, na PARTE 05, uma proposta de Estrutura conceitual comparativa irá validar quais informações o IFC4 possui e quais os requisitos das Normas de concreto Armado são exigidos, para isso uma análise correlaciona item-a-item é realizada e uma análise dos pontos que não estão presentes em qualquer um dos lados é abordada.

Cada parte do diagrama da Figura 15 possui abordagem metodológica própria e será explicado nos subitens a seguir.

3.1 PARTE 1 – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A primeira parte do trabalho inicia-se com a revisão sistemática da literatura, apresentada no capítulo 2, tendo como entrada artigos científicos e Normas, retirados do Portal Science Direct. Através do método Ordinato, análises qualitativas e quantitativas, os artigos foram mapeados com a ajuda de softwares QDA como o Nvivo. A partir da leitura destes resultados foi possível estipular os objetivos da pesquisa, os *gaps* de conhecimento, as metodologias, bem como determinar as etapas metodológicas para montar o IDEF0 apresentado.

3.2 PARTE 2 – EXTRAÇÃO DE ONTOLOGIA DO IFC

A parte 02 apresenta o desenvolvimento de uma ontologia através de um arquivo IFC. Para chegar a esse resultado algumas etapas foram seguidas:

- i. Modelagem de uma estrutura de concreto Armado em software BIM;
- ii. Exportação do modelo BIM para IFC4 ADD2;
- iii. Converter IFC4 ADD2 em RDF;
- iv. Abrir RDF no Protégé;
- v. Analisar resultados.

Para avaliar a estrutura das informações contidas em um arquivo IFC, inicialmente foram modelados no software Revit Structure 2018, da empresa Autodesk, os principais elementos estruturais e suas possíveis variações. Os elementos de concreto armado modelados foram baseados em casos anteriormente abordados por MULLER (2011), que analisou elementos que apresentaram necessidade de estudo aprofundada, uma vez que apresentaram erros ao serem exportados e importados para arquivos IFC. Após ser modelado, salva-se o arquivo em formato IFC4 ADD2 (última versão do IFC).

PAUWELS & TERKAJ (2016) descrevem que base da linguagem EXPRESS (usada no IFC) é semelhante a base da linguagem OWL (usada em Ontologias), e a estrutura semântica de um arquivo IFC é, até certo ponto, comparável à estrutura semântica de um gráfico RDF.

Através desta semelhança IFC-RDF, os desenvolvedores Jyrki Oraskari, Mathias Bonduel, Kris McGlinn criaram um conversor de IFC para RDF, disponível

gratuitamente em um repositório GitHub, que tem como objetivo criar um arquivo TTL para acompanhar as ontologias propostas pela W3C. O objetivo dessa ferramenta é representar as informações do IFC através de ontologia, porém, sem aplicação posterior.

TTL (Terse RDF Triple Language) é uma extensão do RDF também conhecido com RDF turtle. O arquivo Turtle permite escrever um gráfico RDF em uma forma textual compacto. Um gráfico RDF-Turtle é composto de 'triplas' que consistem em um sujeito, predicado e objeto. Com isso, faz ter correlação com as relações entre propriedades (atributos) e recursos, presentes em ontologias.

Então, o arquivo TTL pode ser aberto diretamente no software Protégé, e sua estrutura ontológica pode ser analisada. A análise de resultados consiste em descobrir como e quais são as informações que o IFC está organizando nessa estrutura, como ocorre a classificação hierárquica entre os dados, como estão unidos os elementos estruturais e suas propriedades, e se foram preservadas informações semânticas.

3.3 PARTE 3 – ONTOLOGIAS DE BASE FUNDAMENTADAS NA NORMA

Através da Revisão sistemática da literatura foi possível identificar todas as normas de concreto armado e onde elas estão inseridas na fase de ciclo de vida de uma edificação (Projeto, Construção, Operação/Manutenção, Demolição).

Nesta dissertação foi utilizado o Protégé, um editor de estrutura ontológico gratuito e de código aberto para a construção de sistemas inteligentes, criado na Universidade de Stanford.

Para desenvolver as ontologias, conceitos, relações, propriedades e axiomas relevantes devem ser identificados e organizados. Para isso, todos os requisitos foram retirados da Norma.

Ainda que haja diversas classificações para requisitos na literatura, é indicado que cada organização defina sua própria classificação (SOMMERVILLE, 2004). Por conta disso, os requisitos que procurados na norma são:

- i. Restrições;
- ii. Taxonomias;
- iii. Padrões;

iv. Entradas de dados (valores informados pelo usuário).

Entende-se por entrada de dados todos os valores que um programa possa receber de informação vindo de dispositivos de entrada, como o teclado, mouse, *touchpad*, etc. Todas essas variáveis tem os valores armazenados em uma propriedade de dados dentro da Ontologia.

Com essas informações, quatro ontologias de base serão construídas no Protégé, uma para cada fase do ciclo, sendo que para cada fase, pelo menos uma norma foi encontrada.

Existem vários métodos para construir ontologias de domínio, como métodos TOVE, IDEF5, Skeleton, KACTUS, SEN-SUS, METHONTOLOG e Seven-Step. Entre eles, o método dos sete passos (Seven-Step) é considerado como uma abordagem bem estabelecida e adequada ao propósito desta pesquisa e será utilizado neste trabalho (GAO et al, 2017). Assim como o Protégé, este método de sete passos foi desenvolvido pela Escola de Medicina da Universidade de Stanford.

Os sete passos são:

- i. Determinar o domínio e o escopo da ontologia;
- ii. Considerar a reutilização de ontologias existentes;
- iii. Enumerar termos importantes na ontologia;
- iv. Definir as classes e as classes hierárquicas;
- v. Definir as propriedades das classes;
- vi. Definir as regras;
- vii. Criar instâncias (*Individuals*).

Cada ontologia terá os sete passos respondidos individualmente, sendo que, no passo ii., deve-se considerar a reutilização de ontologias existentes, o próprio método prevê que caso nenhuma ontologia relevante já existente seja encontrada nas bibliotecas de ontologia, pode-se começar a desenvolver uma nova ontologia. Não há ontologias criadas a partir da norma brasileira de concreto.

Para extrair das normas as propriedades das classes, que é o objetivo da produção das ontologias, são considerados todos os valores de entradas de dados, textos, valores, ou informações que o usuário BIM precisa digitar e/ou o software BIM precisa carregar para poder realizar os cálculos de normas, definir terminar,

modelar estruturas e possuir documentação, ou seja, todos os dados que precisam ser inseridos ou já serem pré-carregados na base do IFC.

Para validação, *individuals* (elemento único composto por várias propriedades de dados) serão criados para testar as Regras da Web Semântica SWRL, e um motor de inferência (*reasoner*) será utilizado para se aproveitar dessas regras e classificar as instâncias conforme norma. Para isso, um *individual* é criado e são atribuídos valores da Propriedade de Dados, esses valores são testados e validados conforme as regras presentes no SWRL, e como resposta tem o *individual* classificado em uma classe.

Podem ser criadas mais de uma regra para cada *individual*, bem como, de resposta, ele pode ser enquadrado em mais de uma classe. Serão criadas somente regras SWRL para testar parte da ontologia, com base nas informações de cada *individual*, novas regras podem ser adicionadas a ontologia conforme necessidade de classificar outras características, ou inferência de conhecimento que o usuário/máquina esteja procurando dentro dela.

O objetivo desta pesquisa não é realizar inferência de conhecimento sobre o domínio de concreto armado, foram criadas regras somente para teste do funcionamento da ontologia.

No Protégé, ao final do teste de validação das ontologias, serão listadas as “Propriedades de dados” de cada Ontologia de Norma. Nela estão contidas as informações que são necessárias o IFC transportar para poder suprir determinada fase do ciclo de vida e objetivo dessa pesquisa.

3.4 PARTE 4 – EXTRAÇÃO DE DADOS DO IFC4

A documentação referente ao último lançamento do IFC4 pode ser acessada abertamente no site da buildingSMART, o qual especifica um esquema de dados conceituais e um formato de arquivo de troca para dados BIM. O esquema conceitual é definido na linguagem de especificação de dados EXPRESS. O esquema gráfico é dado pela EXPRESS-G.

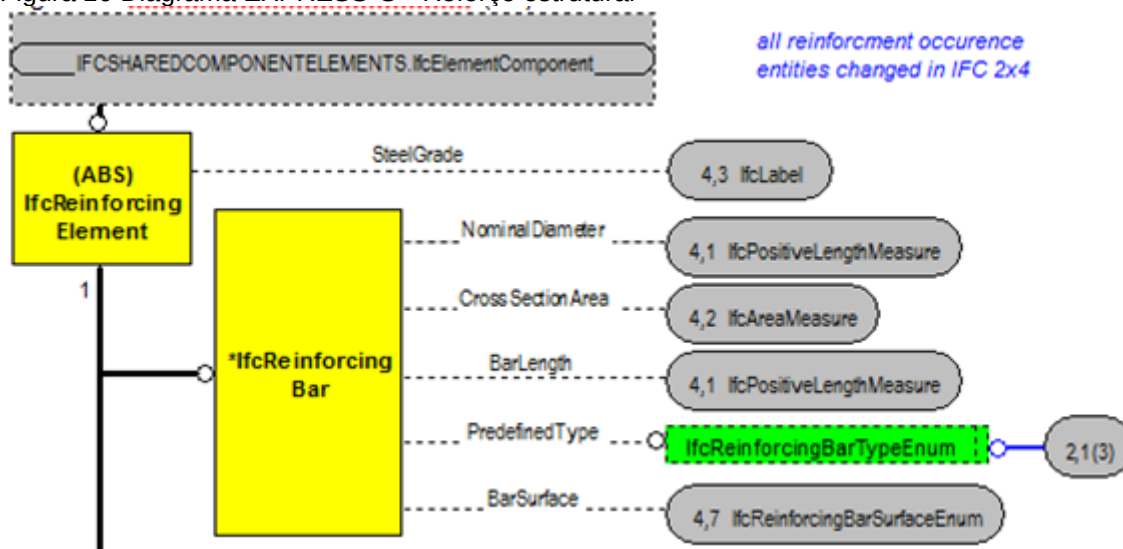
Os gráficos em EXPRESS-G apresentam especificações do IFC que inclui termos, conceitos e itens de especificação de dados que se originam do uso dentro de disciplinas, comércio e profissões do setor da indústria de construção e

gerenciamento de instalações. Os termos e conceitos na documentação usam as palavras em inglês, os itens de dados dentro da especificação de dados seguem uma convenção de nomenclatura.

Na camada de domínio os dois subconjuntos sobre concreto armado (Domínio dos Elementos estruturais e Domínio das Análises Estruturais) serão abertos em diagramas EXPRESS-G e terão as Propriedades de dados catalogadas.

As definições das entidades são as Propriedades de dados que estamos buscando e podem ser vistas na Figura 16 através dos valores escritos sobre as linhas pontilhadas. Neste exemplo os dados que estamos buscando de barra de reforço de estruturas de concreto possui as propriedades de dados: NominalDiameter, CrossSectionArea, BarLength, **PredefinedType** e BarSurface.

Figura 16 Diagrama EXPRESS-G - Reforço estrutural



Fonte: 4 BuildSMART (2018)

O item PredefinedType (que sempre vem acompanhado da cor verde) mostra que existem tipos de barras de reforço previamente cadastrada pelo programa que podem ser escolhidos pelo usuário para adicionar informações, ao contrário das demais opções que o usuário do sistema deve informar uma palavra ou número. Nesse caso, conforme a Figura 17 apresenta, existem oito tipos pré-definidos de armadura de reforço, além da opção do usuário criar um novo tipo através da opção

“USERDEFINED”. De padrão do arquivo IFC todas as opções de escolha de informação, antes de ser escolhido pelo usuário, vem como “NOTDEFINED”.

Figura 17 PredefinedType - ReinforcingBarTypeEnum

Constant	Description
ANCHORING	Anchoring reinforcement.
EDGE	Edge reinforcement.
LIGATURE	The reinforcing bar is a ligature (link, stirrup).
MAIN	The reinforcing bar is a main bar.
PUNCHING	Punching reinforcement.
RING	Ring reinforcement.
SHEAR	The reinforcing bar is a shear bar.
STUD	The reinforcing bar is a stud.
USERDEFINED	The type of reinforcement is user defined.
NOTDEFINED	The type of reinforcement is not defined.

Fonte: BuildSMART (2018)

Sendo assim, as propriedades de dados que foram identificadas dentro da documentação do IFC4 está presente sobre as linhas pontilhadas, com exceção dos itens chamados “PredefinedType”, que são necessários listar as opções possíveis de dentro de cada opção.

3.5 PARTE 5 – ESTRUTURA CONCEITUAL COMPARATIVA

Com a finalização das 04 partes anteriores, é criada uma estrutura conceitual comparativa entre os dados resultante das ontologias e normas, e da extração de dados da documentação do IFC4 add2.

Primeiramente os requisitos de dados são listados e agrupados conforme cada fase do ciclo de vida de concreto armado. É apresentado um gráfico apresentando em que fase do ciclo de vida de estrutura de concreto armado há mais requisitos de entrada de dados.

Após a listagem dos requisitos, é identificado que existem maior quantidade de requisitos em ontologias do que dentro do IFC. Isso ocorre porque algumas propriedades de dados são descritas nas ontologias de normas mais detalhadas do que no presente nas propriedades de dados do que o IFC4, pois o IFC4 é mais generalista, tendo um grupo de propriedades que pode ser inseridos em um mesmo item do IFC4.

Isso é observado quando realizada uma comparação item-a-item, ou seja, cada propriedade de dados das ontologias da norma é procurada um par com o mesmo contexto correspondente dentre todas as propriedades de dados presentes dentro da documentação do IFC4. Sendo que, as propriedades de dados da Norma podem possuir mais do que um correspondente da documentação IFC4, sendo inverso também válido. Essa comparação item-a-item também apresenta quais os dados presentes nas normas não estão disponíveis no IFC4 add2, bem como o contrário.

As propriedades de dados das Ontologias de normas que não tiverem correspondentes dentro da documentação do IFC4 são agrupadas conforme explicativa da possível falta de correspondentes dentro do IFC.

4 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do presente trabalho foi subdividido em quatro passos. No primeiro passo ocorre a extração de uma Ontologia através do IFC, para isso, é construído um modelo de concreto armado em BIM, exportado no formato IFC e, através deste, extraído uma ontologia com auxílio de ferramenta de geração automática de Ontologia para BIM.

No segundo passo, através do mapeamento das Normas Brasileiras de Estruturas de Concreto armado utilizadas em cada fase do ciclo de vida de uma edificação é desenvolvida uma ontologia para cada norma. Este subcapítulo é separado em uma ontologia para cada fase do ciclo de vida Bim.

No terceiro passo são catalogadas as informações que o IFC4 possui sobre Concreto Armado, através da busca do gráficos EXPRESS-G presentes na documentação do site da buildingSMART. No último passo foi realizada uma análise de dados das informações das Ontologias construídas, determinando os dados necessários para o ciclo de vida de uma estrutura em concreto armado são comparadas item a item com as informações extraídas da documentação do IFC4.

4.1 EXTRAÇÃO DE ONTOLOGIA DO IFC

O primeiro passo ocorre o desenvolvimento de uma ontologia com base no arquivo IFC, a abordagem metodológica seguiu conforme apresentado na seção 3.2.

Para avaliar a estrutura das informações contidas em um arquivo IFC, inicialmente foram modeladas estruturas de concreto armado no software Revit Structure 2018, da empresa Autodesk.

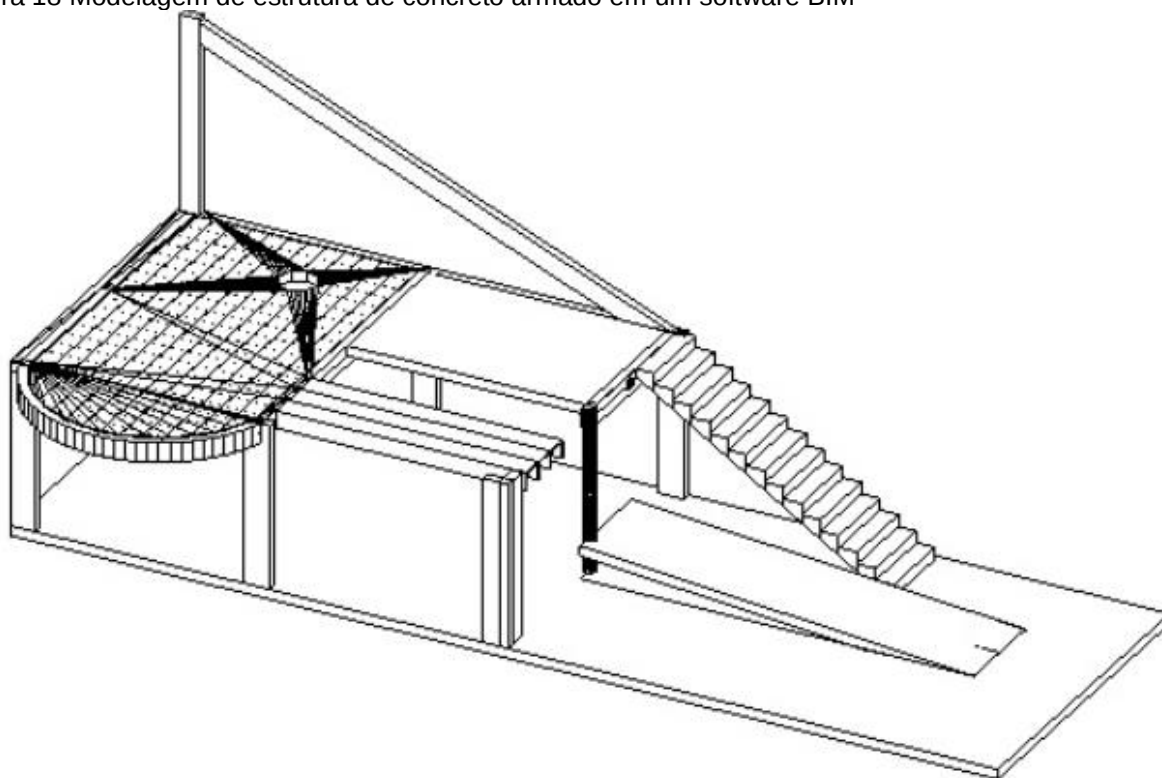
O Revit Structure (versão 2018) adotado no presente trabalho, teve sua primeira versão lançada pela Autodesk em 2002 (EASTMAN *et al*, 2008). Dentre suas funcionalidades o software permite que modelos geométricos e analíticos sejam criados.

O modelo geométrico representa a estrutura física da edificação, já o modelo analítico consiste nos elementos estruturais, suas geometrias, propriedades do material, cargas e combinações, que unificados representam um sistema de engenharia estrutural (TARRAFA, 2012).

Um modelo digital em BIM, com os principais elementos estruturais da supra estrutura de concreto armado e suas possíveis variações foram modelados, sendo eles descritos abaixo e podendo ser observado na Figura 18:

- (i) Vigas: Viga com um tramo; Viga com dois ou mais tramos; Viga com variação de seção; Viga com furo; Viga curva; Viga inclinada;
- (ii) Pilares: Pilar de apenas um pavimento; Pilar de dois ou mais pavimentos; Pilar em L; Pilar circular; Pilar com mudança de seção;
- (iii) Lajes: Laje com bordo livre; Laje com furo; Escada; Rampa; Laje curva; Laje nervurada.

Figura 18 Modelagem de estrutura de concreto armado em um software BIM

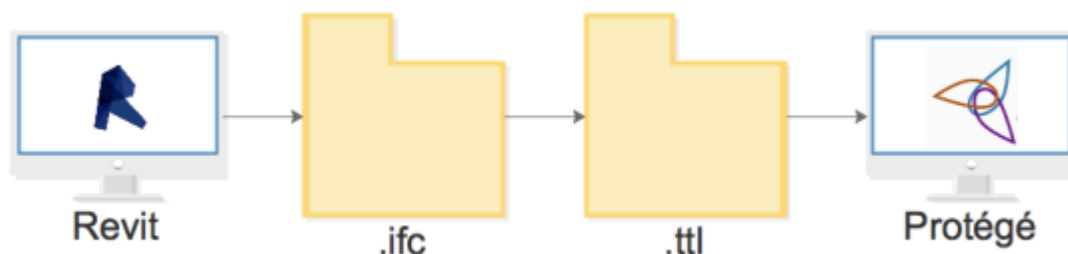


Fonte: O autor (2019)

Esta lista foi baseada em estudo de interoperabilidade em IFC e concreto armado abordado por Muller (2011)[9], que analisou interoperabilidade entre sistemas CAD de projeto de estruturas de concreto armado e modeladores BIM através de arquivos IFC.

Após serem modeladas, o arquivo foi salvo em formato IFC4 add 2. A partir deste ponto foi definido que a estrutura do IFC seria analisada com base em gráficos de Resource Description Framework (RDF), que geram formato de arquivo Terse Triple Language (TTL). Com o auxílio do programa Protégé foi possível visualizar a estrutura resultante. Esse roteiro pode ser visto na Figura 19:

Figura 19 Roteiro de experimento



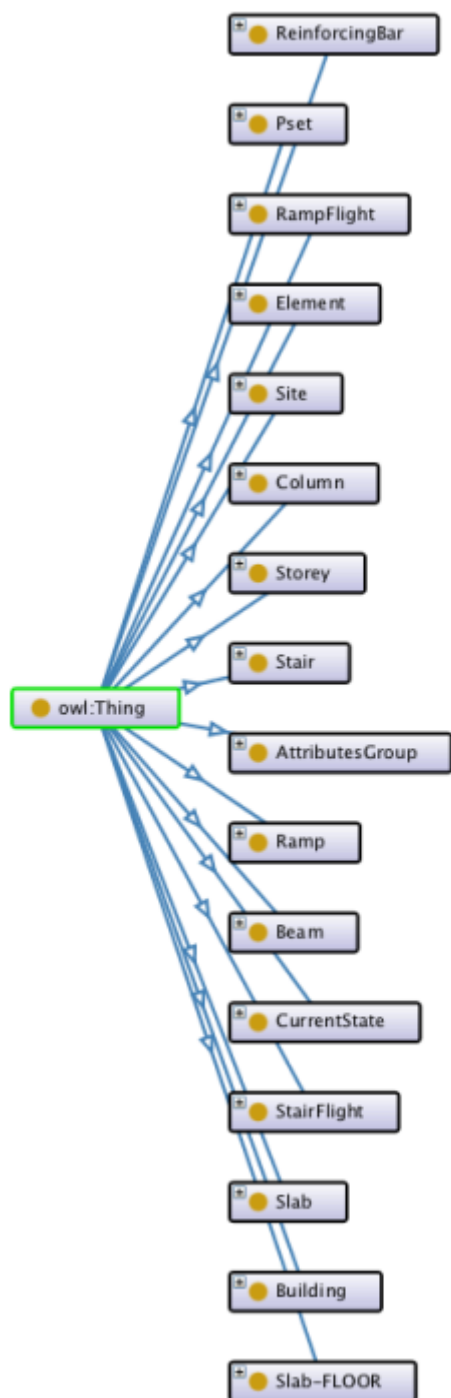
Fonte: O autor (2018)

Para transformar o arquivo IFC em TTL, foi utilizado o conversor de IFCToLBD desktop 2018 dos Autores Jyrki Oraskari e Mathias Bonduel, disponível no github². Esse conversor em JAVA pode realizar essa conversão pois a estrutura semântica de um arquivo IFC é, até certo ponto, comparável à estrutura semântica de um grafo RDF (PAUWELS & TERKAJ, 2015).

Após a conversão em RDF no formato TTL, pode ser aberto diretamente no software Protégé. No software editor de ontologias, geramos um gráfico de ontologia chamado “ontograph”, como pode ser visto na Figura 20.

² <https://github.com/jyrkioraskari/IFCToLBD>

Figura 20 Ontograph do IFC4 de Estruturas de concreto armado



Fonte: O autor (2019)

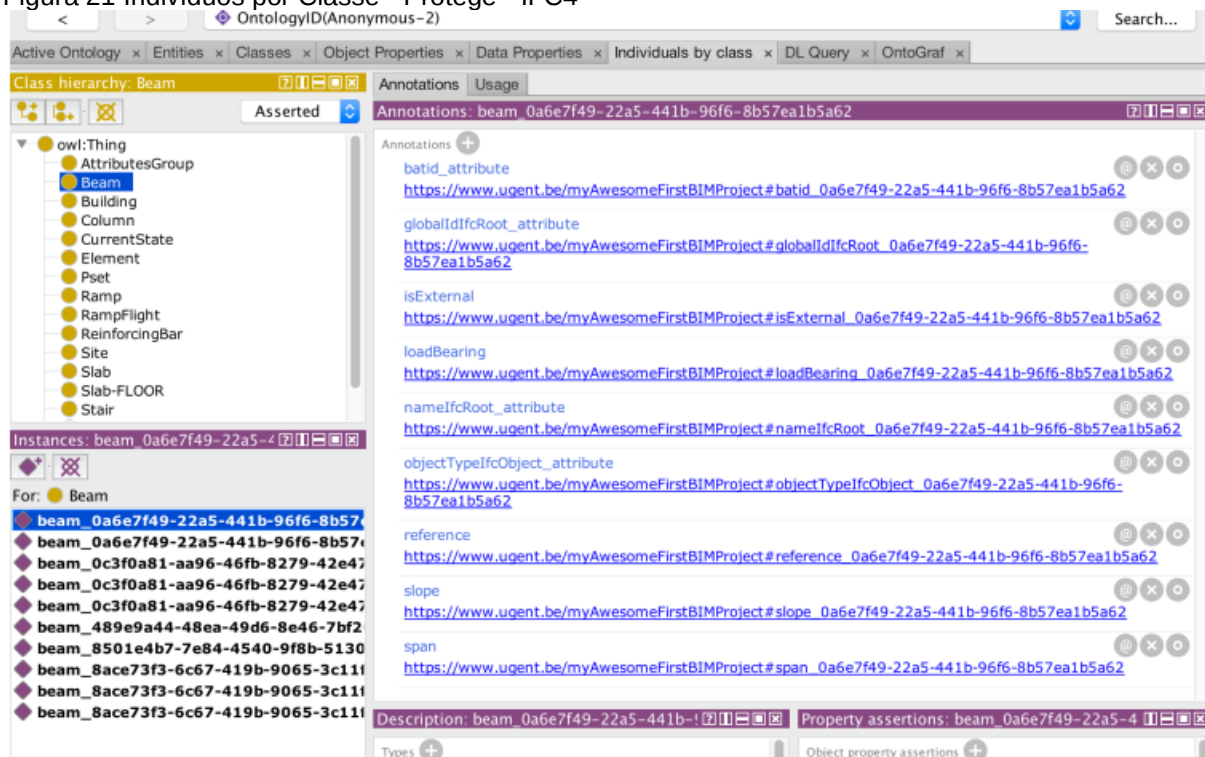
Esta Figura 20 mostra que os elementos estruturais como pilares, rampas, escadas e lajes, aparecem como classes, e não possuem sub-classes. Algumas classes de uso comum do IFC aparecem também, como “Estado atual”, utilizado no BIM 4D para fazer cronogramas/gerenciamento de obra, a classe “Building” comum

a todas as estruturas de construção civil, “Grupo de Atributos”, compostos de atributos gerais e outros. O programa gerou um total de 16 classes, e para cada uma destas classes vieram anotações e indivíduos vinculados a elas.

Como a Ontologia foi gerada com base no arquivo IFC que possui como padrão de língua o Inglês americano, as classes, entidades, anotações e demais informações vieram escritas na língua nativa do arquivo.

Na Figura 21, os indivíduos das Vigas foram inseridos diretamente na classe, e possuem seus atributos em forma de anotação. Esperava-se encontrar os atributos expressados em “propriedades de dados”, pois desta forma, as informações gravadas como anotação não podem ser reescritas, não podem ser utilizadas pela ontologia para inferência de informação e não podem ser associadas a classes ou elementos.

Figura 21 Indivíduos por Classe - Protégé - IFC4



Fonte: O autor (2019)

Não há presença de relações na ontologia gerada; relações representam um tipo de associação entre os conceitos em um domínio. Relações em ontologias são geralmente binárias. Também não há presença de Axiomas formais, que normalmente são usados para representar o conhecimento que os outros componentes não podem definir formalmente. Eles são úteis para inferir novos

conhecimentos, para verificar a consistência da própria ontologia ou a consistência do conhecimento armazenado em uma base de conhecimento.

Por conta disso, não há regras presentes nesta ontologia, sendo assim, novos indivíduos devem ser inseridos diretamente dentro de cada Classe.

4.2 DESENVOLVIMENTO DAS ONTOLOGIAS CONFORME AS NORMAS

Seguindo a sequência lógica do ciclo de vida de uma edificação, começamos com a norma de concepção de edifícios, NBR 6118/2014 – “Projeto de estruturas de concreto — Procedimento”. A esta Norma cabe definir os critérios gerais que regem o projeto das estruturas de concreto, sejam elas de edifícios, pontes, obras hidráulicas, portos ou aeroportos etc. Assim, ela deve ser complementada por outras normas que estabeleçam critérios para estruturas específicas.

Esta Norma aplica-se às estruturas de concretos normais, identificados por massa específica seca maior do que 2 000 kg/m³, não excedendo 2 800 kg/m³, do grupo I de resistência (C20 a C50) e do grupo II de resistência (C55 a C90), conforme classificação da ABNT NBR 8953.

Ou seja, antes de iniciar a NBR 6118 – 2014 é necessário saber se o concreto utilizado é para fins estruturais, através da NBR 8953-2015 – “Concreto para fins estruturais”.

Essa Norma estabelece as classes do concreto em função de sua massa específica, resistência à compressão axial e consistência. Ela se aplica a concretos leves, normais ou pesados, misturados em canteiro de obra ou dosados em central, no próprio local da obra ou fora dela, utilizados em elementos de concreto simples, armado ou protendido, bem como em elementos armados com perfis rígidos de aço.

Essa norma possui somente 04 páginas, por conta disso, será a primeira norma a ser construída uma ontologia e qual será explicada mais detalhadamente.

4.2.1 NBR 8953/2015 – Concreto para fins Estruturais

A sequência será através da metodologia de sete passos relada no item 3.3.

i. Determinar o domínio e o escopo da ontologia

O escopo dessa Ontologia é a norma NBR 8953/2015, que estabelece as classes do Concreto quanto a massa específica, resistência a compressão axial e consistência.

ii. Considerar a reutilização de ontologias existentes

Não há na literatura ontologias de concreto armado a partir de Normas de concreto armado

iii. Enumerar termos importantes na ontologia

Nesta norma, cada capítulo é marcado por termos importantes, sendo eles:

3 – Termos e Definições;

4 – Classes de resistência;

5 – Classes de consistência.

iv. Definir as classes e a classes hierárquicas

A primeira classe que está presente no trabalho são as classes quanto à massa específica, separados por concretos classificados em normal, leve e pesado ou denso.

A segunda classe presente é referente às classes de resistência. Os concretos para fins estruturais são classificados nos grupos I e II, conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}), determinada a partir do ensaio de corpos de prova.

Sendo assim, o Grupo 1 e o Grupo 2 são sub-classes da classe Resistência conforme apresentando na Figura 22.

Figura 22 Classes de resistências de concretos estruturais

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: NBR 8953/2018

A terceira classe, a classe de consistências, é referente a classificação do concreto quanto sua consistência no estado fresco, determinada a partir do ensaio de abatimento, e possui 05 sub-classes (s10, s50, s100, s160, s220) conforme Figura 23.

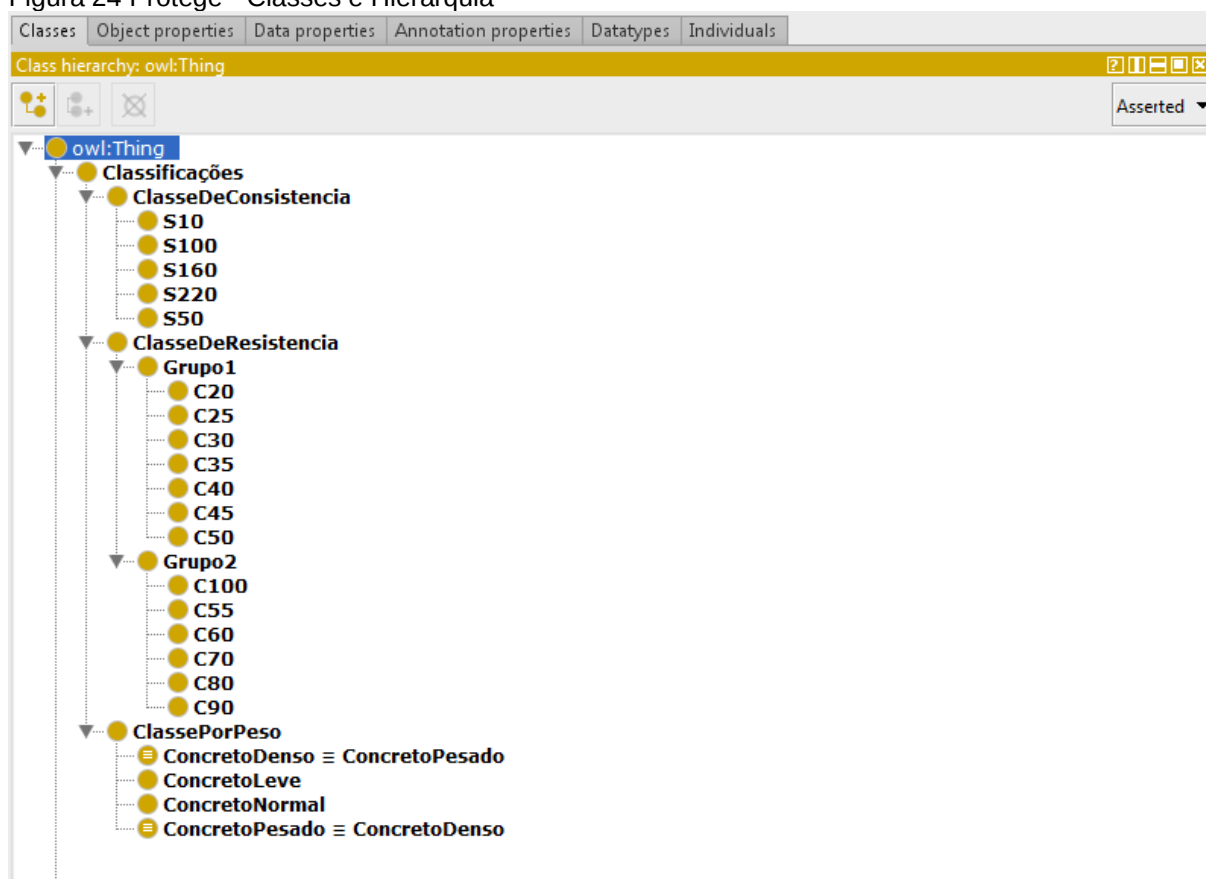
Figura 23 Classe Abatimento e Aplicações típicas

Classe	Abatimento mm	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: NBR 8953/2018

Como resultado, no software Protégé foram construídas essas classes de hierarquia conforme pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 Protégé - Classes e Hierarquia



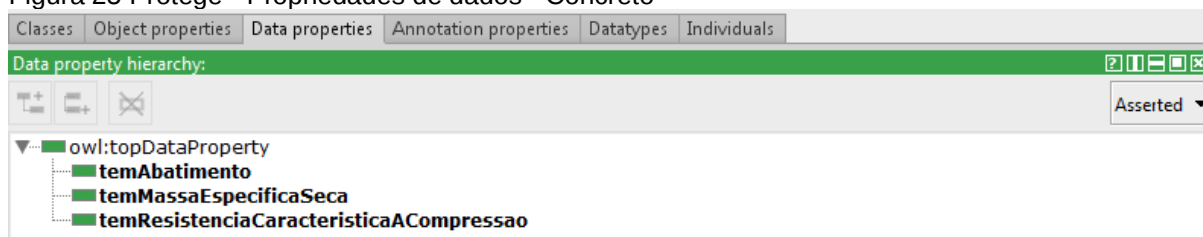
Fonte: O autor (2019)

v. Definir as propriedades das classes

As propriedades de classes são distribuídas em dois tipos de propriedades dentro do software Protégé, Propriedades de Objeto e Propriedades de dados.

As propriedades de objetos representam uma relação binária entre dois indivíduos, sendo que nesta norma não foi necessário esse recurso. As propriedades de dados conectam um indivíduo com dados básicos (como strings ou números), como apresentando na Figura 25, e um mesmo indivíduo pode ter várias propriedades de classe ligadas a ele.

Figura 25 Protégé - Propriedades de dados - Concreto



Fonte: O autor (2019)

Essas necessidades de entrada de dados são requisitos de sistemas necessários para ter implementado em softwares BIM. Isso para haver as informações necessárias para saber se dado concreto pertence a classificação necessária para ser utilizado como concreto estrutural conforme norma de projetos – NBR 6118/2014.

vi. Definir as regras

As regras foram escritas utilizando a linguagem SWRL. Para ditar uma regra é necessário um antecedente (corpo) e consequente (cabeça). O significado pretendido pode ser lido como: sempre que as condições especificadas no antecedente são mantidas, as condições especificadas no consequente também devem ser mantidas.

Por exemplo, A classe de resistência C45, que possui resistência à compressão superior a 45 Mpa e inferior a 50, pois com 50 já é considerada C50, deve ser escrita da seguinte forma no SWRL como regra:

$$\text{ClasseDeResistencia}(?p) \wedge \text{temResistenciaCaracteristicaACompressao}(?p, ?x) \wedge \text{swrlb:greaterThanOrEqual}(?x, 45) \wedge \text{swrlb:lessThan}(?x, 50) \rightarrow \text{C45}(?p)$$

Com isso, ao rodar o motor de inferência do Protégé, ele compreende que se um indivíduo tiver uma propriedade de dados nomeada de “temResistenciaCaracteristicaACompressao” entre 45 e 50, ele vai categorizar esse indivíduo como concreto C45, sendo este sub-classe da “Classe 1” da norma, e está por sua vez, sub-classe de “ClassedeResistencia”. As demais regras criadas podem ser vistas na Figura 26.

Figura 26 Protégé - SWRL - NBR 8953/2015

```

ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 45) ^ swrlb:lessThan(?x, 50) -> C45(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 40) ^ swrlb:lessThan(?x, 45) -> C40(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 50) ^ swrlb:lessThan(?x, 55) -> C50(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 55) ^ swrlb:lessThan(?x, 60) -> C55(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 60) ^ swrlb:lessThan(?x, 70) -> C60(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 70) ^ swrlb:lessThan(?x, 80) -> C70(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 80) ^ swrlb:lessThan(?x, 90) -> C80(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 90) ^ swrlb:lessThan(?x, 100) -> C90(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 100) -> C100(?p)
ClasseDeConsistencia(?p) ^ temAbatimento(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 10) ^ swrlb:lessThan(?x, 50) -> S10(?p)
ClassePorPeso(?p) ^ temMassaEspecificacaSeca(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 2000) ^ swrlb:lessThanOrEqual(?x, 2800) -> ConcretoNormal(?p)
ClasseDeConsistencia(?p) ^ temAbatimento(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 50) ^ swrlb:lessThan(?x, 100) -> S50(?p)
ClasseDeConsistencia(?p) ^ temAbatimento(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 100) ^ swrlb:lessThan(?x, 160) -> S100(?p)
ClasseDeConsistencia(?p) ^ temAbatimento(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 160) ^ swrlb:lessThan(?x, 220) -> S160(?p)
ClasseDeConsistencia(?p) ^ temAbatimento(?p, ?x) ^ swrlb:lessThanOrEqual(?x, 220) -> S220(?p)
ClassePorPeso(?p) ^ temMassaEspecificacaSeca(?p, ?x) ^ swrlb:lessThan(?x, 2000) -> ConcretoLeve(?p)
ClassePorPeso(?p) ^ temMassaEspecificacaSeca(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThan(?x, 2800) -> ConcretoDenso(?p)
Classificações(?p) ^ Pertence_a_Norma(?p, ?s) ^ ClassePorPeso(?s) -> NBR_15823_1(?s)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 20) ^ swrlb:lessThan(?x, 25) -> C20(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 25) ^ swrlb:lessThan(?x, 30) -> C25(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 30) ^ swrlb:lessThan(?x, 35) -> C30(?p)
ClasseDeResistencia(?p) ^ temResistenciaCaracteristicaACompressao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?x, 35) ^ swrlb:lessThan(?x, 40) -> C35(?p)

```

Fonte: O Autor (2019)

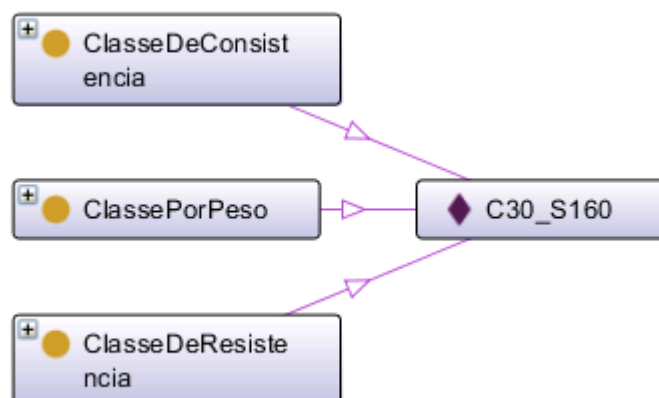
vii. Criar instâncias (*Individuals*)

Essa última etapa, de criação dos indivíduos é utilizada para testar as regras criadas em SWRL, e caso o motor de inferência do Protégé consiga processar as regras e gerar conhecimento através da categorização conforme norma, está implícito que a Ontologia construída não apresenta erros.

Caso o motor de busca apresente apenas um erro, todo o raciocínio é perdido e não é gerado resultados parciais, e o software apresenta uma mensagem de erro, mas não mostra em qual regra criada está o problema.

Nesta norma foram criados 02 indivíduos para testar a ontologia através das regras SWRL, na qual essas regras fazem com que o *individual* seja classificado de acordo com classe de consistência, classe por peso e classe de resistência, que são classes presentes na ontologia, conforme Figura 27.

Figura 27 Protégé - Ligação entre Indivíduos e classes - C30_S160



Fonte: O autor (2019)

O motor de raciocínio identificou automaticamente em amarelo (conforme Figura 28), que um dos dois indivíduos criados, o Concreto C30 S160 está inserido na classe C30 de resistência, é considerado um concreto normal (C) e possui abatimento S160. O outro também foi categorizado conforme suas propriedades.

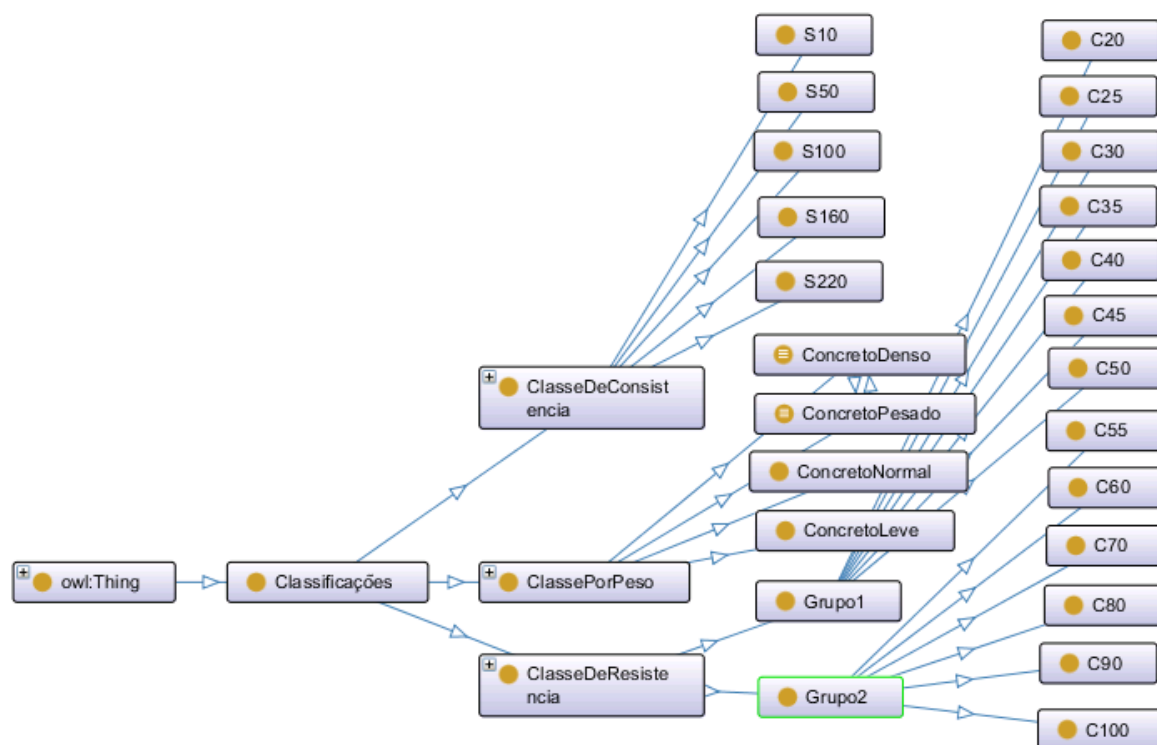
Figura 28 Protégé - Indivíduos - C30_S160



Fonte: O autor (2019)

Como resultado de ontologia, o Ontograph apresentou a taxonomia das classes de concreto armado conforme Figura 29, mostrando as possibilidades de classificação como resposta do motor de inferência ao que foi realizado regras.

Figura 29 Protégé - OntoGraph - NBR 8953/2015



Fonte: O autor (2019)

4.2.2 NBR 6148/2014 v3 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento

- i. Determinar o domínio e o escopo da ontologia

O escopo dessa Ontologia é a NBR 6148/2014 v3 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, que define os critérios gerais que regem o projeto das estruturas de concreto, sejam elas de edifícios, pontes, obras hidráulicas, portos ou aeroportos etc. O domínio desta ontologia ficou restrito ao que diz respeito à concreto armado, não contemplado concreto protendido, armaduras ativas e elementos especiais.

- ii. Considerar a reutilização de ontologias existentes

Como abordado anteriormente, não há na literatura ontologias de concreto armado a partir de Normas de concreto armado.

iii. Enumerar termos importantes na ontologia

A norma está dividida em 25 subitens, sendo estes divididos conforme o tipo de elemento estrutural calculado, o tipo de esforço, os tipos de Ações e propriedades de materiais.

iv. Definir as classes e a classes hierárquicas

Em Ordem alfabética, a primeira classe criada diz respeito ao tipo de ação que o elemento estrutural sofre, podendo ser permanente, variável ou exponencial, ou uma combinação delas.

O Segundo item criado é a classe Armadura, que mostra que após calculado e dependendo do tipo do elemento estrutural e do esforço que o elemento sofre, será adicionado conforme necessidade uma armadura de cisalhamento, de ligação com a mesa, de pele, de suspensão, de torção, longitudinal e/ou transversal, podendo ser armaduras isoladas ou um conjunto das citadas acima.

A Classe de Agressividade Ambiental está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas. Sendo assim, por exemplo, uma edificação que está inserida em ambiental rural tem classe de agressividade I, ou seja, agressividade fraca, risco de deterioração da estrutura insignificante, conforme Figura 30.

Figura 30 Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: NBR 6118/2014

A quarta classe, que depende diretamente do tipo de elemento estrutural e da classe de agressividade, que determina qual o Cobrimento Nominal da armadura, está dividida em seis espessuras de coberturas de concreto a depender da combinação já mencionada, conforme se apresenta na Figura 31

Figura 31 Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118/2014

As combinações de ações ocupam a quinta classe criada, representadas por 03 subitens, de construção, excepcional e normal. Todos os elementos calculados passam por uma rodada de combinação conforme sensibilidade do projetista e caso.

A sexta classe apresenta os elementos estruturais presentes nesta normal, que são de acordo com suas características geométricas e tipo de esforço que sofre separadas em arco, bloco, laje, pilar, pilar parede, tirante, viga e viga parede. Por exemplo, um pilar é definido como um elemento linear de eixo reto, usualmente disposto na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes na menor seção. Caso a força preponderante fosse tração, seria um tirante.

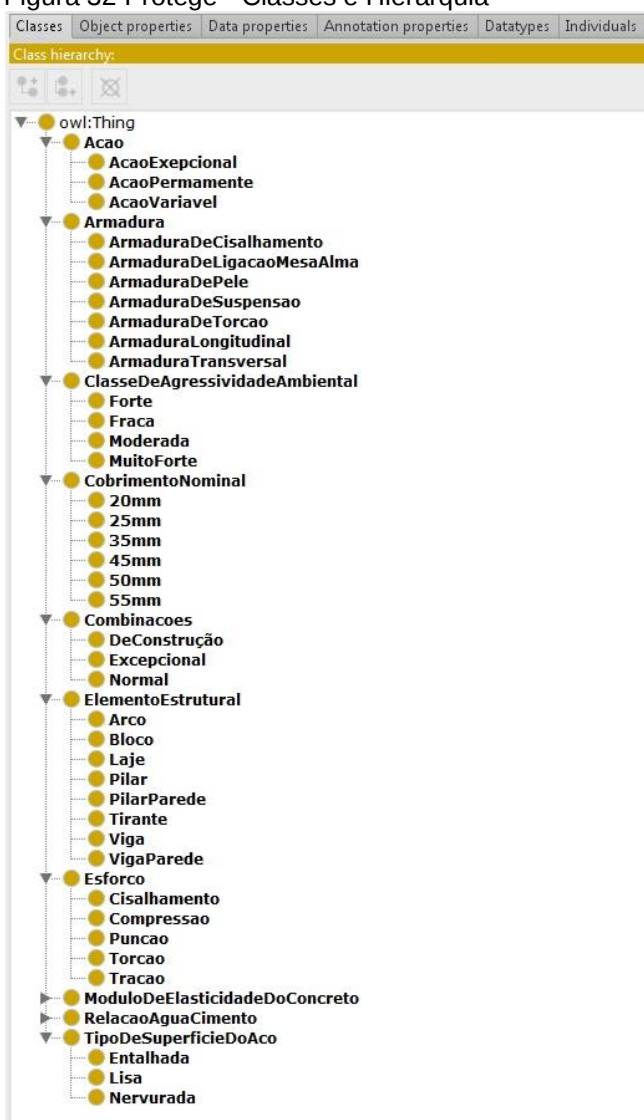
Na norma, os esforços são separados em cisalhamento, compressão, punção, torção e tração. Essa divisão ocorre conforme as forças exercem ação sobre o elemento estrutural calculado, sendo que cada elemento estrutural pode ter um ou um conjunto delas.

Na sequência, o módulo de elasticidade do concreto, que pode ser obtido por cálculo ou simplificado conforme a norma apresenta, sendo classificado em 08 unidades e seu resultado depende da resistência a compressão do concreto calculado.

A norma também possui uma tabela que relaciona a quantidade de água por parte de cimento conforme o grau de agressividade que ela se encontra. Essa relação pode ser utilizada para evitar fissurações que façam com que agentes externos possam entrar na armadura do elemento estrutural, por conta disso, quanto mais água um corpo possui, menor sua resistência a compressão e maior a quantidade de fissuração.

Por último, o tipo de superfície do aço é classificado em entalhada, lisa e nervurada, e corresponde ao tipo de aderência que as barras de aço terão no corpo de concreto. Um elemento só é considerado concreto armado se há uma aderência entre concreto e aço compatível conforme normal. As classes mencionadas estão presentes na Figura 32.

Figura 32 Protégé - Classes e Hierarquia



Fonte: O Autor (2019)

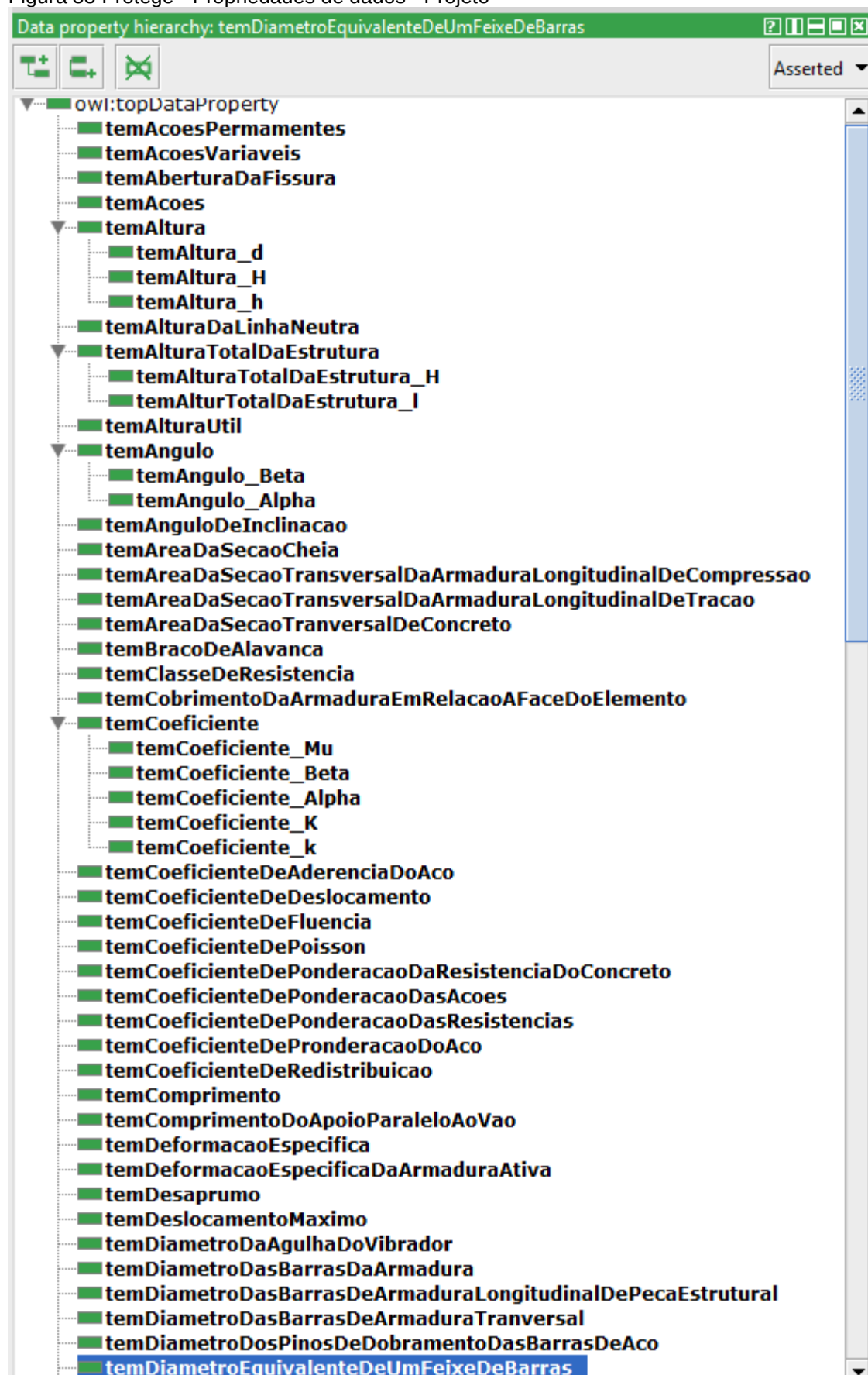
v. Definir as propriedades das classes

As propriedades de dados conectam um indivíduo com dados básicos (como strings ou números). Nesta norma foram identificadas várias propriedades de dados, que fazem parte ou de informações que usuário precisa conhecer/inserir, ou propriedades inerentes aos cálculos de norma.

Existem propriedades de dados que possuem o mesmo nome de acordo com a norma, porém, são dados diferentes quanto a sua natureza, por exemplo, o coeficiente, que pode ser coeficiente de dilatação, coeficiente de Poisson, coeficiente térmico, coeficiente de majoração, coeficiente de segurança, etc.

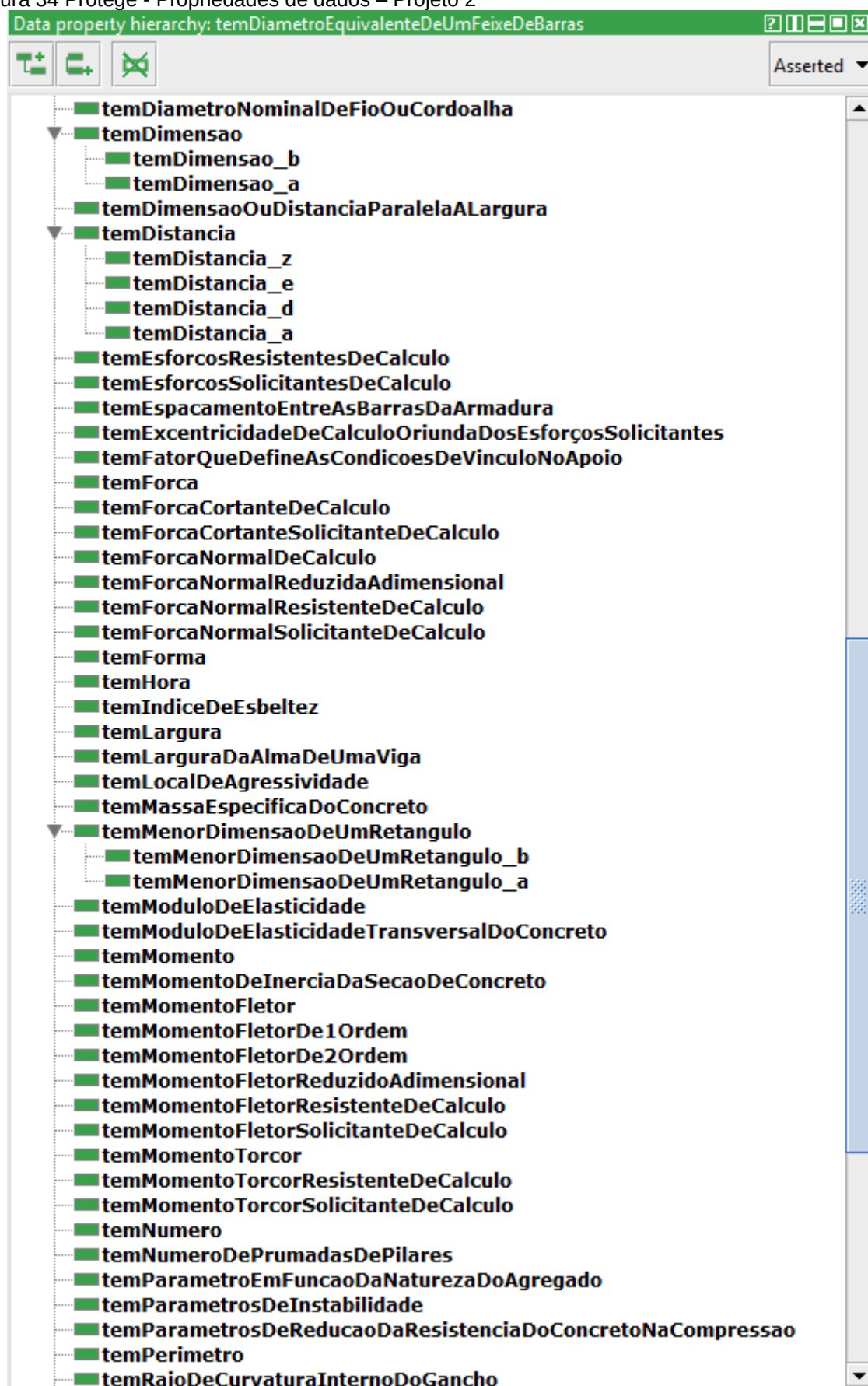
Em norma, o que distingue estes são os símbolos que os acompanham e o local de aplicação, sendo assim, o dado que não acompanha um nome para nomeação diferente dos demais, foi acompanhado de sua respectiva sigla conforme Norma. As propriedades de dados da norma de projeto estão presentes nas Figura 33, Figura 34 e Figura 35.

Figura 33 Protégé - Propriedades de dados - Projeto



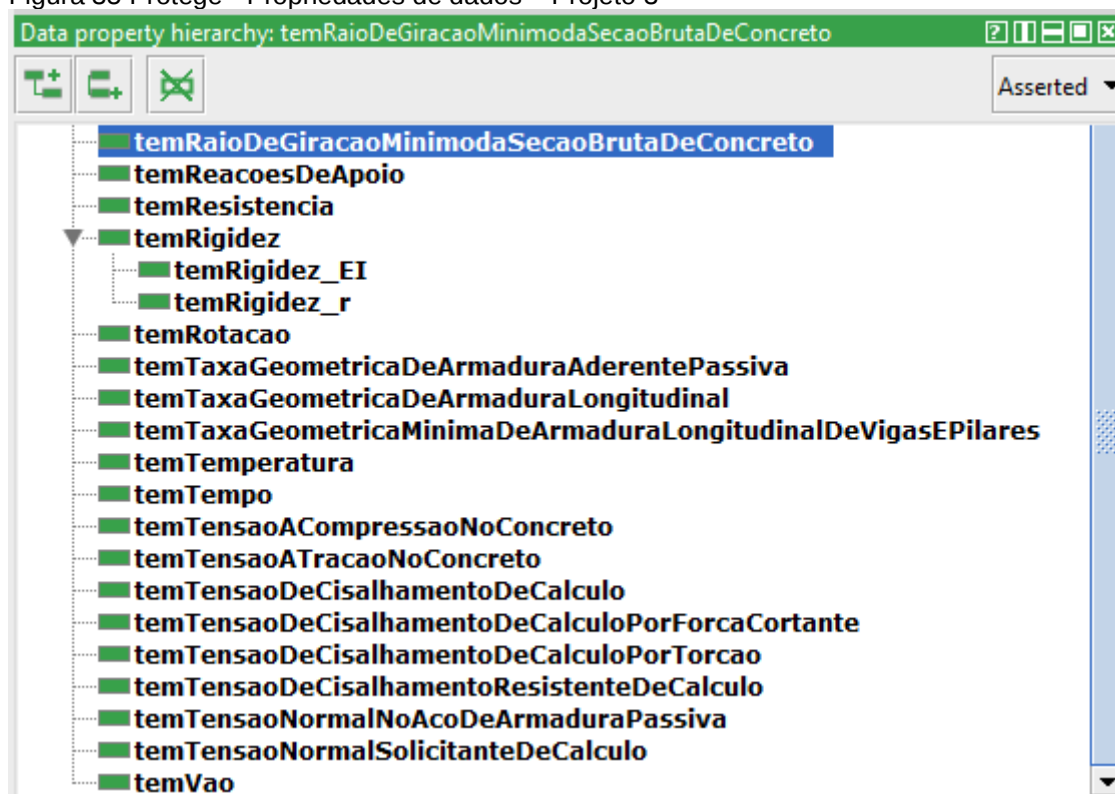
Fonte: O Autor (2019)

Figura 34 Protégé - Propriedades de dados – Projeto 2



Fonte: O Autor (2019)

Figura 35 Protégé - Propriedades de dados – Projeto 3



Fonte: O Autor (2019)

Essas necessidades de entrada de dados são requisitos do sistema necessários para ter implementado em softwares BIM de desenvolvimento de softwares.

Foram identificados 112 valores de requisitos de sistema nesta norma.

vi. Definir as regras

As regras foram criadas a fim de testar esta ontologia, para isto, o objetivo da programação é identificar o cobrimento nominal de concreto sobre a armadura. Esse cobrimento segue a tabela da Figura 31, onde o resultado depende do tipo de elemento estrutural (viga, pilar, laje...) e do tipo de agressividade que esse elemento está submetido.

Portanto, inicialmente foram criadas regras para identificar qual o grau de agressividade conforme Figura 30. Os resultados podem ser Fraco, Moderado, Forte e Muito Fraco, conforme os ambientes rural, submerso, urbana, marinha, industrial e Industrial com presença de sulfetos.

A informação de local é uma propriedade dados que deve ser informada, presente no Data Property nomeado de temLocalDeAgressividade. O código de

SWRL utilizado para isso, a exemplo de locais Rurais que possuem classe de agressividade Fraca foi:

$$\text{ClasseDeAgressividadeAmbiental}(?p) \wedge \text{temLocalDeAgressividade}(?p, ?x) \wedge \text{swrlb:equal}(?x, \text{"Rural"}) \rightarrow \text{Fraca}(?p)$$

No mesmo contexto, para saber qual o cobrimento nominal do elemento estrutural, há uma informação necessária quanto a forma do elemento, que pode ser Arco, Bloco, Laje, Pilar, Pilar Parede, Tirante, Viga e Viga Parede. Como exemplo nesta ontologia um elemento estrutural com formato de Pilar. O Pilar é um elemento que possui sua Altura maior que suas outras duas dimensões, largura e distância (espessura), e sofre forças normais de compressão preponderantes. O código SWRL utilizado para o calculado da forma do elemento é:

$$\text{ElementoEstrutural}(?p) \wedge \text{temLargura}(?p, ?xa) \wedge \text{temDistancia_d}(?p, ?xb) \wedge \text{temAlturaTotalDaEstrutura_H}(?p, ?xc) \wedge \text{swrlb:greaterThanOrEqual}(?xc, ?xa) \wedge \text{swrlb:greaterThanOrEqual}(?xc, ?xb) \rightarrow \text{Pilar}(?p)$$

A largura foi nomeada de xa, a distancia de xb, e altura de xc. Se um elemento possui essas 03 dimensões e quando a altura é simultaneamente maior que a distância e a largura, ela é considerada um Pilar dentro de ElementoEstrutural.

Por fim, quando um elemento faz parte de uma subclasse de ElementoEstrutural e também uma subclasse de ClasseDeAgressividade, pode ser classificado quanto a seu cobrimento nominal. Mantendo o mesmo exemplo, considerando um elemento de formato pilar e com classe de agressividade fraca, uma nova regra SWRL foi descrita da seguinte forma:

$$\text{CobrimentoNominal}(?p) \wedge \text{Fraca}(?p) \wedge \text{Pilar}(?p) \rightarrow 25\text{mm}(?p)$$

Ou seja, terá um cobrimento de concreto de 25mm sobre a face da armadura. Todas as regras SWRL usada neste exemplo estão descritas na Figura 36. Outras regras podem ser criadas e adicionadas a fim de obter diferentes respostas dentro deste domínio de conhecimento.

Figura 36 Protégé - SWRL - NBR 6148/2014

Name	Query
S1	ClasseDeAgressividadeAmbiental(?p) ^ temLocalDeAgressividade(?p, ?x) ^ swrlb:equal(?x, "Rural") -> Fraca(?p)
S2	CobrimentoNominal(?p) ^ Fraca(?p) ^ Pilar(?p) -> mm(?p)
S3	ClasseDeAgressividadeAmbiental(?p) ^ temLocalDeAgressividade(?p, ?x) ^ swrlb:equal(?x, "Submersa") -> Fraca(?p)
S4	ClasseDeAgressividadeAmbiental(?p) ^ temLocalDeAgressividade(?p, ?x) ^ swrlb:equal(?x, "Urbana") -> Moderada(?p)
S5	ClasseDeAgressividadeAmbiental(?p) ^ temLocalDeAgressividade(?p, ?x) ^ swrlb:equal(?x, "Marinha") -> Forte(?p)
S6	ClasseDeAgressividadeAmbiental(?p) ^ temLocalDeAgressividade(?p, ?x) ^ swrlb:equal(?x, "Industrial") -> Forte(?p)
S7	ClasseDeAgressividadeAmbiental(?p) ^ temLocalDeAgressividade(?p, ?x) ^ swrlb:equal(?x, "IndustrialSufetos") -> MuitoForte(?p)
S8	ClasseDeAgressividadeAmbiental(?p) ^ temLocalDeAgressividade(?p, ?x) ^ swrlb:equal(?x, "RespingosMare") -> MuitoForte(?p)
S9	ElementoEstrutural(?p) ^ temLargura(?p, ?xa) ^ temDistancia_d(?p, ?xb) ^ temAlturaTotalDaEstrutura_H(?p, ?xc) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?xc, ?xa) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?xc, ?xb) -> Pilar(?p)

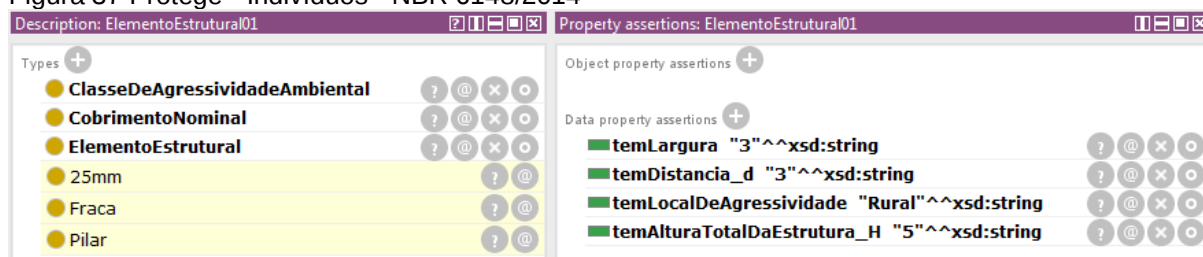
Fonte: O Autor (2019)

vii. Criar instâncias (*Individuals*)

Foi criado um indivíduo chamado ElementoEstrutural1, que possui as propriedades de dados temLargura "3", temDistancia_d "3", temAlturaTotalDaEstrutura "5" e temLocalDeAgressividade "Rural".

Esse indivíduo foi adicionado as classes ClasseDeAgressividade, Cobrimento Nominal e ElementoEstrutural. Ao rodar o motor de inferência Pellet, ele classifica o ElementoEstrutural1 como tendo 25mm de cobrimento nominal, um Classe de Agressividade Fraca e tem a forma de um Pilar, conforme exposto na Figura 37.

Figura 37 Protégé - Indivíduos - NBR 6148/2014



Fonte: O autor (2019)

Como resultado gráfico da Ontologia, o OntoGraph apresenta todas as classes e subclasses descritos nesse domínio de conhecimento na Figura 38.

iv. Definir as classes e a classes hierárquicas

Foram definidos 03 classes principais, sendo elas Documento, Material e ToleranciaDeDimensãoLongitudinal .

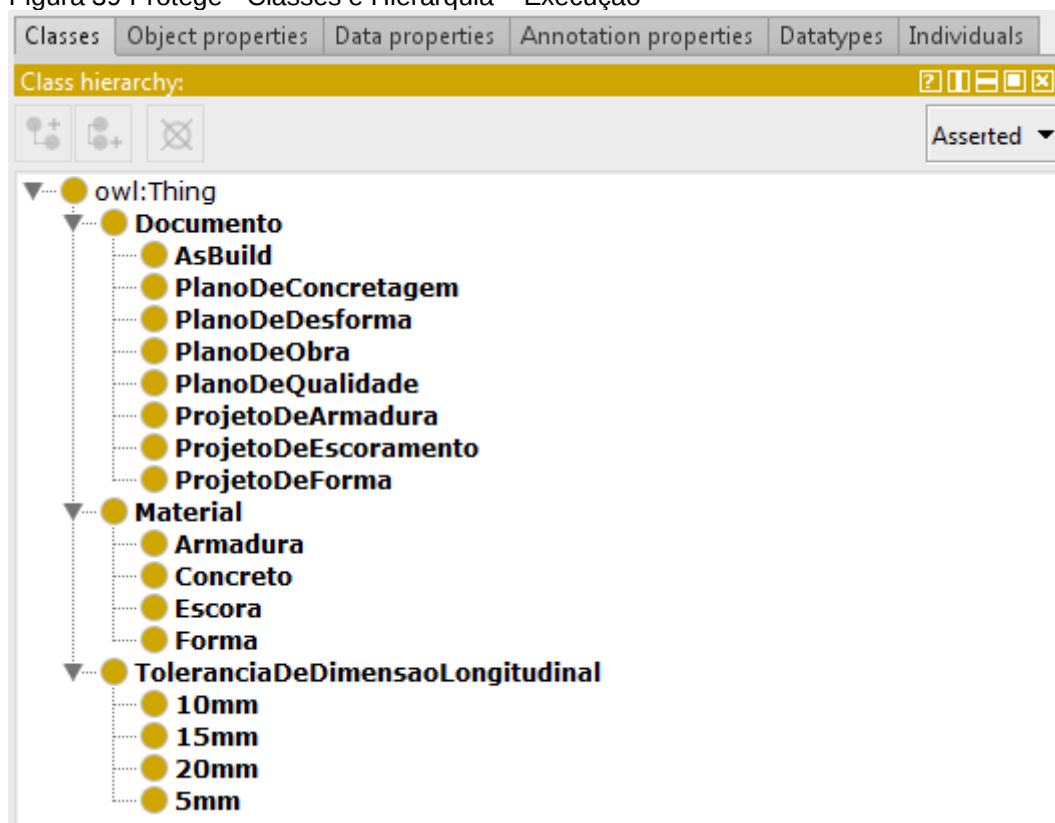
A classe Documento possui 08 subclasses que são projetos ou planos necessários de execução, sendo eles: Plano de concretagem, Plano de Desforma, Plano de Obra, Plano de Qualidade, Projeto AsBuild, Projeto de Armadura, Projeto de Escoramento e Projeto de Forma.

A classe Material está dividida conforme os sub-itens de norma: Armadura , concreto, escora e forma.

A Tolerância de Dimensão Longitudinal tem haver com a verificação que é realizada com base em cada elemento estrutural axial, sendo permitido variação de dimensões de 5mm, 10mm, 15mm e 20mm, conforme o comprimento do elemento.

Na Figura 39 é apresentando a taxonomia das classes.

Figura 39 Protégé - Classes e Hierarquia – Execução

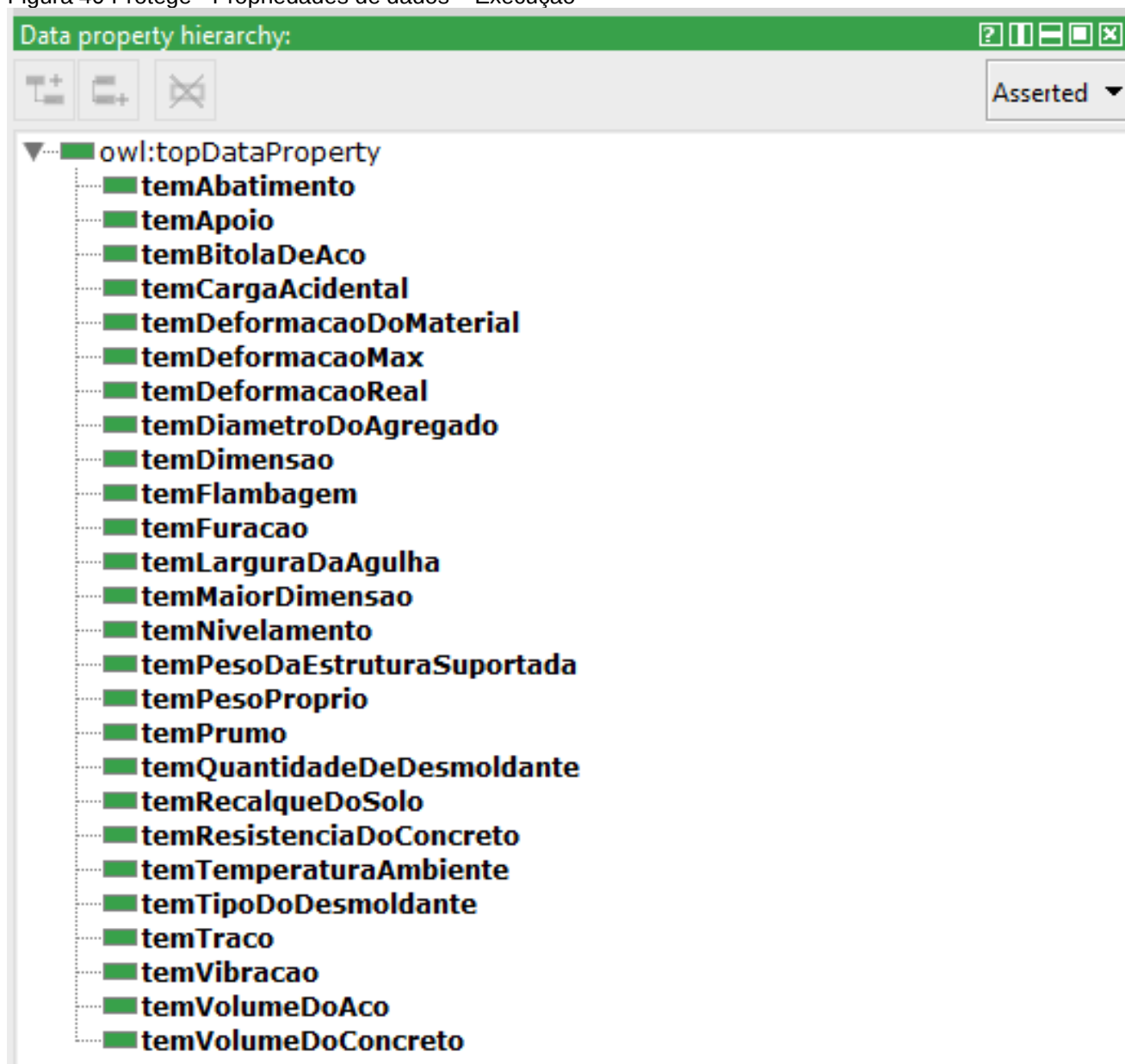


Fonte: O Autor (2019)

v. Definir as propriedades das classes

Nesta norma foram identificadas as propriedades de dados necessárias para sanar os requisitos dos documentos de obra de acordo com cada tipo de elemento. Entre elas algumas propriedades são comuns e devem ser previamente definidas na etapa de projetos. As propriedades de dados estão representadas na Figura 40.

Figura 40 Protégé - Propriedades de dados – Execução



Fonte: O Autor (2019)

Foram identificados 26 valores de requisitos de sistema nesta norma.

vi. Definir as regras

Foram criadas regras na ontologia para verificar a tolerância dimensional em milímetros para o comprimento de elementos estruturais lineares em relação ao projeto, conforme Figura 41.

Figura 41 Tolerâncias dimensionais para o comprimento de elementos estruturais lineares

Dimensão (ℓ) m	Tolerância (t) mm
$\ell \leq 3$	± 5
$3 < \ell \leq 5$	± 10
$5 < \ell \leq 15$	± 15
$\ell > 15$	± 20
NOTA A tolerância dimensional de elementos lineares justapostos deve ser considerada sobre a dimensão total.	

Fonte: NBR 14931/2004

Para criar essa regra de programação em SWRL, foram escritas 04 linhas de programação, uma para cada intervalo da norma, conforme Figura 42.

Figura 42 SWRL - execução

Name	Query
S1	<code>ToleranciaDeDimensaoLongitudinal(?p) ^ temMaiorDimensao(?p, ?x) ^ swrlb:lessThanOrEqual(?x, 3) -> mm(?p)</code>
S2	<code>ToleranciaDeDimensaoLongitudinal(?p) ^ temMaiorDimensao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThan(?x, 3) ^ swrlb:lessThanOrEqual(?x, 5) -> mm(?p)</code>
S3	<code>ToleranciaDeDimensaoLongitudinal(?p) ^ temMaiorDimensao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThan(?x, 5) ^ swrlb:lessThanOrEqual(?x, 15) -> mm(?p)</code>
S4	<code>ToleranciaDeDimensaoLongitudinal(?p) ^ temMaiorDimensao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThan(?x, 15) -> mm(?p)</code>

Fonte: O Autor (2019)

vii. Criar instâncias (*Individuals*)

Uma instância foi criada para testar a inferência de lógica do código programado, chamado de “Viga”, essa viga possui maior dimensão de 18 metros. Ao rodar o motor de inferência da Ontologia, descobre-se que a tolerância de dimensão longitudinal é de 20mm conforme demonstrado na Figura 43 .

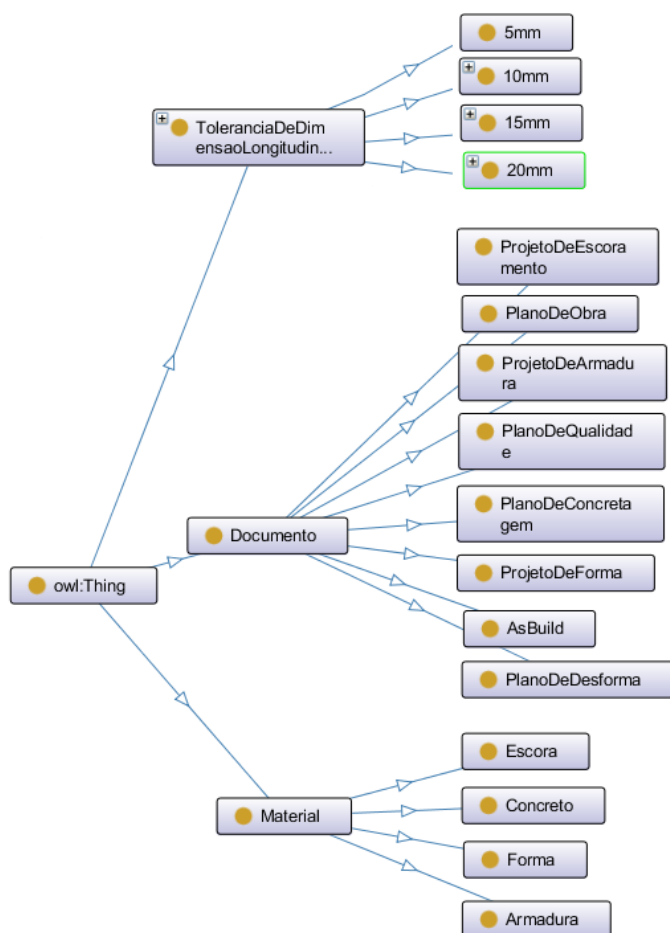
Figura 43 Protégé – Indivíduo Viga – Tolerância de dimensão



Fonte: O Autor (2019)

Como resultado de ontologia, o Ontograph apresentou a taxonomia das classes de concreto armado conforme Figura 44.

Figura 44 Protégé - OntoGraph – Execução



Fonte: O Autor (2019)

4.2.4 NBR 5674/2012 - Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção

- i. Determinar o domínio e o escopo da ontologia

A norma NBR 5674/2012 estabelece os requisitos para a gestão do sistema de manutenção de edificações, para preservar as características originais da edificação e prevenir a perda de desempenho decorrente da degradação dos seus sistemas. Essa norma foca em processo documental e a periodicidade que devem ocorrer. Essa norma cita que os procedimentos de análise de estruturas devem seguir o que está descrito na norma NBR 15575-2/2013¹⁴³, Norma de Desempenho e Requisitos para os sistemas estruturais. Por conta disso, ambas as normas foram utilizadas nessa ontologia.

- ii. Considerar a reutilização de ontologias existentes

Não há na literatura ontologias de concreto armado a partir de Normas de concreto armado.

- iii. Enumerar termos importantes na ontologia

A norma NBR 5674/2012 atenta quanto ao período de verificação das estruturas de concreto, que devem ocorrer anualmente, e quais os documentos necessários para realizar esse procedimento.

A norma parte 2 da NBR 15575/2013 cita que a maneira como realizar as verificações visuais de estruturas de concreto armado e quais são suas tolerâncias quanto a deslocamento, fissuração, flecha e ensaio de corpo duro/mole.

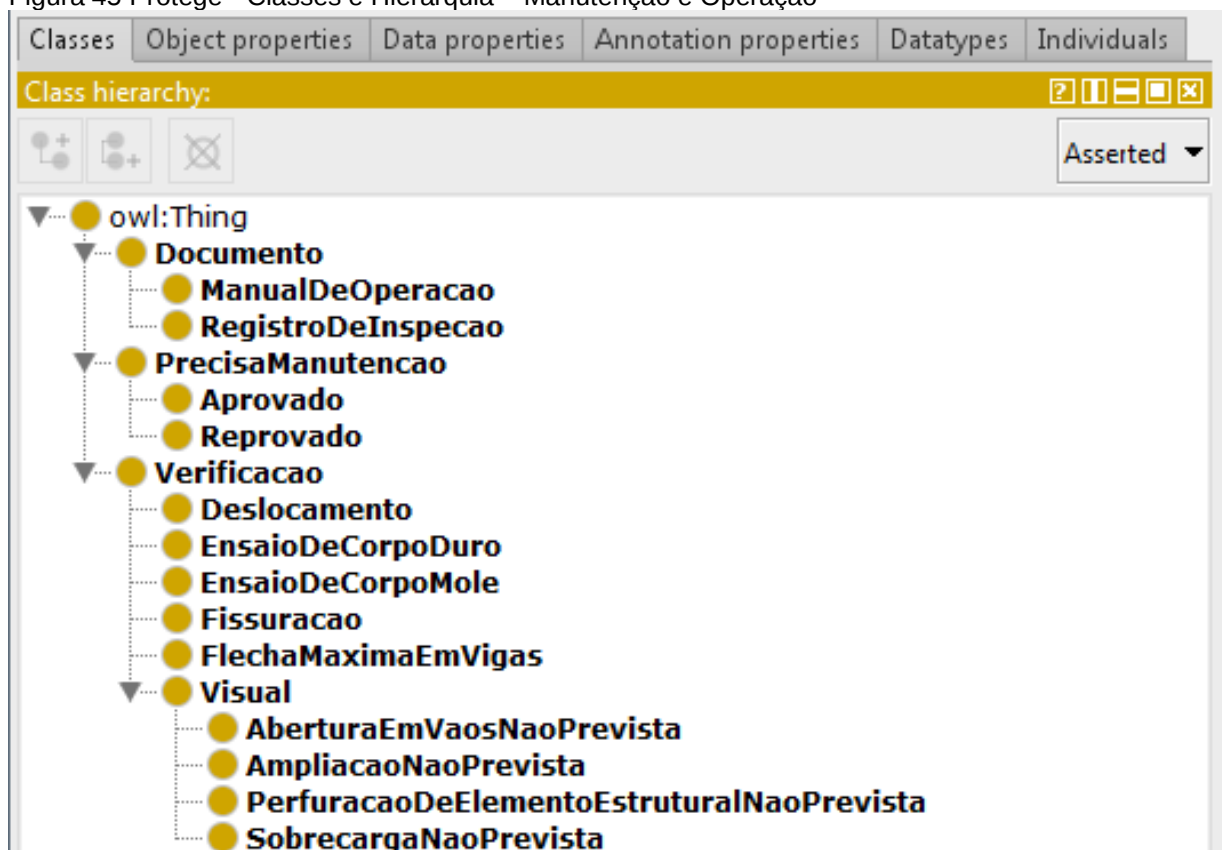
- iv. Definir as classes e a classes hierárquicas

A primeira classe criada diz respeito à documentação necessária para realizar as manutenções e operação da estrutura, que são divididas em duas principais: ManualDeOperação e RegistroDeInspeção.

A Segunda classe que se chama PrecisaManutenção é um indicador através de suas sub-classes se a verificação encontra-se dentro na norma. As subclasses são “Aprovado” e “Reprovado”.

A classe Verificação mostra os procedimentos que devem ser realizados de verificação de elementos estruturais, sendo eles: Deslocamento, Ensaio de corpo Duro, Ensaio de corpo Mole, Fissuração, Flecha máxima em Vigas e quatro verificações visuais: Abertura em vãos não previstas em projetos, Ampliações não previstas em Projetos, Perfuração de elementos estruturais não previstas em Normas, Sobrecargas não previstas em projeto. As classes e subclasses são expressas na Figura 45.

Figura 45 Protégé - Classes e Hierarquia – Manutenção e Operação

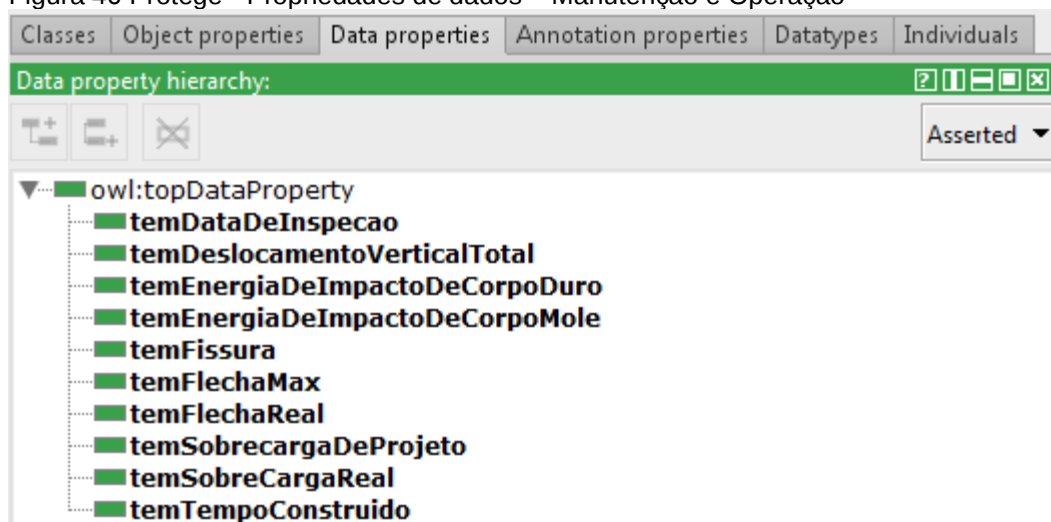


Fonte: O Autor (2019)

v. Definir as propriedades das classes

Nestas normas foram identificadas as propriedades de dados necessárias para sanar os requisitos das análises estruturais. Entre eles algumas propriedades são comuns e devem ser previamente definidas na etapa de projetos.

Figura 46 Protégé - Propriedades de dados – Manutenção e Operação



Fonte: O Autor (2019)

Foram identificados 10 valores de requisitos de sistema nesta norma conforme Figura 46.

vi. Definir as regras

As regras escritas nessa ontologia têm como base o tempo de conclusão do edifício e o tempo da última manutenção preventiva realizada. A norma aconselha verificações anuais e por conta disso, se o sistema indicar que uma edificação está pronto a mais de 01 ano e possui tempo de realização da última manutenção documentada no Registro de Inspeção deve-se realizar uma nova verificação dos elementos estruturais. A linha de programação utilizada para isso foi:

`Verificacao(?p) ^ temDataDeInspecao(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThan(?x, "1"^^xsd:int) ^ temTempoConstruido(?p, ?x) -> PrecisaManutencao(?p)`

Caso a Ontologia identifique que um indivíduo precisa de manutenção, ele deve ser testado nos 06 testes de verificação citado anteriormente, como exemplo, foi realizada uma regra que diz que caso o indivíduo possuir mais que 0.6mm de fissura, esse elemento está reprovado e precisa ser arrumado. A linha de teste para isso é:

`PrecisaManutencao(?p) ^ temFissura(?p, ?x) ^ swrlb:greaterThan(?x, 0.6) -> Reprovado(?p)`

As demais regras podem ser criadas na Ontologia para testar e satisfazer as demais condições da norma.

vii. Criar instâncias (*Individuals*)

Para testar as regras criadas em SWRL, e fazer com o motor de inferência pudesse dizer se o elemento está aprovado ou não foi criado um indivíduo de nome “Viga1” que possui diversas propriedades de dados.

Conforme apresentando na Figura 47, ao realizar o processamento dos dados a ontologia sugere que deve ser realizado manutenção, e em seguida reprova o elemento estrutural por possuir uma fissuração superior a 0.6mm;

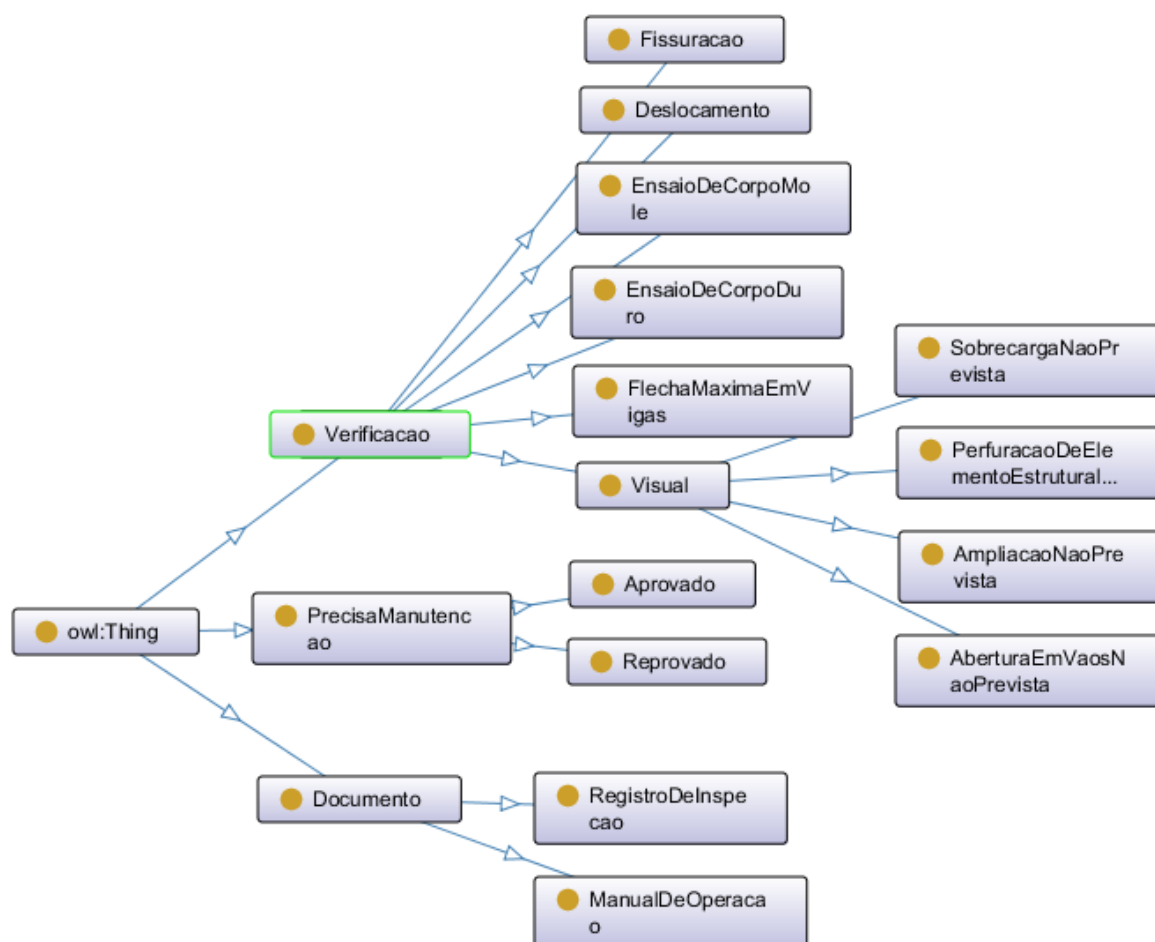
Figura 47 Protégé – Indivíduo Viga1



Fonte: O Autor (2019)

Como resultado de ontologia, o Ontograph apresentou a taxonomia das classes de concreto armado conforme demonstrado na Figura 48.

Figura 48 Protégé - OntoGraph – Manutenção e Operação



Fonte: O Autor (2019)

4.2.5 NBR 5682/1977 DEMOLIÇÃO

- i. Determinar o domínio e o escopo da ontologia

O escopo dessa Ontologia é a norma NBR 5682/1977, que estabelece métodos, providências e licenciamento de Demolições. Será abordado o subitem da norma 8.3.2 que diz respeito a Concreto Armado “in situ”. Os demais itens dessa norma são sobre demolição total de uma obra existente.

- ii. Considerar a reutilização de ontologias existentes

Como abordado anteriormente, não há na literatura ontologias de concreto armado a partir de Normas de concreto armado.

iii. Enumerar termos importantes na ontologia

Nesta norma, cada sub-item orienta procedimentos específicos quanto a forma da estrutura. Sendo elas:

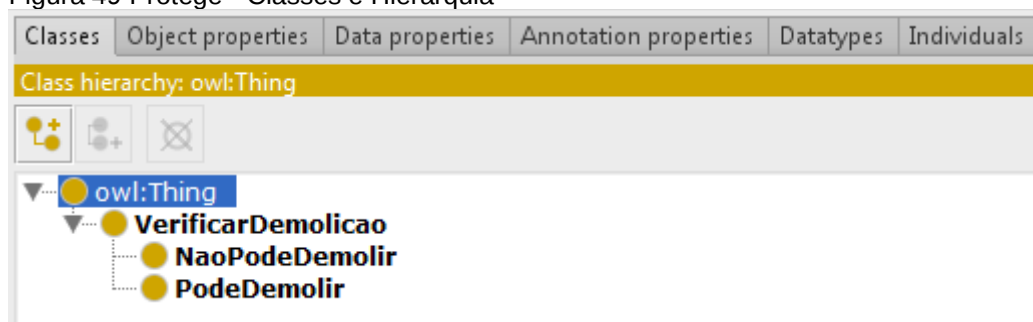
- 1 – Vigas
- 2 – Pilares
- 3 – Lajes

iv. Definir as classes e a classes hierárquicas

Antes do início da demolição de uma estrutura de concreto moldado in loco, deve-se determinar a natureza e condição do concreto, a condição e posições das armações, e a possibilidade de descontinuidade da mesma, sendo que estes itens estão presentes no projeto estrutural. Para cada tipo de estrutura possui um tipo de procedimento, entretanto, todas elas necessitam ter os elementos sobre elas previamente demolidos/desconstruídos.

Sendo assim, uma classe que determina se a estrutura pode ou não ser removida com base na existência de sobrecargas foi adicionada a ontologia, conforme Figura 49.

Figura 49 Protégé - Classes e Hierarquia



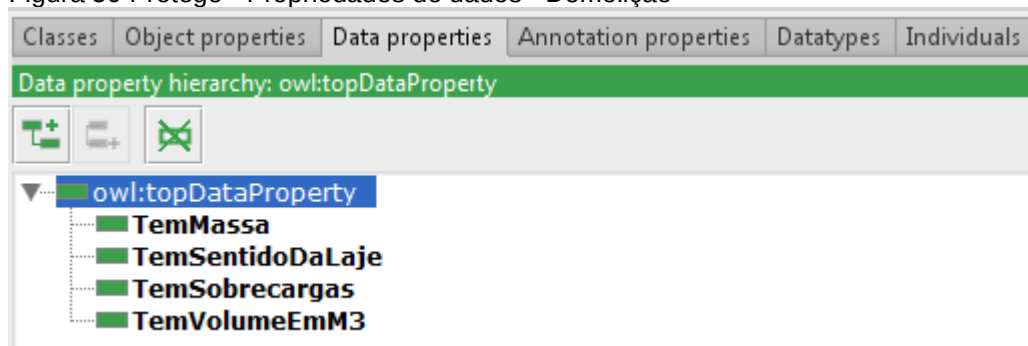
Fonte: O Autor (2019)

v. Definir as propriedades das classes

As propriedades de dados inerentes a demolição têm ligação direta com o projeto estrutural previamente desenvolvido, pois através dele é possível analisar

qual o peso e quantidade de cada material que será demolido, e o volume de destinação. As 04 propriedades de dados podem ser observadas na Figura 50.

Figura 50 Protégé - Propriedades de dados - Demolição



Fonte: O Autor (2019)

Para essas informações estarem disponíveis para demolição, devem ser previamente definidas no projeto estrutural.

vi. Definir as regras

A regra criada para identificar se uma estrutura pode ou não ser demolida está ligada a certificação de que todas as sobrecargas foram removidas previamente. Por exemplo, para uma viga poder ser demolida, a alvenaria, janelas, portas e lajes precisam ser removidas previamente. Assim como, no caso de pilares, as vigas devem ser removidas previamente.

$$\text{VerificarDemolicao}(?p) \wedge \text{TemSobrecargas}(?p, ?x) \wedge \text{swrlb:greaterThan}(?x, "0"^^\text{xsd:int}) \rightarrow \text{NaoPodeDemolir}(?p)$$

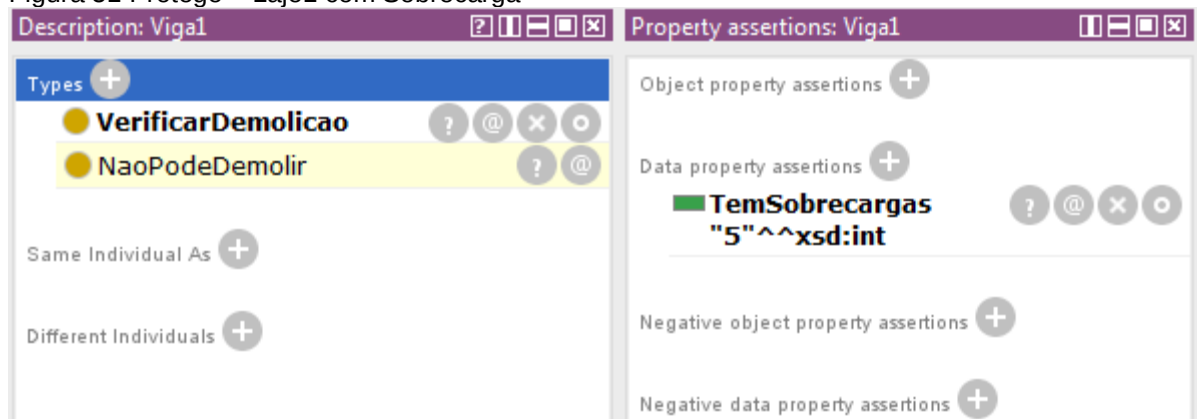
Ou seja, toda estrutura que possui sobrecargas sobre ela não pode ser demolida;

vii. Criar instâncias (*Individuals*)

Para testar essa regra SWRL, um indivíduo foi criado com o nome de "laje1", possuindo o a propriedade de dados "temSobrecarga" com o número de 5. Na

Figura 51, o motor de inferência mostra em amarelo que não é permitido realizar a demolição.

Figura 51 Protégé – Laje1 com Sobrecarga



Fonte: O Autor (2019)

4.3 EXTRAÇÃO DE DADOS DO IFC 4

Através da Documentação HTML do IFC4 add2 que contem o subconjunto de entidades, propriedades e conceitos que o IFC especifica para a troca de informação entre sistemas BIM, será realizado a extração de dados do IFC4. Nesta parte do trabalho serão extraídas da documentação IFC todas as informações que o IFC4 possui sobre concreto armado para posteriormente comparar com as informações extraídas das ontologias das normas do capítulo 4.2 e analisar se o arquivo IFC é completo quanto a essas informações.

O IFC organiza seus dados de acordo com os domínios que nele estão inseridos a informação, por exemplo, dentro do domínio de elementos estruturais, um dado chamado “IfcFooting” que representa fundações, tem uma propriedade chamada de “IfcFootingTypeEnum”, que representa o tipo de fundação que será escolhida por cada usuário. Esse tipo de informação pode ser “Caisson_Foundation”, “Footing_Beam”, “Pad_Footing”, “Pile_Cap”, “Strip_Footing”, “Userdefined” ou “notdefined”;

Ao escolher cada tipo de fundação, além dos atributos do domínio de elementos estruturais, cada tipo de fundação também usará atributos comuns a vários domínios, como o “shared property sets”, “representations”, “materials”, “composition of elements”.

Ou seja, cada tipo de fundação representa uma complexa ligação entre todos os domínios com alguns atributos do domínio Elementos estruturais;

Neste trabalho serão catalogados somente os elementos dentro dos domínios de Elementos estruturais (“IfcStructuralElementsDomain”) e de Análise Estrutural (“IfcStructuralAnalysisDomain”).

Para isso foi analisado os gráficos EXPRESS-G presentes na documentação do IFC4 add4. Cada domínio possui 04 gráficos EXPRESS-G analisados individualmente neste trabalho. A extração de dados seguirá conforme apresentando no capítulo 3.4, abordagem metodológica.

4.3.1 Domínio de Elementos Estruturais

O esquema IfcStructuralElementsDomain fornece a capacidade de representar diferentes tipos de elementos de construção e construir partes de elementos que, em geral, são de natureza estrutural. Além dos elementos de construção geralmente usados já definidos no esquema IfcSharedBuildingElements, o esquema contém entidades para representar partes de fundação, como fundações e estacas, bem como algumas subpartes estruturais importantes incluídas em outros elementos de construção, como diferentes tipos de peças de reforço explícitas e recursos e tratamentos fabricados (buildingSmart, 2016).

O primeiro Gráfico EXPRESS-G apresenta os tipos de fundações e os tipos de estacas. Também mostra como indica a Figura 52, um recurso de tratamento de superfície e um recurso de anulação que é uma modificação de um elemento que reduz seu volume, como por exemplo, adicionar volumes “ocos” dentro de estruturas de concreto, ou chanfros. Conforme apresentando no item 3.4, serão retirados dos gráficos EXPRESS-G todos as propriedades de dados que estão localizadas sobre as linhas pontilhadas, salvo quando forem “PredefinedType”, que será listado os itens pré definidos pelo IFC4.

Figura 52 IfcStructuralElementsDomain (1/4)



Fonte: O Autor (2019), adaptado de BuildingSMART (2018),

Como todas as propriedades de dados acima eram descritas em verde, ou seja, era um tipo de listagem de dados, foram adicionadas todas as possíveis optativas dentro das mesmas. Importante ressaltar que o usuário pode escolher qualquer uma delas bem como, pode utilizar a opção “Userdefined” e escrever eles mesmo uma nova opção.

As informações de dados que procuramos estão descritas sobre a linha pontilhada, e foram adicionadas seu antecessor para não confundir com vários “PredefinedType”, conforme apresentando na imagem Figura 52, os valores circulados foram descritos abaixo:

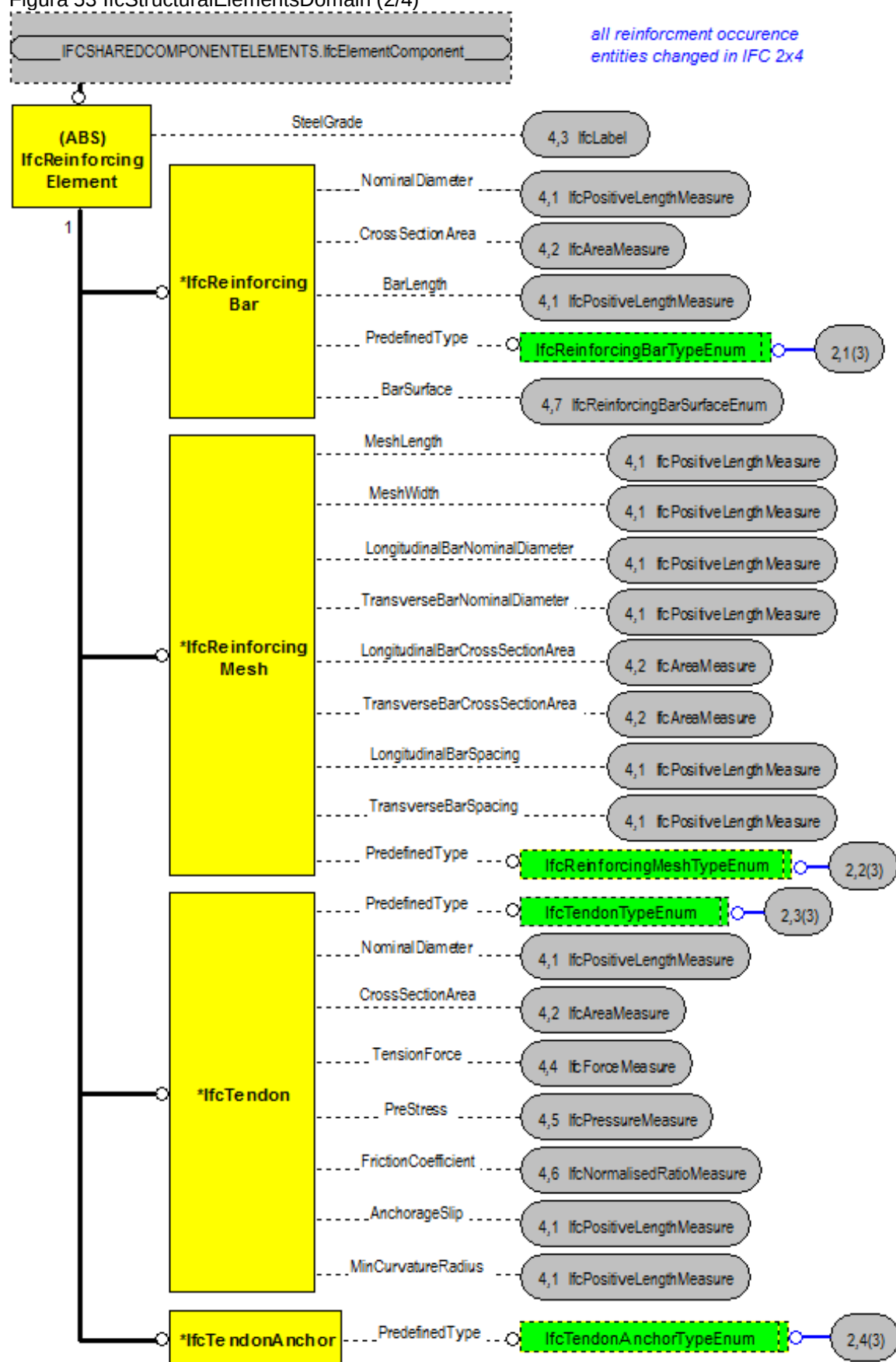
- PrefefinedTypeOfFooting
 - Caisson_foundation
 - Footing_beam

- Pad_footing
 - Pile_cap
 - Strip_footing
 - Userdefined
 - Notdefined
- PredefinedTypeOfPile
 - Bored
 - Driven
 - Jetgrouting
 - Cohesion
 - Friction
 - Support
 - Userdefined
 - Notdefined
- ConstructionTypeOfPile
 - Cast_in_place
 - Composite
 - Precast_concrete
 - Prefab_steel
 - Userdefined
 - Notdefined
- PredefinedTypeOfSurface
 - Mark
 - Tag
 - Treatment
 - Userdefined
 - Notdefined
- PredefinedTypeOfVoiding
 - Cutout
 - Notch
 - Hole
 - Miter
 - Chamfer
 - Edge
 - Userdefined
 - Notdefined

Como todas as propriedades de dados acima eram descritas em verde, ou seja, era um tipo de listagem de dados, foram adicionadas todas as possíveis optativas dentro das mesmas. Importante ressaltar que o usuário pode escolher qualquer uma delas bem como, pode utilizar a opção “Userdefined” e informar uma nova opção.

O segundo gráfico (Figura 53) apresenta entradas de dados referentes à elementos de reforço, que são separados em barras de reforço, malhas de reforço, reforço por cabo de proteção e ancoragem de proteção.

Figura 53 IfcStructuralElementsDomain (2/4)



Fonte: BuildingSMART (2018)

Os valores buscados são aquele sobre as linhas pontilhadas expressas graficamente na imagem Figura 53. Em Barras de Reforço temos:

- NominalDiameter
- CrossSectionArea
- BarLegth
- PredefinedTypeOfReinforcingBar
 - Anchoring
 - Edge
 - Ligature
 - Main
 - Punching
 - Ring
 - Shear
 - Stud
 - Userdefined
 - Notdefined
- BarSurface

Em Malhas de Reforço temos:

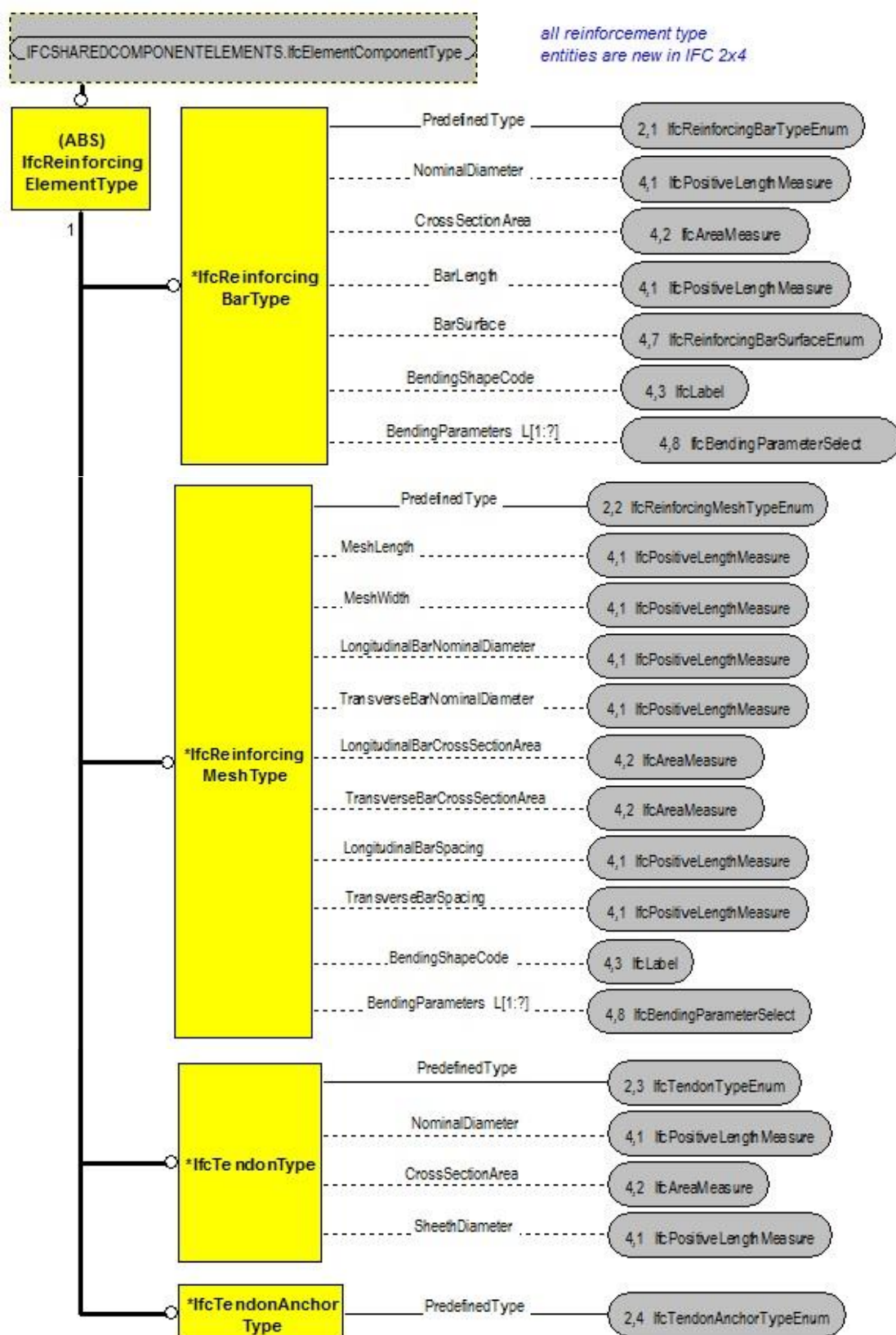
- MeshLenght
- MeshWidth
- LongitudinalBarNominalDiameter
- TranverseBarNominalDiameter
- LongitudinalBarCrossSectionArea
- LongitudinalBarSpacing
- TransverseBarSpacing
- PredefinedTypeOfReinforcingMesh
 - Userdefined
 - Notdefined

Os elementos com armaduras protendidas não serão listados, pois não fazem parte do escopo deste trabalho.

PredefinedTypeOfReinforcingMesh refere-se ao prefixo que é nomeado pelo usuário à listagem de elementos estruturais, por exemplo pilares, se o usuário preferir que todo pilar inicie com a letra “P”, ficando no formato P – X, sendo x o nº correspondente do pilar (P – 1, P – 2 , P – 3), pode ser definido nessa opção. Caso não informado será mantido o padrão do programa.

O terceiro gráfico EXPRESS-G (Figura 54) apresenta os Tipos de Reforços estruturais, que são classificados conforme as propriedades que eles têm em comum. Da mesma maneira que o EXPRESS-G anterior, também está dividido em barras de reforço, malhas de reforço, reforço por cabo de proteção e ancoragem de proteção.

Figura 54 IfcStructuralElementsDomain (3/4)



Fonte: BuildingSMART (2018)

Em Barras de Reforço:

- PredefinedTypeOfReinforcingBar
- NominalDiameter
- CrossSectionArea
- BarLegth
- BarSurface
- BendingShapeCode
- BendingParameters

Em Malhas de Reforço:

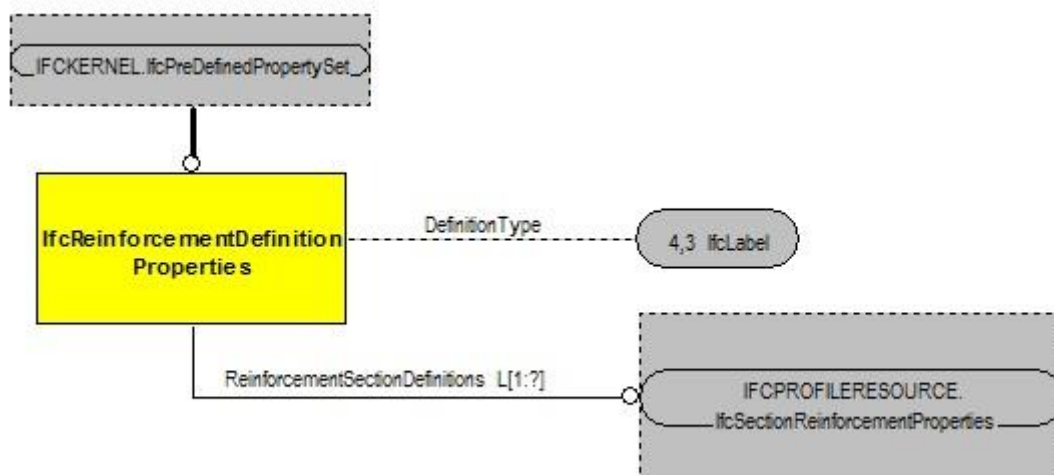
- PredefinedTypeOfReinforcingMesh
- MeshLenght
- MeshWidth
- LongitudinalBarNominalDiameter
- TranverseBarNominalDiameter
- LongitudinalBarCrossSectionArea
- TransversalBarCrossSectionArea
- LongitudinalBarSpacing
- TransverseBarSpacing
- BendingShapeCode
- BendingParameters

Os elementos de proteção não serão listados, pois não fazem parte do escopo deste trabalho.

O quarto e último EXPRESS-G de Elementos Estruturais define as Propriedades de Reforços, conforme apresenta a Figura 55, que possuem as seguintes entradas de dados:

- DefinitionTypeOfReinforcement
- ReinforcementSectionDefinitions

Figura 55 IfcStructuralElementsDomain (4/4)



Fonte: BuildingSMART (2018)

4.3.2 Domínio de Análise Estrutural

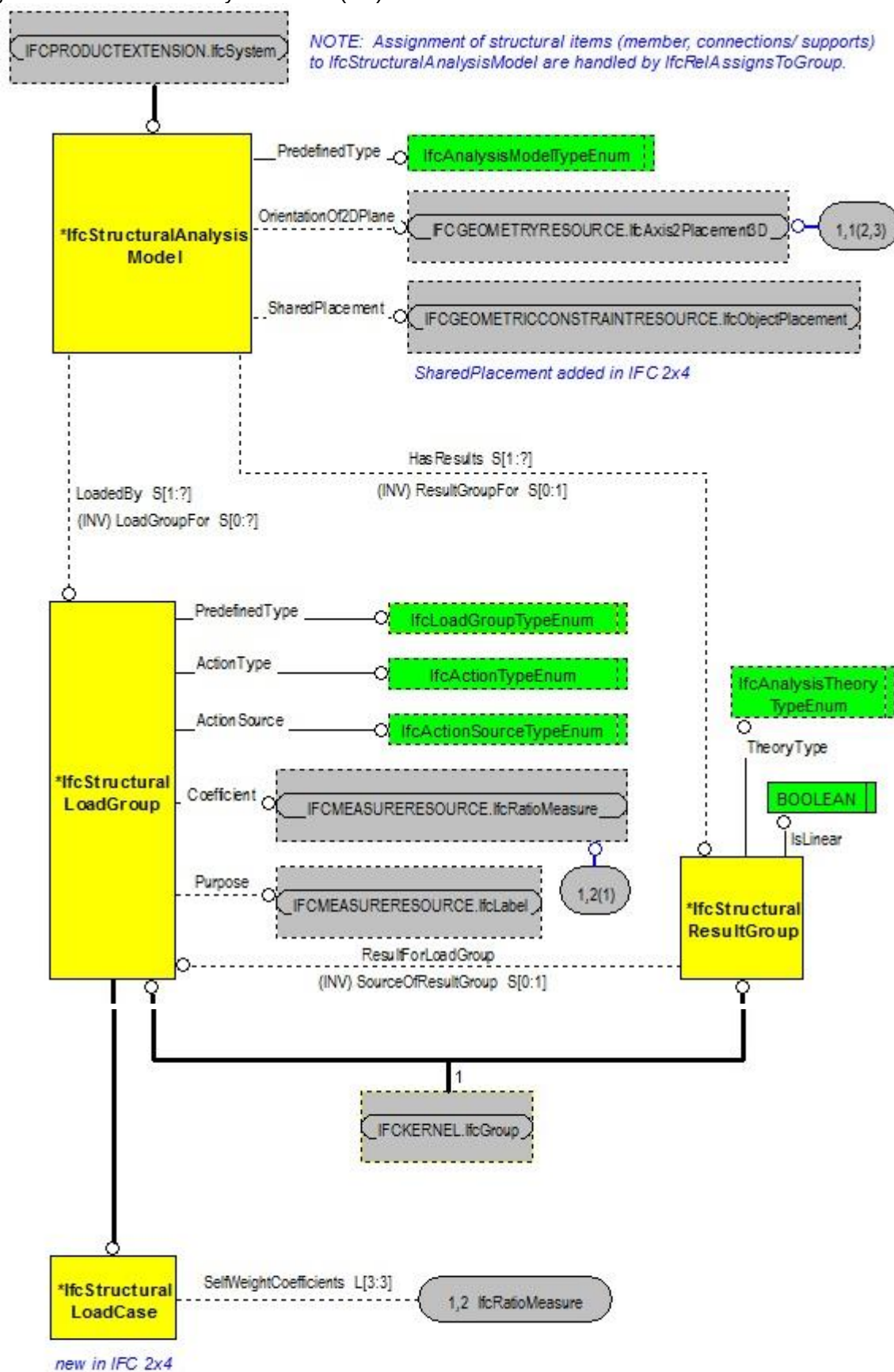
De acordo com a documentação da builSMART[8], o IfcStructuralAnalysisDomain descreve o modelo de análise estrutural para integrar o domínio de engenharia estrutural. O foco é garantir que as informações de engenharia estrutural sejam capturadas e tornadas visíveis para outros domínios relacionados.

Incluídos neste domínio estão:

- Elementos estruturais retos ou curvos, elementos de superfície estruturais planos ou curvos.
- Conexões e suportes de ponto, curva e superfície.
- Especificação de cargas incluindo ponto, curva, cargas de superfície, cargas de temperatura, sua atribuição a grupos de carga, casos de carga e combinações de carga.
- Especificação de diferentes modelos de análise estrutural para descrever diferentes aspectos ou partes do edifício. Além disso, as dependências entre esses modelos podem ser armazenadas no modelo para uso posterior.
- Resultados de análise definidos por forças e deslocamentos.

Este domínio possui 04 gráficos EXPRESS-G, que serão abordados na totalidade. O primeiro deles, composto do modelo de análise estrutural, Grupo de Cargas Estruturais, Grupo de Resultado Estrutural e Caso de carga estrutural conforme Figura 56.

Figura 56 IfcStructuralAnalysisDomain (1/4)



Em Modelo De Análise Estrutural:

- PredefinedTypeOfAnalysisModel
 - In_plane_loading_2d
 - Out_plane_loading_2d
 - Loading_3d
 - Userdefined
 - Notdefined
- OrientationOf2DPlane
- SharedPlacement

Em Grupo de Cargas Estruturais:

- PredefinedTypeOfLoadGroup
 - Load_group
 - Load_case
 - Load_combination
 - Userdefined
 - Notdefined
- ActionType
 - Permanent_g
 - Variable_q
 - Extraordinary_a
 - Userdefined
 - Notdefined
- ActionSource
 - Dead_load_g
 - Completion_g1
 - Live_load_q
 - Snow_s
 - Wind_w
 - Prestressing_p
 - Settlement_u
 - Temperature_t
 - Earthquake_e

- Fire
- Impulse
- Impact
- Transport
- Erection
- Propping
- System_imperfection
- Shrinkage
- Creep
- Lack_of_fit
- Buoyancy
- Ice
- Current
- Wave
- Rain
- Brakes
- Userdefined
- Notdefined
- Coefficient
- Purpose

Em Caso de Cargas Estruturais:

- SelfWeightCoefficients

Em Grupo de Resultado Estrutural:

- TheoryType
 - First_order_theory
 - Second_order_theory
 - Third_order_theory
 - Full_nonlinear_theory
 - Userdefined
 - Notdefined

O segundo e o terceiro gráfico EXPRESS-G (Figura 57 e Figura 58) apresentam as condições de Apoio, as conexões entre os elementos estruturais e os membros estruturais que estão conectados, como por exemplo uma laje apoiada em uma viga, que por sua vez apoia no pilar, e este passa para fundação que descarrega no solo. Os valores de entrada pelo usuário estão divididos:

Em Conexões Estruturais:

- AppliedCondition

Em Membros estruturais Conectados

- AdditionalConditions
- AppliedConditions
- SupportedLength
- ConditionCoordinateSystem

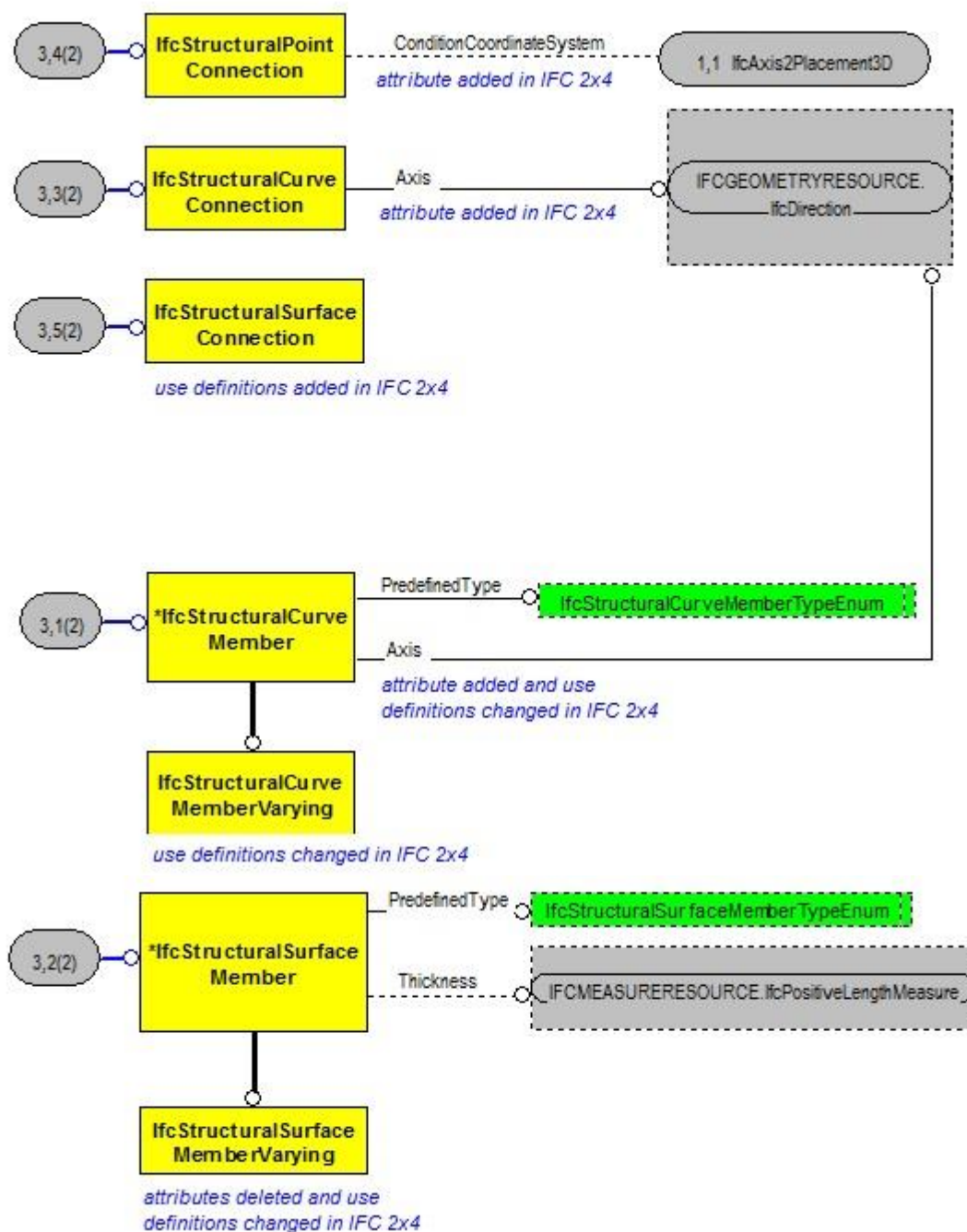
Em Pontos de Conexões:

- ConditionCoordinateSystem
- Axis

Em Membro De Superfície Estrutural:

- PredefinedTypeOfSurface
 - Bending_element
 - Membrane_element
 - Shell
 - Userdefined
 - Notdefined
- Thickness

Figura 58 IfcStructuralAnalysisDomain (3/4)



Fonte: BuildingSMART (2018)

Como fechamento desta seção, termina-se o mapeamento e extração de propriedades de dados de todos os gráficos EXPRESS-G que diz respeito aos domínios de elementos estruturais e análise estrutural. Quando necessário foi explorado dentro dos “PredefinedType” para descobrir quais os itens pré-definidos o IFC carrega. A Tabela 7 apresenta em ordem numérica os requisitos de dados encontrados na documentação do IFC4 add2.

Tabela 7 Requisitos de Dados presentes na Documentação do IFC4 add2

Domínio de Elementos Estruturais	1	PrefefinedTypeOfFooting	Domínio de Análise Estrutural	25	PredefinedTypeOfAnalysisModel
	2	PredefinedTypeOfPile		26	OrientationOf2DPlane
	3	ConstructionTypeOfPile		27	SharedPlacement
	4	PredefinedTypeOfSurface		28	PredefinedTypeOfLoadGroup
	5	PredefinedTypeOfVoiding		29	ActionType
	6	NominalDiameter		30	ActionSource
	7	CrossSectionArea		31	Coefficient
	8	BarLegth		32	Purpose
	9	PredefinedTypeOfReinforcingBar		33	SelfWheightCoefficients
	10	BarSurface		34	TheoryType
	11	MeshLenght		35	AdditionalConditions
	12	LongitudinalBarNominalDiameter		36	AppliedConditions
	13	TranverseBarNominalDiameter		37	SupportedLenght
	14	LongitudinalBarCrossSectionArea		38	ConditionCordinateSystem
	15	LongitudinalBarSpacing		39	Axis
	16	TransverseBarSpacing		40	PredefinedTypeOfSurface
	17	PredefinedTypeOfReinforcingMesh		41	Thickness
	18	PredefinedTypeOfReinforcingBar			
	19	BendingShapeCode			
	20	BendingParameters			
	21	PredefinedTypeOfReinforcingMesh			
	22	MeshWidth			
	23	MeshLenght			

Fonte: O Autor(2019)

5 RESULTADOS

No tocante à delimitação do escopo do desta pesquisa em Concreto Armado, os requisitos foram encontrados e especificados após a análise das normas e documentação IFC4 ADD2. Quanto a quantidade de requisitos encontrados em cada norma das etapas do ciclo de vida através da ferramenta de ontologia, tivemos 03 em pré-projeto, 112 em Projeto, 26 em Execução, 10 em operação e manutenção e 4 em demolição. Esses valores foram retirados da quinta etapa da metodologia de sete passos de cada Ontologia criada (“Definir as propriedades das classes”). Conforme representado na Figura 60 as porcentagens.

Figura 60 Propriedade de dados em Ontologias de Normas



Fonte: O Autor (2019)

Quanto as propriedades de dados presentes na documentação IFC4 add2, foram encontrados 23 no Domínio de Elementos Estruturais e 17 no Domínio de Análise Estrutural.

Os requisitos podem ser únicos ou colaborativos. Há várias fases do projeto com informação colaborativas às demais fases do ciclo de vida, como por exemplo “sobrecargas”, que é utilizado: para dimensionar a estrutura na fase de projeto,

para dimensionar formas na fase de execução, verificar as sobrecargas na fase de operação e manutenção e, indispensável, conhecer as mesmas antes da fase de demolição da estrutura.

Quanto as propriedades de dados encontradas no levantamento através da documentação do IFC4 add2, os dados contidos no Domínio de Elementos Estruturais (IfcStructuralElementsDomain) estavam descritos de forma explícita como nas ontologias criadas, como por exemplo “ Diâmetro Nominal Longitudinal da barra” (LongitudinalBarNominalDiameter), que é um requisito que pode ser informado ou calculado na fase de projeto e consultado na parte de execução.

Já nos requisitos encontrados no Domínio de análise estrutural, os requisitos identificados são generalistas, como por exemplo, (ActionType), que possui uma lista pré-definida de tipos de ações como por exemplo uma ação permanente, uma ação variável, uma ação extraordinária, porém, além das previamente estipuladas pelo programa o usuário pode definir um novo tipo de ação.

Ao todo foram encontrados 23 diferentes tipos de propriedades de dados no Domínio Estrutural e 17 em Análise estrutural, além dos itens pré-definidos dentro das propriedades de dados, que somam mais 32 no domínio Estrutural e 38 no domínio de Análise estrutural, totalizando 52 propriedades de dados e 70 predefinições.

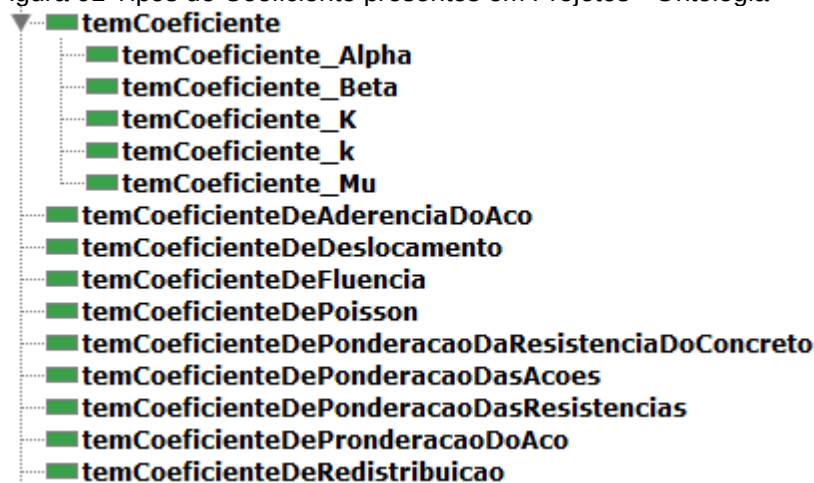
Finalizando, há 155 propriedades de dados presentes nas ontologias e normas de concreto armado contra 52 presentes na documentação IFC. Esses números não retratam que faltam 2/3 de propriedades correspondentes dentro do IFC, visto que as propriedades de dados do IFC são generalistas, podendo compreender mais que uma propriedade de dados dentro de si. Essa comparação ocorrerá a seguir.

5.1 COMPARAÇÃO ONTOLOGIAS X IFC4 ADD2

Com o intuito de identificar quais propriedades de dados presentes nos 155 dados de propriedades encontrados nas normas estão presentes no IFC, uma comparação é realizada item a item, correlacionando o contexto que cada propriedade tem com os consequentes.

O contexto é a chave comparativa, pois algumas propriedades de dados presentes na documentação IFC4 são generalistas, possui múltiplos significados e múltiplas possibilidades de análise, como por exemplo, “coefficient”, que está ligada não somente há um tipo de coeficiente, mas a todos os coeficientes que se aplicam valores, como esta demonstrando na Figura 61, ou seja, dentro do arquivo IFC a palavra Coeficiente será correlacionada com todas as 15 opções de coeficientes expressos nas ontologias.

Figura 61 Tipos de Coeficiente presentes em Projetos - Ontologia



Fonte: O Autor (2019)

Ainda sobre contexto, a propriedade de dados chamada de “Purpose” presente na documentação IFC4, refere-se a um rótulo, ou seja, termo pelo qual algo pode ser referido. É uma string que representa o nome de alguma coisa que pode ser interpretada por humanos e deve ter um significado de linguagem natural. Por exemplo, a numeração de Vigas, é um rótulo que a norma cita que deve ser realizada nos projetos estruturais.

Como resultado dessa avaliação item a item, dentro das tabelas 8, 9 10, 11 e 12, a coluna “norma” mostra as propriedades de dados presentes na ontologia e compara com qual Requisito do IFC4 ela poderia ser inserida.

Nos locais onde não há continuidade de cor, não há item no IFC4 nos domínios analisados que suportem esses dados.

Seguindo a ordem como foi apresentando as Ontologias no desenvolvimento desta dissertação, a Tabela 8 apresenta a comparação das propriedades de dados

presentes na ontologia de conceito e compara com todas as propriedades de dados do IFC4, achando um correspondente, quando este existir.

Tabela 8 Tabela comparativa Norma x IF4 - Conceito

Fase	nº	Norma	IFC4 ADD2
Conceito	1	temAbatimento	
	2	temMassaEspecific	SelfWeightCoefficients
	3	temResistenciaCaracteristicaACompressao	ActionType

Fonte: O Autor (2019)

A falta de cor em célula desta tabela representa que não há correspondência entre a norma e o ifc4, sendo assim, o item “temAbatimento” não é apresentando dentro do IFC4 nos domínios analisados.

A Tabela 9 apresenta as propriedades de dados da fase do ciclo de vida de projetos, sendo esta a fase que mais possui correlações.

Tabela 9 Tabela comparativa Norma x IF4 – Projeto

Fase	nº	Norma	IFC4 ADD2
Projeto	4	temAberturaDaFissura	
	5	temAcoes	ActionType
	6	temAcoesPermanentes	ActionType
	7	temAcoesVariaveis	ActionType
	8	temAltura_d	ConditionCordinateSystem
	9	temAltura_H	ConditionCordinateSystem
	10	temAltura_h	ConditionCordinateSystem
	11	temAlturaDaLinhaNeutra	ConditionCordinateSystem
	12	temAlturaTotalDaEstrutura_H	ConditionCordinateSystem
	13	temAlturaTotalDaEstrutura_h	ConditionCordinateSystem
	14	temAlturaUtil	ConditionCordinateSystem
	15	temAngulo_Beta	ConditionCordinateSystem
	16	temAngulo_Alpha	ConditionCordinateSystem
	17	temAnguloDeInclinacao	ConditionCordinateSystem
	18	temAreaDaSecaoCheia	CrossSectionArea
	19	temAreaDaSecaoTranversalDaArmaduraLongitudinalDeCompressao	LongitudinalBarNominalDiameter
	20	temAreaDaSecaoTranversalDaArmaduraLongitudinalDeTracao	LongitudinalBarNominalDiameter
	21	temAreaDaSecaoTransversalDeConcreto	TransverseBarNominalDiameter
	22	temBracoDeAlavanca	AppliedConditions
	23	temClasseDeResistencia	ActionType
	24	temCobrimentoDaArmaduraEmRelacaoAFaceDoElemento	

25	temCoeficiente_Mu	Coefficient
26	temCoeficiente_Beta	Coefficient
27	temCoeficiente_Alpha	Coefficient
28	temCoeficiente_K	Coefficient
29	temCoeficiente_k	Coefficient
30	temCoeficienteDeAderenciaDoAco	Coefficient
31	temCoeficienteDeDeslocamento	Coefficient
32	temCoeficienteDeFluencia	Coefficient
33	temCoeficienteDePoisson	Coefficient
34	temCoeficienteDePonderacaoDaResistenciaDoConcreto	Coefficient
35	temCoeficienteDePonderacaoDasAcoes	Coefficient
36	temCoeficienteDeProtenciaDasResistencia	Coefficient
37	temCoeficienteDePonderacaoDoAco	Coefficient
38	temCoeficienteDeRedistribuicao	Coefficient
39	temComprimento	SupportedLenght
40	temComprimentoDoApoioParaleloAoVao	SupportedLenght
41	temDeformacaoEspecific	
42	temDeformacaoEspecificDaArmaduraAtiva	
43	temDeformacaoEspecificDoAcoDaArmaduraPassiva	
44	temDesaprumo	
45	temDeslocamentoMaximo	
46	temDiametroDaAgulhaDoVibrador	
47	temDiametroDasBarrasDaArmadura	NominalDiameter
48	temDiametroDasBarrasDeArmaduraLongitunal	LongitudinalBarNominalDiameter
49	temDiametroDasBarrasDeArmaduraTransversal	TransverseBarNominalDiameter
50	temDiametroDosPinosDeDobramentoDasBarrasDeAco	
53	temDimensao_a	ConditionCordinateSystem
54	temDimensao_b	ConditionCordinateSystem
55	temDimensaoOuDistanciaParalelaALargura	ConditionCordinateSystem
56	temDistancia_z	ConditionCordinateSystem
57	temDistancia_e	ConditionCordinateSystem
58	temDistancia_d	ConditionCordinateSystem
59	temDistancia_a	ConditionCordinateSystem
60	temEsforcoResistenteDeCalculo	ActionType
61	temEsforcoSolicitanteDeCalculo	ActionType
62	temEspacamentoEntreAsBarrasDaAmadura	LongitudinalBarSpacing
63	temExcentricidadeDeCalculoOriundaDosEsforcosSolicitantes	ActionType
64	temFatorQueDefineAsCondicoesDeVinculoNoApoio	AppliedConditions
65	temForca	ActionType
66	temForcaCortanteDeCalculo	ActionType
67	temForcaCortanteSolicitanteDeCalculo	ActionType

68	temForcaNormalReduzidaAdimensional	ActionType
69	temForcaNormalResistenteDeCalculo	ActionType
70	temForcaNormalSolicitanteDeCalculo	ActionType
71	temForma	PredefinedTypeOfSurface
72	temHora	
73	temIndiceDeEsbeltez	Coefficient
74	temLargura	ConditionCordinateSystem
75	temLarguraDaAlmaDeUmaViga	ConditionCordinateSystem
76	temLocalDeAgressividade	ActionType
77	temMassaEspecificadoConcreto	SelfWheightCoefficients
78	temMenorDimensaoDeUmRetangulo_a	ConditionCordinateSystem
79	temMenorDimensaoDeUmRetangulo_b	ConditionCordinateSystem
80	temModuloDeElasticidade	Coefficient
81	temModuloDeElasticidadeTransversalDoConcreto	Coefficient
82	temMomentoDeInerciaDaSecaoDeConcreto	Coefficient
83	temMomentoFletor	ActionType
84	temMomentoFletorDe1Ordem	TheoryType
85	temMomentoFletorDe2Ordem	TheoryType
86	temMomentoFletorReduzidaAdimensional	ActionType
87	temMomentoFletorResistenteDeCalculo	ActionType
88	temMomentoFletorSolicitanteDeCalculo	ActionType
89	temNumero	Purpose
90	temNumeroDePrumadaDePilares	Purpose
91	temParametroEmFuncaoDaNaturezaDoAgregado	Coefficient
92	temParametrosDeInstabilidade	AdditionalConditions
93	temParametrosDeReducaoDeResistenciaDoConcreto NaCompressao	AdditionalConditions
94	temPerimetro	ConditionCordinateSystem
95	temRaioDeCurvaturaInternoDoGancho	
96	TemRaioDeGiracaoMinimoDaSecaoBrutaDeConcreto	Axis
97	temReacoesDeApoio	AppliedConditions
98	temResistencia	ActionType
99	temRigidez_EI	Coefficient
100	temRidizez_r	Coefficient
101	temRotacao	Axis
102	temTaxaGeometricaDeArmaduraAderentePassiva	LongitudinalBarNominalDiameter
103	temTaxaGeometricaDeArmaduraLongitudinal	LongitudinalBarNominalDiameter
104	temTaxaGeometricaMinimaDeArmaduraLongitudinal DeVigasEPilares	LongitudinalBarNominalDiameter
105	temTemperatura	
106	temTempo	
107	temTensaoACompressaoNoConcreto	ActionSource
108	temTensaoATracaoNoConcreto	ActionSource
109	temTensaoDeCisalhamentoDeCalculo	ActionSource

	110	temTensaoDeCisalhamentoDeCalculoPorForcaCortante	ActionSource
	111	temTensaoDeCisalhamentoDeCalculoPorTorcao	ActionSource
	112	temTensaoDeCisalhamentoResistenteDeCalculo	ActionSource
	113	temTensaoNormalNoAcoDeArmaduraPassiva	ActionSource
	114	temTensaoNormalSolicitanteDeCalculo	ActionSource
	115	temVao	ConditionCordinateSystem

Fonte: O Autor (2019)

Nessa fase, 13 propriedades de dados da ontologia ficaram sem correspondente dentro do IFC4 add2, sendo eles:

- temAberturaDaFissura
- temCobrimentoDaArmaduraEmRelacaoAFaceDoElemento
- temDeformacaoEspecificada
- temDeformacaoEspecificadaDaArmaduraAtiva
- temDeformacaoEspecificadaDoAcoDaArmaduraPassiva
- temDesaprumo
- temDeslocamentoMaximo
- temDiametroDaAgulhaDoVibrador
- temDiametroDosPinosDeDobramentoDasBarrasDeAco
- temHora
- temRaioDeCurvaturaInternoDoGancho
- temTemperatura
- temTempo

Na Tabela 10 é apresentada a comparação da fase de execução do ciclo de vida de uma edificação em concreto armado.

Tabela 10 Tabela comparativa Norma x IF4 – Execução

Fase	nº	Norma	IFC4 ADD2
Execução	116	temAbatimento	
	117	temApoio	AppliedConditions
	118	temBitolaDoAco	TransverseBarNominalDiameter
	119	temCargaAcidental	AdditionalConditions
	120	temDeformacaoDoMaterial	
	121	temDeformacaoMax	

122	temDeformacaoReal	AdditionalConditions
123	temDiametroDoAgregado	NominalDiameter
124	temDimensao	ConditionCordinateSystem
125	temFlambagem	ActionType
126	temFuracao	Axis
127	temLaguraDaAgulha	
128	temMaiorDimensao	ConditionCordinateSystem
129	temNivelamento	
130	temPesoDaEstruturaSuportada	PredefinedTypeOfLoadGroup
131	temPesoProprio	SelfWheightCoefficients
132	temPrumo	
133	temQuantidadeDeDesmoldante	
134	temRecalqueDoSolo	
135	temResistenciaDoConcreto	ActionType
136	temTemperaturaAmbiente	ActionType
137	temTipoDoDesmoldante	Purpose
138	temTracao	ActionType
139	temVibricao	ActionType
140	temVolumeDoAco	SelfWheightCoefficients
141	temVolumeDoConcreto	SelfWheightCoefficients

Fonte: O Autor (2019)

Nessa fase, 08 das 25 propriedades de dados não tiveram correspondência na documentação do IFC4. Isso representa 1/3 das propriedades de dados desta fase.

Na sequencia do ciclo de vida, a comparação da fase de operação e manutenção é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 Tabela comparativa Norma x IF4 – Operação e Manutenção

Fase	nº	Norma	IFC4 ADD2
Operação e Manutenção	142	temDataDeInspecao	
	143	temDeslocamentoVerticalTotal	
	144	temEnergiaDeImpactoDeCorpoDuro	AdditionalConditions
	145	temEnergiaDeImpactoDeCorpoMole	AdditionalConditions
	146	temFissura	
	147	temFlechaMax	AdditionalConditions
	148	temFlechaReal	AdditionalConditions
	149	temSobrecargaDeProjeto	PredefinedTypeOfLoadGroup
	150	temSobrecargaReal	AdditionalConditions
	151	temTempoConstruido	

Fonte: O Autor (2019)

Essa fase tem 04 propriedades de dados que não tiveram correlação com a documentação do IFC4. A última tabela comparativa ocorre na fase de demolição, apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 Tabela comparativa Norma x IF4 – Demolição

Fase	nº	Norma	IFC4 ADD2
Demolição	152	temMassa	SelfWheightCoefficients
	153	temSentidoDaLaje	ConditionCordinateSystem
	154	temSobrecargas	PredefinedTypeOfLoadGroup
	155	temVolumeEmM3	SelfWheightCoefficients

Fonte: O Autor (2019)

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao todo, 26 propriedades de dados da ontologia não tiveram representatividade no IFC4 add2. Em grande maioria, isso se deve ao fato de que ao analisar a evolução dos dois campos de domínios analisados na documentação do IFC4 add2, domínio de análise estrutural e domínio de elementos estruturais, existem pontos já conhecidos pela buildingSMART que devem ser sanados em próximas versões, sendo elas:

- Análise dinâmica
- Descrição das cargas pré-esforçadas
- Topologia de elemento finito
- Deformações nos elementos estruturais.

Em síntese, estes resultados indicam que, nos itens de análises relatados anteriormente, todas as propriedades de dados que indiquem deformação, expansões ou recalques não são previstos no IFC4, e podem ser vistas que ficaram sem correspondente dentro das tabelas comparativas. Sendo estes:

- temDeformacaoEspecific
- temDeformacaoEspecificDaArmaduraAtiva
- temDeformacaoEspecificDoAcoDaArmaduraPassiva
- temDeslocamentoMaximo
- temDeformacaoDoMaterial
- temDeformacaoMax

- temRecalqueDoSolo
- temDeslocamentoVerticalTotal

Além disso, existem propriedades de dados consideradas temporais como data, hora, período que não estão presentes no domínio de elementos ou análise estrutural, porém, estão presentes no domínio de elementos comuns do IFC4. Por conta disso os seguintes itens não tiveram correspondência:

- temHora
- temTempo
- temDataDeInspecao

Os demais itens sem correspondência de fato não existem no corpo da documentação do IFC4 add2, sendo que são necessários para sanar todas as fases do ciclo de vida de uma edificação de concreto armado. São eles:

- temAbatimento
- temAberturaDaFissura
- temCobrimentoDaArmaduraEmRelacaoAFaceDoElemento
- temDiametroDaAgulhaDoVibrador
- temDesaprumo
- temDiametroDosPinosDeDobramentoDasBarrasDeAco
- temRaioDeCurvaturaInternoDoGancho
- temPrumo
- temQuantidadeDeDesmoldante
- temFissura

Os itens relacionados à fissuração são apresentados na norma de projeto de estruturas de concreto armado e possuem relação com Limites para dimensões, deslocamentos e aberturas de fissuras, Controle da fissuração e proteção das armaduras, Estado-limite de fissuração. Em Operação estão presentes em mapeamento e controle da espessura das fissuras para comparar com os limites de projeto.

As propriedades de dados de Abatimento do concreto e Cobrimento nominal da armadura com concreto estão presentes na Norma de concreto, e possuem

correlação com qual o tipo de ambiente que a estrutura está inserida, quanto maior a severidade do ambiente, maior a proteção mecânica a armadura deve receber.

O item de diâmetro da agulha do vibrador está presente em projeto, pois através da mesma é delimitado o espaçamento mínimo entre elementos da armadura para que possa ocorrer a correta vibração na execução. E em execução ocorre a consulta do tamanho da agulha previamente estipulado para entrar nos vãos de projeto.

O prumo e desaprumo são elementos presentes na norma de execução, onde variações são permissíveis conforme o comprimento e tipo do elemento estrutural.

Por fim, o diâmetro dos pinos de dobramento das barras de aço, bem como, o raio de curvatura interna do gancho são elementos tabelados pela norma de execução, e presentes para execução.

Por outro lado, os itens que não tiveram representatividade do IFC4 em propriedades das normas foram os seguintes:

- PrefefinedTypeOfFooting
- PredefinedTypeOfPile
- ConstructionTypeOfPile
- PredefinedTypeOfSurface
- PredefinedTypeOfVoiding
- PredefinedTypeOfAnalysisModel
- OrientationOf2DPlane

Isso ocorre pois o IFC4 add2 considera os elementos de infra-estrutura como blocos, sapatas, estacas e elementos de fundação junto com os elementos de supra estrutura que foram analisados nas normas de concreto armado.

Os itens de PredefinedTypeOfAnalysisModel e OrientationOf2DPlane diz respeito a estrutura interna do IFC para analisar e transformar estruturais em 3D em 2D para efeito de cálculos.

Conforme apresentando na revisão da literatura, o IFC é uma extensão que possui atualizações anualmente, e nesta dissertação, através da análise de resultados, constata-se que existem 12 informações necessárias em normas de concreto armado que deveriam ser incluídas em uma futura atualização, além dos pontos de melhorias IFC já conhecidos pela buildingSMART.

Além disso, como o arquivo IFC possibilita a criação de novas propriedades de dados diretamente pelo usuário, erros semânticos podem ser gerados, visto que

o usuário pode informar uma nova propriedade chamada “NovaPropriedadeDeConcreto” e outro sistema utilizar como padrão “NovoPropriedadeDeConcreto”. Essa diferença de apenas uma letra é o suficiente para o sistema não compreender que estão falando da mesma propriedade. Para evitar esse tipo de situação é conveniente o arquivo IFC4 ter sempre o máximo de opções possíveis em seus “PredefinedTypes”, evitando assim que o usuário insira novas propriedades com nomenclaturas criadas por ele.

Para isso, se todas as informações de propriedades de dados catalogadas nas normas através das ontologias tivessem correspondentes diretos dentro da documentação IFC, evitaria que o usuário precisasse inserir informações novas no sistema, aumentando a interoperabilidade entre sistemas, pois padronizaria o nome das propriedades.

6 CONCLUSÕES

Através da revisão sistemática da literatura que uma das principais características das estruturas de concreto armado que deve ser levada em conta quando se trata de interoperabilidade de modeladores BIM é o fato de esta ter uma vida bem marcada em todo ciclo de vida da edificação. Por conta disso, fica evidente a necessidade de haver um único arquivo IFC que conserve todas essas informações para aumentar a interoperabilidade entre softwares e agentes BIM.

A documentação disponível do Arquivo IFC4 add2 apresenta, através dos diagramas em EXPRESS-G no domínio de elementos estruturais e análises estruturais, as propriedades de dados que este arquivo possui.

Para saber se esses dados são suficientes para sanar a demanda de informação em todas as fases do ciclo de vida da edificação se fez necessário um mapeamento de propriedades de requisitos. Para este fim, foi utilizado ontologias como ferramenta de mapeamento de requisitos e formalização do conhecimento envolvido.

Existem maneiras conhecidas na literatura para extrair uma ontologia de maneira automática via IFC, porém, as conexões semânticas e a possibilidade de reaproveitamento da Ontologia para outros fins são perdidos. Por conta disso, foi escolhido desenvolver ontologias de maneira manual com base nas normas brasileiras técnicas para Concreto Armado. Cada fase do ciclo de vida da estrutura de concreto armado possui pelo menos uma norma fornecendo diretrizes.

Como resultado da Revisão sistemática da literatura também se descobre a metodologia conhecida como seven-steps para criação de ontologias, nesta dissertação utilizada para extrair requisitos de dados com base em normas técnicas.

As ontologias criadas com base em norma tiveram o objetivo de representar o conhecimento sobre um tópico, sendo que, apenas foram criadas regras para representar a funcionalidade das mesmas. A base de conhecimento criada nessas ontologias pode ser utilizada para fins de inferência de conhecimento caso venha a ser programadas regras para o objetivo requerido.

As propriedades de dados das ontologias foram analisadas e nota-se a presença delas em todas as fases de ciclo de vida da edificação, sendo que, algumas propriedades se repetem em diferentes momentos do ciclo. Também fica

registrado que a concepção do projeto é a fase que mais possui propriedades de dados diferentes.

Ao comparar os requisitos de dados presentes na extração através das ontologias e da documentação do IFC4, percebe-se que a maior parte dos requisitos possui estrutura associativa dentro do IFC4 add2, proporcionada pela adição do domínio de análise estrutural na versão 3x2. Porém, existem melhorias a serem incorporadas a esta extensão, sendo elas principalmente de cunho relativo à deformação dos elementos estruturais.

O IFC é uma extensão que possui atualizações anuais, e este trabalho demonstra que existe informação dentro do domínio de estruturas de concreto que podem e devem ser melhorados a fim de garantir maior interoperabilidade semântica de dados.

Este trabalho apresenta o domínio de concreto armado, porém, a metodologia utilizada para criação das ontologias e extração dos requisitos de dados pode ser adaptada aos diferentes tipos de estruturas e materiais da construção civil, desde que existam normas pertinentes sobre os mesmos.

Os resultados obtidos são válidos somente para o IFC4 add2, e para as normas publicadas até a data deste trabalho, caso as normas ou o arquivo IFC atualizem, é possível replicar o método.

O método apresentando para criação de ontologias com base em normas técnicas pode ser replicado para outros domínios além de concreto armado. Os resultados obtidos também podem ser comparados a documentação IFC correspondente para uma análise de interoperabilidade, como realizado nesta dissertação.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através da Revisão sistemática da literatura nota-se carência em determinadas áreas de estudo que podem ser realizados em trabalhos futuros:

- i. Confecção de novas ontologias com base na norma usando a metodologia seven-steps no contexto AEC;

- ii. Teste real dos requisitos de dados aqui abordados em uma estrutural de concreto armado no ciclo completo da edificação.
- iii. Análise mais detalhada do IFC4 add2 quanto as propriedades de dados dentro do EXPRESS-G, além dos domínios de Concreto Armado.
- iv. Adicionar os requisitos de dados aqui mencionados como entradas em um mapeamento de processos completo de uma estrutura de concreto.
- v. Realizar a integração de todas as ontologias de Norma de Concreto a fim de mostrar interrelações entre as diferentes normas ou mesmo que não existem tais interrelações.
- vi. Apresentar uma maneira de utilizar a Ontologia como repositório de informação ao qual o BIM possa acessar e usar de suas informações.
- vii. Obtenção de uma ontologia com as regras, subclasses e propriedades completas de todas as Normas de Concreto Armado.

7 REFERENCIAL TEÓRICO

- [1] FIBRA, NOTICIA - Construção civil representa 6,2% do PIB Brasil, Disponível em < <https://www.sistemafibra.org.br/fibra/sala-de-imprensa/noticias/1315-construcao-civil-representa-6-2-do-pib-brasil> > acesso em 11 de Maio de 2019
- [2] CARVALHO, J. D. (2008) Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. 17 ed. Revista Tecnológica. p. 19-28
- [3] Sacks, R., Kaner, I., Eastman, C. M., & Jeong, Y. S. (2010). The Rosewood experiment - Building information modeling and interoperability for architectural precast facades. *Automation in Construction*, 19(4), 419–432. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.012>
- [4] Karan, E. P., & Irizarry, J. (2015). Extending BIM interoperability to preconstruction operations using geospatial analyses and semantic web services. *Automation in Construction*, 53, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.012>
- [5] Venugopal, M., Eastman, C. M., & Teizer, J. (2015). An ontology-based analysis of the industry foundation class schema for building information model exchanges. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), 940–957. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.09.006>
- [6] Yang, Q. Z., & Zhang, Y. (2006). Semantic interoperability in building design: Methods and tools. *CAD Computer Aided Design*, 38(10), 1099–1112. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2006.06.003>
- [7] Eastman, c.; teicholz, p.; sacks, r.; liston, k. (2008). **BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors**. New Jersey: John Wiley and sons
- [8] BuildingSMART, Internacional Home of openBIM, Disponível em < <http://www.buildingsmart-tech.org/> > acesso em 11 de Maio de 2019
- [9] Muller, m. F. (2011) A Interoperabilidade Entre Sistemas CAD de Projeto de Estruturas de Concreto Armado Baseada em Arquivos IFC. Curitiba, 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [10] Vandecasteele, F., Merci, B., & Verstockt, S. (2017). Fireground location understanding by semantic linking of visual objects and building information models. *Fire Safety Journal*, 91(May), 1026–1034. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.083>
- [11] Ma, Z., & Liu, Z. (2018). Ontology- and freeware-based platform for rapid development of BIM applications with reasoning support. *Automation in Construction*, 90(January), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.004>
- [12] ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland NOTICIA - Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto, Disponível em < <https://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/> > acesso em 11 de Maio de 2019
- [13] ISO, International Organization for Standardization - (2015). ISO/TC 71/SC4/2015 - Performance requirements for structural concrete— , 133.

- [14] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 14931 - Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento, 53. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2230.2004.01593.x>
- [15] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento , 233.
- [16] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). NBR 5674 - Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. 27.
- [17] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). NBR 8953 - Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3.
- [18] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1977). NBR 5682 – Contratação, execução e Supervisão de Demolições. 41.
- [19] Kitchenham, B.; Charters, S. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. UK: [s.n.]
- [20] Pagani, R. N., Kovalski, J., Mauricio, L., & Resende, M. De. (2015). Methodi Ordinatio : a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor , number of citation , and year of publication . Methodi Ordinatio : a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing, (September). <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>
- [21] Issn, A., Cient, I. E., Saraiva, M. T., Avalia, S., Review, D. B., & Revis, O. J. S. (2011). No Title, 47–62. <https://doi.org/10.5773/rgsa.v5i2.424>
- [22] Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction, 18(3), 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
- [23] Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. Automation in Construction, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- [24] Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. Automation in Construction, 31, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.006>
- [25] Cerovsek, T. (2011). A review and outlook for a “Building Information Model” (BIM): A multi-standpoint framework for technological development. Advanced Engineering Informatics, 25(2), 224–244. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.003>
- [26] Pauwels, P., Van Deursen, D., Verstraeten, R., De Roo, J., De Meyer, R., Van De Walle, R., & Van Campenhout, J. (2011). A semantic rule checking environment for building performance checking. Automation in Construction, 20(5), 506–518. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.017>
- [27] Park, C. S., Lee, D. Y., Kwon, O. S., & Wang, X. (2013). A framework for proactive construction defect management using BIM, augmented reality and ontology-based data collection template. Automation in Construction, 33, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.010>
- [28] Isikdag, U., Underwood, J., & Aouad, G. (2008). An investigation into the applicability of building information models in geospatial environment in support of site selection and fire response management processes. Advanced Engineering Informatics, 22(4), 504–519. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2008.06.001>

- [29] Venugopal, M., Eastman, C. M., Sacks, R., & Teizer, J. (2012). Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 411–428.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.01.005>
- [30] Hong, T., D'Oca, S., Taylor-Lange, S. C., Turner, W. J. N., Chen, Y., & Corgnati, S. P. (2015). An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part II: Implementation of the DNAS framework using an XML schema. *Building and Environment*, 94(P1), 196–205.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.006>
- [31] Curry, E., O'Donnell, J., Corry, E., Hasan, S., Keane, M., & O'Riain, S. (2013). Linking building data in the cloud: Integrating cross-domain building data using linked data. *Advanced Engineering Informatics*, 27(2), 206–219.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.10.003>
- [32] Lee, S. K., Kim, K. R., & Yu, J. H. (2014). BIM and ontology-based approach for building cost estimation. *Automation in Construction*, 41, 96–105.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.020>
- [33] Garcia, A. C. B., Kunz, J., Ekstrom, M., & Kiviniemi, A. (2004). Building a project ontology with extreme collaboration and virtual design and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 18(2), 71–83.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2004.09.001>
- [34] Gielingh, W. (2008). An assessment of the current state of product data technologies. *CAD Computer Aided Design*, 40(7), 750–759.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2008.06.003>
- [35] Zhang, S., Boukamp, F., & Teizer, J. (2015). Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA). *Automation in Construction*, 52, 29–41.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.005>
- [36] Isikdag, U., Zlatanova, S., & Underwood, J. (2013). A BIM-Oriented Model for supporting indoor navigation requirements. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 112–123
- [37] Pauwels, P., & Terkaj, W. (2016). EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. *Automation in Construction*, 63, 100–133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.003>
- [38] Yalcinkaya, M., & Singh, V. (2015). Patterns and trends in Building Information Modeling (BIM) research: A Latent Semantic Analysis. *Automation in Construction*, 59, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.012>
- [39] Scherer, R. J., & Schapke, S. E. (2011). A distributed multi-model-based Management Information System for simulation and decision-making on construction projects. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 582–599.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.08.007>
- [40] Lin, Y. H., Liu, Y. S., Gao, G., Han, X. G., Lai, C. Y., & Gu, M. (2013). The IFC-based path planning for 3D indoor spaces. *Advanced Engineering Informatics*, 27(2), 189–205. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.10.001>
- [41] Rezgui, Y., Boddy, S., Wetherill, M., & Cooper, G. (2011). Past, present and future of information and knowledge sharing in the construction industry: Towards semantic service-based e-construction? *CAD Computer Aided Design*, 43(5), 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.06.005>
- [42] Wetzel, E. M., & Thabet, W. Y. (2015). The use of a BIM-based framework to support safe facility management processes. *Automation in Construction*, 60, 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.09.004>

- [43] Dimitrov, A., & Golparvar-Fard, M. (2014). Vision-based material recognition for automated monitoring of construction progress and generating building information modeling from unordered site image collections. *Advanced Engineering Informatics*, 28(1), 37–49.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.11.002>
- [44] QSR, nVivo - O software n 1º para análise qualitativa de dados, Disponível em < <http://www.qsrinternational.com/nvivo-portuguese> > acesso em 11 de Maio de 2019
- [45] S. Meza, Z. Turk, M. Dolenc, Component based engineering of a mobile BIM-based augmented reality system, *Autom. Constr.* 42 (2014) 1–12,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.011>
- [46] Lee, D. Y., Chi, H. lin, Wang, J., Wang, X., & Park, C. S. (2016). A linked data system framework for sharing construction defect information using ontologies and BIM environments. *Automation in Construction*, 68, 102–113.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.003>
- [47] Lee, Y. C., Eastman, C. M., & Solihin, W. (2016). An ontology-based approach for developing data exchange requirements and model views of building information modeling. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 354–367.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.008>
- [48] Muller, M. F.; Garbers, A.; Esmanioto, F.; et al. Data interoperability assessment though IFC for BIM in structural design – a five-year gap analysis. *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 23, n. 7, p. 943–954, 2017.
- [49] MACIT İLAL, S.; GÜNAYDIN, H. M. Computer representation of building codes for automated compliance checking. *Automation in Construction*, v. 82, n. June, p. 43–58, 2017
- [50] Petrinja, E., Stankovski, V., & Turk, Ž. (2007). A provenance data management system for improving the product modelling process. *Automation in Construction*, 16(4), 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.08.002>
- [51] Laakso, M., & Kiviniemi, A. (2012). The IFC standard : A review of History , development , and standardization , *Information Technology*, (May 2012).
- [52] Kiviniemi, A. (2006). Ten Years of IFC Development - Why are we not yet there ? *International Alliance for Interoperability. IAI International Technical Management*, (January 2006), 43.
- [53] Koch, C., Vonthron, A., & König, M. (2017). A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects. *Automation in Construction*, 83(April), 78–90.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.006>
- [54] Kiviniemi, A.; Tarandi, V.; karlshoj, J.; BELL, H.; KARUD, O. Review of the Development and Implementation of IFC Compatible BIM. ERA BUILD FUNDING ORGANIZATIONS, 2008.
- [55] Lee, Y. C., Eastman, C. M., & Solihin, W. (2018). Logic for ensuring the data exchange integrity of building information models. *Automation in Construction*, 85(August 2016), 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.010>
- [56] ISO, International Organization for Standardization - (2004). ISO 10303-11:2004- Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange — , 133.
- [57] Wilson, Peter R. (1998). STEP and EXPRESS 9,
(<http://deslab.mit.edu/DesignLab/dicpm/step.htm>)

- [58] Monteiro, A., & Martins, J. P. (2011). Building Information Modeling - Funcionalidades e Aplicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Porto, Portugal: Secção de Construções Cívicas
- [59] Wong, J. K. W.; Zhou, J. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*, v. 57, p. 156–165, set. 2015.
- [60] Pittet, P., Cruz, C., & Nicolle, C. (2014). An ontology change management approach for facility management. *Computers in Industry*, 65(9), 1301–1315. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.006>
- [61] Langenhan, C., Weber, M., Liwicki, M., Petzold, F., & Dengel, A. (2013). Graph-based retrieval of building information models for supporting the early design stages. *Advanced Engineering Informatics*, 27(4), 413–426. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.04.005>
- [62] Sanguinetti P., S. Abdelmohsen, J. Lee, H. Sheward, C. Eastman, General system architecture for BIM: an integrated approach for design and analysis, *Adv. Eng. Inform.* 26 (2) (2012) 317–333, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2011.12>.
- [63] Costa, G., & Madrazo, L. (2015). Connecting building component catalogues with BIM models using semantic technologies: An application for precast concrete components. *Automation in Construction*, 57, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.05.007A>
- [64] Wang H. , Zhai Z. (John, Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014, *Energy Build.* 128 (2016) 319–335. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.080.
- [65] Esmanioto, M. F., Huber, M. H. N. Compatibilização de Projetos Através de BIM. Trabalho de conclusão de curso apresentada a Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. 2014.
- [66] Zhang, H., Chen, D., Guo, P., Luo, X., George, A., 2018. A novel surface-cluster approach towards transient modeling of hydro-turbine governing systems in the start-up process. *Energy Convers. Manag.* 165, 861e868. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.097>.
- [67] Tashakkori, H., Rajabifard, A., & Kalantari, M. (2015). A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation. *Building and Environment*, 89, 170–182. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.036>
- [68] Chen, W., Chen, K., Cheng, J. C. P., Wang, Q., & Gan, V. J. L. (2018). BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders. *Automation in Construction*, 91(February), 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.007>
- [69] Chi H.L., J. Wang, X. Wang, M. Truijens, P. Yung, A Conceptual Framework of Quality Assured Fabrication, Delivery and Installation Processes for Liquefied Natural Gas (LNG) Plant Construction, *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.* 79 (2015) 433–448. doi:10.1007/s10846-014-0123-9.
- [70] J.I. Kim, J. Kim, M. Fischer, R. Orr, BIM-based decision-support method for master planning of sustainable large-scale developments, *Autom. Constr.* 58 (2015) 95–108. doi:10.1016/j.autcon.2015.07.003.
- [71] Howell, S., Rezgui, Y., & Beach, T. (2017). Integrating building and urban semantics to empower smart water solutions. *Automation in Construction*, 81, 434–448. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.004>
- [72] Bassier, M., Van Genechten, B., & Vergauwen, M. (2018). Classification of sensor independent point cloud data of building objects using random forests.

- Journal of Building Engineering*, (September 2017), 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.027>
- [73] Čuš-Babič, N., Rebolj, D., Nekrep-Perc, M., & Podbreznik, P. (2014). Supply-chain transparency within industrialized construction projects. *Computers in Industry*, 65(2), 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.12.003>
- [74] Akbarnezhad A., K.C.G. Ong, L.R. Chandra, Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling, *Autom. Constr.* 37(2014) 131–144. doi:10.1016/j.autcon.2013.10.017.
- [75] Wu, P., Mao, C., Wang, J., Song, Y., Wang, X., 2016. A decade review of the credits obtained by LEED v2.2 certified green building projects. *Build. Environ.* 102,167e178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.026>.
- [76] Chen, D. (2014). Enterprise Interoperability Framework . Enterprise Interoperability Framework, (January 2006).
- [77] JALAEI, F.; JRADE, A. Integrating BIM with Green Building Certification System, Energy Analysis, and Cost Estimating Tools to Conceptually Design Sustainable Buildings. Construction Research Congress 2014. Anais American Society of Civil Engineers, 2014 dx.doi.org/10.1061/9780784413517.015.
- [78] Sheth, A. P. (1999). Changing Focus on Interoperability in Information Systems: From System, Syntax, Structure to Semantics. *Interoperating Geographic Information Systems*, (July), 5–29. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5189-8_2
- [79] Guo, B. H. W., & Goh, Y. M. (2017). Ontology for design of active fall protection systems. *Automation in Construction*, 82, 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.009>
- [80] Miller, E. , Koivunen, M. (2001) R. W3C Semantic Web Activity, <http://www.w3.org/2001/sw/>, (acessado em Maio de 2019)
- [81] Kim, K., Kim, G., Yoo, D., & Yu, J. (2013). Semantic material name matching system for building energy analysis. *Automation in Construction*, 30, 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.011>
- [82] Mignard, C., & Nicolle, C. (2014). Merging BIM and GIS using ontologies application to Urban facility management in ACTIVE3D. *Computers in Industry*, 65(9), 1276–1290. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.008>
- [83] Noy, N. F., & McGuinness, D. L. (2000). *Ontology Development 101 : A Guide to Creating Your First Ontology*, 1–25, Stanford University
- [84] Detro, S. P. (2018) A framework for managing process variability through process mining and semantic reasoning : An application in healthcare. Curitiba, 2011. 164 f. teste (Doutorado em Produção e Sistemas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção e Sistemas- PUCPR, Curitiba.
- [85] Fusco, Péricles Brasiliense. *Fundamentos do Projeto Estrutural*. V.1. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1930. 295 p
- [86] Sommerville, Ian. 2004. *Software Engineering* (7th Edition). Pearson Addison Wesley.
- [87] Gao, G., Liu, Y. S., Lin, P., Wang, M., Gu, M., & Yong, J. H. (2017). BIMTag: Concept-based automatic semantic annotation of online BIM product resources. *Advanced Engineering Informatics*, 31, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.10.003>
- [88] Tarrafa, Diogo Gonçalo Pinto. Aplicabilidade prática do conceito BIM em projeto de estruturas. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Especialidade de Mecânica Estrutural) - Universidade de Coimbra, Coimbra

- [89] Bonduel, M., Oraskari, J., Pauwels, P., Vergauwen, M., & Klein, R. (n.d.). The IFC to Linked Building Data Converter - Current Status, 34–43.
- [90] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR 15575-2 - Norma de Desempenho e Requisitos para os sistemas estruturais , 32.
- [91] Marca, D. A., and C. L. McGowan. ": SADT: structured analysis and design technique. McGraw-Hill Book Co." (1987).