

José Humberto Góes Alves

**Desenvolvimento de uma ferramenta de modelagem paramétrica para
projetos em sistema construtivo estruturado em perfis metálicos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional.

Orientadora: Profa. D.Sc. Flávia de Souza Bastos

Coorientadora: Profa. D.Sc. Michèle Cristina Resende Farage

Juiz de Fora

2015

José Humberto Góes Alves,

Desenvolvimento de uma ferramenta de modelagem paramétrica para projetos em sistema construtivo estruturado em perfis metálicos/ José Humberto Góes Alves. – Juiz de Fora: UFJF/MMC, 2015.

XIX, 133 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Flávia de Souza Bastos

Coorientador: Michèle Cristina Resende Farage

Dissertação (mestrado) – UFJF/MMC/Programa de Modelagem Computacional, 2015.

Referências: p.72–76.

1. Steel Frame. 2. Flambagem. 3. SketchUp.
4. Perfis de aço formados a frio. 5. Ruby. 6.
Ferramenta. I. de Souza Bastos, Flávia *et al.* II.
Universidade Federal de Juiz de Fora, MMC, Programa
de Modelagem Computacional.

José Humberto Góes Alves

**Desenvolvimento de uma ferramenta de modelagem paramétrica para
projetos em sistema construtivo estruturado em perfis metálicos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional.

Aprovada em 2 de Março de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Profa. D.Sc. Flávia de Souza Bastos - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. D.Sc. Michèle Cristina Resende Farage - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. D.Sc. Arlene Maria Cunha Sarmanho
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. D.Sc. Carlos Cristiano Hasenclever Borges
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, inteligência suprema, causa primária de todas as coisas.

Ao Mestre Jesus, fonte inesgotável de suporte moral para qualquer situação.

À minha família, pelo apoio com que me dispõe incondicionalmente, e em especial à minha mãe pela dedicação e amor incessantes, impossível de retribuir em apenas uma vida.

Aos amigos, visíveis e invisíveis. Em especial aqueles que conheci na pós graduação e suplantaram a amizade se tornando verdadeiros irmãos de ideais, tanto que nem precisarei citar nomes, eles se reconhecerão.

À minha orientadora Flávia, pelos diversos ensinamentos que me transmitiu. Pessoa que tenho orgulho de conhecer e de ter convivido por algum tempo. Se um dia me tornar professor, me espelharei na Flávia, pois é o exemplo mais próximo que presenciei do que significa ensinar.

À Michèle, minha coorientadora, e aos demais professores e colaboradores da pós em Modelagem Computacional.

À UFJF e a CAPES pela oportunidade que me concederam em continuar estudando e por me permitirem conhecer Juiz de Fora, onde tive o prazer de morar por dois anos.

Definições

O que sentes revela o rumo para onde te diriges.

O que pensas te aponta o lugar em que te encontras.

O que falas indica o que sabes.

O que fazes mostra quem és.

(Francisco Cândido Xavier)

RESUMO

Frente ao grande número de entulhos gerados na construção civil atualmente no Brasil, surgem novos métodos construtivos, se servindo de processos mais industrializados para racionalizar os materiais de construção. O *Light Steel Frame* (LSF) é um desses novos métodos, baseado em perfis de aço que trabalham em conjunto através de subsistemas estruturais, não requisitando água nem produção de materiais *in loco*. Não só a forma de construir deve ser atualizada para melhor utilizar os recursos produtivos, como também deve-se promover melhorias no gerenciamento das construções. Em virtude disso, uma crescente tecnologia que está cada vez mais sendo agregada na construção civil é a Modelagem De Informação Da Construção, ou simplesmente BIM, da sigla em inglês. BIM permite planejar, projetar, construir, usar e manter uma construção. Para isso, não é necessário que exista um aplicativo que englobe todas essas tarefas. Por utilizar informação parametrizada, aplicativos distintos podem compartilhar uma mesma informação e gerar seus resultados, processo esse denominado de interoperabilidade. Assim, este trabalho tem como foco principal desenvolver uma ferramenta capaz de modelar estruturas em LSF, realizar um pré-cálculo estrutural e também prover meios de permitir a interoperabilidade com outros *softwares*. Para este fim, foi empregado o SketchUp, que possui uma interface de programação em linguagem Ruby, e possui módulos de geração de dados compatíveis com as necessidades da interoperabilidade. Como resultado, a ferramenta gerada neste trabalho alcançou desempenho satisfatório, mesmo que ainda existam muitos recursos para serem agregados.

Palavras-chave: Steel Frame. Flambagem. SketchUp. Perfis de aço formados a frio. Ruby. Ferramenta.

ABSTRACT

The large amount of construction waste currently generated in Brazil demands new construction methods and more industrialized process. The Light Steel Frame (LSF) is one of those new methods based on structural subsystems comprising steel properties, not ordering water or production of material in loco. Building and its management should be improved. Building Information Modeling, or simply BIM, allows the planning design, building using and maintaining of building. Therefore, it is not necessary to have an application that includes all these tasks. By means of parameterized information, different applications can share the same information and generate results, a process known as interoperability. This work is mainly focused on developing a tool capable of modeling structures in LSF, performing a structural pre-analysis and also providing a means to enable interoperability with other software. To this end, we applied the SketchUp, which has a programming interface in Ruby language, and has data generation modules compatible with the interoperability needs. As a result, the generated tool in this work has achieved satisfactory performance, even though there are still many resources to be aggregated.

Keywords: Steel Frame. Buckling. SketchUp. Cold formed steel profiles. Ruby. Tool.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Considerações iniciais	20
1.2	Justificativas e Objetivos	24
1.3	Estrutura do trabalho	25
2	SISTEMA CONSTRUTIVO ESTRUTURADO EM PERFIS METÁLICOS.....	27
2.1	Considerações Iniciais	27
2.2	Fundações	29
2.3	Painéis	31
2.4	Cobertura	34
2.5	Fechamento	36
2.6	Perfis formados a frio	38
2.6.1	<i>Fabricação</i>	38
2.6.2	<i>Tipos e uso de PFF</i>	39
2.7	Flambagem	42
3	MODELAGEM DE INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO.....	44
3.1	Considerações Iniciais	44
3.2	Parametrização	46
3.3	O que é Modelagem de Informação da Construção?	46
3.4	Interoperabilidade	48
4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	51
4.1	SketchUp	51
4.1.1	<i>Sobre o SketchUp</i>	51
4.1.2	<i>Sobre o Ruby</i>	53
4.1.3	<i>SketchUp + Ruby</i>	56
4.2	Criação do Código	58
4.3	Sobre o <i>plugin</i> LSF-UFJF	61
4.4	Estrutura do código	65

5 CONCLUSÕES	69
5.1 Considerações finais	69
5.2 Proposta para trabalhos futuros	71
APÊNDICES	76
A.1 Considerações Iniciais	77
A.2 Modelagem da estrutura	81
A.3 Cálculo das ações atuantes	84
A.3.1 Ações permanentes	85
A.3.2 Ações variáveis	88
<i>A.3.2.1 Cálculo da ação do vento</i>	89
<i>A.3.2.2 Sobrecarga</i>	104
<i>A.3.2.3 Carga Acidental</i>	107
A.3.3 Cálculo das reações resistentes	109
<i>A.3.3.1 Flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção na empena</i>	110
<i>A.3.3.2 Flambagem local da empena</i>	111
<i>A.3.3.3 Resistência final a compressão da empena</i>	113
<i>A.3.3.4 Flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção na viga</i>	114
<i>A.3.3.5 Flambagem local da viga</i>	115
<i>A.3.3.6 Resistência final a compressão da viga</i>	116
<i>A.3.3.7 Flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção no montante</i>	116
<i>A.3.3.8 Flambagem local do montante</i>	118
<i>A.3.3.9 Resistência final a compressão do montante</i>	118
<i>A.3.3.10 Início de escoamento da seção efetiva para a empena e viga</i>	119
<i>A.3.3.11 Flambagem lateral com torção na viga</i>	121
<i>A.3.3.12 Flambagem lateral com torção na empena</i>	123
<i>A.3.3.13 Flambagem distorcional na viga e empena</i>	125
A.4 Dificuldades encontradas	126
B.1 Resultados gerados em arquivo	129

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1.1	Aspecto de construção com <i>Wood-Frame</i> . Adaptado de: Burrows (2014).	22
1.2	Problemas identificados quanto à qualidade das habitações construídas e à disponibilidade de infraestrutura interna em empreendimentos contratados pelo Programa Minha Casa Minha Vida/Fundo de Arrendamento Residencial. Fonte: TCU (2013).	24
2.1	Exemplo de construção utilizando o sistema construtivo estruturado em perfis metálicos. a) Aspecto inicial da estrutura e b) Iniciando o fechamento externo. Fonte Futureng (2014).	29
2.2	Exemplo de construção modular. Fonte: Modularis (2014).	29
2.3	(a) Deformações excessivas, (b) colapso do solo e (c) colapsos dos elementos estruturais, resultantes de projetos deficientes. Fonte: Hachich <i>et al.</i> (1998).	30
2.4	Principais tipos de fundação superficial: (a) bloco, (b) sapata, (c) viga e (d) radier. Fonte: Hachich <i>et al.</i> (1998).	31
2.5	Efeitos da carga de vento na estrutura: a) translação e b) tombamento. Fonte: Crasto (2005).	31
2.6	Painel típico em <i>Light Steel Framing</i> . Fonte: Crasto (2005).	32
2.7	Esquema de corpo livre de montantes. Fonte: Rodrigues (2006).	33
2.8	Desenho esquemático de painel estrutural com abertura. Fonte: Crasto (2005).	34
2.9	Exemplo de cobertura plana em LSF. Fonte: Crasto (2005).	35
2.10	Exemplo de cobertura inclinada em LSF. Fonte: Crasto (2005).	35
2.11	Nomenclatura das dimensões do a) Perfil U e b) Perfil Ue, padronizado pela ABNT NBR 6355:2012. Adaptado de: Silva <i>et al.</i> (2014).	40
2.12	Seções transversais dos perfis formados a frio. Fonte: Pereira (2004).	40
2.13	Seções transversais dos perfis formados a frio de chapas corrugada. Fonte: Pereira (2004).	41

2.14	Modos de deformação de um perfil U enrijecido: (a) Modos globais: (1) Extensão axial. (2) Flexão em torno do eixo de maior inércia. (3) Flexão em torno do eixo de menor inércia. (4) Torção. (b) Modos distorcionais: (5) Simétrico. (6) Antissimétrico. (c) Modos locais de placa. Fonte: Dôres (2014).	43
3.1	Diagrama conceitual que representa uma equipe de projeto Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) e os limites típicos organizacionais. Adaptado de: Eastman <i>et al.</i> (2011).	45
3.2	Informações geradas pela base de dados BIM. Fonte: Moreira (2008).	48
3.3	Todos os formatos de troca modernas são baseadas em um esquema definido em uma linguagem de esquema. Há muitos esquemas XML com diferentes linguagens de esquema. Adaptado de: Eastman <i>et al.</i> (2011).	49
4.1	Gráfico de crescimento do SketchUp. O eixo horizontal do gráfico representa tempo e o vertical é com que frequência é procurado um termo, globalmente. A partir do ponto “A” o gráfico foi gerado através de previsão por extrapolações de valores passados, que indicam uma tendência de estabilidade. Disponível em: < http://www.google.com.br/trends/explore#q=sketchup > Acesso em: 15 dez. 2014	52
4.2	Gráfico de variação da porcentagem de participação no índice TIOBE que o Ruby obteve em cada período. Fonte: www.tiobe.com	55
4.3	Resultado do exemplo do uso de unidades de comprimento.	58
4.4	Processos de modelagem 3D. a) O código em Ruby gera um objeto, e este objeto é o responsável pela modelagem do desenho 3D. b) O código em Ruby gera diretamente um desenho 3D.	60
4.5	Alguns desenhos arquitetônicos de portas. Adaptado de:Montenegro (1978).	61
4.6	Alguns desenhos arquitetônicos de janelas. Adaptado de:Montenegro (1978).	61
4.7	Desenho arquitetônico de porta e janela conforme o <i>plugin</i>	61
4.8	Exemplo de uma linha que tem algum tipo de interrupção. A linha de três metros da parte inferior do desenho é contínua, enquanto a da parte superior está dividida em duas partes.	62

4.9	Conteúdo do arquivo de tipo txt que contém os dados do perfil u.	63
4.10	Peças constituintes da estrutura.	64
4.11	Sequência de ações realizadas pelo <i>plugin</i> para gerar a modelagem 3D.	65
4.12	Sequência de ações realizadas pelo <i>plugin</i> para realizar o pré cálculo estrutural.	66
4.13	Parte do código em Ruby para criação da cobertura.	67
A.3	Dimensões da construção proposta.	78
A.1	Planta baixa utilizada como exemplo, seguindo alguns elementos padrões de projeto arquitetônico.	79
A.2	Planta baixa adaptada para emprego do plugin.	80
A.4	Modelagem 3D da edificação proposta gerada em Revit.	80
A.5	Localização da opção “Gerar estrutura” no SketchUp 2015. Na versão 2014, a opção “Extensões” aparece como “Plug-ins”.	82
A.6	a) Janela principal de entrada de dados. b - f) Janelas correspondentes aos modelos de portas e janelas da edificação.	83
A.7	Resultado da modelagem gerada no <i>plugin</i>	84
A.8	Cargas concentradas devido às ações permanentes.	86
A.9	Cargas distribuídas devido às ações permanentes atuando nos nós.	87
A.10	Diagrama de corpo livre no nó D.	87
A.11	Diagrama de corpo livre no nó F.	88
A.12	Diagrama de corpo livre no Nó E.	88
A.13	Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s). Fonte: NBR 6123.	91
A.14	Local de atuação dos coeficientes externos na parede. Fonte: NBR 6123.	94
A.15	Valores encontrados para os coeficiente externos, na parede.	95
A.16	Local de atuação dos coeficientes externos na cobertura. Fonte: NBR 6123.	96
A.17	Valores encontrados para os coeficiente externos, na cobertura.	97
A.18	Figura explicativa sobre a transição de a) todos os coeficientes de pressão e forma, externos, para parede e cobertura, em uma b) figura que apresenta os maiores coeficientes encontrados em cada caso.	97
A.19	Coefficientes resultantes da ação do vento na estrutura.	98
A.20	Resultantes de $c_{pe} + c_{pi}$. a) Caso 1 b)Caso 2.	99
A.21	Resultantes de $c_{pe} + c_{pi}$. a) Caso 3 b)Caso 4.	99
A.22	Atuação da ação do vento na cobertura.	100

A.23 Cargas concentradas devido ao vento atuando na estrutura.	101
A.24 Cargas devido ao vento atuando nos nós.	101
A.25 Cargas devido ao vento decompostas nas direções horizontal e vertical.	102
A.26 Reações de apoio na treliça	102
A.27 Diagrama de corpo livre no nó B.	103
A.28 Diagrama de corpo livre no nó E.	103
A.29 Diagrama de corpo livre no nó F.	103
A.30 Cargas concentradas dedivo às ações de sobrecarga na cobertura.	104
A.31 Cargas dedivo às ações de sobrecarga na cobertura distriuídas nos nós	105
A.32 Reações de apoio na treliça.	105
A.33 Diagrama de corpo livre no nó B.	106
A.34 Diagrama de corpo livre no nó E.	106
A.35 Diagrama de corpo livre no nó F.	106
A.36 Cargas concentradas dedivo às ações da carga acidental no forro.	107
A.37 Cargas dedivo às ações da carga acidental no forro distribuídas nos nós.	108
A.38 Diagrama de corpo livre no nó D.	108
A.39 Diagrama de corpo livre no nó F.	108
A.40 Diagrama de corpo livre no nó E.	109
A.41 Valores do coeficiente de flambagem local k_l para barras sob compressão centrada. Fonte: NBR 14762.	112
A.42 Valores do coeficiente de flambagem local k_l da seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia. Fonte: NBR 14762.	120
A.43 Desenho gerado pelo algoritmo pode nem sempre representar uma solução numericamente exata.	127
A.44 Um dos erros encontrados durante a implementação.	128

LISTA DE TABELAS

2.1	Sistemas e subsistemas de edifícios, segundo a norma ISO 6241 (1984). Fonte: Silva (2011)	37
2.2	Massas mínimas de revestimento. Fonte: NBR 15253:2005.	39
4.1	Perfis U disponíveis no <i>plugin</i> . Fonte: Foi em um arquivo pré norma.	63
A.1	Perfis utilizados para compor a estrutura.	78
A.2	Valores relativos às propriedades da seção transversal do perfil Ue.	81
A.3	Valores relativos às propriedades do aço.	81
A.4	Peso dos componentes permanentes da edificação.	85
A.5	Valores das ações permanentes das componentes da estrutura.	86
A.6	Coefficientes de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular. Fonte: NBR 6123.	94
A.7	Coefficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular. Fonte: NBR 6123.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIM	<i>Building Information Modeling</i>
PPF	Perfis formados a frio
LSF	<i>Light Steel Frame</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
NBS	<i>National Building Specification</i>
GSA	<i>General Services Administration</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
W3C	<i>World Wide Web Consortium</i>
CEO	Chefe Executivo de Ofício
POO	Programação Orientada a Objetos

b_w	Largura nominal da alma
b_f	largura nominal da mesa
D	largura nominal do enrijecedor de borda
t_n	espessura da chapa ou do elemento
C_w	constante de empenamento da seção transversal
$I_x; I_y$	momentos de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y, respectivamente.
J	constante de torção
r_0	raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção
x_0	distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo x
W	módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento
E	módulo de elasticidade do aço, adotado igual a 200 000 MPa
f_y	resistência ao escoamento do aço
G	módulo de elasticidade transversal, adotado igual a 77 000 MPa
ν	Coefficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,3
q	Pressão dinâmica do vento
V_k	Velocidade característica do vento
V_0	Velocidade básica do vento
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno
S_3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
a	A maior dimensão horizontal de uma edificação
b	A menor dimensão horizontal de uma edificação
h	Altura de uma edificação acima do terreno, medida até o topo da platibanda ou nível do beiral
c_{pe}	Coefficiente de pressão e forma, externos
c_{pi}	Coefficiente de pressão interna

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Um dos métodos construtivos mais utilizados no Brasil teve sua origem nos tempos antigos, onde se usavam pedras naturais juntamente com algum aglomerante para erguerem as edificações. A natureza mecânica desses materiais comporta bem os esforços axiais de compressão, mas sendo bem frágeis quanto à tração. Com o advento do cimento Portland, as construções passaram a contar com a reprodução das características das pedras naturais, utilizando o cimento, agregados e água para compor o que atualmente é conhecido por concreto.

Aliando-se ao concreto, o aço, que possui tanto grandes resistências à compressão quanto à tração, fez surgir o concreto armado, que atualmente é tão utilizado nas construções. Graças ao aço, grandes vãos puderam ser alcançados e as construções passaram a adotar estruturas do tipo coluna, viga e laje para compor a edificação. Demais elementos como portas, janelas e paredes ficam responsáveis pela vedação, não sendo necessárias para manter o equilíbrio da estrutura (apesar de terem suas parcelas de participação).

Apenas em janeiro de 2014, o Brasil consumiu 6.003.905 toneladas de cimento (CBIC, 2014)¹. Aliado a esse consumo está um dado de um relatório da ABRELPE (2013)² sobre um levantamento feito no ano de 2013 com 404 municípios da federação que, juntos, coletaram mais de 117 mil toneladas por dia de Resíduos de Construção e Demolição. A ABRELPE, em seu relatório já citado, fez um alerta sobre esses dados afirmando que “a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas resíduos lançados em logradouros públicos”.

Uma grande contribuição para esses números reside na natureza do método construtivo utilizado. O cimento se combina quimicamente com a água, para então desenvolver

¹Câmara Brasileira da Indústria da Construção

²Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

suas propriedades (ABCP, 2014)³. Como a reciclagem do cimento é um processo ainda pouco difundido, existem formas de reuso do concreto, transformando-o em um tipo de agregado (Troian, 2010). Além disso, o concreto é um material produzido *in loco* e muitas vezes é concebido sem uma supervisão técnica adequada, como também são utilizados instrumentos poucos precisos para a medição dos materiais, mistura e vibração, somado com uma cura mal executada. Concomitante a esse processo, ocorre, não raras vezes, o desperdício de materiais devido ao seu mau uso. E assim, toma-se forma o cenário exposto pela ABRELPE através de seus dados.

Junto ao grande número de cartilhas informativas que buscam minorar o desperdício e quantidade de entulhos gerados pela construção civil atual, surgem novos métodos construtivos que visam racionalizar os materiais utilizados, a fim de evitar desperdícios e maximizar a produção. Para Barros e Sabbatini (2003), “numa economia competitiva, como a que atualmente está se configurando, a redução dos custos de produção dos empreendimentos é um fator decisivo para a sobrevivência das empresas”.

A necessidade de se reduzir custos de produção já era um dos conceitos da primeira Revolução Industrial, que teve início em meados do século XVIII, na Inglaterra. Nesta época, na América do Norte, a madeira era utilizada como principal material na construção de muitas edificações, uma vez que havia grandes áreas de floresta naquela região. Seu uso se intensificou em função da expansão das fronteiras dos EUA para o oeste, e pela repetição de seu processo veio o aperfeiçoamento e geração de um modo construtivo, o sistema construtivo estruturado em perfis de madeira, ou *Wood-Frame* (Pizzi, 2003).

Atualmente, o processo mais utilizado na construção de residências em *Wood-Frame* é o tipo de construção em plataforma, sobre o piso (Figura 1.1). Primeiro é construído o piso e as paredes são colocadas sobre esse piso. As paredes podem ser pré-fabricadas ou montadas horizontalmente sobre o piso e posteriormente alocadas em sua posição final sem requerer auxílio de equipamentos pesados. As placas de fundo e de topo, que são partes integrantes do enquadramento da parede, fornecem bloqueios contra o fogo no chão

³Associação Brasileira de Cimento Portland

e no teto e também serve como apoio para revestimento da parede e acabamento interior (Burrows, 2014).

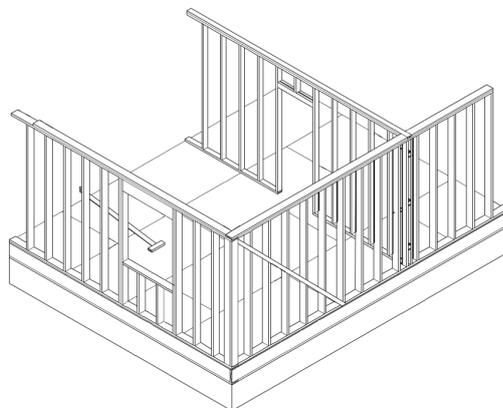


Figura 1.1: Aspecto de construção com *Wood-Frame*. Adaptado de: Burrows (2014).

Segundo Conceição (2012), entre os anos de 1850 e 1880 aconteceu uma grande transformação na indústria do aço, permitindo mudanças significativas que tornaram possível a fabricação de aço barato e de alta qualidade em grande escala, ocasionando até mesmo a substituição de trilhos de ferro por trilhos de aço.

A partir da metade do século XX começaram a surgir os perfis de aço de menores espessuras e com maior resistência à corrosão. Isso permitiu a confecção de perfis com custo reduzido e conseqüentemente mais interessantes para a construção civil. A técnica de construir utilizando madeira poderia ser replicada utilizando o aço e, com a utilização do novo material, surgiu um novo método construtivo que passou a se chamar sistema construtivo estruturado em perfis de aço, ou *Steel-Frame*.

De acordo com Santiago *et al.* (2012), foi após a Segunda Guerra Mundial que a substituição da madeira pelo aço passou a ser vantajosa graças à melhoria no processo de obtenção do aço e devido à sua “maior resistência e eficiência estrutural [...] e à capacidade da estrutura de resistir a catástrofes naturais como terremotos e furacões”. Os autores ainda relatam a existência de variação no preço e na qualidade das madeiras na década de 90, e que no final desta década, 25% das residências construídas nos Estados Unidos foram em *Steel-Frame*.

No tocante a residências no Brasil, estudos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) mostram que houve uma redução no déficit habitacional de 10% no ano de 2007 para 8,53% em 2012, totalizando 5,24 milhões de residências ainda faltantes. Em esforços de diminuir esses números, o governo federal brasileiro aprovou a Lei nº 11.977, em 7 de julho de 2009, referente ao programa “Minha Casa Minha Vida”, que até o dia 9 de dezembro de 2013, de acordo o portal do PAC⁴ já havia entregue 1,4 milhões de moradias.

Esses dados seriam mais animadores se não fossem os problemas técnicos existentes em várias dessas novas residências. Em relatório de auditoria do TCU (2013)⁵, o item 108 chama a atenção por conter reclamações dos moradores quanto a problemas encontrados nas residências. Esse item diz:

As altas taxas de reclamações que recaíram sobre as patologias relacionadas à parte hidráulica, trincas nas paredes, problemas de esquadrias e impermeabilizações estão relacionadas com a grande frequência das infiltrações nas residências. A origem das patologias pode estar associada a diversos fatores, relacionados tanto à fase de concepção, com a aprovação de projetos em desacordo com as especificações do programa e erros de dimensionamento, como à fase de execução da obra, com o uso, por exemplo, de materiais inadequados ou de baixa qualidade e da pouca capacitação profissional da mão de obra empregada. A existência de parte dos problemas aqui expostos, por si só, já é suficiente para causar a deterioração do imóvel e, se não forem tratados corretamente, podem vir até mesmo a comprometer sua estrutura.

Em seguida o mesmo relatório apresenta o gráfico presente na Figura 1.2. Fica visível a falta de condução apropriada na edificação dessas residências. Seu processo construtivo de concreto armado parece seguir os mesmos passos que há muitos anos vem causando desperdícios, entulhos e execuções precárias.

⁴Programa de Aceleração do Crescimento. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/noticia/22141600>> Acesso em: 19 de nov. 2014.

⁵Tribunal de Contas da União.

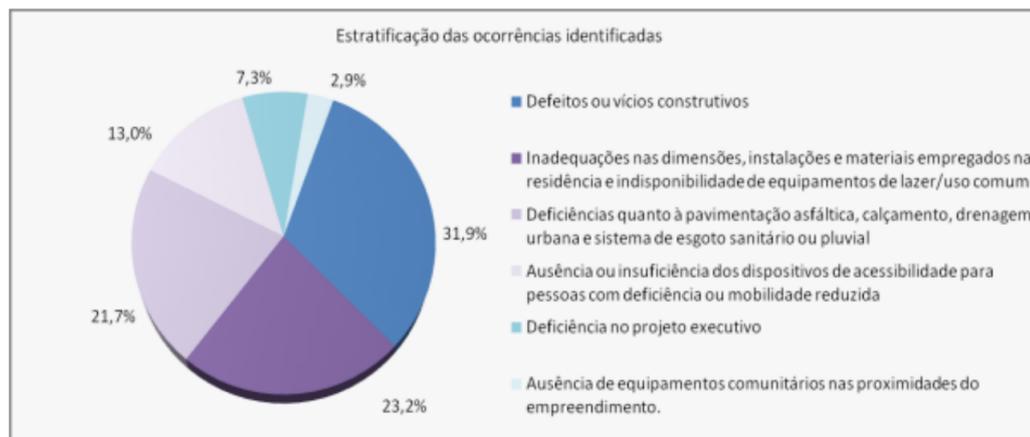


Figura 1.2: Problemas identificados quanto à qualidade das habitações construídas e à disponibilidade de infraestrutura interna em empreendimentos contratados pelo Programa Minha Casa Minha Vida/Fundo de Arrendamento Residencial. Fonte: TCU (2013).

1.2 Justificativas e Objetivos

Os avanços científicos proporcionados pelo advento da computação modificaram significativamente as formas com que as empresas e organizações em geral lidam com seus produtos e serviços. Os computadores passaram a estar presentes em todos os setores produtivos, armazenando dados em planilhas, realizando cálculos com maior velocidade, trocando informações sem limites físicos de distância, entre outras práticas.

É possível observar essas alterações no cotidiano, até mesmo as relações interpessoais passaram por adaptações. Não obstante, existem muitas formas de inserir novas tecnologias na engenharia civil praticada no Brasil. Ainda persistem a baixa especialização da mão de obra e um método construtivo que gera bastante desperdício e entulho. Dentre várias maneiras de contornar esses transtornos, o *Steel Frame* é um método que permite adotar meios racionais de produção por possuir padronização de suas peças constituintes devido a sua produção fabril.

Diante de tantos avanços, surge o BIM (*Building Information Modeling*, ou em português, Modelagem de Informação da Construção), tecnologia capaz de virtualizar uma construção, não só realizando sua apresentação gráfica, mas oferecendo também meios de analisar todos os aspectos inerentes de uma construção, do seu pré projeto até o pós venda.

Informações de cálculo estrutural, viabilidade econômica, conforto térmico e acústico, dentre outros recursos, fazem parte do BIM. Isso permite que estudos mais aprofundados sejam feitos, resultando na execução de construções racionalizadas. Contudo, softwares BIM tendem a serem complexos devido a tantas possibilidades.

Este trabalho tem então como principal objetivo propor uma ferramenta de uso simplificado, capaz de apresentar a modelagem 3D de uma construção em *Steel Frame*, efetuando um pré-cálculo estrutural e, concebida de forma a evoluir no sentido de se tornar um recurso BIM. Para isso, foi utilizado um *software* de modelagem 3D no computador, o SketchUp, por possuir uma versão gratuita, que permite proceder com estudos acadêmicos.

Deste objetivo principal, se ramificam objetivos secundários, como:

- Apresentar um exemplo de como auxiliar a industrialização da construção civil;
- Expor as facilidades do método em *Steel Frame*;
- Contribuir com o conhecimento a respeito do Steel Frame como sendo uma alternativa factível ao concreto armado, em termos técnicos, econômicos e ecológico;
- Mostrar as capacidades que a programação pode oferecer para a construção civil;
- Contribuir com a produção de *softwares* livres que possuam características BIM.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, onde buscou-se apresentar uma sequência didática de informações para melhor entendimento do que foi proposto.

O Capítulo 1 compreende uma breve introdução sobre alguns problemas relativos à construção civil, bem como possíveis alternativas de contornar esses problemas. Assim, é apresentada a criação de uma ferramenta que possa servir de motivação na busca de novas aplicações computacionais na construção civil.

O Capítulo 2 aborda o sistema construtivo a qual a ferramenta se baseia. São apresentados os características básicas desse sistema.

O Capítulo 3 apresenta uma tecnologia que está ganhando espaço nas empresas de construção, por englobar todo o processo construtivo em *softwares*, auxiliando no gerenciamento de obras no intuito de maximizar lucros e minimizar perdas.

O Capítulo 4 retrata o processo que gerou a ferramenta proposta e, também, o conjunto de objetos empregados na sua realização.

O Capítulo 5 dispõe os resultados de uma aplicação avaliativa da ferramenta, abordando a modelagem da estrutura e os pré-cálculos estruturais.

O Capítulo 6 conclui esse trabalho e também lança propostas para trabalhos futuros. Estas propostas foram surgindo no decorrer do trabalho, visto que possuem grande relevância no processo de industrialização da construção civil.

Finalmente, são listadas as referências bibliográficas utilizadas durante a elaboração deste trabalho.

2 SISTEMA CONSTRUTIVO ESTRUTURADO EM PERFIS METÁLICOS

2.1 Considerações Iniciais

O Sistema Construtivo Estruturado em Perfis Metálicos (Figura 2.1) é constituído de perfis formados a frio (PFF), unidos através de parafusos. Um de seus fundamentos está na utilização de quase todos os perfis como componentes da estrutura, onde estes trabalham para resistir aos esforços de cargas atuantes. Devido à capacidade dos PFF de obter grandes resistências mesmo com pequenas áreas de seção transversal, o peso total da estrutura é bastante reduzido. É por conta dessa característica que esse método recebe o nome de *Light Steel Frame Housing* na Europa e *Residential Cold-Formed Steel Framing* nos Estados Unidos. Conforme Crasto (2005), ainda existem muitas publicações que utilizam o termo *Light Gauge Steel Frame*, sendo *gauge* uma unidade utilizada na espessura das chapas, mas atualmente este termo está caindo em desuso.

Em um relatório técnico da CSSBI (2002) foi comparado o peso de um viga de aço de 150mm com o peso de uma outra viga de mesmo tamanho, mas confeccionada em concreto, obtendo: Viga em aço = $0,29kN/m^2$; Viga em concreto = $1,68kN/m^2$. Assim, fica natural compreender a adoção do termo *Light Steel Frame Housing* na Europa.

Existem prescrições que indicam práticas de montagem para o Sistema Construtivo Estruturado em Perfis Metálicos, doravante LSF (de *Light Steel Frame*). Como todos os componentes da estrutura devem trabalhar juntos para manter o equilíbrio do todo, é imprescindível que sua montagem siga critérios comprovadamente eficientes. Isso quer dizer que um projeto em LSF demanda uma prévia elaboração, uma vez que alterações durante sua execução são altamente não recomendadas. Também é necessário ter ciência

da grande importância da mão de obra atuante, pois qualquer alteração na montagem de alguma parte da estrutura irá desconfigurar o projeto previsto.

Conforme Santiago *et al.* (2012), são três os principais métodos de construção em LSF:

a) Método “*Stick*”:

Este método é talvez o que mais exige esforços manuais. Os perfis são cortados no local da construção, e a montagem dos painéis é feita manualmente utilizando os perfis já cortados, que podem vir ou não já perfurados para passagem de tubulações elétricas, hidráulicas ou o que for necessário. Como os painéis são conectados na obra, o transporte dos perfis individualizados se torna uma tarefa mais simples.

b) Método por Painéis:

É um método onde os painéis (estruturais ou não), contraventamentos, lajes e tesouras de telhado já chegam conectados no canteiro de obras. Esses subsistemas são então montados no local, reduzindo assim o tempo de construção em relação ao método anterior, bem como diminuindo a possível quantidade de erros de precisão, ocasionando em maior qualidade na construção.

c) Construção Modular

Neste caso, a edificação é quase que totalmente pré-fabricada (ver Figura 2.2), sendo entregue já com acabamentos internos revestidos e com demais materiais fixos, como louças sanitárias, bancadas de cozinha, instalações elétricas e hidráulicas, etc. Desta forma, a edificação é particionada em módulos, que devem ser agrupados em seu local final.



Figura 2.1: Exemplo de construção utilizando o sistema construtivo estruturado em perfis metálicos. a) Aspecto inicial da estrutura e b) Iniciando o fechamento externo. Fonte Futureng (2014).



Figura 2.2: Exemplo de construção modular. Fonte: Modularis (2014).

2.2 Fundações

A fundação de uma edificação é a parte da estrutura responsável pela transmissão dos esforços atuantes na edificação para o solo. Como este último tem o trabalho de absorver todas as cargas da construção, se torna necessário estudar o solo e suas características, sendo essa uma das práticas da Geotecnia. Este estudo abrange a natureza dos solos (tamanho das partículas, constituição mineralógica, etc), classificação (argilosos, arenosos,

saprolíticos, etc), percolação da água, e várias outras influências que interferem na capacidade do solo em resistir tensões.

Para Hachich *et al.* (1998), um projeto de fundações deve obedecer a três requisitos indispensáveis:

1 - Diante das condições normais, a estrutura deve permanecer dentro de uma margem de deformações aceitáveis; 2 - Estabilidade “externa” - o solo de fundação deve possuir segurança apropriada; 3 - Estabilidade “interna” - segurança adequada contra o colapso de elementos estruturais.

Para ilustrar as possíveis causas da não obediência a esses três requisitos, o autor apresenta a Figura 2.3, que representa, de forma esquemática, três situações causadas por projetos deficientes: deformações excessivas, colapso do solo e colapso de elementos estruturais.

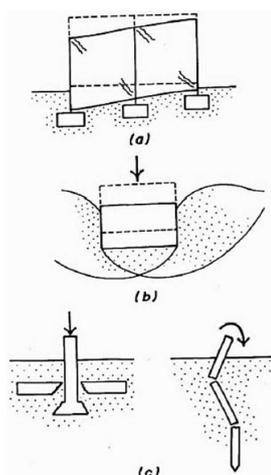


Figura 2.3: (a) Deformações excessivas, (b) colapso do solo e (c) colapsos dos elementos estruturais, resultantes de projetos deficientes. Fonte: Hachich *et al.* (1998).

Os tipos de fundações podem ser divididos em dois grupos: superficiais (Figura 2.4) e profundas, segundo Hachich *et al.* (1998), ou diretas ou rasas e indiretas ou profundas, segundo Azeredo (1977). Crasto (2005) afirma que no sistema LSF, por ter uma distribuição uniforme das cargas ao longo dos perfis estruturais, “a fundação deverá ser contínua suportando os painéis em toda a sua extensão”.

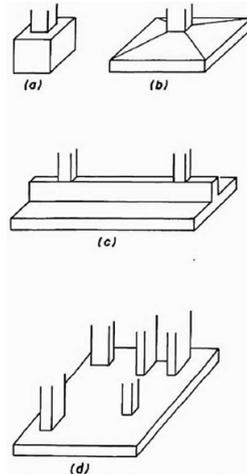


Figura 2.4: Principais tipos de fundação superficial: (a) bloco, (b) sapata, (c) viga e (d) radier. Fonte: Hachich *et al.* (1998).

Outro tipo de esforço que a edificação deve suportar é aquele provocado pelo ação do vento. Crasto (2005) aponta para a necessidade de evitar movimentos de translação e de tombamento (Figura 2.5). Para isso, deve ser feita uma ancoragem da estrutura na fundação. Esta ancoragem vai variar de acordo o cálculo estrutural do projeto, tendo como tipos mais usuais: a ancoragem química com barra rosca; a com fita metálica; e a com fixação com barras tipo “J”.

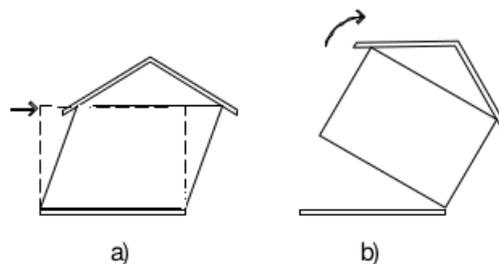


Figura 2.5: Efeitos da carga de vento na estrutura: a) translação e b) tombamento. Fonte: Crasto (2005).

2.3 Painéis

Os painéis são partes constituintes da edificação em LSF que podem ou não exercer função estrutural. Contudo, sua configuração básica é sempre composta por montantes e

guias, como pode ser visto na Figura 2.6. Guias são PFF geralmente de seção do tipo U posicionados horizontalmente, formando a base e o topo dos painéis. Já os montantes são PFF do tipo Ue (perfil U enrijecido) fixados em posição vertical entre as guias de base e topo Crasto (2005).

O espaçamento entre montantes varia de acordo com a solicitação de carga, sendo comumente de 400mm ou 600mm. Como esse espaçamento costuma se repetir em outros painéis, é habitual utilizar o termo modulação. Seguindo uma padronização modular, os painéis de diferentes pavimentos tendem a coincidir a localização de seus montantes, distribuindo as cargas axialmente, evitando momentos fletores.

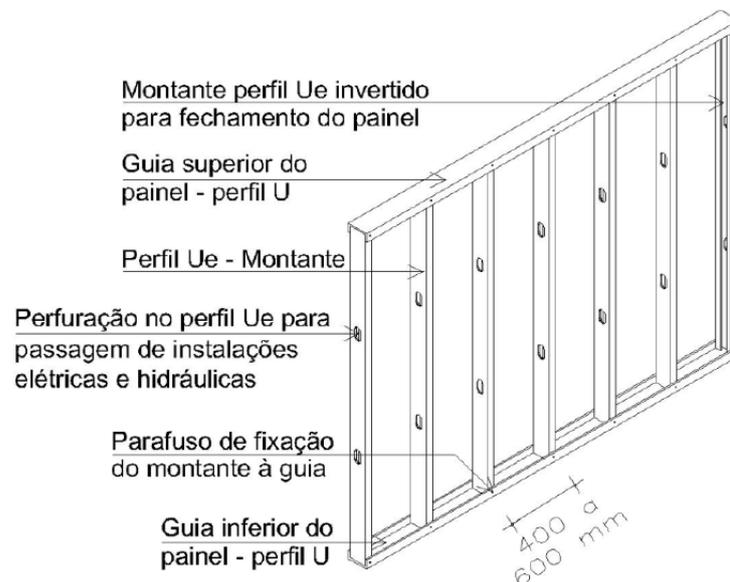


Figura 2.6: Painel típico em *Light Steel Framing*. Fonte: Crasto (2005).

Para Rodrigues (2006), os montantes podem ser considerados como tendo extremidades rotuladas, conforme apresenta a Figura 2.7.

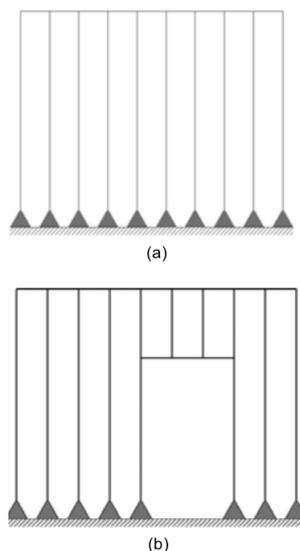


Figura 2.7: Esquema de corpo livre de montantes. Fonte: Rodrigues (2006).

Quanto às cargas horizontais, os montantes já não são capazes de resistir a esse tipo de solicitação, que pode provocar instabilidades na estrutura, levando a deformações e colapso. Essas forças horizontais são majoritariamente provenientes das ações do vento, e daí vem o termo que designa a parte constituinte da estrutura responsável pela estabilização do LSF, o contraventamento. Nesse tipo de construção, o mais utilizado é o contraventamento em “X”, localizado na face do painel (Brasilit, 2014).

Santiago *et al.* (2012) recomenda o uso de contraventamentos juntamente com “diafragma rígido no plano de piso que atua transmitindo os esforços aos painéis contraventados”. No caso do LSF, o fechamento externo dos painéis pode conter materiais que exerçam essa função.

Quando um painel é interrompido para que sejam feitas aberturas de portas ou janelas, duas situações distintas podem ocorrer, dependendo do painel ter ou não função estrutural. Caso o painel seja estrutural, como na Figura 2.8, a abertura do vão requisitará a presença de verga para distribuir as cargas solicitantes para as ombreiras. Se o painel não for estrutural, servindo apenas para fechamento, a carga solicitante em seus perfis será apenas aquela proveniente de seu peso próprio, não requisitando o auxílio de vergas.

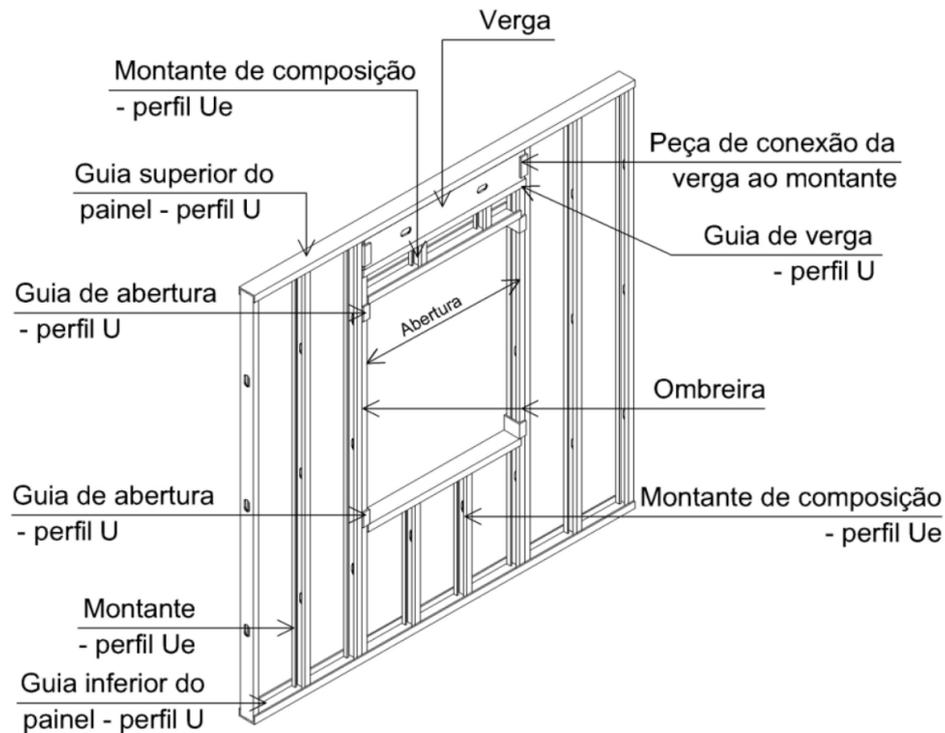


Figura 2.8: Desenho esquemático de painel estrutural com abertura. Fonte: Crasto (2005).

São variadas as formas como podem ser alocadas as vergas, já que a distribuição de cargas não ocorre de apenas uma maneira. A mesma situação acontece para as ligações entre painéis. Não existe apenas um modo eficiente para alcançar os resultados de estabilidade da estrutura, cabendo ao projetista escolher aquela forma que mais lhe apraz.

2.4 Cobertura

A estrutura das coberturas em LSF possui grande similaridade com as coberturas em madeira e pode dar-se de variadas configurações. Se classificadas em tipos, as coberturas podem ser planas (Figura 2.9) ou inclinadas (Figura 2.10) (Crasto, 2005).

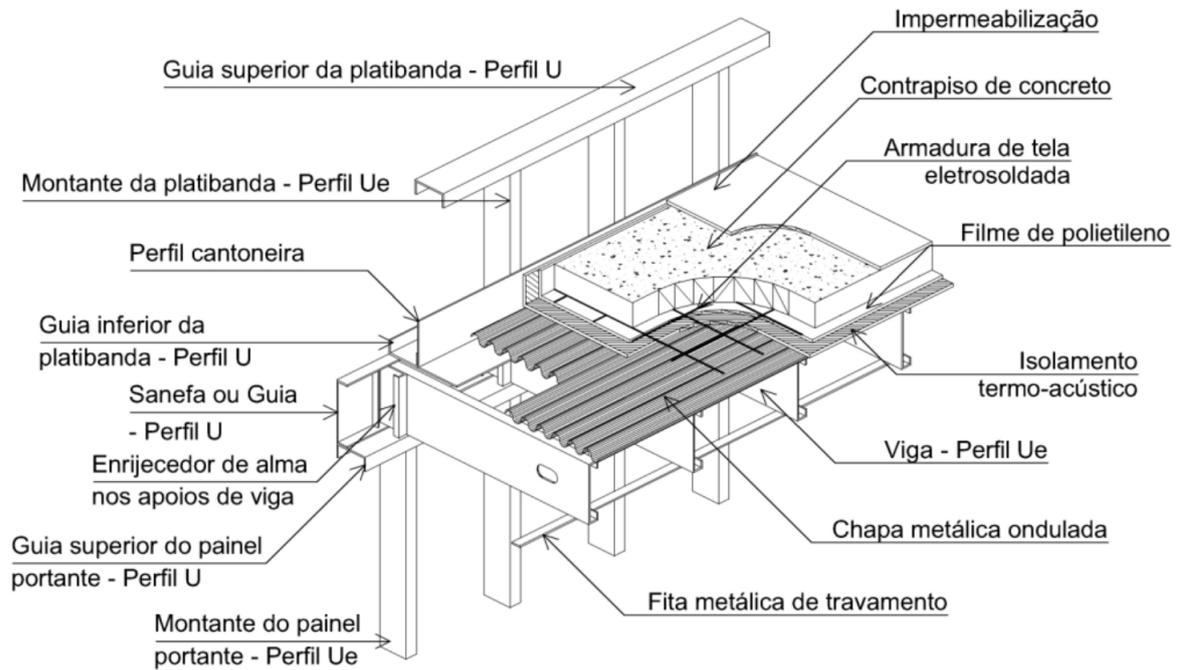


Figura 2.9: Exemplo de cobertura plana em LSF. Fonte: Crasto (2005).

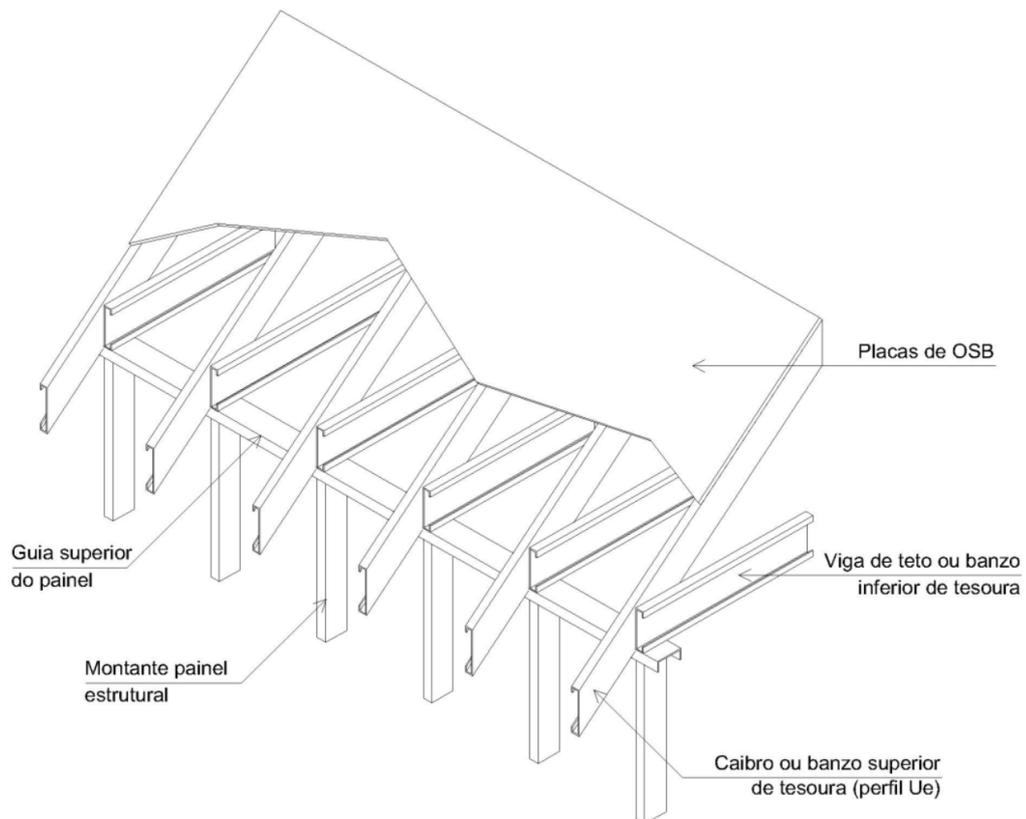


Figura 2.10: Exemplo de cobertura inclinada em LSF. Fonte: Crasto (2005).

2.5 Fechamento

Como o LSF é um sistema construtivo leve (em comparação aos tradicionais métodos utilizados atualmente no Brasil), os materiais componentes de fechamento devem também possuir essa mesma característica. Estes são posicionados nas faces externas e internas dos painéis, como demonstra a Figura 2.1 b).

Crasto (2005) cita a importância de empregar sistemas racionalizados no fechamento dos painéis com o intuito de fomentar um maior uso de materiais industrializados na construção. Assim, o autor relata “que na maioria dos casos, as placas [de fechamento] são dimensionadas com largura de 1,20m, múltiplo da modulação de 400mm ou 600mm, como ocorre com as placas de gesso acartonado e placas cimentícias.”

Existem normas que abordam os requisitos aos quais os fechamentos devem atender. A ISO 6241-1984, com última revisão em 2010 (essa norma é atualizada a cada cinco anos), propõe dividir uma edificação em sistemas e subsistemas, como apresentado na Tabela 2.5, a fim de obedecer critérios de segurança estrutural, segurança ao fogo, conforto termoacústico, durabilidade, dentre outros.

	Sistemas	Subsistemas
<i>Exterior</i>	1. Estrutura 2. Envelope exterior 3. Divisões espaciais exterior ao envelope	Fundações; Esqueleto. Envelope abaixo do terreno; Envelope acima do terreno. Escadas exteriores; Divisão vertical exterior; Divisão vertical interior
<i>Interior</i>	4. Divisões espaciais interiores 5. Instalações	Escadas interiores; Divisão vertical interior; Divisão vertical exterior. Distribuição e drenagem de água; Aquecimento e ventilação; Distribuição de gás; Eletricidade e Telecomunicações; Transporte mecânico e electromecânico, pneumático e gravítico; Segurança.

Tabela 2.1: Sistemas e subsistemas de edifícios, segundo a norma ISO 6241 (1984). Fonte: Silva (2011)

2.6 Perfis formados a frio

2.6.1 *Fabricação*

De acordo Silva *et al.* (2014), existem dois processos de fabricação para os PFF: contínuo e descontínuo. O primeiro caso “é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço, sobre os roletes de uma linha de perfilação.” São os roletes, em um processo repetitivo, os responsáveis pela forma final do perfil. Após esse processo, o aço é cortado no comprimento desejado.

Quanto ao processo descontínuo, é utilizada uma prensa dobradeira em uma chapa de aço, até essa assumir o perfil desejado. Tem a desvantagem de que o comprimento do perfil é limitado pela largura da prensa, sendo um processo indicado apenas para obter pequenas quantidades de perfis.

A NBR 15253:2005 propõe o uso de bobinas de aço revestidas com zinco ou liga alumínio-zinco (através do processo contínuo de imersão a quente ou por eletrodeposição) para a fabricação de PFF. No que diz respeito às massas mínimas desses revestimentos, essa mesma norma apresenta a Tabela 2.2.

Tipo de revestimento	Perfis estruturais		Perfis não estruturais	
	Massa mínima do revestimento g/m ² (1)	Designação do revestimento conforme normas	Massa mínima do revestimento g/m ² (1)	Designação do revestimento conforme normas
Zincado por imersão a quente	180	Z180 (NBR 7008)	100	Z 100 (NBT 7008)
Zincado por eletrodeposição	180	90/90 (NBR 14964)	100	50/50 (NBR 14964)
Alumínio-zinco por imersão a quente	150	AZ150 (NM 86)	100	AZ100 (NM 86)

(1) A massa mínima refere-se ao total nas duas faces (média do ensaio triplo) e sua determinação deve ser conforme a NM 278).

Tabela 2.2: Massas mínimas de revestimento. Fonte: NBR 15253:2005.

2.6.2 Tipos e uso de PFF

Existe uma grande variedade de tipos de seções transversais de PFF. Todavia, é possível estabelecer uma divisão em dois grupos: um de perfis estruturais individuais e outro de chapas corrugadas. Embora as seções dos PFF possam assumir diversos formatos, existe uma padronização de seções para perfis estruturais individuais que podem ser encontrados no mercado, sendo as seções do tipo cantoneira, U (Figura 2.11-a), U enrijecido (Figura 2.11-b), Z, Z enrijecido e cartola as mais convencionais, como demonstra a Figura 2.12.

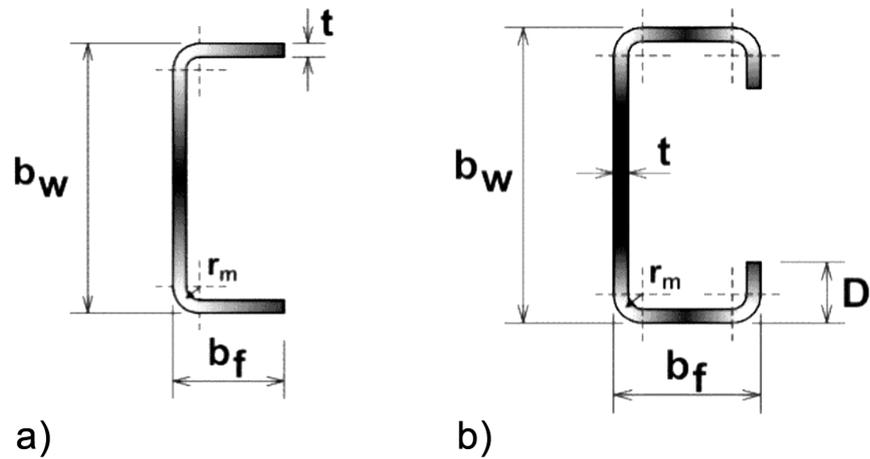


Figura 2.11: Nomenclatura das dimensões do a) Perfil U e b) Perfil Ue, padronizado pela ABNT NBR 6355:2012. Adaptado de: Silva *et al.* (2014).

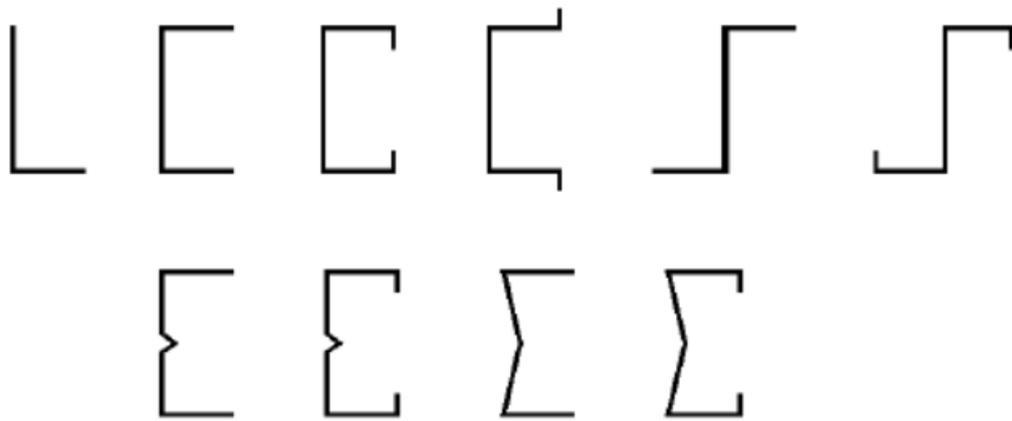


Figura 2.12: Seções transversais dos perfis formados a frio. Fonte: Pereira (2004).

Quanto às chapas corrugadas (Figura 2.13), Pereira (2004) afirma que os perfis deste grupo são comumente utilizados como telhas, tapamentos laterais e coberturas de edificações industriais e comerciais. Além disso, seções do tipo “*Steel-Deck*” são também empregadas na fabricação de lajes mistas, servindo de forma para concretagem e posteriormente funcionando como armadura positiva.

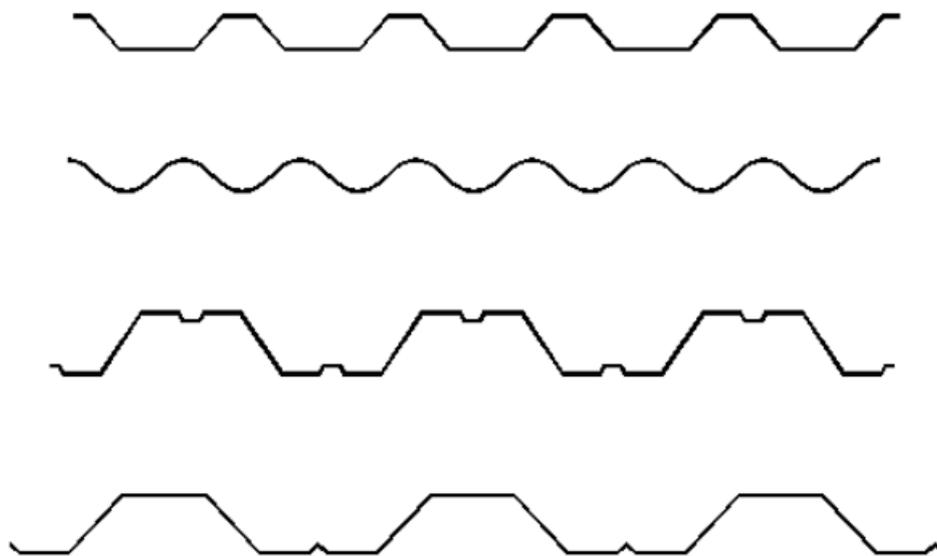


Figura 2.13: Seções transversais dos perfis formados a frio de chapas corrugada. Fonte: Pereira (2004).

Por causa da numerosa variedade de modelos de seções transversais que podem ser fabricadas e da boa relação massa/resistência, os PFF estão ganhando mais notoriedade entre as construções metálicas, especialmente em obras de pequeno porte. Pequenos edifícios, galpões e residências são exemplos de construções que utilizam esse tipo de aço como estrutura principal. Na construção civil seu uso também está aplicado em formas para concretagem, andaimes e escoramentos, terças, longarinas e armações para forros (Javaroni, 1999).

Para Pereira (2004), os PFF têm a possibilidade de serem dimensionados para menores carregamentos e vãos, o que não acontece para perfis laminados e soldados. PFF também podem compor painéis estruturais de paredes e pisos, o que facilita a passagem de tubulações elétricas e hidráulicas.

Os PFF vêm sendo usados para a construção de casas nos EUA há muitos anos. Suas principais vantagens são a estabilidade de preço, menor peso, alta resistência e rigidez, qualidade uniforme, facilidade de pré-fabricação e produção em massa, montagem e instalação rápida e fácil, não ser um combustível para o fogo e pelo fato de que é à prova de cupins e de apodrecimento (Yu, 2000).

A utilização de PFF vem ganhando espaço na construção metálica em todo o mundo,

inclusive no Brasil, sobretudo devido à esbeltez de suas peças, tornando a estrutura mais leve. Contudo, a diminuição da espessura das chapas dos perfis tem levado a obtenção de altos valores na relação largura/espessura. Quando submetidos a esforços de compressão, em virtude da grande esbeltez, esses perfis apresentam elevadas possibilidades de fletir (Mezzomo, 2012).

2.7 Flambagem

Colunas esbeltas estão sujeitas a um tipo de comportamento conhecido como flambagem. Quando a carga de compressão sobre uma coluna é relativamente pequena, o incremento dessa carga resulta apenas em um leve encurtamento da coluna. No entanto, uma vez que uma determinada carga crítica é alcançada, a coluna de repente encurva para um lado, dando origem a grandes deformações, que por sua vez levam a coluna a entrar em colapso. A carga que ocasiona a flambagem é, portanto, um critério para o dimensionamento de colunas (Chajes, 1974).

Para Chajes (1974), qualquer elemento submetido a um estado de tração, ou compressão quando se trata de barras curtas, rompem quando a tensão atuante atinge uma certa força limite do material. Uma vez que essa força limite do material é conhecida, é uma questão relativamente simples determinar a capacidade de carga do elemento. A flambagem, no entanto, não ocorre como um resultado da tensão aplicada atingindo certa força previsível do material. Em vez disso, a tensão que provoca deformação depende de uma variedade de fatores, incluindo as dimensões do componente, a forma na qual o elemento é apoiado, e as propriedades do material do qual o elemento é feito. A determinação dessa tensão de deformação é, portanto, um problema relativamente complexo.

Rondal *et al.* (1996) também afirmam que, em se tratando de barras comprimidas, a elevada esbeltez dos perfis torna-os suscetíveis à ocorrência do modo de falha por instabilidade sob carregamentos frequentemente menores do que aqueles que correspondem à plastificação total ou parcial da seção transversal. Segundo Mezzomo (2012) existem três formas gerais de flambagem (Figura 2.14): global, distorcional e local.

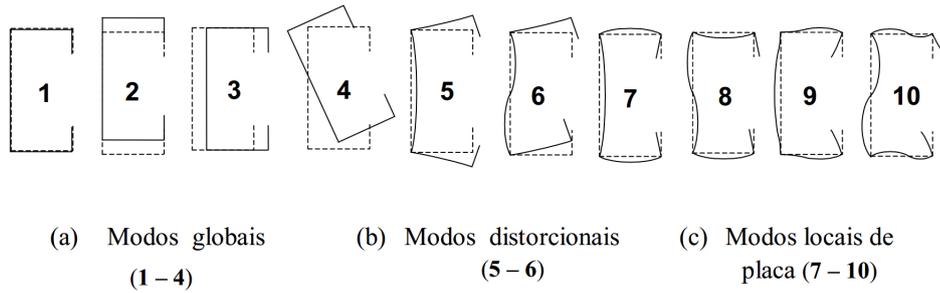


Figura 2.14: Modos de deformação de um perfil U enrijecido: (a) Modos globais: (1) Extensão axial. (2) Flexão em torno do eixo de maior inércia. (3) Flexão em torno do eixo de menor inércia. (4) Torção. (b) Modos distorcionais: (5) Simétrico. (6) Antissimétrico. (c) Modos locais de placa. Fonte: Dôres (2014).

3 MODELAGEM DE INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

3.1 Considerações Iniciais

Todo e qualquer projeto, para obter sucesso em sua execução, precisa de um mínimo de planejamento. Em se tratando de projeto com interesse econômico, necessário se faz observar a demanda pelo produto/serviço e avaliar sua viabilidade. A atividade da construção civil não difere conceitualmente de nenhuma outra atividade econômica, visa manter o lucro, que pode ser também entendido administrativamente como sendo a “saúde” organizacional. A construção de equipamentos públicos, obras particulares, reformas, etc, sempre necessitarão de planejamento e estudo antes da execução. Segundo a NBR 5674:1999, projeto é uma “descrição gráfica e escrita das características de um serviço ou obra de Engenharia ou de Arquitetura, definindo seus atributos técnicos, econômicos, financeiros e legais”.

Para Sousa Junior *et al.* (2014), grande parte dos problemas encontrados na construção civil são devidos a falhas de projeto. Isso tem provocado uma mudança na forma de gerir a atividade de projeto, buscando aprimorar o modelo convencional a fim de resultar em um produto final de maior qualidade. Uma obra bem planejada evita retrabalhos e mantém o prazo de execução, evitando tomadas de decisões urgentes e pouco elaboradas. Melhado (1994) acredita que as empresas muitas vezes entendem o projeto como sendo um ônus e, na tentativa de alcançar o lucro desejado, minimizam sua importância.

Um projeto de construção civil é composto por vários outros sub-projetos, como por exemplo, projeto de arquitetura, de estruturas, de fachada, de instalações elétricas, etc. Todos esses sub-projetos devem se relacionar no sentido de manterem coesas suas

informações. Como por exemplo, um projeto de arquitetura de um prédio prevê uma sala de estar com grandes vão e metragem quadrada. O projeto de estruturas, por sua vez, ao analisar os esforços atuantes nesse prédio, identifica a necessidade de construção nesta sala de uma viga em seu vão central, que devido às suas proporções, ficará aparente para o consumidor final. Como este fato não era conhecido durante o projeto arquitetônico, este deverá ser atualizado visando manter o padrão adotado no projeto inicial.

Na construção civil, essa interação entre projetos é conhecida como compatibilização. Conforme Santos *et al.* (2013), falhas na compatibilização conduzem à perda de competitividade da empresa, uma vez que as falhas dos projetos irão ocasionar um maior consumo de recursos, sejam esses tangíveis ou intangíveis. De acordo Sousa Junior *et al.* (2014), a compatibilização de projetos permite gerar integração de informações, viabilizando a construção do empreendimento.

Eastman *et al.* (2011), além de também afirmar que erros de projeto acarretam em custos extras e atrasos, alerta igualmente para a possibilidade de ocorrer ações judiciais entre as várias partes das equipes de projeto. Pelo grande número de participantes e documentos, administrar uma construção não é uma tarefa simples. A Figura 3.1 ilustra os membros típicos de uma equipe de projeto e suas fronteiras organizacionais.

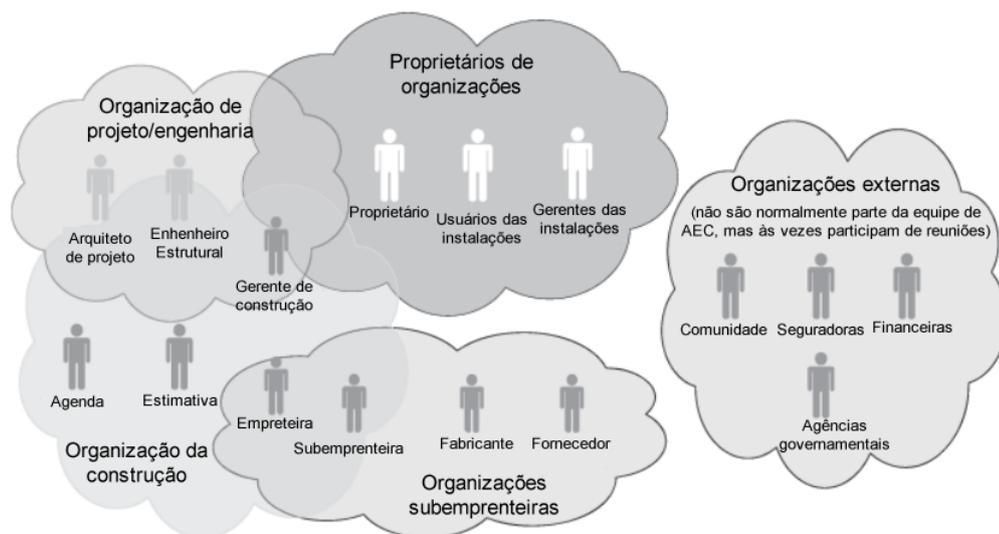


Figura 3.1: Diagrama conceitual que representa uma equipe de projeto Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) e os limites típicos organizacionais. Adaptado de: Eastman *et al.* (2011).

3.2 Parametrização

A indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) vem acompanhando lentamente o uso de ferramentas computacionais em seus escritórios. Um grande passo foi dado com a adoção de *softwares CAD (Computer-Aided Design*, em português, desenho assistido por computador) que substituíram as pranchetas de desenho por programas de computador, automatizando e trazendo mais precisão aos desenhos esquemáticos. Com o passar do tempo, surgiram também programas auxiliares de cálculo, muitos deles se servindo da alta capacidade computacional para resolver problemas complexos através do método dos elementos finitos e, assim, automatizando também diversos cálculos estruturais. A necessidade de automatização aumenta na mesma escala das complexidades dos projetos, em função das questões ambientais, energéticas, no aumento da produtividade, dentre outros (Tarrafa, 2012).

Ainda assim, no panorama atual que permeia a maior parte das empresas de AEC, os programas utilizados são referentes a solucionar determinado tipo de problema individualmente. Seja o CAD para os desenhos técnicos, os programas para cálculo estrutural, as plantas humanizadas para a produção de panfletos de divulgação, todos esses programas acabam trabalhando de forma isolada dos demais, mesmo que seja para executar tarefas de um mesmo projeto. Diante de alterações desse projeto, cada um dos programas deverá ter informações atualizadas, um a um, por exemplo.

Uma maneira de contornar esse problema é a parametrização de dados.

3.3 O que é Modelagem de Informação da Construção?

Conceituar o que é Modelagem de Informação da Construção (BIM, da abreviatura em inglês) se torna um processo complicado, uma vez que BIM se trata de uma tecnologia e que está em constante atualização (Moreira, 2008).

A proposta do BIM foi desenvolvida no final de 1970 no *Georgia Institute of Technology*, que fica na cidade de Atlanta, nos Estados Unidos da América. Devido a um grande

progresso, empresas de AEC passaram a adotar o BIM, e esse termo apareceu pela primeira vez em um projeto no ano de 2002 (Harris, 2009).

Uma das formas para entender o que realmente BIM significa é abordar inicialmente, conforme Eastman *et al.* (2011) propõe, uma série de descrições que não definem BIM:

- Modelos que contêm apenas dados em 3D e nenhuma (ou pouca) informação sobre o objeto¹. O SkecthUp, que será abordado no próximo capítulo, é um exemplo de programa que contém a modelagem 3D com atributos de geometria e aparência, mas sem suporte (nativo) à atribuição de outras características.
- Modelos sem suporte a comportamento, que não utilizam informação parametrizada.
- Modelos que são compostos de vários arquivos do tipo CAD 2D que devem ser combinados para definir uma edificação. Não há garantias de que isso resulte em um modelo 3D consistente.
- Modelos que permitem alterações nas dimensões de um ponto de vista que não são refletidas automaticamente em outros pontos de vista. Pode ocasionar erros muito difíceis de serem encontrados.

Para o NBS² - sistema de especificação de construção utilizado por arquitetos e outros profissionais da construção no Reino Unido para descrever os materiais, normas e fabricação de um projeto de construção - BIM reúne todas as informações sobre todos os componentes de um edifício, em um só lugar. Isso torna possível para qualquer um acessar essas informações para qualquer fim. Desta forma, o risco de erros ou discrepâncias é reduzido, e custos minimizados. Dados de BIM podem ser usados para ilustrar todo o ciclo de vida do edifício, desde a concepção e projeto até a demolição e reutilização de materiais. Espaços, sistemas de produtos e as sequências podem ser mostrados em escala uma em relação à outra e, por sua vez, em relação a todo o projeto.

GSA³ - agência do governo dos EUA responsável por compras administrativas - afirma que modelos geométricos em 3D apenas fazem representação de uma edificação real em

¹Um objeto é qualquer unidade de um edifício que tem propriedades associadas a ele. Assim, os espaços em um edifício são também objetos. Elemento ou componente podem também serem usados como sinônimo de objeto nesses casos. Fonte: Eastman *et al.* (2011).

²National Building Specification - <http://www.thenbs.com/bim/what-is-bim.asp>

³General Services Administration
http://www.gsa.gov/graphics/pbs/GSA_BIM_Guide_v0.60_Series01_Overview_05_14_07.pdf

computador, enquanto que modelos em BIM são organizados como um protótipo da edificação, em termos de construção de pavimentos, espaços, paredes, portas, janelas, e uma grande variedade de informações associadas com cada um desses elementos. O modelo em BIM pode ser visualizado em 3D, mas também contendo informações utilizadas por outros aplicativos, como de estimativas de custo, simulação de energia, iluminação natural, dinâmica dos fluidos computacional, etc.

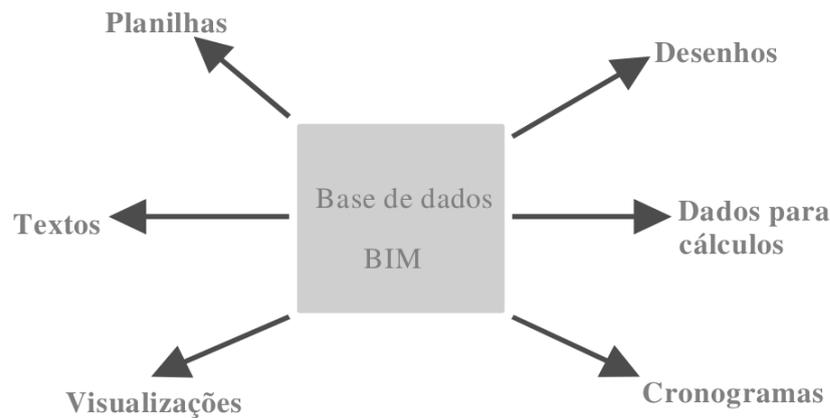


Figura 3.2: Informações geradas pela base de dados BIM. Fonte: Moreira (2008).

3.4 Interoperabilidade

Com a industrialização da construção civil, muitos aplicativos foram criados com a finalidade de automatizar processos produtivos e gerenciar informações de todos os tipos. Contudo, esses aplicativos por muitas vezes não abrangem totalmente as necessidades inerentes a um projeto de edificação, desde sua preparação, até o pós venda. Além disso, a depender do grau de atuação de uma empresa, essa não necessariamente necessitará de um aplicativo que englobe todas possibilidades da cadeia produtiva de uma construção. Por exemplo, uma empresa que tem o foco em gerar marketing e propaganda de condomínios residenciais pode utilizar informações precisas sobre todo um projeto através de seu banco de dados unificado gerado pelo BIM. Assim, essa empresa ao mesmo tempo que necessitará de um aplicativo capaz de realizar a leitura desse banco de dados, não tem motivos para obter um aplicativo que realize o cálculo estrutural desse projeto.

Para tornar possível que um aplicativo tenha a habilidade de se comunicar com um

outro, e vice versa, surge um conceito de que deve existir um protocolo comum para a troca de informações dando sustentação à interoperabilidade. Conforme Eastman *et al.* (2011), a interoperabilidade é a capacidade de trocar dados entre aplicativos, que suaviza os fluxos de trabalho e, por vezes, facilita a sua automação. O maior desafio da interoperabilidade é a troca de informações entre aplicativos, já que cada um possui uma forma de como gerenciar e manter seus dados.

Assim, a interoperabilidade entre aplicativos pode ser explicada da seguinte maneira: imagine que criou-se no mundo um novo idioma, totalmente independente dos já existentes e com regras definidas, e também foi criado um dicionário para traduzir esse novo idioma em qualquer outro. Assim, se uma pessoa apenas fala espanhol, ela pode traduzir seu texto para esse novo idioma, que poderá ser traduzido para o inglês, português, francês, utilizando o dicionário. Ninguém produz nada nesse idioma, nem nenhuma nação o adotou na prática, é apenas um idioma de apoio, servido somente para a transição entre um idioma e outro. Na interoperabilidade entre aplicativos, são as linguagens esquemáticas que têm o papel de traduzir os dados, e existem diferentes tipos de linguagens, como ilustra a Figura 3.3.

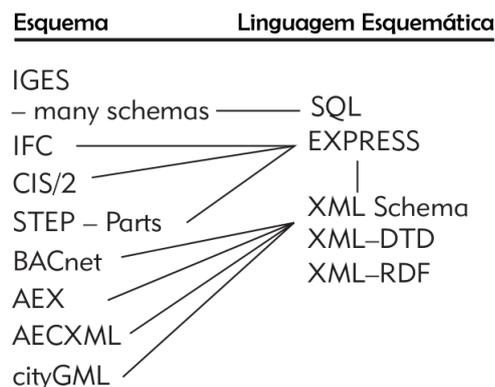


Figura 3.3: Todos os formatos de troca modernas são baseadas em um esquema definido em uma linguagem de esquema. Há muitos esquemas XML com diferentes linguagens de esquema. Adaptado de: Eastman *et al.* (2011).

Como exemplo de linguagem esquemática, o Algoritmo 3.1 demonstra um código em XML Schema com declaração de um elemento com nome “student”, duas declarações de atributos de nome “id” e “score”, a definição de um tipo complexo de nome

“StudentType”, e uma definição de tipo simples com nome “Score”.

```

1 <xsd:schema xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
2           xmlns:s="http://www.brics.dk/ixwt/students"
3           targetNamespace="http://www.brics.dk/ixwt/students">
4
5 <xsd:element name="student" type="s:StudentType"/>
6
7 <xsd:attribute name="id" type="xsd:string"/>
8 <xsd:attribute name="score" type="s:Score"/>
9
10 <xsd:complexType name="StudentType">
11   <xsd:attribute ref="s:id" use="required"/>
12   <xsd:attribute ref="s:score" use="required"/>
13 </xsd:complexType>
14
15 <xsd:simpleType name="Score">
16   <xsd:restriction base="xsd:integer">
17     <xsd:minInclusive value="0"/>
18     <xsd:maxInclusive value="100"/>
19   </xsd:restriction>
20 </xsd:simpleType>
21
22 </xsd:schema>

```

Algoritmo 3.1: Exemplo de código em XML Schema. Fonte: Moller e Schwartzbach (2006)

Para que um *software* tenha interoperabilidade, é fundamental que este possua capacidade de se comunicar com as linguagens esquemáticas, geralmente em função do tipo exportar/importar dados. A base de dados BIM pode ser acessada por quaisquer *softwares* que possuam a faculdade da interoperabilidade.

4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação computacional se deu através da criação de algoritmos em linguagem de programação Ruby, que é parte integrante do SketchUp, *software* responsável por modelar objetos em 3D. Esses algoritmos, quando trabalhando em conjunto, dão funcionamento à ferramenta proposta e, para que esta seja parte integrante do SketchUp, deu-se a forma de um *plugin*.

4.1 SketchUp

4.1.1 Sobre o SketchUp

O SketchUp é um *software* de modelagem 3D em computador criado pela @Last Software. Em 2006 foi comprado pela Google¹ e em 2012 foi a vez da Trimble² adquirir os direitos sobre o programa.

A Figura 4.1 demonstra o gráfico de interesse com o passar do tempo quanto a busca da palavra “sketchup” no Google.com. Fica perceptível o crescimento do gráfico em meados do ano em que o Google adquiriu os direitos sobre o SketchUp. O SketchUp possui versões paga (Pro) e gratuita para uso pessoal (*Make*). A essência das versões é a mesma, e como a cada ano uma nova versão é lançada, as diferenças entre elas também são alteradas. É de se esperar que a versão Pro possua mais funcionalidades, contudo, para a realização deste trabalho foi suficiente e utilizada a sua versão gratuita. Para garantir sua funcionalidade, os requisitos de *hardware* e *software* disponibilizados no site oficial do SketchUp³ informam que a partir de sua versão 2015 os sistemas operacionais

¹Diponível em: <<http://googleblog.blogspot.com.br/2006/03/new-home-for-last-software.html>> Acesso em 22 nov. 2014.

²Disponível em: <<http://sketchupdate.blogspot.com.br/2012/04/new-home-for-sketchup.html>> Acesso em 22 nov. 2014.

³<http://help.sketchup.com/pt-BR/article/36208-0>, acesso em 22-11-14

compatíveis são: Windows 7 e 8, na plataforma da Microsoft, e Mac OS X 10.10, 10.9 e 10.8, na plataforma da Apple, e todos sendo compatíveis com suas versões atualizadas.

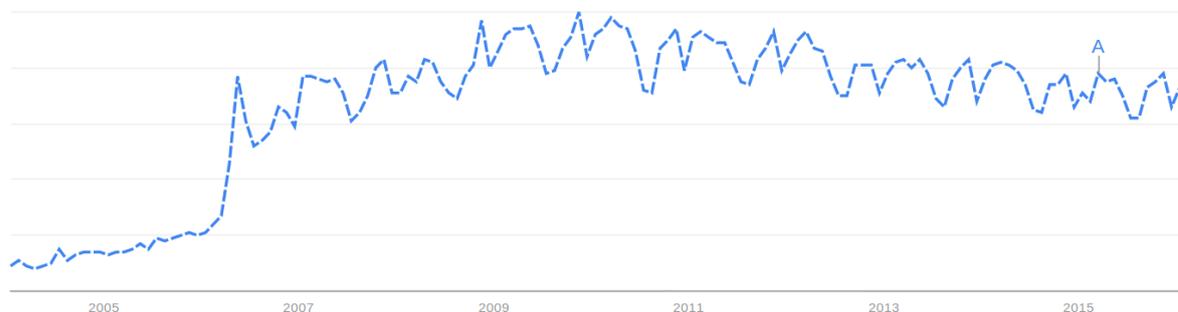


Figura 4.1: Gráfico de crescimento do SketchUp. O eixo horizontal do gráfico representa tempo e o vertical é com que frequência é procurado um termo, globalmente. A partir do ponto “A” o gráfico foi gerado através de previsão por extrapolações de valores passados, que indicam uma tendência de estabilidade. Disponível em: <<http://www.google.com.br/trends/explore#q=sketchup>> Acesso em: 15 dez. 2014

As especificações de uso quanto ao *hardware* não são informadas, devendo ao menos obedecer às recomendações do sistema operacional utilizado. Além disso, fica explícito no *site* oficial do SketchUp que este *software* não tira proveito da existência de mais de um processador, *multi-threading* ou *hyper-threading*, até sua versão 2015.

Hyper-threading é uma tecnologia desenvolvida pela Intel que visa incrementar o desempenho dos processadores através de uma simulação onde um processador físico funcionaria como se existissem dois (Intel, 2014).

Thread é uma sequência de instruções que devem ser executadas pelo processador. Dividir em sequência torna possível o usuário utilizar vários programas ao mesmo tempo, como ouvir música e navegar na Internet por exemplo. Com *multi-thread* é possível executar mais de uma sequência ao mesmo tempo. Como o SketchUp não suporta essa tecnologia pode ocorrer em momentos de intenso uso que o computador fique com um aspecto “congelado”. Isso ocorre porque a sua thread terá que ser executada para só então o processador executar outras que sejam requisitadas, como o tocar música (SunSoft, 1994) (Apple, 2014).

A principal função do SketchUp é modelar qualquer tipo de objeto em 3D, sendo possível expandir a ideia de objeto para lugares. É difícil precisar quais seriam seus limites quanto ao tamanho da modelagem em seu ambiente, sendo também necessário se atentar para as capacidades do *hardware* que o manipula. Exemplos de modelagens podem ser encontrados em área específica no *site* oficial do SketchUp⁴.

As facilidades de criação de modelos 3D no SketchUp são variadas em função de diversos motivos: possui ferramenta como o Empurrar/Puxar, onde a partir de uma superfície é possível criar um volume; utiliza inferência, ajudando a encontrar pontos de extremidade, metade de linhas, paralelismo entre linhas, etc; contém *plugins*⁵ diversos e que podem ser feitos por qualquer usuário; disponibilidade de SketchUp e materiais auxiliares em português e gratuitos.

De todas essas características, a que torna possível a criação de ferramentas são os já citados *plugins*. Para isso, o SketchUp conta com um IDE (Integrated Development Environment ou Ambiente Integrado de Desenvolvimento) baseado na linguagem de programação Ruby (que será abordado na próxima seção), sendo então possível gerar códigos, salvá-los e executá-los quando necessário. Até mesmo existem *plugins* que auxiliam na digitação, execução e gerenciamento dos códigos fontes.

4.1.2 Sobre o Ruby

Ruby é uma linguagem multi-plataforma interpretada que tem muitas características em comum com outras linguagens como Perl e Python. Sua sintaxe é de fácil leitura e se parece com Pascal. As linguagens de programação que mais a influenciaram foram Perl, Smalltalk, Eiffel, Ada e Lisp. Ruby foi criado por Yukihiro Matsumoto (mais conhecido como Matz) e teve sua primeira versão em 1995 (Collingbourne, 2011).

Linguagens mais modernas orientadas a objetos, como Java e C++, têm um maior ou menor grau de recursos de programação orientada a objetos. Contudo, Ruby é completamente orientada a objeto, ou seja, todos os tipos de dados, de um simples número

⁴<https://3dwarehouse.sketchup.com/index.html>

⁵Programa de computador relativamente pequeno que adiciona novos recursos a um *software* publicado por terceiros. Disponível em: <<http://www.businessdictionary.com/definition/plugin.html>> Acesso em: 18 dez. 2015

ou *string* a algo mais complicado como um arquivo ou um módulo, é tratado como um objeto, e quase tudo que se faz com um objeto é feito por algum método⁶. Mesmo operadores, tais como mais (+) e menos (-) são métodos (Collingbourne, 2011).

Na prática, Ruby é uma linguagem bastante simples de ser manipulada. Não há necessidade de tipagem de dados, que é feita automaticamente, nem possui excesso de formalismos como o C++. Para exemplificar sua simplicidade, o famoso “Hello World” será reproduzido em C++ (Algoritmo 4.1) e em Ruby (Algoritmo 4.2). Ambos os códigos produzem o mesmo resultado, sendo exibido na tela o texto *Hello World!*.

```

1 #include <iostream>
2 int main()
3 {
4     std::cout << "Hello World!";
5 }
```

Algoritmo 4.1: “Hello World” na linguagem C++

```

1 puts "Hello World!"
```

Algoritmo 4.2: “Hello World” na linguagem Ruby

Como toda linguagem de programação, o Ruby também possui uma comunidade crescente de programadores. Um popular índice de aferição de popularidade de uma linguagem de programação é o Índice TIOBE (em janeiro de 2015, o Ruby figurou na 15^o posição), que em seu *site* oficial, se descreve da seguinte maneira:

O índice TIOBE Programming Community é um indicador da popularidade de linguagens de programação. O índice é atualizado uma vez por mês. As classificações são baseadas no número de engenheiros qualificados no mundo inteiro, cursos e fornecedores terceirizados. Motores de busca populares, como Google, Bing, Yahoo!, Wikipedia, Amazon, YouTube e Baidu são utilizados para calcular as classificações. É importante notar que o índice TIOBE não é

⁶Método é uma rotina, como uma função, que tem a capacidade de manipular os dados de um objeto. Fonte: Ricarte (2001)

sobre a melhor linguagem de programação ou a língua em que a maioria das linhas de código foram escritas.

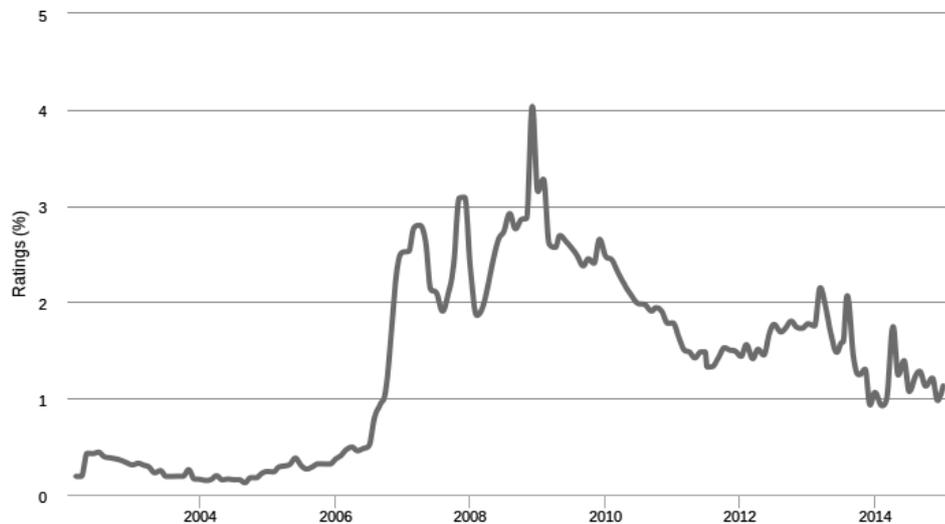


Figura 4.2: Gráfico de variação da porcentagem de participação no índice TIOBE que o Ruby obteve em cada período. Fonte: www.tiobe.com

Essa forte representatividade que o Ruby possui dentre as linguagens de programação produz frutos provenientes de sua ampla aplicação, onde diversos programadores se agrupam em comunidades a fim de trocarem informações. Dentre as várias comunidades existentes, tem-se o World Wide Web Consortium (W3C), que também em seu site oficial⁷ se define da seguinte maneira:

O World Wide Web Consortium (W3C) é uma comunidade internacional na qual as organizações associadas, profissionais de tempo integral, bem como o público em geral, trabalham em conjunto para desenvolver padrões para a Web. Liderado pelo inventor da Web Tim Berners-Lee e Chefe Executivo de Ofício (CEO) Jeffrey Jaffe, a missão do W3C é conduzir a Web ao seu potencial máximo.

É assim que é possível encontrar diversos conteúdos relativos a programação dentro da comunidade W3C. Dentre eles, existe uma área específica para a criação de módulos

⁷Disponível em: <<http://www.w3.org/Consortium/>> Acesso em: 18 dez. 2014.

em Ruby⁸, inclusive no que se refere ao XML Schema. Isso quer dizer que é possível e que também já existem formas de traduzir os dados obtidos em Ruby em estruturas de dados compatíveis com diversos aplicativos, fundamento esse essencial da interoperabilidade, como visto no Capítulo 3.

4.1.3 *SketchUp + Ruby*

Devido às novas possibilidades impostas pelo acréscimo de informação proveniente do ambiente de modelagem do SketchUp, a linguagem Ruby sofreu adaptações para funcionar em associação a este ambiente. É desta forma que neste trabalho não será feita distinção entre SketchUp e Ruby, ambos serão tratados como sendo uma unidade se inter-relacionando para gerar resultados, e como o Ruby foi modificado para ser utilizado pelo SketchUp, e não o contrário, então as referências ao SketchUp serão dadas tanto para o ambiente de modelagem quanto para a programação. Além disso, não cabe aqui comparar o Ruby modificado para o SketchUp com o Ruby puro.

Para ilustrar um dos resultados dessa adaptação, o Algoritmo 4.3 apresenta a introdução das unidades de comprimento, que são métodos para os algarismos. Isso porque, como o SketchUp é um programa de modelagem 3D, se torna necessário especificar uma unidade de comprimento para que um algarismo faça sentido. Não seria coerente dizer que uma parede possui tamanho três, e é por isso que o SketchUp define uma unidade padrão para representar graficamente os resultados. Quando um algarismo é criado e não lhe é atribuída uma unidade de comprimento, ele automaticamente é tido como sendo do tipo ‘polegadas’. Assim, a parede de tamanho três passa por padrão a ser de três polegadas. Com apenas esse exemplo, uma série de embaraços podem ocorrer, como demonstra o Algoritmo 4.3.

```
1 parede1 = 3
2 parede2 = 5.m
3 parede3 = 7.m
4 parede4 = parede1 + parede2
```

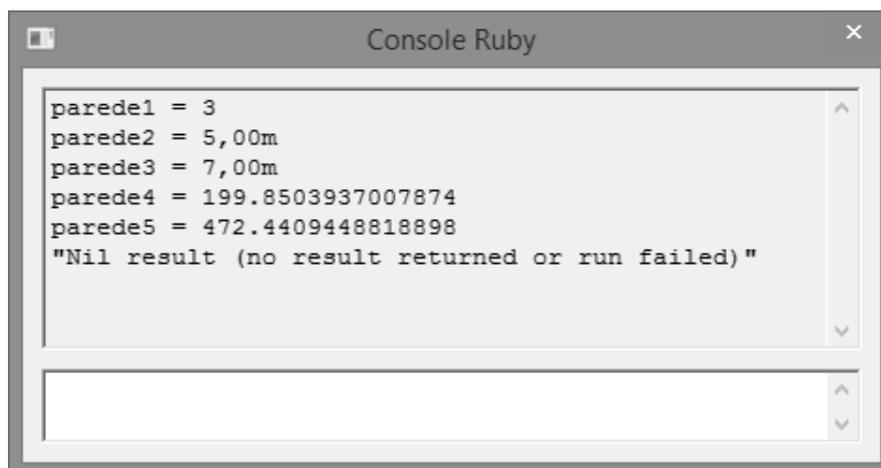
⁸Disponível em: <<http://www.w3.org/TR/ruby-implementation>> Acesso em: 18 dez. 2014.

```
5 parede5 = parede2 + parede3
6 puts "parede1 = "+parede1.to_s
7 puts "parede2 = "+parede2.to_s
8 puts "parede3 = "+parede3.to_s
9 puts "parede4 = "+parede4.to_s
10 puts "parede5 = "+parede5.to_s
```

Algoritmo 4.3: Exemplo do uso de unidades de comprimento.

Como em Ruby até mesmo os números são objetos, esses também têm acesso a métodos que possam modificá-los. Assim, através do operador (.) ponto o objeto número, no exemplo dado, de nomes “parede2” e “parede3”, estão acessando o método “m” que indica que o valor atribuído à variável é do tipo metro. Assim, “parede2” tem cinco metros e da mesma forma “parede3” tem sete metros. A variável “parede5” recebe os valores da soma de “parede2” e “parede3”, onde essas duas últimas estão com valores em metros. Contudo, parede5 não executou o método que altera a sua unidade e, assim, exibe como resultado o valor em polegadas.

Por fim, o método “to_s” nada mais faz do que converter o número em *string*, para que esse possa ser exibido juntamente com o texto. É interessante notar que em nenhum momento foi dito se os valores seriam do tipo inteiro ou real e que ainda assim o próprio Ruby se incumbiu de realizar as alterações necessárias, pois os valores em metro são do tipo inteiro, enquanto que os valores em polegadas estão sendo representados como números reais.

A screenshot of a 'Console Ruby' window. The window title is 'Console Ruby' and it has standard window controls (minimize, maximize, close). The main area contains the following text:

```
parede1 = 3
parede2 = 5,00m
parede3 = 7,00m
parede4 = 199.8503937007874
parede5 = 472.4409448818898
"Nil result (no result returned or run failed)"
```

There is a vertical scrollbar on the right side of the text area, and an empty input field at the bottom of the window.

Figura 4.3: Resultado do exemplo do uso de unidades de comprimento.

A Figura 4.3 exibe o resultado do Algoritmo 4.3 diretamente do Console Ruby, que é parte integrante do SketchUp. Ciente de que o valor de um metro é de aproximadamente 39,3700787 polegadas, fica fácil entender os resultados. A variável `parede4` recebe o valor de 3 polegadas de “`parede1`”, somado a 5 metros de “`parede2`”. Fazendo a conversão, 5 metros valem aproximadamente 196,8503935 polegadas, que somados às 3 polegadas de “`parede1`” resulta em 199,8503935 polegadas. O mesmo processo acontece para “`parede5`”, que recebe dois valores em metros.

A linha final do resultado, entre aspas, informa que o interpretador não encontrou nenhum valor de retorno da função principal. É importante notar a precisão que os números reais (por padrão) tem em Ruby, pois isso fará uma pequena diferença mais adiante.

4.2 Criação do Código

Buscou-se a criação de um algoritmo que possibilite a modelagem 3D de uma construção, através do método LSF, e ainda realizando o cálculo estrutural, exíguo de delimitadores do processo criativo, permitindo uma contínua expansão da produção em computador das ideias que possam ir surgindo durante a concepção do projeto.

Referente à modelagem 3D, é possível criar uma ferramenta onde o próprio usuário seja o responsável pela alocação de painéis, portas e janelas na planta baixa, como em um

jogo de montar. Também é possível automatizar o processo de alocação das partes da estrutura, deixando para o usuário apenas o papel de indicar em que posição os painéis devem ser montados.

Para o cálculo estrutural, existem normas que dão um indicativo de cálculo, mas também existe a teoria que dá origem às normas. Da teoria, é possível alcançar equações complexas e vários métodos numéricos para resolvê-las.

Encontrar limites para o escopo desse trabalho foi um processo dinâmico que não foi previsto com exatidão. Muitos caminhos foram traçados e não percorridos, enquanto outros, até então desconhecidos, foram descobertos ao longo do tempo. E desta forma, o *plugin* foi ganhando conteúdo sempre a passos curtos, buscando manter total controle sobre o que já se possuía, ao mesmo tempo que permitia observar todas as opções possíveis para dar o próximo passo.

Definir um ponto de partida para resolver um problema que agrega tanta informação pode não ser simples. Talvez por isso mesmo, o ponto de partida pode ser aquele mais conhecido, dentro da zona de conforto tão difícil de ser abandonada. Assim, a criação desta ferramenta ocorreu utilizando a programação orientada a objetos (POO), até mesmo porque o Ruby é essencialmente orientado a objetos, como já dito.

Assim que era compreendido um pouco mais sobre o processo construtivo em LSF, mais código era criado, incrementando a ferramenta, que em um determinado momento alcançou a capacidade de gerar painéis, portas e janelas sobre uma planta baixa desenhada no SketchUp. A essa altura, até mesmo um artigo⁹ foi publicado.

Ao passar do tempo, o amadurecimento do código não acompanhou o ritmo de absorção de informação sobre o LSF. A POO não mais parecia ser uma ideia muito eficiente, porque passaram a existir dados inúteis, que eram justamente os objetos criados em Ruby. O problema ocorreu pelo modo como o algoritmo estava sendo implementado e em momento algum deve ser entendido como sendo um problema devido à POO.

⁹BASTOS, F. S. ; FARAGE, M. C. R. ; Alves, J H G ; Mendes, R. J. ; Resende, N. S. R. . Desenvolvimento de uma Ferramenta de Modelagem Paramétrica para Projetos em Sistema Construtivo Estruturado em Perfis Metálicos. *Mecânica Computacional*, v. XXXIII, p. 2527, 2014.

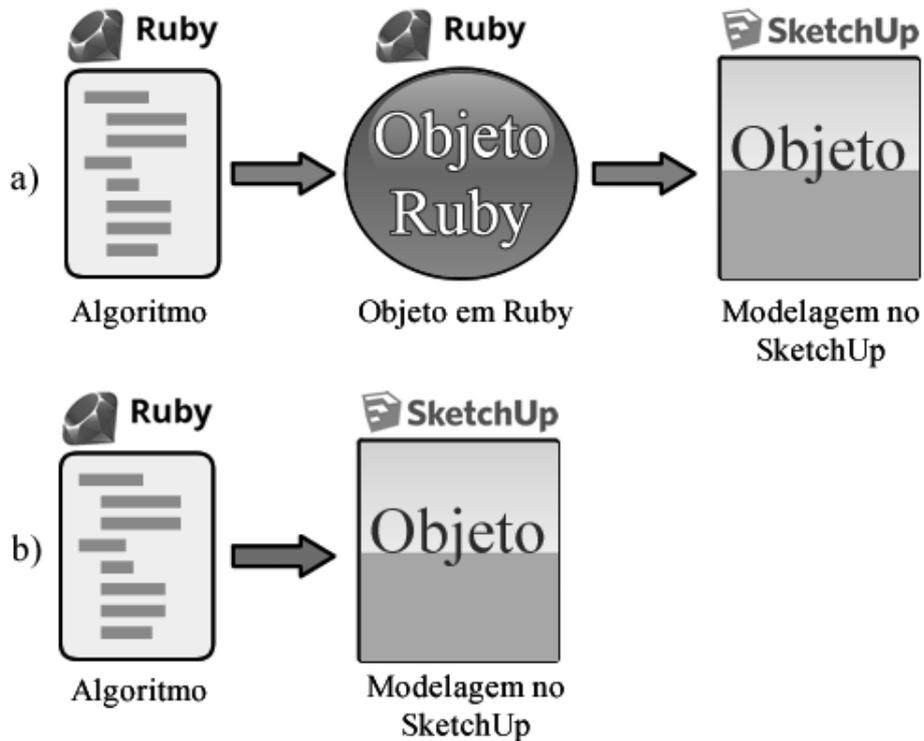


Figura 4.4: Processos de modelagem 3D. a) O código em Ruby gera um objeto, e este objeto é o responsável pela modelagem do desenho 3D. b) O código em Ruby gera diretamente um desenho 3D.

A explicação reside no fato de que tudo que é exibido no SketchUp também é um objeto. Linhas, faces, grupos de linhas e faces são tidos como sendo objetos, mas sem possuir a mesma estrutura computacional que um objeto em linguagem Ruby tem, apesar de serem capazes de possuir as mesmas características.

Por exemplo, o código gera um objeto do tipo porta, que contém atributos como altura, largura, perfis utilizados. Esses dados são então utilizados para modelar essa porta em 3D, que obviamente receberá os mesmos atributos e que também podem ser acessados pelo código, caso seja necessário. Daí percebeu-se que os objetos criados em Ruby davam origem aos objetos do SketchUp e depois permaneciam inertes no código, apenas ocupando espaço na memória do computador.

A Figura 4.4 demonstra graficamente, e de forma resumida, em a) a forma na qual a ferramenta estava sendo implementada, e em b) a maneira em que se encontra atualmente, que de modo informal pode ser entendida como sendo “programação orientada

a SketchUp”.

4.3 Sobre o *plugin* LSF-UFJF

O *plugin* tem um funcionamento simplificado para o usuário, bastando que esse desenhe uma planta baixa no SketchUp. Porém esse desenho deve obedecer algumas regras e o usuário precisa estar atento para alguns itens:

1 - O desenho arquitetônico de portas (Figura 4.5) e janelas (Figura 4.6) não segue o padrão. Devem ser desenhadas conforme Figura 4.7;

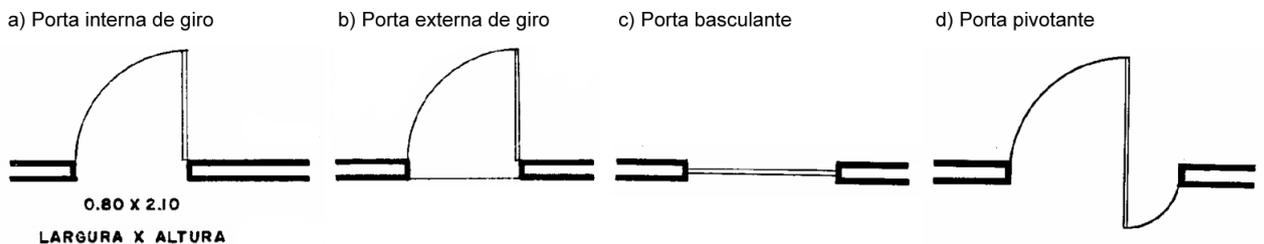


Figura 4.5: Alguns desenhos arquitetônicos de portas. Adaptado de:Montenegro (1978).

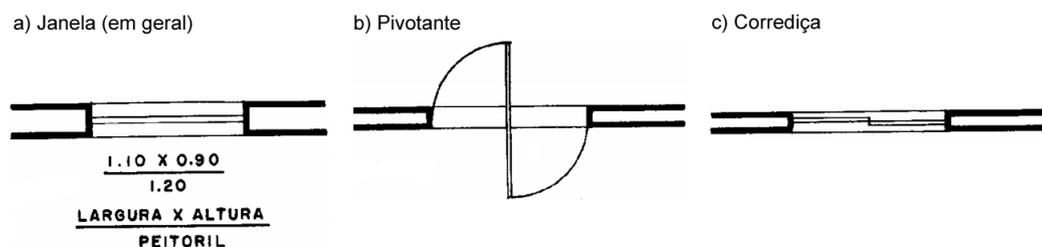


Figura 4.6: Alguns desenhos arquitetônicos de janelas. Adaptado de:Montenegro (1978).

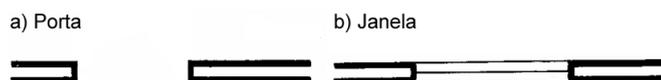


Figura 4.7: Desenho arquitetônico de porta e janela conforme o *plugin*.

2 - A planta baixa nunca pode fazer contato com um dos eixos, e deve estar na cota $z = 0$;

3 - As linhas não podem ter pontos de interrupção, como demonstra a Figura 4.8;

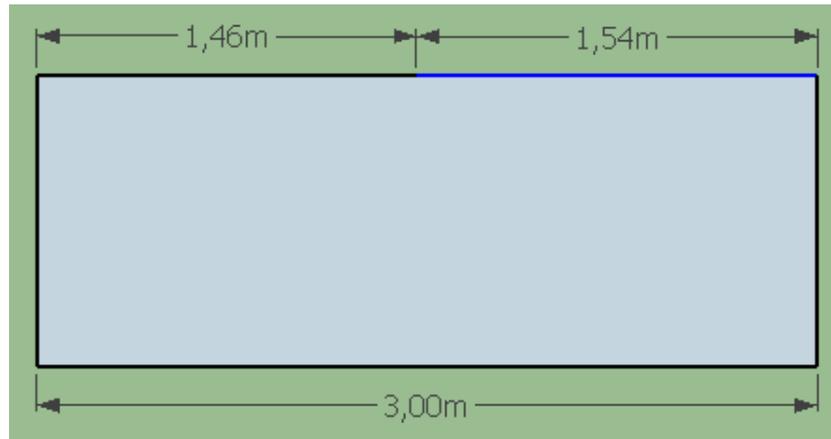


Figura 4.8: Exemplo de uma linha que tem algum tipo de interrupção. A linha de três metros da parte inferior do desenho é contínua, enquanto a da parte superior está dividida em duas partes.

4 - Espessura da parede não é a espessura final, mas sim a do perfil U utilizado.

O *plugin* dá algumas opções de seções de perfis U e Ue sendo todos com largura de 92 milímetros. Contudo, o próprio usuário pode editar o arquivo onde estão listados os perfis e acrescentar ou retirar o que achar conveniente, apenas seguindo o padrão estabelecido, que foi separar em linhas as diferentes seções transversais e em colunas suas respectivas propriedades. A Tabela 4.1 lista todos os perfis do tipo U presentes no *plugin* e a Figura 4.9 apresenta a forma com que esses dados estão organizados no arquivo “perfis_u.txt” para que o *plugin* possa encontrá-los.

Perfil			Dimensões			Eixo X					Eixo Y					
U	m	A	bw	bf	tn	Ix	Wx	rx	xg	x0	Iy	Wy	ry	It	Cw	r0
	kg/m	cm2	mm	mm	mm	cm4	cm3	cm	cm	cm	cm4	cm3	cm	cm4	cm6	cm
92x38x0,80	1,04	1,32	92	38	0,80	16,82	3,66	3,57	0,90	2,19	1,87	2,09	1,19	0,0028	27,47	4,35
92x38x0,95	1,23	1,57	92	38	0,95	19,69	4,28	3,55	0,90	2,18	2,20	2,45	1,19	0,0047	32,32	4,33
92x38x1,25	1,61	2,05	92	38	1,25	25,19	5,48	3,51	0,92	2,18	2,86	3,13	1,18	0,0107	41,75	4,30
92x38x1,55	1,98	2,53	92	38	1,55	30,35	6,60	3,47	0,93	2,18	3,50	3,77	1,18	0,0202	50,82	4,26
92x38x2,25	2,84	3,61	92	38	2,25	41,18	8,96	3,38	0,96	2,16	4,92	5,13	1,17	0,0610	70,65	4,17
92x38x2,46	3,09	3,93	92	38	2,46	44,10	9,59	3,35	0,97	2,15	5,33	5,50	1,16	0,0794	76,24	4,15
92x38x2,65	3,31	4,22	92	38	2,65	46,62	10,14	3,32	0,98	2,15	5,69	5,83	1,16	0,0988	81,16	4,12
92x38x3,00	3,72	4,74	92	38	3,00	50,97	11,08	3,28	0,99	2,14	6,34	6,39	1,16	0,1423	89,88	4,08

Tabela 4.1: Perfis U disponíveis no *plugin*. Fonte: Foi em um arquivo pré norma.

The image shows a screenshot of a text editor window titled "perfil_u.txt - Bloco de notas". The window contains a table with 17 columns and 9 rows of data, matching the data in Table 4.1. The columns are: Perfil, m, A, bw, bf, tn, Ix, Wx, rx, xg, x0, Iy, Wy, ry, It, Cw, and r0. The rows represent different U-profile dimensions from 92x38x0.80 to 92x38x3.00.

Perfil	m	A	bw	bf	tn	Ix	Wx	rx	xg	x0	Iy	Wy	ry	It	Cw	r0
92x38x0.80	1.04	1.32	92	38	0.8	16.82	3.66	3.57	0.9	2.19	1.87	2.09	1.19	0.0028	27.47	4.35
92x38x0.95	1.23	1.57	92	38	0.95	19.69	4.28	3.55	0.9	2.19	2.2	2.45	1.19	0.0047	32.32	4.33
92x38x1.25	1.61	2.05	92	38	1.25	25.19	5.48	3.51	0.92	2.18	2.86	3.13	1.18	0.0107	41.75	4.3
92x38x1.55	1.98	2.53	92	38	1.55	30.35	6.6	3.47	0.93	2.18	3.5	3.77	1.18	0.0202	50.82	4.26
92x38x2.25	2.84	3.61	92	38	2.25	41.18	8.96	3.38	0.96	2.16	4.92	5.13	1.17	0.061	70.65	4.17
92x38x2.46	3.09	3.93	92	38	2.46	44.1	9.59	3.35	0.97	2.15	5.33	5.5	1.16	0.0794	76.24	4.15
92x38x2.65	3.31	4.22	92	38	2.65	46.62	10.14	3.32	0.98	2.15	5.69	5.83	1.16	0.0988	81.16	4.12
92x38x3.00	3.72	4.74	92	38	3	50.97	11.08	3.28	0.99	2.14	6.34	6.39	1.16	0.1423	89.88	4.08

Figura 4.9: Conteúdo do arquivo de tipo txt que contém os dados do perfil u.

Para o cálculo estrutural, esse consistirá em encontrar a situação mais desfavorável para a resistência. Em outras palavras, o *plugin* encontra a situação de maior solicitação de cargas e avalia, a partir disso, se a construção é passível de ser viável ou não, fazendo apenas um pré-cálculo estrutural, não dando ainda nenhuma garantia de que os valores encontrados são representações isentas de erros.

A cobertura será sempre de duas águas, simétrica quando a planta baixa for em formato retangular. Quando não for o caso e a planta baixa apresentar um desenho irregular, a cobertura irá acompanhar a irregularidade.

São averiguadas as solicitações e resistências da empena, pendural, viga e montante. A Figura 4.10 demonstra a localização de cada uma dessas peças, sendo todas com seção do tipo Ue e consideradas bi rotuladas, uma vez que contraventamentos não farão parte dos cálculos nesse *plugin*.

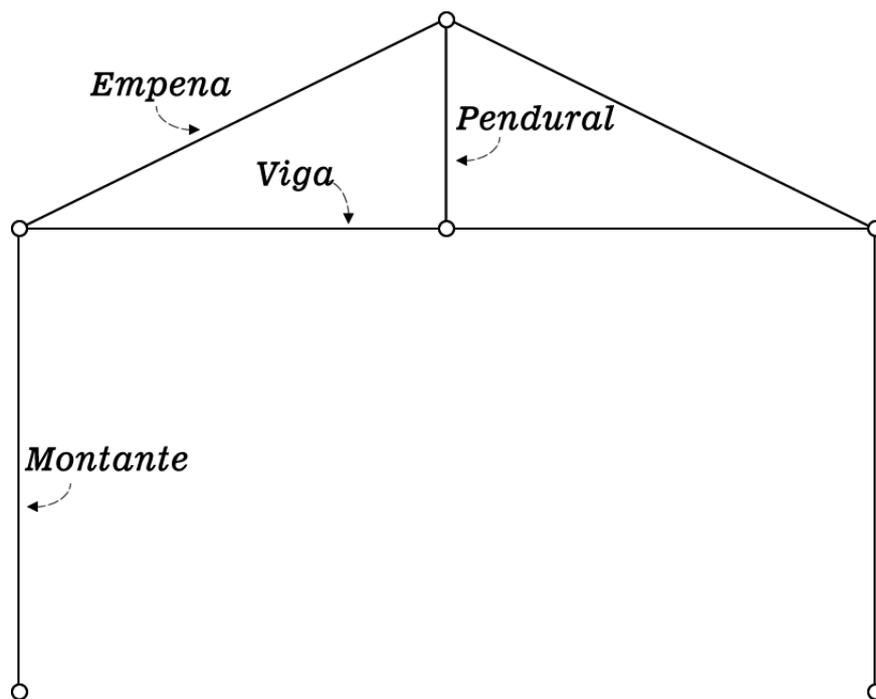


Figura 4.10: Peças constituintes da estrutura.

Empena e viga serão calculadas a esforço de flexão, enquanto que pendural e montante serão avaliados quanto à compressão. Em se tratando de um cálculo que visa encontrar a pior situação, será calculada uma unidade de cada peça, sendo o beiral, pendural e viga de maiores extensões e o montante que sustenta essa maior viga.

4.4 Estrutura do código

Como já explicitado, o código teve seu início focado na POO e posteriormente foi alterado para o que foi chamado de “programação orientada a SketchUp”. Isso porque a implementação passou a ser direcionada para a criação dos modelos 3D e, de forma simplificada, teve o código dividido em módulos que exercem papéis independentes. O funcionamento é simples: como o ponto de partida do *plugin* é um simples desenho da planta baixa no SketchUp, as únicas informações disponíveis são as linhas do desenho e alguns dados informados pelo usuário. Assim, um código foi criado para analisar essas linhas e avaliar a sua representação (painel, porta ou janela) e localização juntamente com os dados.

As Figuras 4.12 apresentam, em resumo, os fluxogramas de funcionamento do *plugin*. Ao dar início ao processo de modelagem da estrutura, o *plugin* inicialmente solicita ao usuário algumas informações, como quantidade de diferentes tamanhos de portas e janelas, os perfis U e Ue que serão utilizados, pé direito, inclinação do telhado, etc. Esses dados são armazenados e uma nova verificação é feita, identificando as propriedades geométrica e física dos perfis, bem como cálculos que servirão de apoio para o *plugin*.

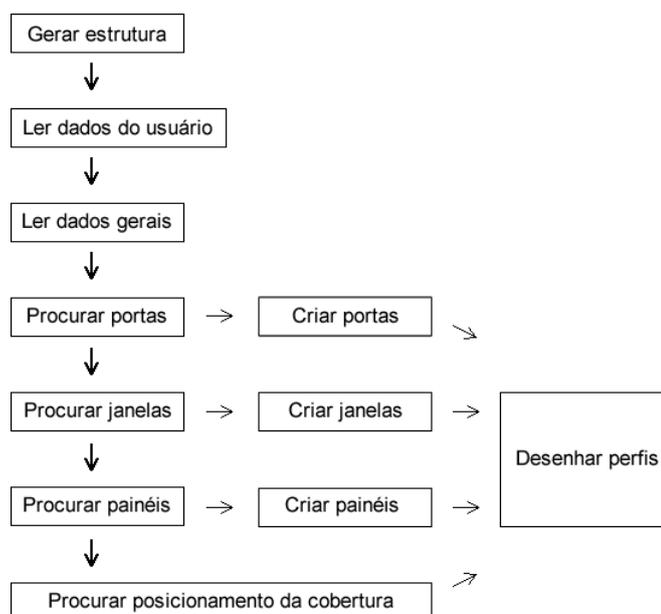


Figura 4.11: Sequência de ações realizadas pelo *plugin* para gerar a modelagem 3D.

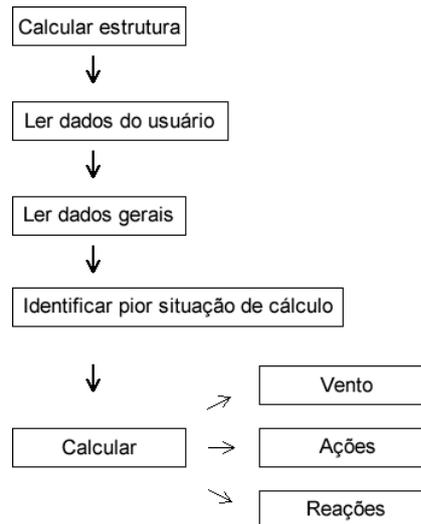
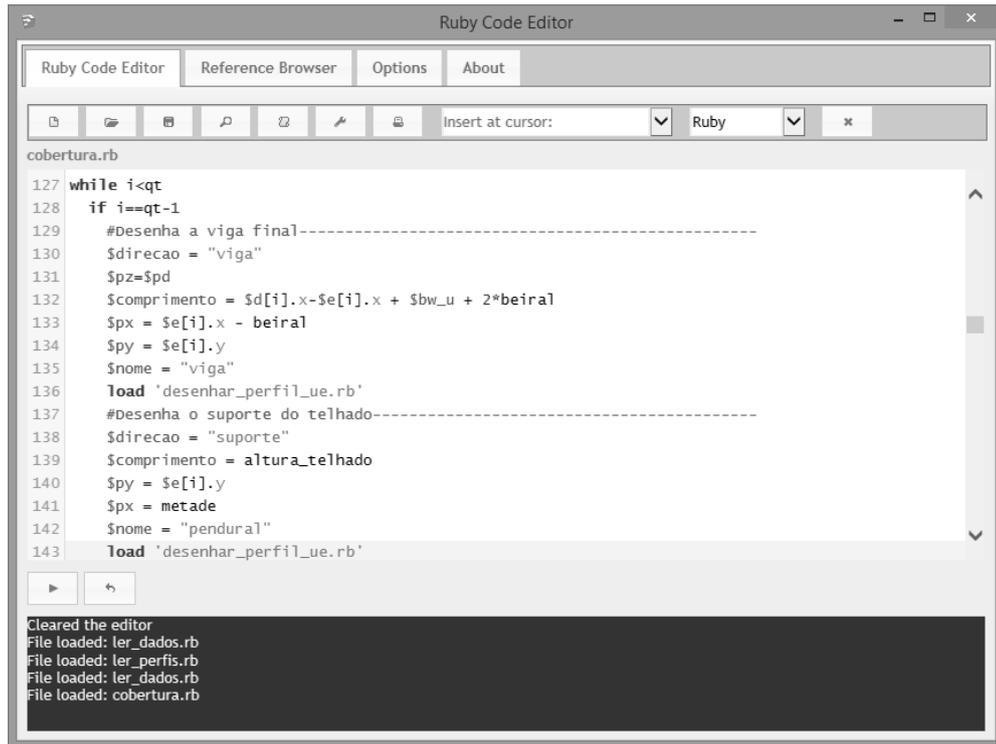


Figura 4.12: Sequência de ações realizadas pelo *plugin* para realizar o pré cálculo estrutural.

As identificações de portas, janelas, painéis e cobertura ocorrem a partir das linhas desenhadas que formam a planta baixa. Uma vez encontradas, essas estruturas são montadas utilizando os dados já definidos nas leituras de dados. Após isso o *plugin* busca a configuração mais desfavorável para a resistência estrutural, identifica suas componentes e realiza os devidos cálculos.

A Figura 4.13 demonstra o aspecto do ambiente de desenvolvimento utilizado, que ocorreu através do uso de um *plugin* do SketchUp no gerenciamento de códigos, o *Ruby Code Editor*. Já o Algoritmo 4.4 exhibe na íntegra o algoritmo responsável por gerar um único perfil U.



```

Ruby Code Editor
Ruby Code Editor Reference Browser Options About
Insert at cursor: Ruby
cobertura.rb
127 while i<qt
128   if i==qt-1
129     #Desenha a viga final-----
130     $direcao = "viga"
131     $pz=$pd
132     $comprimento = $d[i].x-$e[i].x + $bw_u + 2*beiral
133     $px = $e[i].x - beiral
134     $py = $e[i].y
135     $nome = "viga"
136     Load 'desenhar_perfil_ue.rb'
137     #Desenha o suporte do telhado-----
138     $direcao = "suporte"
139     $comprimento = altura_telhado
140     $py = $e[i].y
141     $px = metade
142     $nome = "pendural"
143     Load 'desenhar_perfil_ue.rb'

```

```

Cleared the editor
File loaded: ler_dados.rb
File loaded: ler_perfis.rb
File loaded: ler_dados.rb
File loaded: cobertura.rb

```

Figura 4.13: Parte do código em Ruby para criação da cobertura.

```

1 model = Sketchup.active_model
2 entities = model.entities
3
4 #Montar perfil U (guia)-----
5 #Cria pontos para o desenho da peça.
6 pt1 = [0, 0, 0]
7 pt2 = [$bf_u, 0, 0]
8 pt3 = [$bf_u, $t_u, 0]
9 pt4 = [$t_u,$t_u, 0]
10 pt5 = [$t_u, ($bw_u-$t_u), 0]
11 pt6 = [$bf_u, ($bw_u-$t_u), 0]
12 pt7 = [$bf_u, $bw_u, 0]
13 pt8 = [0, $bw_u, 0]
14
15 #Desenha a peça.
16 new_face = entities.add_face pt1, pt2, pt3, pt4, pt5, pt6, pt7,

```

```

    pt8
17 new_face.pushpull -$comprimento
18 #Uma peça é formada por pontos e faces.
19 #Esse grupo une as partes de uma peça.
20 grupo = entities.add_group new_face.all_connected
21
22 #Rotaciona a peça. (os valores são acumulativos)
23 #Deixa a guia voltada para cima
24 if ($direcao.eql? "cima")
25     r1 = Geom::Transformation.rotation [0, 0, 0], [0, -1, 0], 90.
        degrees
26     grupo.entities.transform_entities r1, grupo
27     t1 = Geom::Transformation.translation [$comprimento, 0, 0]
28     grupo.entities.transform_entities t1, grupo
29     #Posiciona a peça em um determinado local.
30     t2 = Geom::Transformation.translation [$px, $py, $pz]
31     grupo.entities.transform_entities t2, grupo
32 end
33 #Deixa a guia voltada para baixo
34 if ($direcao.eql? "baixo")
35     r2 = Geom::Transformation.rotation [0, 0, 0], [0, -1, 0], 270.
        degrees
36     grupo.entities.transform_entities r2, grupo
37     #Posiciona a peça em um determinado local.
38     t2 = Geom::Transformation.translation [$px, $py, $pz]
39     grupo.entities.transform_entities t2, grupo
40 end

```

Algoritmo 4.4: Algoritmo responsável por gerar um perfil U.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

A integração de diferentes áreas do conhecimento é um fator essencial para o refinamento da produção de qualquer atividade. Quando se busca aprimorar um produto/serviço, muito provavelmente será preciso recorrer a informações de diversas fontes, e não mais só aquela que diretamente está ligada à sua realização.

Nenhuma grande mudança pode ocorrer se não enveredar na junção de conhecimentos variados. Foi com esse pensamento que este trabalho foi norteado e muitos novos conceitos foram unidos para dar corpo a esta ideia. De início, tem-se o princípio de que a construção civil tem a capacidade de realizar os mesmos feitos da indústria em geral, sendo racional ao ponto de reduzir o uso de técnicas manuais na produção de seus componentes construtivos.

O próprio aprimoramento da construção civil está atrelado à computação, uma vez que o computador é uma ferramenta essencial no gerenciamento de informações, sejam dados financeiros, de cálculos e geração de todo tipo de desenhos. Além disso, o surgimento de novos métodos construtivos ao encontrar a barreira da incredulidade, pode se beneficiar das tecnologias computacionais ao realizar simulações atestando seus benefícios ao demonstrar resultados que apresentam sua eficiência.

O aço, além de ser um material totalmente reciclável, parece ser uma ideia acertada na busca de manter o equilíbrio na industrialização da construção civil, por ser um material que possui alta resistência estrutural, bem como permite que haja produção em série de seus perfis. Dessa produção serial é possível prever quais os perfis podem ser utilizados na construção, gerando um catálogo de opções disponíveis, dando continuidade a esse processo industrial na construção das edificações.

Programar para o SketchUp demanda atenção especial em função de sua característica de modelar objetos em 3D, que por padrão adota a unidade de medida em polegadas. Neste caso, é extremamente importante se ater para os possíveis erros de conversão de

unidade quando o caso requisitar muita precisão numérica. Além disso, os desenhos em SketchUp são todos tratados como sendo objetos, possuindo atributos individuais, passíveis de serem manipulados em código Ruby.

É muito simples gerenciar os dados no SketchUp e, graças às suas atualizações anuais, novas implementações são nativamente agregadas e seus comandos são disponibilizados em seu site oficial¹, e à linguagem Ruby, por possuir grande versatilidade.

Todos esses aspectos contribuíram para tornar o *plugin* uma ferramenta simples de ser utilizada. Essa simplicidade se traduziu em uma grande liberdade para o usuário, como por exemplo, sendo possível desenhar uma planta baixa com quaisquer dimensões, e assim, uma parede de tamanho 3,82019 metros pode ser criada. Contudo, como todos os números são primariamente em polegadas e depois convertidos para alguma outra unidade, ao criar números que dependam de várias casas decimais, durante a conversão pode ocorrer perda de casas decimais, ocasionando na falta de precisão dos desenhos.

Para o cálculo estrutural essa liberdade ofertada pelo *plugin* não exerce nenhuma influência, já que os valores de resistência e solicitação da estrutura não dependem de precisão com muitas casas decimais.

Como resultado, o *plugin* apresenta funcionamento satisfatório nas versões 2014 e 2015 do SketchUp, uma vez que com essa ferramenta gratuita se criam modelos 3D de construções em LSF e se efetuam pré-cálculos estruturais. Esta modelagem já apresenta algumas características do BIM em se tratando de parametrização e interoperabilidade, já que faz uso de uma linguagem capaz de ser traduzidas pelas linguagens esquemas.

Espera-se que com o uso do *plugin* se exponha a facilidade em criar projetos no sistema construtivo LSF e sirva de motivação para a contínua utilização de recursos computacionais, sobretudo a programação.

¹Disponível em: <<http://www.sketchup.com/intl/en/developer/docs/classes>> Acesso em: 11 jan. 2015

5.2 Proposta para trabalhos futuros

Como consequência deste trabalho, várias extensões são sugeridas:

- Como no LSF existem diversas formas para a montagem da estrutura, é interessante criar algoritmos que englobem essas diversas possibilidades, podendo dar ao usuário a opção de escolher a forma que mais lhe agradar, quando o caso permitir;
- Possibilitar a construção de mais de um pavimento, introduzindo a escada e suas possibilidades;
- Modularizar a construção, prevenindo o usuário de entrar com valores que requeiram números reais com muitas casas decimais;
- Criar ferramentas para gerar painéis, portas e janelas. Por exemplo, o usuário seleciona a ferramenta “gerar painel” e no ambiente de desenho do SketchUp clica em um determinado ponto, arrasta o *mouse* até um outro ponto, solta o botão e o *plugin* gera o painel. Isso traria a vantagem de já criar um painel sem ter que gastar recursos computacionais para encontrar sua posição de montagem;
- Realizar o cálculo estrutural com mais precisão, avaliando todos os componentes, inclusive as fundações. Além disso, também é possível utilizar métodos numéricos em substituição às formulações normatizadas;
- Dar ênfase na apresentação da modelagem, deixando-a mais amigável e com a presença de elementos de fechamento;
- Gerar uma base de dados em linguagem esquemática no SketchUp e importá-la em um outro aplicativo, dando início à interoperabilidade.

É também importante atentar novamente para a POO. Para este trabalho, foi mais produtivo criar um método onde os dados de entrada são analisados, posteriormente dando origem aos desenhos em SketchUp, que possuem atributos tais quais os objetos da POO. Contudo, não há aqui qualquer afirmação sobre qual método é o mais eficiente para gerar um *plugin* como o que foi implementado. Assim, também fica a proposta de implementar um algoritmo baseado na POO.

Referências

- ABCP, 2014. Cimento portland - perguntas frequentes. <http://www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php?id=31>, acesso em: 02 dez. 2014.
- ABRELPE, 2013. Panorama dos resíduos sólidos no brasil. <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>, acesso em: 01 dez. 2014.
- Almeida, S. J. d. C., 2007. Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas, USP.
- Angst, A. J., 2003. Estudo crítico das metodologias de cálculo para perfis dobrados a frio de vigas tipo canal sem enrijecedores de borda. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Apple, 2014. Threading programming guide.
- Azeredo, H. A. d., 1977. O Edifício até sua Cobertura, 2nd Edition. Edgard Blücher, São Paulo.
- Barros, M. M. B. d., Sabbatini, F. H., 2003. Diretrizes para o processo de projeto para a implantação de tecnologias construtivas racionalizadas na produção de edifícios. Tech. rep.
- Brasilit, 2014. Construção industrializada. Tech. rep.
- Burrows, J., 2014. Canadian wood-frame house construction. Central Mortgage and Housing Corporation.

- CBIC, 2014. Boletim estatístico: Indicadores da construção civil. http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/boletim_ano10n05.pdf, acesso em: 02 dez. 2014.
- Chajes, A., 1974. Principles of structural stability theory. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Chodraui, G. M. d. B., 2006. Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Collingbourne, H., 2011. The Book of Ruby: A Hands-On Guide for the Adventurous, 1st Edition. No Starch Press, San Francisco, CA.
- Conceição, C. S., 2012. Da revolução industrial à revolução da informação: Uma análise evolucionária da industrialização da América Latina. Tese de doutorado, Faculdade de Ciências Econômicas, UFRGS.
- Crasto, R. C. M. d., 2005. Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: Light steel framing. Ph.D. thesis, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil–Construção Metálica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- CSSBI, 2002. Lightweight steel framing - architectural design guide. Tech. rep.
- Dôres, A. G. R. d., 2014. Análise de elementos estruturais com seção transversal de parede fina aberta ramificada utilizando a teoria generalizada das vigas. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, UFOP.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K., 2011. BIM Handbook, second edition Edition. Editora John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Futureng, 2014. Light steel frame - engenharia e projecto. <http://www.futureng.pt/>, acesso em: 05 dez. 2014.
- Grossi, L. G. F., Malite, M., 2013. Procedimento simplificado para cálculo do momento fletor resistente de instabilidade distorcional em perfis u e z enrijecidos. Revista da Estrutura de Aço 2 (2), 115–125.

- Hachich, W., Falconi, F. F., Saes, J. L., Frota, R. G. Q., Carvalho, C. S., Niyama, S., 1998. Fundações: teoria e prática, 2nd Edition. Pini, São Paulo.
- Harris, J., 2009. Integration of bim and business strategy.
- Intel, 2014. Tecnologia hyper-threading intel. <http://www.intel.com.br/content/www/br/pt/architecture-and-technology/hyper-threading/hyper-threading-technology.html>, accessed: 2014-12-05.
- Javaroni, C. E., 1999. Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: análise teórico-experimental. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Melhado, S. B., 1994. Qualidade do projeto na construção de edifícios: aplicação ao caso das empresas de incorporação e construção. Ph.D. thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- Mezzomo, G. P., 2012. Análise de flambagem de perfis formados a frio utilizando modos puros de deformação.
- Modularis, 2014. Construções modulares - módulos standard. <http://www.modularis.com.br/linhas-de-produtos/modulos-standard/>, acesso em: 05 dez. 2014.
- Moller, A., Schwartzbach, M., 2006. An Introduction to XML and Web Technologies. Addison-Wesley.
- Montenegro, G. A., 1978. Desenho Arquitetônico. Edgard Blucher Ltda, São Paulo - SP - Brasil.
- Moreira, T. P. F., 2008. A influência da parametrização dos softwares cadd arquiteturais no processo de projeção arquitetônica. Dissertação de mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Universidade de Brasília.
- Pereira, C. J., 2004. Edifícios de pequeno porte contraventados com perfis de chapa fina de aço. Ph.D. thesis, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

- Pinheiro, A. C. d. F. B., 2007. Estruturas Metálicas - Cálculos, detalhes exercícios e projetos, 2nd Edition. Blucher, São Paulo - SP - Brasil.
- Pizzi, M., 2003. The invention of the ballon frame how it affected architecture in the new world: the case of chile. In: Proceedings of the First International Congress on Construction History: Madrid, 20th-24th january 2003. Instituto Juan de Herrera, pp. 1639–1648.
- Ricarte, I. L. M., 2001. Programação orientada a objetos: Uma abordagem com java.
- Rodrigues, F. C., 2006. Steel Framing: Engenharia. Instituto Brasileiro de Siderurgia/Centro Brasileiro da Construção em Aço, Rio de Janeiro.
- Rondal, J., Würker, K. G., Dutta, D., Wardenier, J., Yeomans, N., 1996. Structural stability of hollow sections. Verlag TÜV Rheinland.
- Santiago, A. K., Freitas, A. M. S., Crasto, R. C. M. d., 2012. Steel Framing: Arquitetura, 2nd Edition. Instituto Aço Brasil/CBCA, Rio de Janeiro.
- Santos, W. J. d., Branco, L. A. M. N., Abreu Filho, J. V. d., 2013. Compatibilização de projetos: análise de algumas falhas em um edificação pública 1, 1–16.
- Santos, W. S., 2002. Interação flambagem global–flambagem local em pilares metálicos de seção i duplamente simétricos sob compressão uniforme. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Silva, E. L., Pierin, I., Silva, V. P. e., 2014. Estruturas compostas por perfis formados a frio - dimensionamento pelo método das larguras efetivas e a aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012. Instituto Aço Brasil / CBCA, Rio de Janeiro.
- Silva, J. J. P. B. D., 2011. Vidas úteis em elementos da construção em edifícios habitacionais. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.

Sousa Junior, A. M. d., Maia, C. C. L. L., Azevedo, P. R. P. d., 2014. CompatibilizaÇÃo de projeto arquitetônico, estrutural e sanitário: Uma abordagem teórica e estudo de caso. *Revista Monografias Ambientais* 14 (2), 3236–3244.

SunSoft, 1994. *Multithreaded programming guide*.

Tarrafá, D. G. P., 2012. Aplicabilidade prática do conceito bim em projetos de estruturas. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra.

TCU, 2013. Relatório de auditoria - minha casa minha vida. Tech. rep.

Troian, A., 2010. Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons de cloreto. Dissertação de mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Yu, W.-W., 2000. *COLD-FORMED STEEL DESIGN*, 3rd Edition. Editora John Wiley & Sons, Inc., New York - NY.

APÊNDICE A - APLICAÇÕES

Com o intuito de verificar os resultados obtidos pelo *plugin*, foi empregado um problema teste, que foi resolvido também manualmente. É importante ter ciência de que o código abrange plantas baixas de diversas configurações, sendo impraticável testar todas suas combinações. Uma simples planta baixa, por exemplo, pode ser definida de variadas formas, tamanhos, com quantidades diversas de portas, janelas, etc.

No caso manual, todos os resultados, bem como os processos utilizados para encontrá-los, estão transcritos neste capítulo. Neste caso foi utilizada a calculadora de marca Casio, modelo fx-82MS, que possui dez dígitos para representar um número. Tentou-se manter todas as casas decimais encontradas nos cálculos, a fim de mitigar as diferenças de resultados encontrados através da ferramenta devido à grande capacidade de precisão com a qual um número real é representado pelo computador.

A.1 Considerações Iniciais

Uma planta baixa de uma residência qualquer foi criada, sem nenhum critério para os cômodos, com dimensões aleatórias, visando desvincular essa planta baixa de quaisquer vícios de medidas a fim de obter comprimentos propositalmente irregulares. Apenas a espessura da parede (aqui tanto as paredes internas como externas possuem a mesma espessura) foi mantida constante em 92 milímetros. Essa espessura diz respeito à dimensão dos PFF utilizados, e não à espessura final da parede. As dimensões dos PFF utilizados estão na Tabela A.1.

Uma vez que a planta baixa foi criada (Figuras A.1 e A.2), necessário também se fez estabelecer a dimensão do pé direito (arbitrado em 3000 milímetros), espaçamento entre montantes (definido como 400 milímetros) e a inclinação do telhado. Quanto a este último, é corrente encontrar catálogos de produtos para o telhado utilizando a porcentagem como valor de inclinação, mesmo porque é mais simples obter no canteiro de obras o valor

percentual ao valor da inclinação em graus. É desta forma que a ferramenta proposta tem como entrada de dados para a inclinação o seu valor percentual. Contudo, será adotada a inclinação em ângulo de 20° no exemplo criado. O resumo das dimensões do exemplo a ser analisando é apresentado na Figura A.3.

Os demais valores relativos à dimensão da seção e às propriedades do aço utilizado estão dispostos na Tabela A.2 e A.3, respectivamente.

	$b_w(mm)$	$b_f(mm)$	$D(mm)$	$t_n(mm)$	$Area(cm^2)$
Perfil U	92	38	-	0,80	1,32
Perfil Ue	90	40	12	0,80	1,41

Tabela A.1: Perfis utilizados para compor a estrutura.

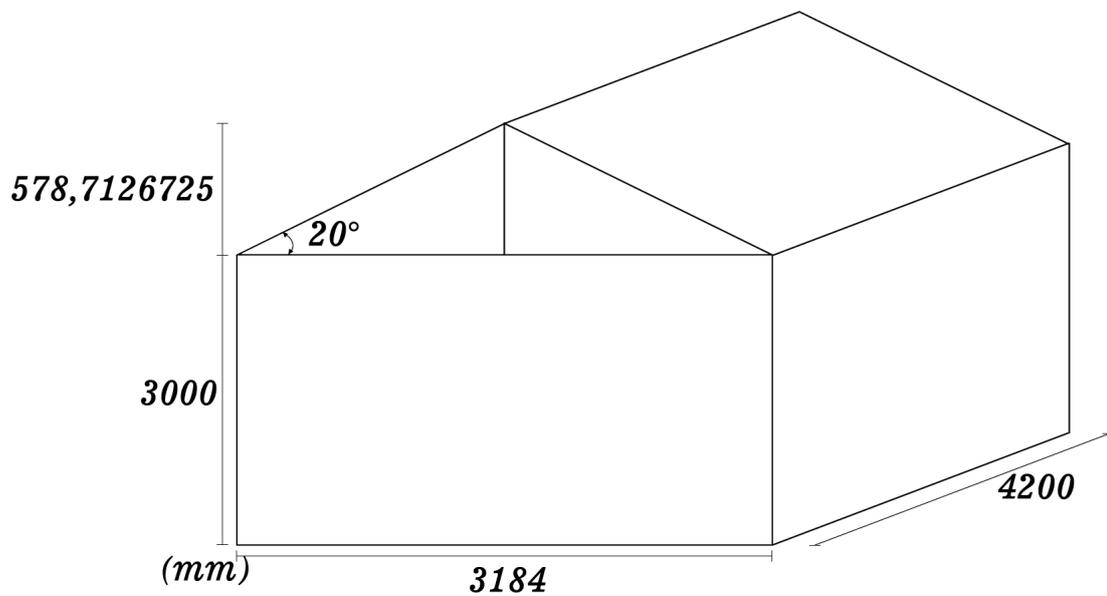


Figura A.3: Dimensões da construção proposta.

O tamanho da empena foi calculado dividindo 1.592 milímetros pelo cosseno de 20° , obtendo o valor de 1.694,171014 milímetros.

A Figura A.4 apresenta a modelagem 3D dessa edificação em Revit, que é um *software* de projeto de edificações e construção, sendo definido em seu *site*¹ oficial no Brasil como:

O *software* de projeto de construção AutoCAD Revit foi desenvolvido especificamente para a Modelagem de Informação da Construção (BIM),

¹<http://www.autodesk.com.br/products/revit-family/overview>, 01-02-15

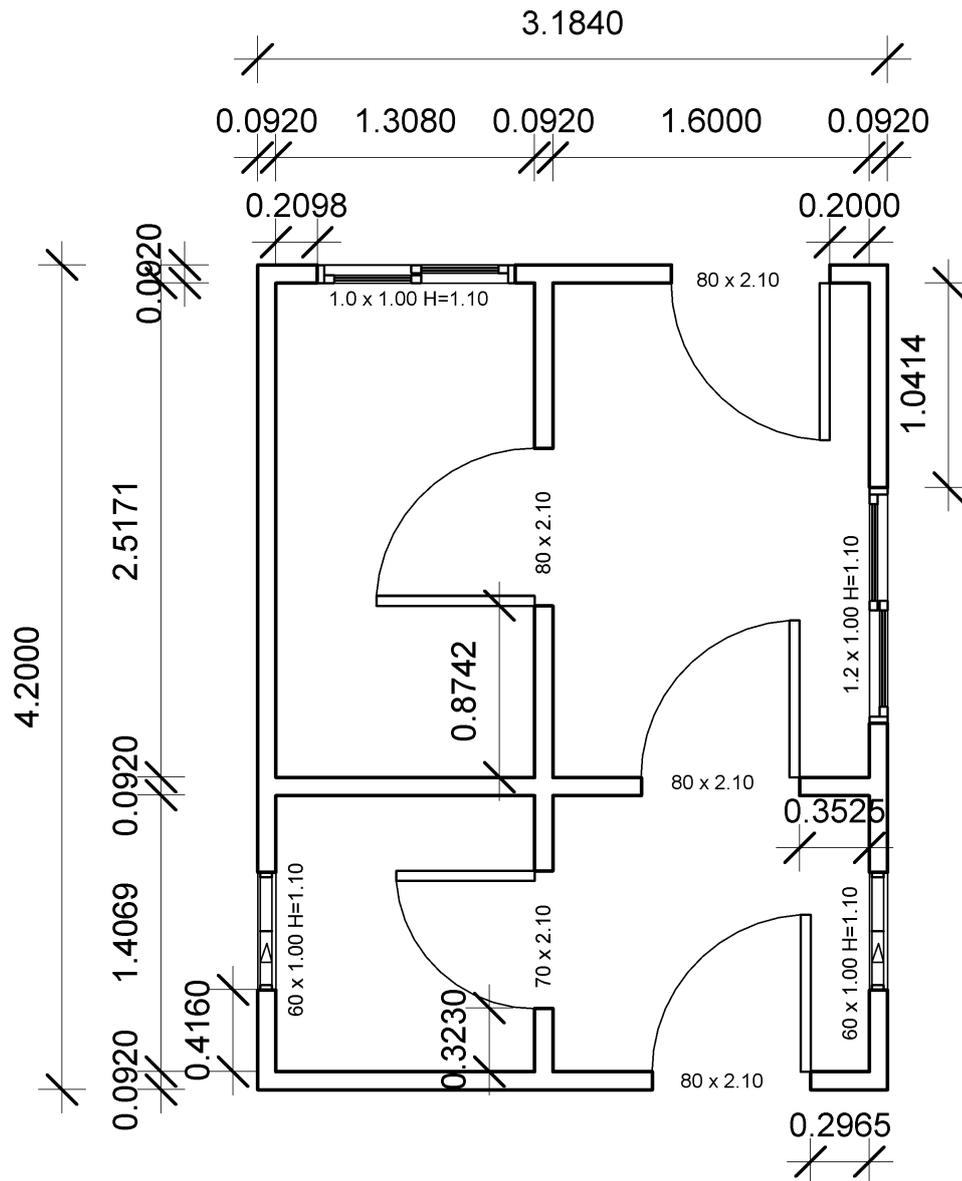


Figura A.1: Planta baixa utilizada como exemplo, seguindo alguns elementos padrões de projeto arquitetônico.

possibilitando que os profissionais de projeto e construção levem suas ideias da concepção até a elaboração, com uma abordagem por modelos coordenada e consistente. O Revit é um aplicativo individual que inclui recursos para projeto de arquitetura, de construção e de engenharia estrutural e MEP².

²mecânica, elétrica e hidráulica

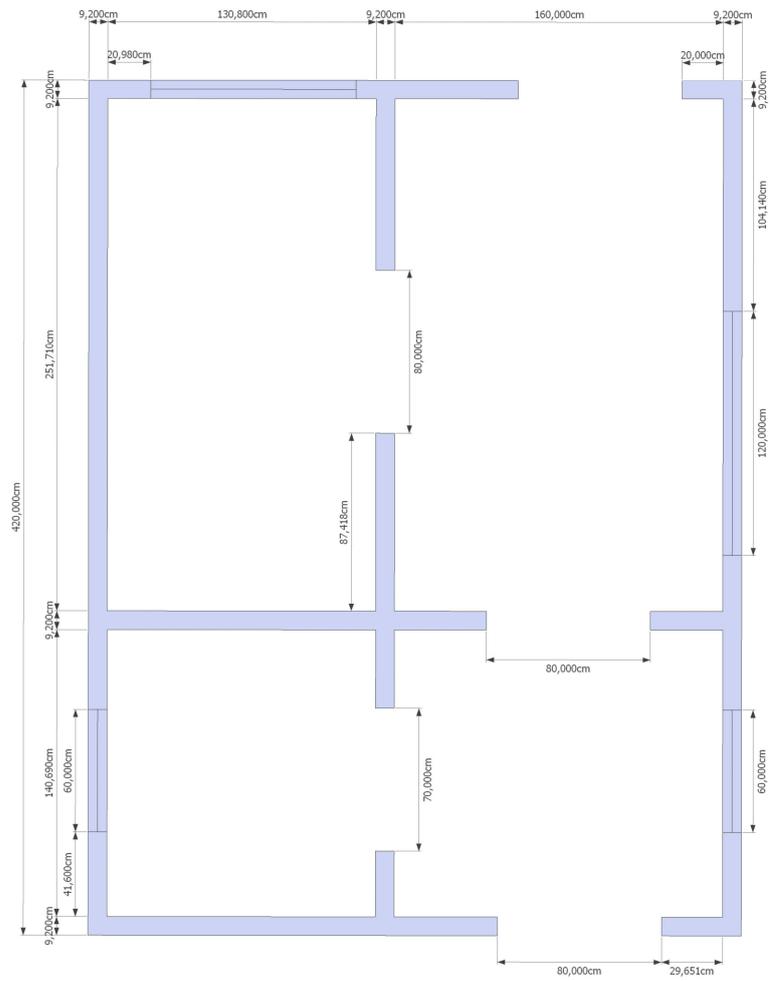


Figura A.2: Planta baixa adaptada para emprego do plugin.



Figura A.4: Modelagem 3D da edificação proposta gerada em Revit.

	Valor	Unidade
C_w	54.460.000	mm^6
I_x	188.400	mm^4
I_y	32.800	mm^4
J	28	mm^4
r_0	51,1	mm
x_0	32,3	mm
w	2450	mm^3
w_c	2450	mm^3
w_y	2450	mm^3

Tabela A.2: Valores relativos às propriedades da seção transversal do perfil Ue.

	Valor	Unidade
E	200.000	N/mm^2
f_y	250	N/mm^2
G	77.000	N/mm^2
v	0.3	<i>adimensional</i>

Tabela A.3: Valores relativos às propriedades do aço.

Já com todos esses dados conhecidos e convertidos para as unidades afins, iniciou-se a modelagem 3D e a realização dos cálculos. Em anexo, constam os principais resultados objetidos pelo *plugin*.

A.2 Modelagem da estrutura

A modelagem da estrutura pelo *plugin* ocorre de forma bastante simplificada. Com a planta baixa já desenhada no SketchUp, o usuário deve escolher a opção “Gerar estrutura”, como exhibe a Figura A.5. O *plugin* inicia solicitando do usuário alguns dados sobre a edificação (Figura A.6 a), como, por exemplo, a quantidade de modelo de portas e janelas que este possui.

Assim, se existem portas de tamanhos diferentes, como de 70cm e 80cm, o usuário deve informar que a edificação contém dois tipos de portas, e o mesmo deve ocorrer para as janelas. Assim, os próximos passos são referentes às dimensões das portas (Figuras A.6 b e A.6 c) e janelas (Figura A.6 d, Figura A.6 e , Figura A.6 f). Todos os campos estão preenchidos com valores padrões que podem ser alterados.

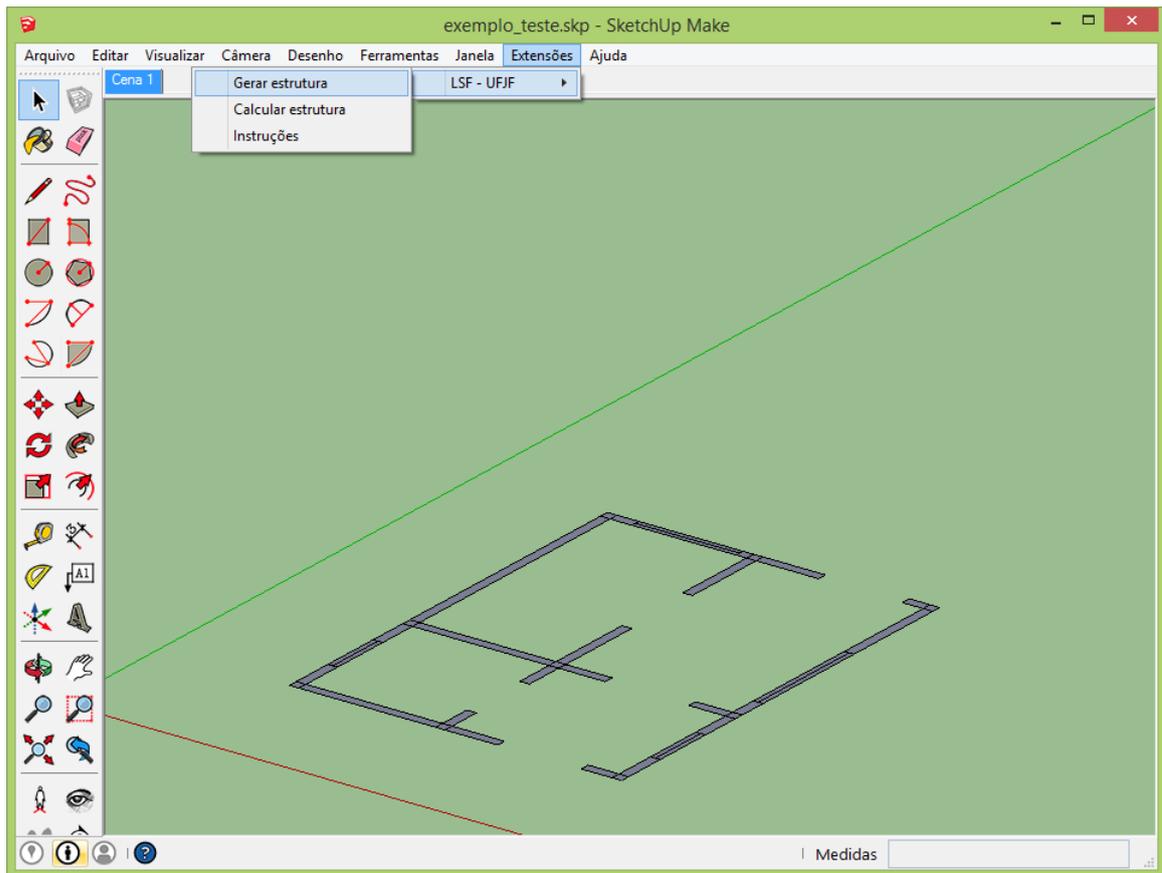


Figura A.5: Localização da opção “Gerar estrutura” no SketchUp 2015. Na versão 2014, a opção “Extensões” aparece como “Plug-ins”.

Configuração

Perfil - UE (bw, bf, D, t) - U (bw, bf, t) (mm)

Espaçamento (mm) 400

Pé direito (mm) 3000

Modelos de porta 2

Modelos de janela 3

Inclinação do telhado (%) 36.397

OK Cancelar

a)

Configuração das portas

Porta 1 - Largura (mm) 800

OK Cancelar

b)

Configuração das portas

Porta 2 - Largura (mm) 700

OK Cancelar

c)

Configuração das janelas

Janela 1 - Largura (mm) 1200

Janela 1 - Peitoril (mm) 1100

OK Cancelar

d)

Configuração das janelas

Janela 2 - Largura (mm) 2500

Janela 2 - Peitoril (mm) 1400

OK Cancelar

e)

Configuração das janelas

Janela 3 - Largura (mm) 600

Janela 3 - Peitoril (mm) 1500

OK Cancelar

f)

Figura A.6: a) Janela principal de entrada de dados. b - f) Janelas correspondentes aos modelos de portas e janelas da edificação.

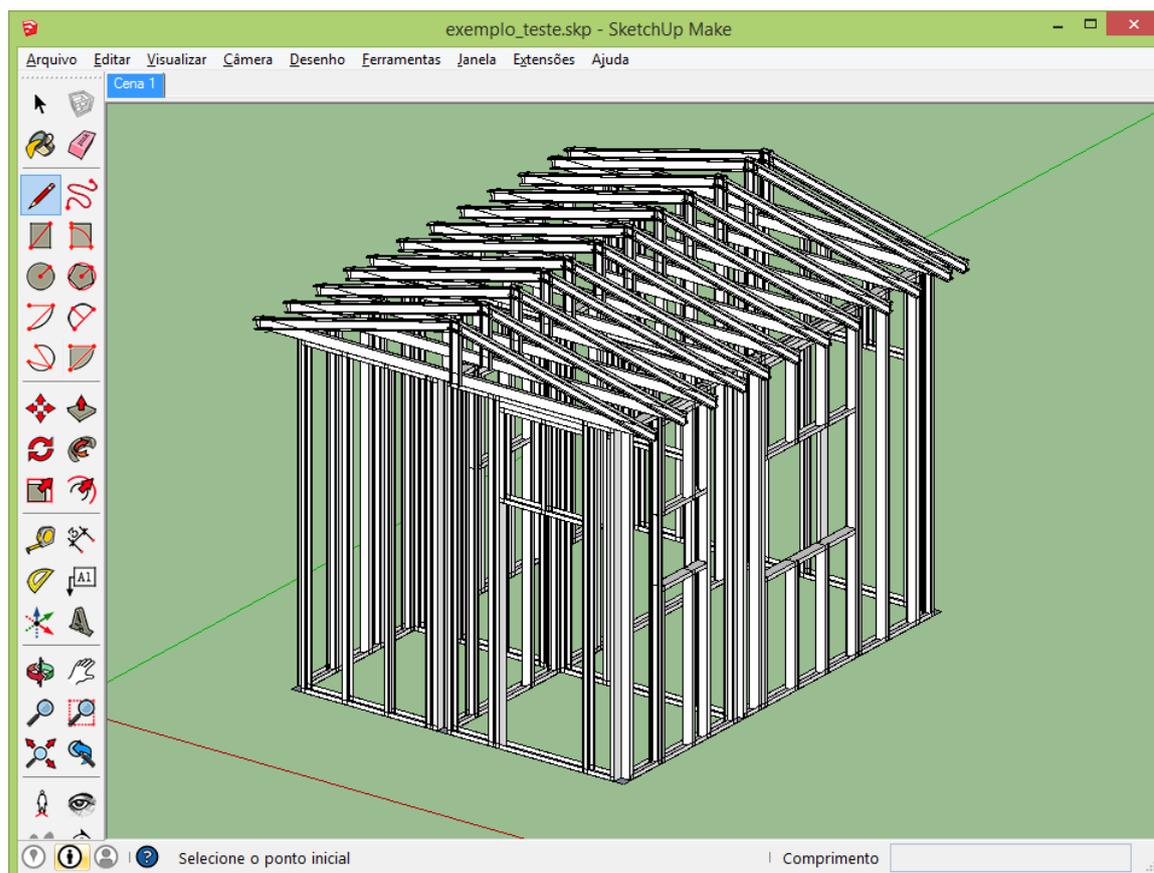


Figura A.7: Resultado da modelagem gerada no *plugin*.

A definição da quantidade de modelos de portas e janelas fez diminuir o tempo de execução do *plugin* e também permitiu que o usuário estabelecesse dimensões personalizadas, como as alturas dos peitoris das janelas de cozinha que constantemente diferem entre as edificações.

A.3 Cálculo das ações atuantes

A NBR 8681 considera a existência de três tipos distintos de ações capazes de produzir efeitos significativos na estrutura: permanentes, variáveis e excepcionais. As ações excepcionais são aquelas que possuem atuação em um curto espaço de tempo, além de possuir uma pequena probabilidade de acontecer, como explosões, incêndio, choques de veículos, sismos, etc. Em se tratando de um estudo mais simplificado, como é o caso desse trabalho, esse tipo de ação será ignorada. Os demais casos são tratados a seguir.

A.3.1 Ações permanentes

Como o próprio nome sugere, ações permanentes são aquelas que ocorrem durante toda a vida útil da edificação. Existem subclassificações para essas ações, contudo, nenhuma distinção será feita entre as ações permanentes neste trabalho.

Produto principal na construção em LSF, o aço possui peso específico de $78,5 \text{ kN}/\text{m}^3$, ou $7,85 \times 10^{-5} \text{ N}/\text{mm}^3$, e fará parte na constituição do peso das peças estruturais, que são todas de perfil Ue. Valores comerciais foram coletados para telha³ e forro⁴, sendo de $1,765 \times 10^{-4} \text{ N}/\text{mm}^2$ e $5,1 \times 10^{-5} \text{ N}/\text{mm}^2$ respectivamente. Assim, a Tabela A.4 lista as peças componentes da estrutura, e o modo como foi utilizado para encontrar seus pesos distribuídos. A área da seção do perfil utilizado já foi encontrada.

Componente	Sigla	Composição	Unidade
Peso do perfil Ue	G_p	Peso do aço \times área da seção	N/mm
Peso do telhado	G_t	Peso da telha \times espaçamento	N/mm
Peso do forro	G_f	Peso do gesso \times espaçamento	N/mm

Tabela A.4: Peso dos componentes permanentes da edificação.

$$G_p = 7,85 \times 10^{-5} \text{ N}/\text{mm}^3 \times 141 \text{ mm}^2 = 0,0110685 \text{ N}/\text{mm} \quad (\text{A.1})$$

$$G_t = 1,765 \times 10^{-4} \text{ N}/\text{mm}^2 \times 400 \text{ mm} = 0,0706 \text{ N}/\text{mm} \quad (\text{A.2})$$

$$G_f = 5,1 \times 10^{-5} \text{ N}/\text{mm}^2 \times 400 \text{ mm} = 0,0204 \text{ N}/\text{mm} \quad (\text{A.3})$$

A Tabela A.5 sintetiza os valores das ações permanentes das componentes da estrutura. As ações permanentes possuem relação direta com o comprimento das peças.

Passo1: Cargas nodais equivalentes devido às ações permanentes na estrutura.

³<http://www.telhatem.com.br/images/catalogo-tecnico-telha-ondulada-brasil.pdf>

⁴<http://www.planam.com.br/catalogos/forro-gessoplus.pdf>

	Ações permanentes	Comprimento (mm)	Valor final (N)
G_{Empena}	$G_p + G_t$	1694,1710	138,3604
G_{Viga}	$G_p + G_f$	1592	50,0978
$G_{Pendural}$	G_p	578,7126	6,4054
$G_{Montante}$	G_p	3000	33,2055

Tabela A.5: Valores das ações permanentes das componentes da estrutura.

A Figura A.8 apresenta as cargas concentradas devido às ações permanentes de cada elemento estrutural, enquanto que a Figura A.9 demonstra essas cargas distriuídas nos nós.

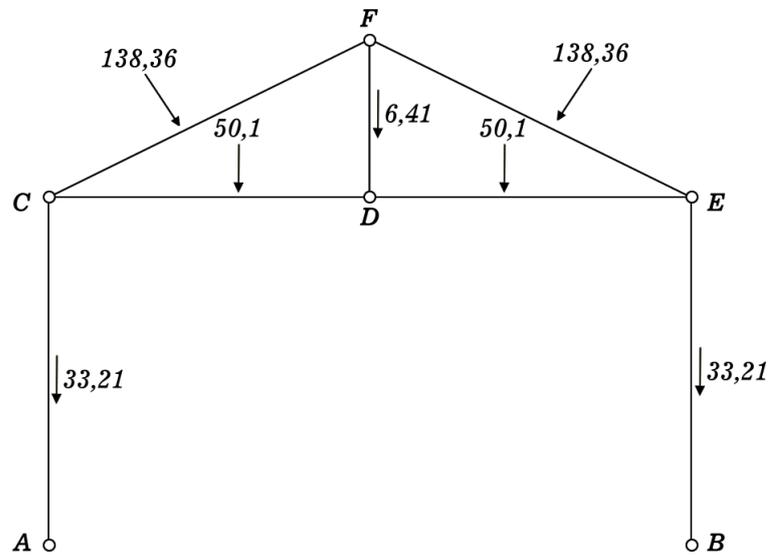


Figura A.8: Cargas concentradas devido às ações permanentes.

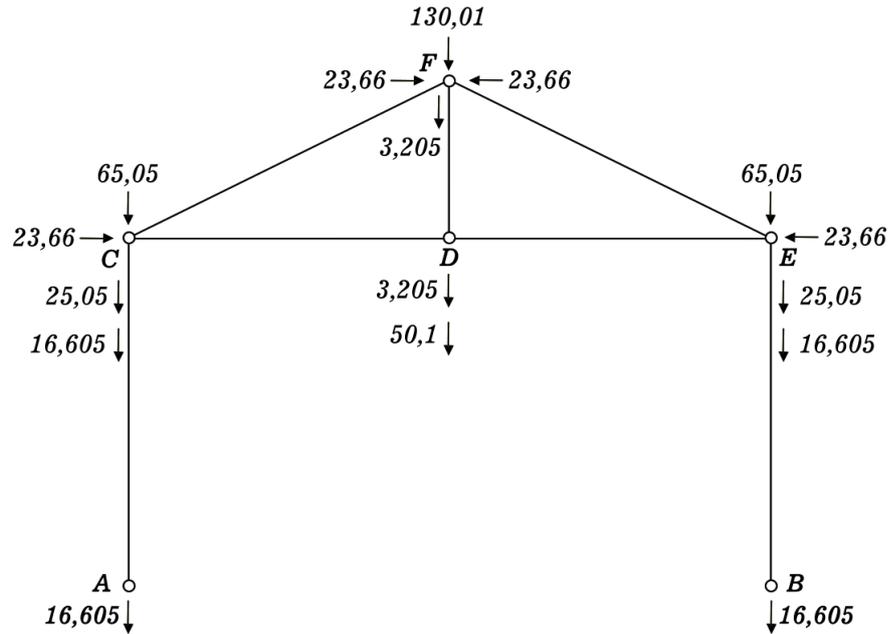


Figura A.9: Cargas distriuídas dedivo às ações permanentes atuando nos nós.

Passo2: Cálculo dos esforços normais nas barras.

Diagrama de corpo livre no nó D (Figura A.10):

$$F_p - 3,205 - 50,1 = 0$$

$$F_p = 53,305 \text{ N (t)}$$

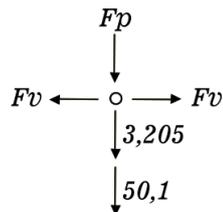


Figura A.10: Diagrama de corpo livre no nó D.

Diagrama de corpo livre no nó F (Figura A.11):

$$2 \times F_e \times \sin(20^\circ) + 130,01 + 3,205 + 53,305 = 0$$

$$F_e = -272,67 \text{ N (t)}$$

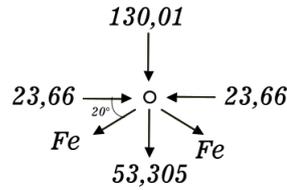


Figura A.11: Diagrama de corpo livre no nó F.

Diagrama de corpo livre no Nó E (Figura A.12):

$$-F_m - 272,67 \times \sin(20^\circ) - 65,05 - 25,05 - 16,605 = 0$$

$$F_m = -199,97 \text{ N (c)}$$

$$-F_v - 23,66 + 272,67 \times \cos(20^\circ) = 0$$

$$F_v = 232,57 \text{ N (t)}$$

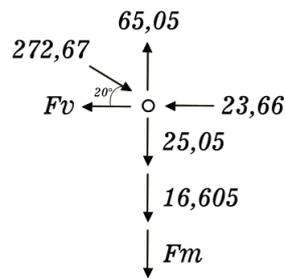


Figura A.12: Diagrama de corpo livre no Nó E.

Passo 3: Cálculo do momento fletor na empena (M_e) e viga.

$$M_e = \frac{(0,0110685+0,0706) \times 1694,1710^2}{8} = 29300,77 \text{ Nmm}$$

$$M_v = \frac{(0,0110685+0,0204) \times 1592^2}{8} = 9969,47 \text{ Nmm}$$

A.3.2 Ações variáveis

Conforme a NBR 8800, ações variáveis são aquelas que atuam na estrutura, mas seus valores sofrem muitas mudanças em um curto período de tempo. As que ocorrem com mais frequência são as ações devido ao uso e ocupação da edificação, sobrecargas em pisos e coberturas por conta de fatores como instalação de equipamentos sobre a estrutura, divisórias móveis, pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas e também pela ação do vento

e variação da temperatura na estrutura. Neste trabalho serão empregadas três ações variáveis: vento, sobrecarga na cobertura (Q_s) e carga acidental (Q_a) no forro.

Primeiro será calculada a ação do vento na estrutura, em seguida a sobrecarga e a carga acidental. Segundo a NBR 8800, no item anexo B.5 - Sobrecargas em coberturas, mais especificamente o item B.5.1, “deve ser prevista uma sobrecarga característica mínima de 0,25 kN/m²” no caso de coberturas comuns. Para a NBR 6120:1980, no item 15 da Tabela 2, forros que não tem acesso a pessoas devem ser dimensionados levando em consideração a carga acidental mínima de 0,5 kN/m². Multiplicando essas cargas pelo espaçamento dos perfis, seus valores ficam:

$$Q_s = 0,25 \text{ kN/m}^2 \times 400 \text{ mm} = 0,1 \text{ N/mm} \quad (\text{A.4})$$

$$Q_a = 0,5 \text{ kN/m}^2 \times 400 \text{ mm} = 0,2 \text{ N/mm} \quad (\text{A.5})$$

A.3.2.1 Cálculo da ação do vento

Determinação das forças estáticas devidas ao vento:

Para encontrar as forças devidas ao vento na edificação foi utilizada a norma NBR 6123:1988, com errata de dezembro de 1990, que apresenta uma forma de determinar as forças estáticas devido ao vento. Assim, faz-se necessário obter a pressão dinâmica conforme a equação seguinte:

$$q = 0,613V_k^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (\text{A.6})$$

V_k é a velocidade característica do vento, dada por:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \text{ (m/s)} \quad (\text{A.7})$$

Onde:

V_0 = velocidade básica do vento;

S_1 = fator topográfico;

S_2 = fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno;

S_3 = fator baseado em conceitos probabilísticos.

A velocidade V_0 foi encontrada através da Figura A.13, admitindo então $V_0 = 33 \text{ m/s}$.

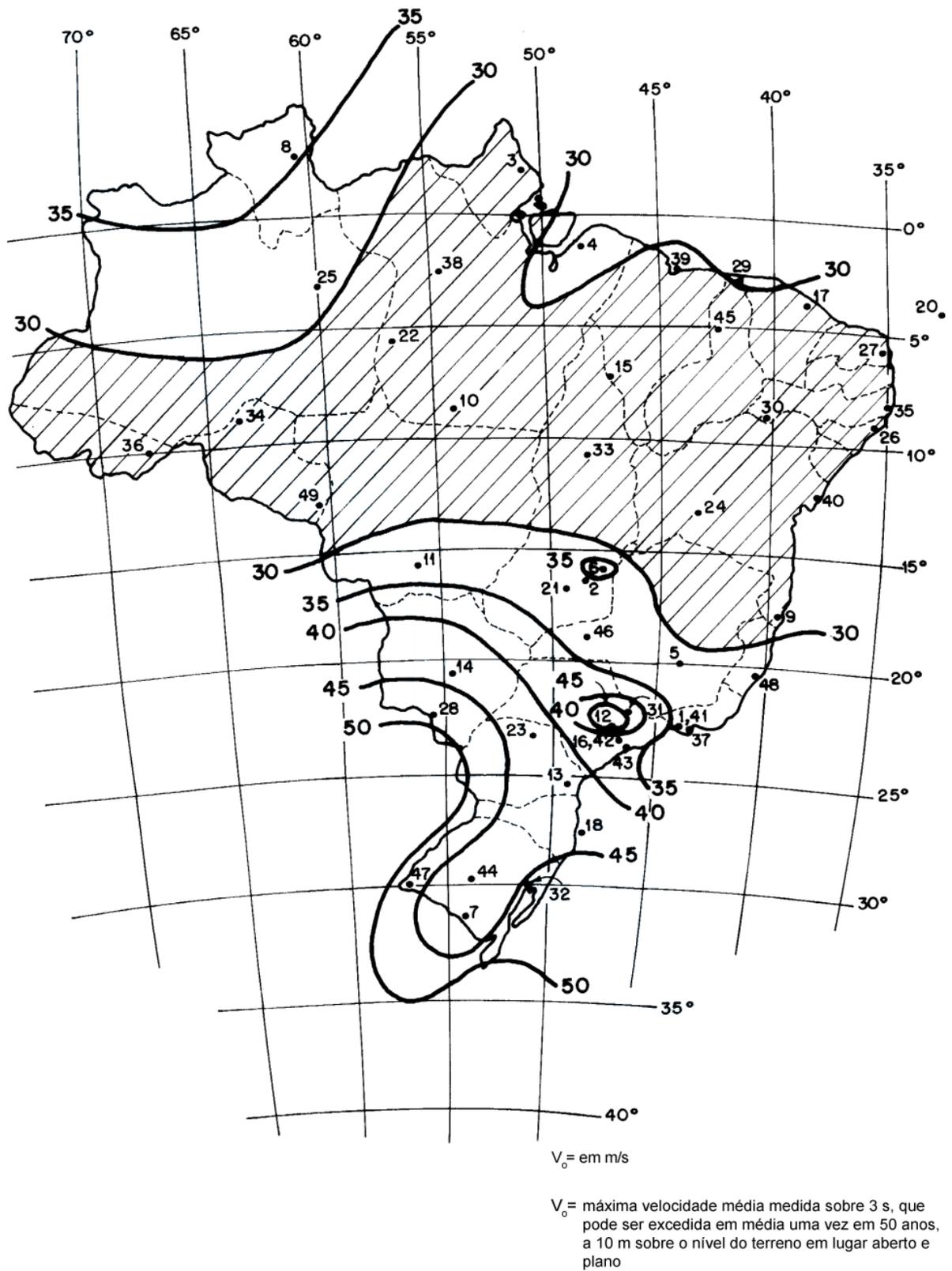


Figura A.13: Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s). Fonte: NBR 6123.

Para S_1 foi escolhida a opção de terreno plano ou fracamente acidentado, e assim

$S_1 = 1,0$. Quanto a S_2 , esse necessita de três parâmetros, sendo uma categoria para a rugosidade do terreno, uma classe correspondente às dimensões da edificação e a altura sobre o terreno. Dentre as opções disponíveis na norma, este exemplo teste figurou na Categoria IV (referente a zona urbanizada), Classe A (por ter uma dimensão máxima menor que 20 metros) e com cota acima do terreno menor que 5 metros. Desta forma, o valor resultante foi $S_2 = 0,79$. Por fim, como o exemplo teste é referente a uma construção residencial, obteve $S_3 = 1,0$.

Assim, a Equação A.7 resulta no valor $V_k = 26,07 \text{ m/s}$, que por sua vez implica no valor $q = 416,6223 \text{ N/m}^2$ ou $q = 0,0004166223 \text{ N/mm}^2$, da Equação A.6. Como a estrutura possui um espaçamento de 400 milímetros entre os perfis de sustentação, é coerente afirmar que a carga de vento deve ser distribuída em função desse espaçamento, assim tem-se uma nova equação:

$$\text{Carga de vento distribuída} = q \times \text{espaçamento} \quad (\text{A.8})$$

$$\text{Carga de vento distribuída} = 0,0004166223 \text{ N/mm}^2 \times 400 \text{ mm} = 0,16664892 \text{ N/mm} \quad (\text{A.9})$$

Coefficientes de pressão e de forma, externos:

A NBR 6123 designa que a atuação da carga de vento nas edificações não ocorre de forma homogênea por toda a estrutura. Existem áreas onde há mais atuação da carga de vento que em outras, e por isso, separou a edificação em partes, bem como estabeleceu a possibilidade de ocorrência de vento em dois casos extremos: vento incidindo na estrutura a 0° e a 90° .

Várias são as possíveis formas que uma construção pode assumir, por isso a norma propõe uma maneira simplificada de cálculo onde permite a generalização de algumas construções para o formato retangular, introduzindo algumas incógnitas:

- a - a maior dimensão horizontal de uma edificação;
- b - a menor dimensão horizontal de uma edificação;

h - Altura de uma edificação acima do terreno, medida até o topo da platibanda ou nível do beiral.

Para o caso em estudo fica:

$$a = 4200 \text{ mm}$$

$$b = 3184 \text{ mm}$$

$$h = 3000 \text{ mm}$$

Diante desses dados, é necessário calcular as alturas relativas que possibilitarão encontrar os coeficientes de pressão e de forma, externos, na parede, conforme a Tabela A.6 e Figura A.14 .

$$\frac{a}{b} = \frac{4200 \text{ mm}}{3184 \text{ mm}} = 1,319095477 \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{h}{b} = \frac{3000 \text{ mm}}{3184 \text{ mm}} = 0,942211055 \quad (\text{A.11})$$

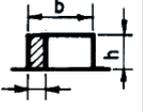
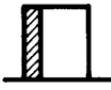
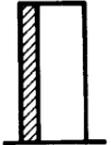
Altura relativa	Valores de C_e para								c_{pe} médio 	
	$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$					
	A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2		
 $0,2 b$ ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,8	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,9	-0,5	+0,7	-0,5	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,9	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,6	-0,9	-0,5	-1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-1,0	-0,6	+0,8	-0,6	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-1,0	-0,5	+0,8	-0,3	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2

Tabela A.6: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular. Fonte: NBR 6123.

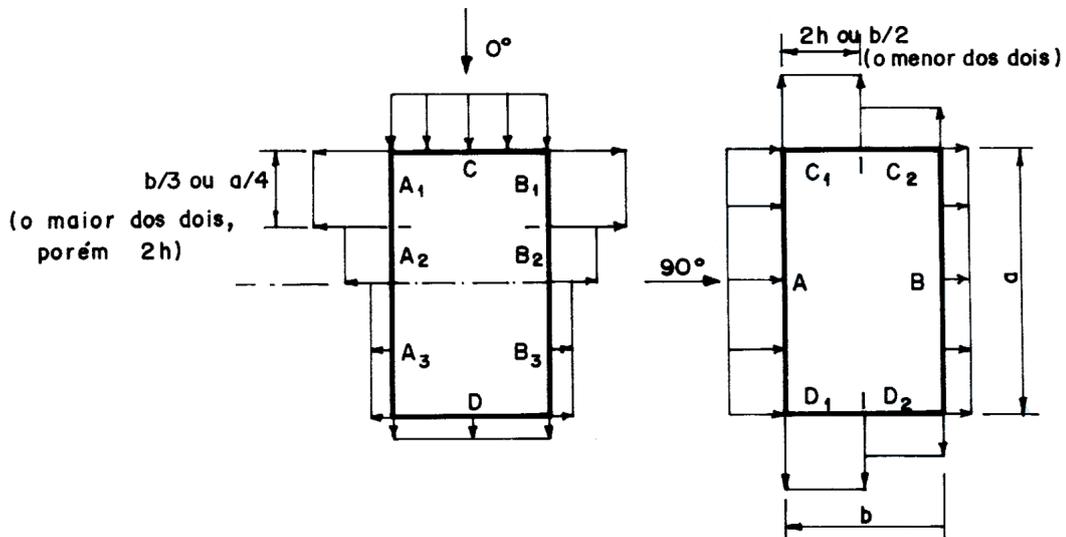


Figura A.14: Local de atuação dos coeficientes externos na parede. Fonte: NBR 6123.

Utilizando os dados das Equações A.10 e A.11, a Tabela A.6 e a Figura A.14, o resultado pode ser encontrado na Figura A.15. No que se refere ao coeficiente A_3 e B_3 , estes possuem um modo específico de serem encontrados, contudo, como neste exemplo será levado em consideração apenas a situação com maior carga solicitante, tais coeficientes podem ser descartados, uma vez que a própria norma os tratam como sendo portadores de valores inferiores aos demais coeficientes, como pode ser observado na Figura A.14.

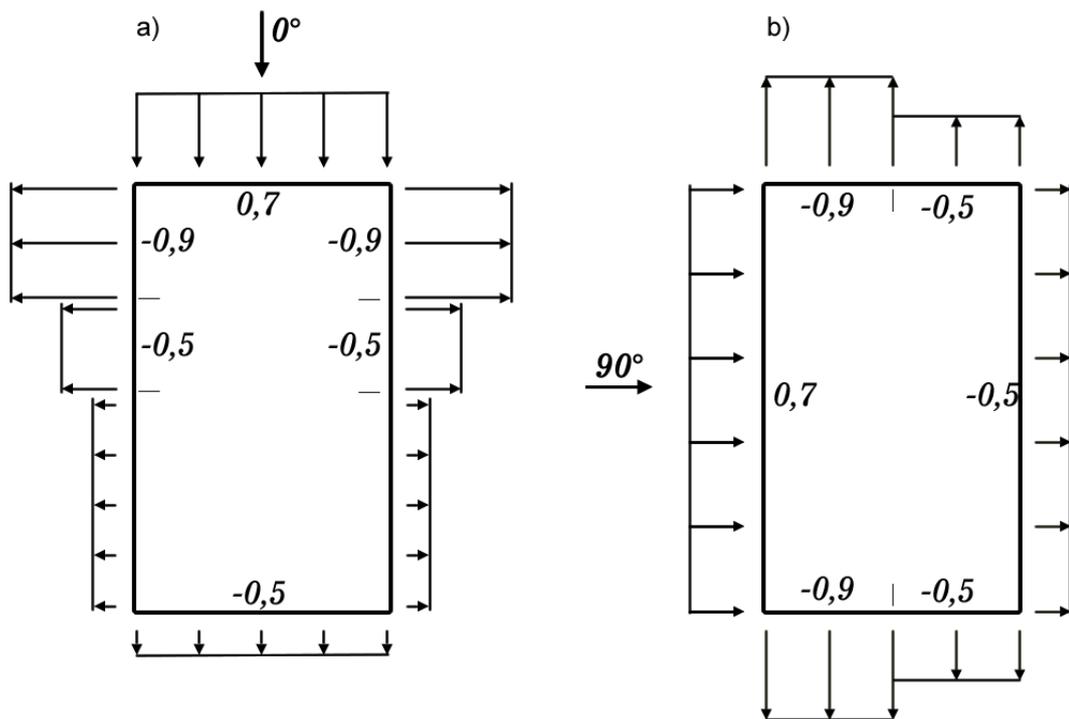


Figura A.15: Valores encontrados para os coeficiente externos, na parede.

O cálculo da ação do vento na cobertura também deve ser levado em consideração e, para isso, usa-se a Tabela A.7 e Figura A.16

Altura relativa	θ	Valores de C_e para				c_{pe} médio			
		$\alpha = 90^\circ (A)$		$\alpha = 0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
$\frac{b}{2} \leq \frac{h}{2}$ 	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1
$\frac{1}{2} \frac{b}{2} \leq \frac{h}{2}$ 	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,5	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0			-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8				
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8				
$\frac{b}{2} < \frac{h}{2}$ 	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,8	-1,8	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5			
	40°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0			
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7				
60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7					

Tabela A.7: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular. Fonte: NBR 6123.

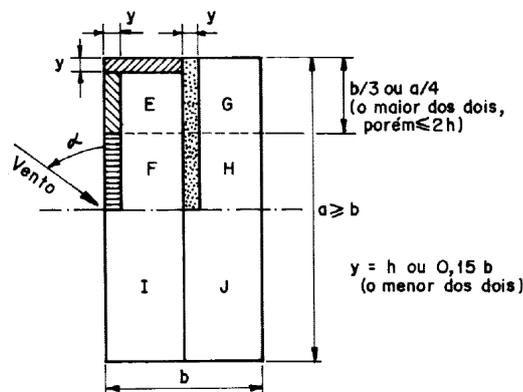


Figura A.16: Local de atuação dos coeficientes externos na cobertura. Fonte: NBR 6123.

Utilizando os dados da Equação A.11, Tabela A.7 e Figura A.16, o resultado pode

ser encontrado na Figura A.17. Novamente, os coeficientes I e J terão sempre valores inferiores ou iguais aos demais, e ficaram sem cálculo.

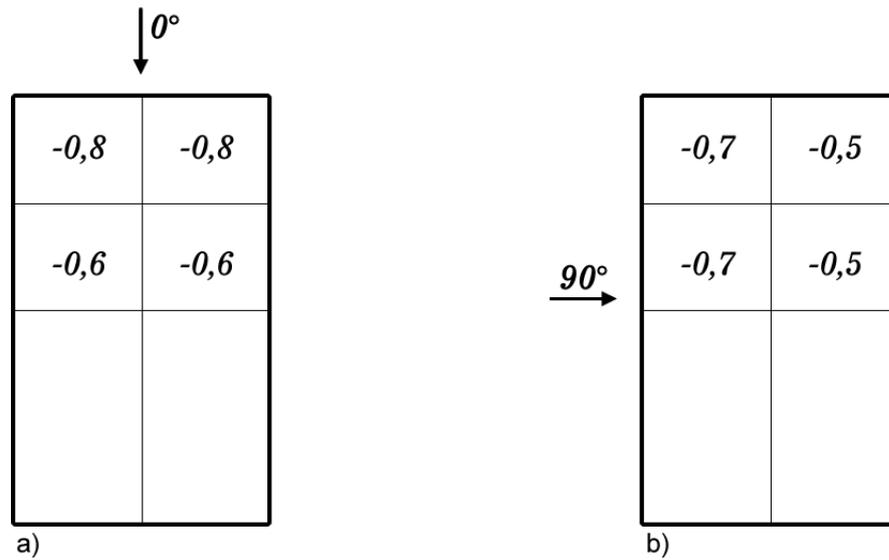


Figura A.17: Valores encontrados para os coeficiente externos, na cobertura.

A Figura A.19 ilustra o resultado para os coeficientes de pressão e forma, externos, seguindo procedimento semelhante ao usado por Pinheiro (2007).

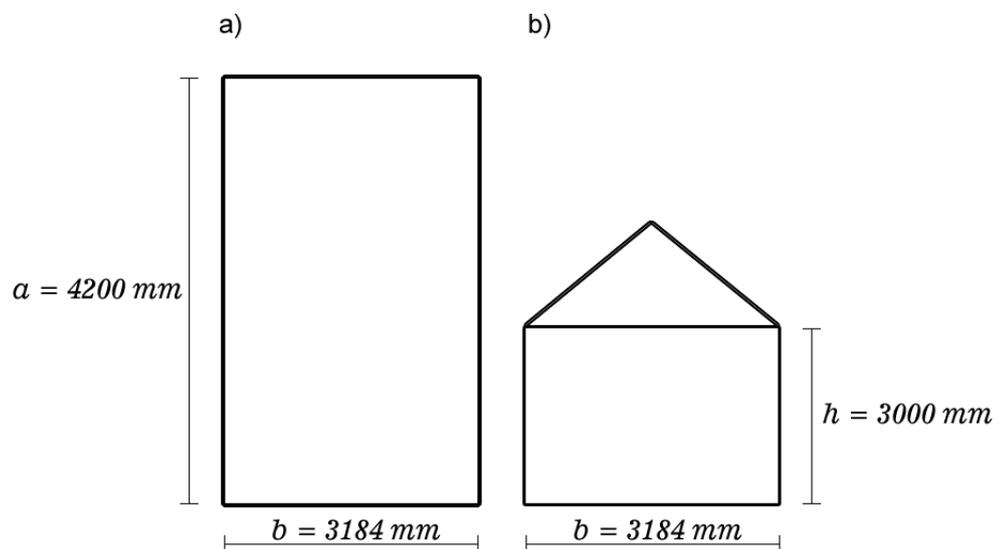


Figura A.18: Figura explicativa sobre a transição de a) todos os coeficientes de pressão e forma, externos, para parede e cobertura, em uma b) figura que apresenta os maiores coeficientes encontrados em cada caso.

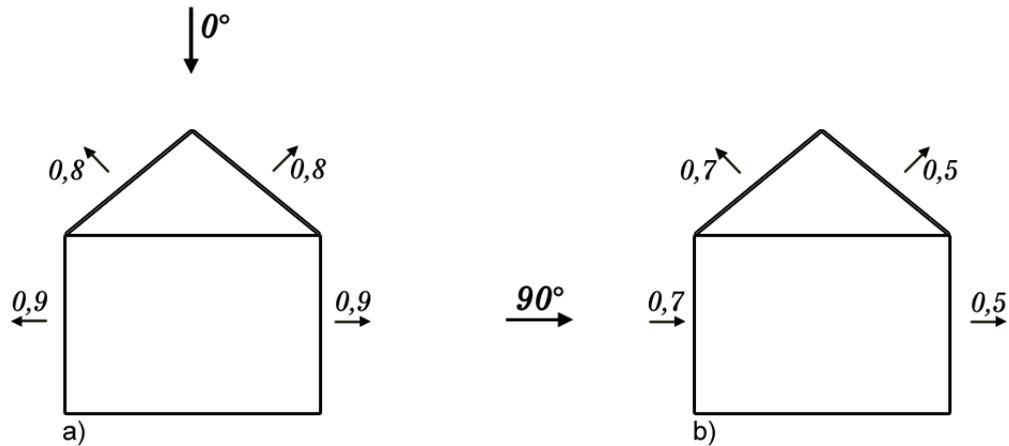


Figura A.19: Coeficientes resultantes da ação do vento na estrutura.

Coeficientes de pressão interna e resultado:

A NBR 6123 trata também de coeficientes de pressão interna (c_{pi}), que diz respeito a permeabilidade de vento no interior da edificação. Para tanto, deve ser analisada quais partes da edificação permitem essa permeabilidade, logo, a norma sugere formas de cálculos individuais para diversas situações ao mesmo tempo que também prevê situações que podem ocorrer com mais frequência. Dentre essas situações mais frequentes, há a que trabalha com a possibilidade de que as paredes internas da edificação permitem a permeabilidade do vento, bem como as quatro faces externas.

Segundo a mesma norma, são tidos como elementos construtivos e de vedações impermeáveis: “lajes e cortinas de concreto armado ou protendido; paredes de alvenaria, de pedra, de tijolos, de blocos de concreto e afins, sem portas, janelas ou quaisquer outras aberturas”. Fica então claro que forros de gesso, como são considerados os forros pelo *plugin*, não são impermeáveis ao vento. Pode-se assim entender que todos os coeficientes de vento, sejam esses externos ou internos, podem e devem ser tratados como partes atuantes na estrutura do telhado.

Isto posto, existirão dois valores de coeficientes de pressão interna: $c_{pi} = 0$ e $c_{pi} = -0,3$, que devem se somar aos coeficientes externos. É desta forma que serão encontrados quatro possíveis casos:

Caso 1 - $c_{pe}(0^\circ) + c_{pi}(0)$, Figura A.20 a)

Caso 2 - $c_{pe}(0^\circ) + c_{pi}(-0,3)$, Figura A.20 b)

Caso 3 - $c_{pe}(90^\circ) + c_{pi}(0)$, Figura A.21 a)

Caso 4 - $c_{pe}(90^\circ) + c_{pi}(-0,3)$, Figura A.21 b)

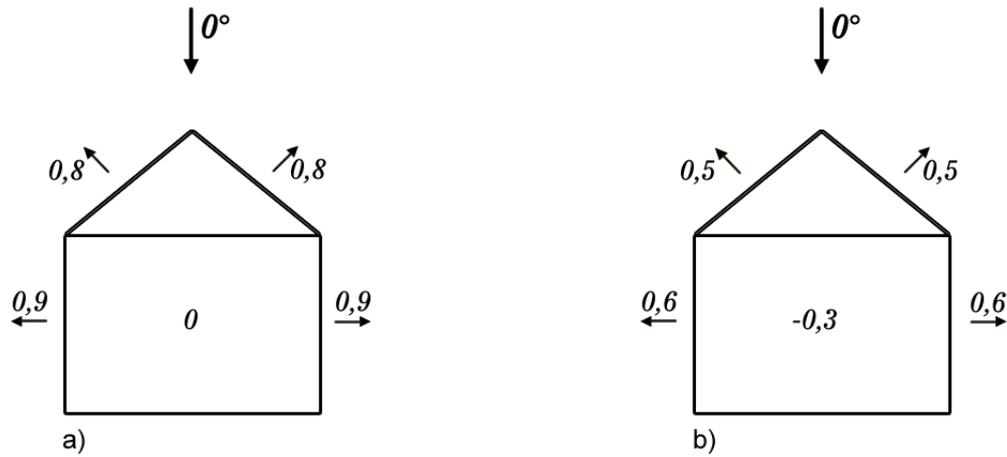


Figura A.20: Resultantes de $c_{pe} + c_{pi}$. a) Caso 1 b) Caso 2.

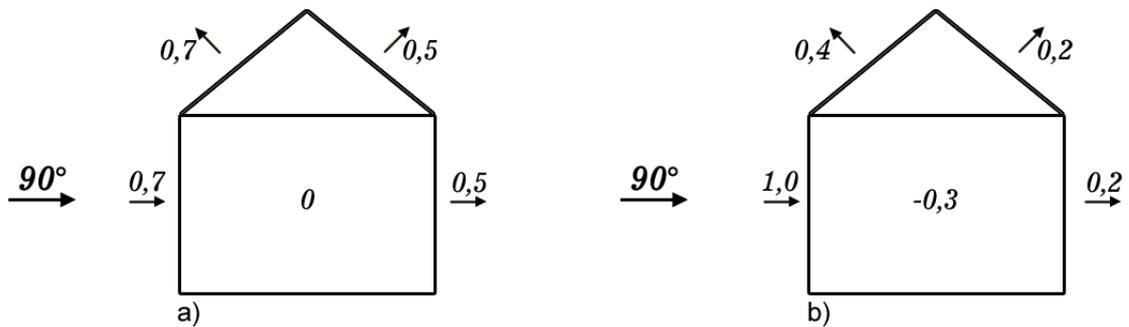


Figura A.21: Resultantes de $c_{pe} + c_{pi}$. a) Caso 3 b) Caso 4.

Diante de todos esses coeficiente, fica fácil detectar aquele que mais causa impacto na estrutura. Como neste trabalho não será tratado casos de contraventamento, os coeficientes atuantes nas paredes ficarão apenas expostos, sem a finalização dos cálculos. O cálculo de vento será então continuado seguindo apenas a ação do vento atuante na cobertura. Como pode ser observado, a ação do vento sempre tende a provocar tração na cobertura, nunca comprimindo-a, sendo o pior cenário apresentado no Caso 1.

Cálculo da carga de vento na estrutura:

Imprescindível é atualizar o resultado da Equação A.9, multiplicando seu valor com o do

coeficiente de vento encontrado.

$$Carga\ de\ vento\ distribuida = 0,16664892\ N/mm \times -0,8 = -0,133319136\ N/mm \quad (A.12)$$

Essa carga distribuída, conforme Pinheiro (2007), são normais às empenas, como é demonstrado na Figura A.22. O próximo passo é encontrar a ação resultante de tração e suas componentes vertical e horizontal. A fim de facilitar o entedimento do cálculo, este será dividido em passos.

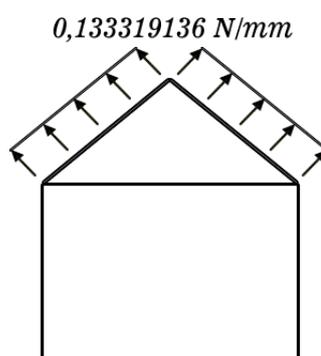


Figura A.22: Atuação da ação do vento na cobertura.

Passo 1: Cálculo das cargas nodais equivalentes devido à ação do vento na cobertura.

Concentrando o esforço distribuído do vento na cobertura, o valor resultante é o que está exposto na Figura A.23, que também identifica os nós das ligações.

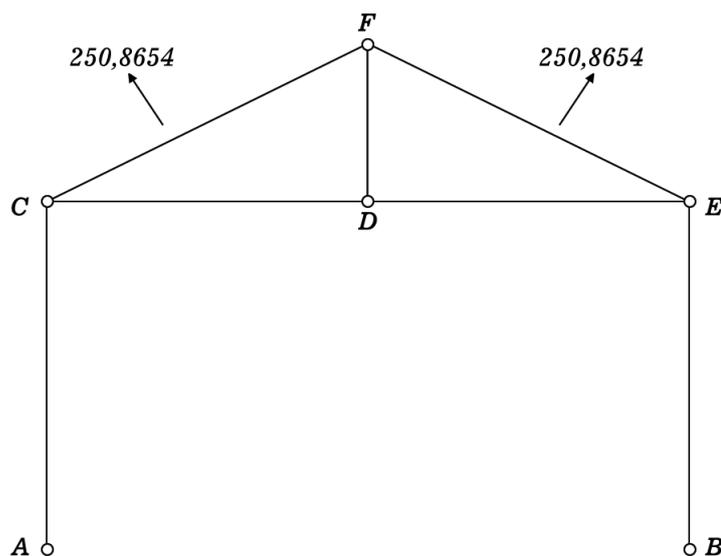


Figura A.23: Cargas concentradas devido ao vento atuando na estrutura.

Em cada nó incide metade da carga concentrada atuante na barra, no caso, a empena. Assim, a Figura A.24 demonstra esse caso, com a Figura A.25 apresentando as cargas decompostas nas direções horizontal e vertical.

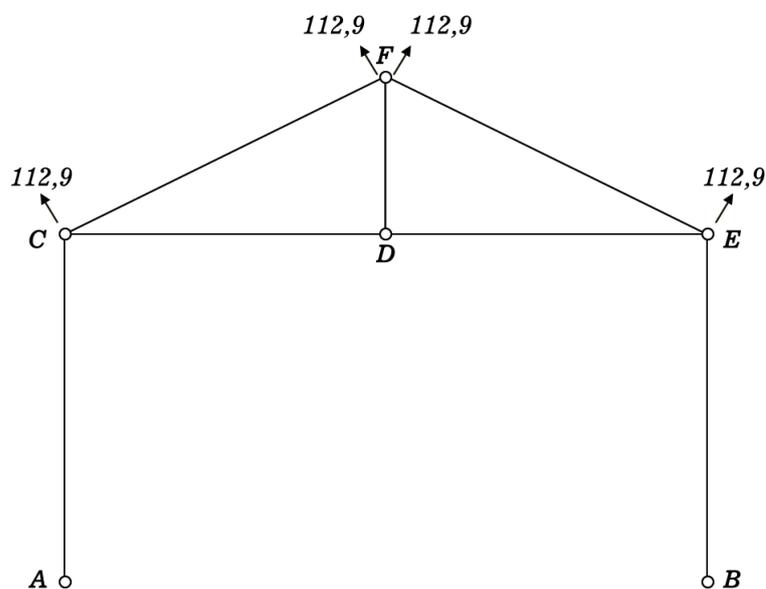


Figura A.24: Cargas devido ao vento atuando nos nós.

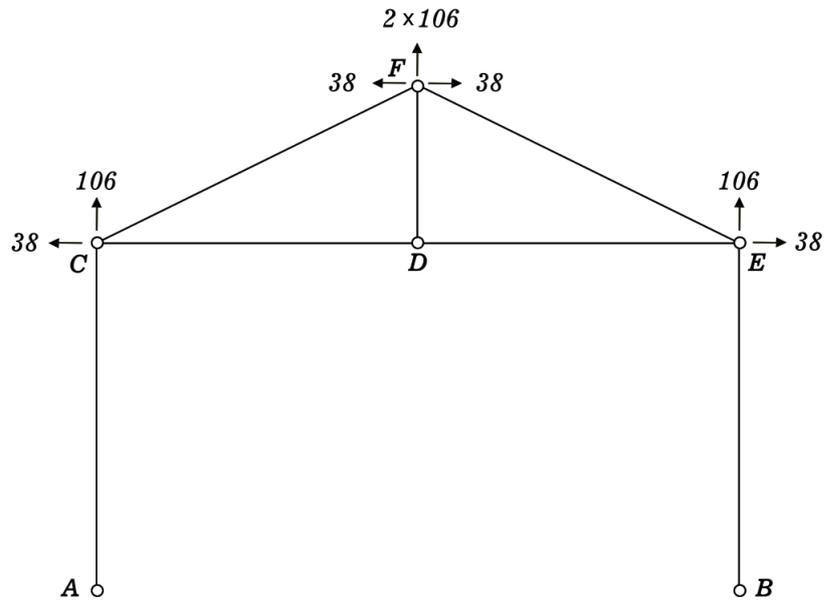


Figura A.25: Cargas devido ao vento decompostas nas direções horizontal e vertical.

Passo 2: Cálculo das reações de apoio na treliça.

A fim de encontrar o equilíbrio da estrutura (Figura A.26), necessário se faz identificar as forças que atuam em suas componentes. Assim, ocorre o estudo individual de cada nó.

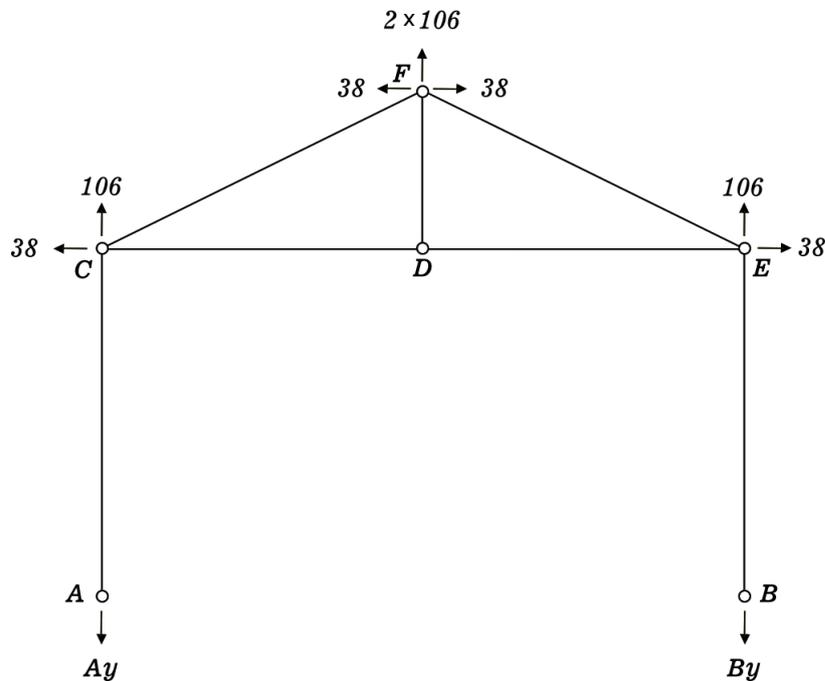


Figura A.26: Reações de apoio na treliça

$$A_y + B_y = 4 \times 106$$

$$A_y = B_y$$

$$B_y = 2 \times 106 = 212 \text{ N}$$

Passo 3: Cálculo dos esforços normais nas barras.

Diagrama de corpo livre no nó B (Figura A.27):

$$F_m = B_y$$

$$F_m = 212 \text{ N (t}^5\text{)}$$



Figura A.27: Diagrama de corpo livre no nó B.

Diagrama de corpo livre no nó E (Figura A.28)

$$F_e = \frac{F_m - 106}{\sin(20^\circ)} = 309,9 \text{ N (t)}$$

$$F_v = 38 - F_e \times \sin(20^\circ) = 253,24 \text{ N (c)}$$

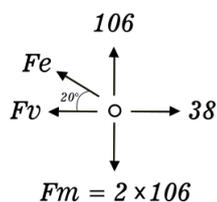


Figura A.28: Diagrama de corpo livre no nó E.

Diagrama de corpo livre no nó F (Figura A.29)

$$F_p + 2 \times 309,9 \times \sin(20^\circ) = 2 \times 106$$

$$F_p = 0,0156 \text{ N (t)}$$

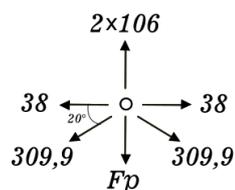


Figura A.29: Diagrama de corpo livre no nó F.

⁵t = tração, c = compressão

Passo 3: Cálculo do momento fletor na empena (M_e).

$$M_e = \frac{ql^2}{8} = \frac{0,1333 \times 1694,17^2}{8} = 47815 \text{ Nmm} \quad (\text{A.13})$$

A.3.2.2 Sobrecarga

Passo1: Cargas nodais equivalentes devido à ação de sobrecarga na cobertura.

A Figura A.30 apresenta as cargas concentradas dedivo às ações de sobrecarga na cobertura, atuando de cada elemento estrutural, enquanto que a Figura A.31 demonstra essas cargas distriuídas nos nós. O valor é referente à Equação A.4 multiplicada pelo comprimento da empena ($1964,17\text{mm}$).

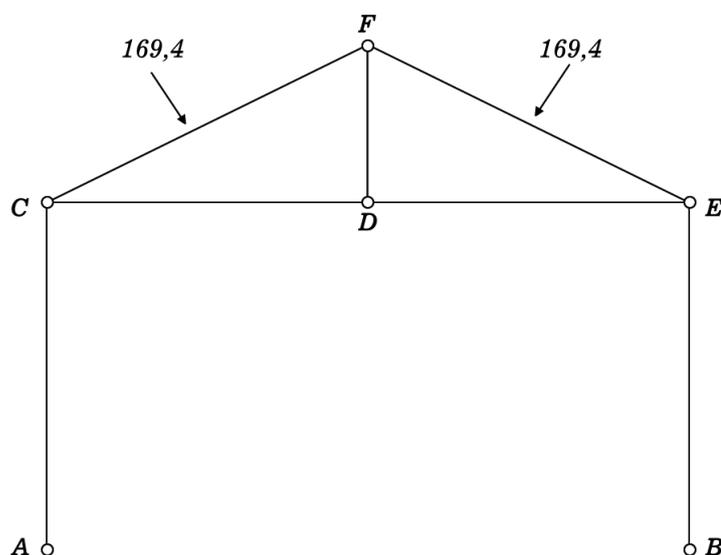


Figura A.30: Cargas concentradas dedivo às ações de sobrecarga na cobertura.

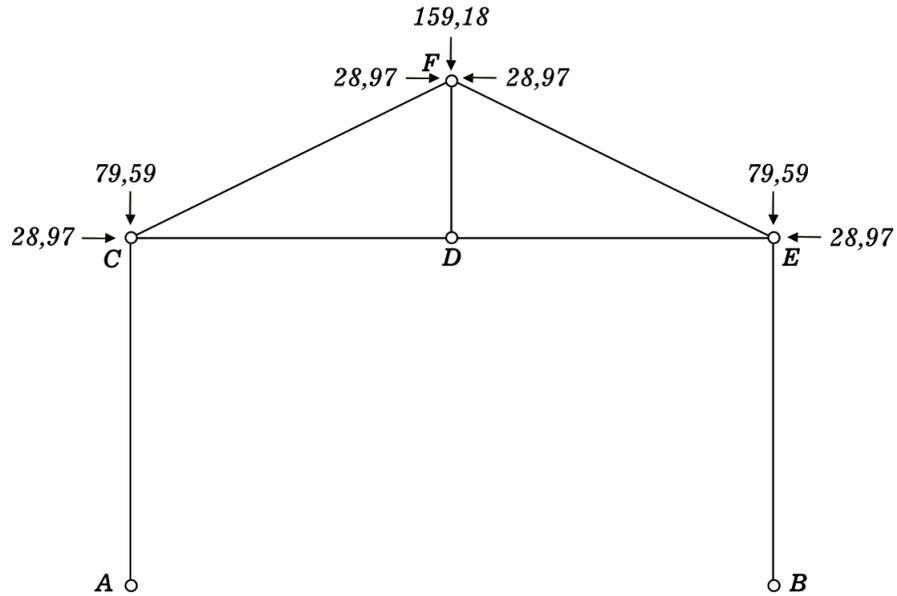


Figura A.31: Cargas devido às ações de sobrecarga na cobertura distribuídas nos nós

Passo2: Cálculo das reações de apoio na treliça (Figura A.32):

$$158,18 + 2 \times 79,59 - A_y - B_y = 0$$

$$A_y = B_y$$

$$B_y = 158,18 \text{ N}$$

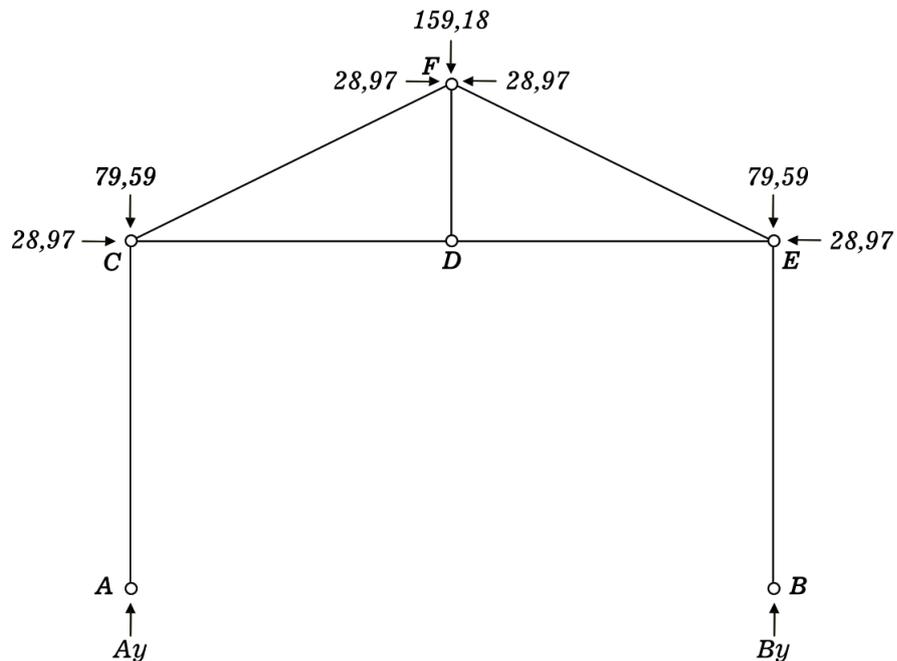


Figura A.32: Reações de apoio na treliça.

Passo3: Cálculo dos esforços normais nas barras

Diagrama de corpo livre no nó B (Figura A.33):

$$B_y - F_m = 0$$

$$F_m = 158,18 \text{ N (c)}$$

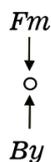


Figura A.33: Diagrama de corpo livre no nó B.

Diagrama de corpo livre no nó E (Figura A.34)

$$158,18 + F_e \times \sin(20^\circ) - 79,59 = 0$$

$$F_e = -229,78 \text{ N (c)}$$

$$-F_v - 28,97 - F_e \times \cos(20^\circ) = 0$$

$$F_v = 186,95 \text{ N (t)}$$

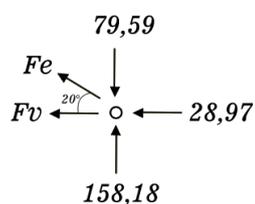


Figura A.34: Diagrama de corpo livre no nó E.

Diagrama de corpo livre no nó F (Figura A.35)

$$2 \times 229,78 \times \sin(20^\circ) - 158,18 = 0$$

$$F_p = 1 \text{ N (t)}$$

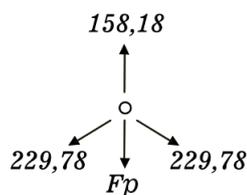


Figura A.35: Diagrama de corpo livre no nó F.

Passo4: Cálculo do momento fletor na empena (M_e)

$$M_e = \frac{(0,1) \times 1694,1710^2}{8} = 35877,69 \text{ Nmm}$$

A.3.2.3 Carga Acidental

Passo1: Cargas nodais equivalentes devido à ação de carga acidental no forro.

A Figura A.36 apresenta as cargas concentradas devido às ações da carga acidental no forro, atuando de cada elemento estrutural, enquanto que a Figura A.37 demonstra essas cargas distriuídas nos nós. O valor é referente à Equação A.5 multiplicada pelo comprimento da viga ($1592mm$).

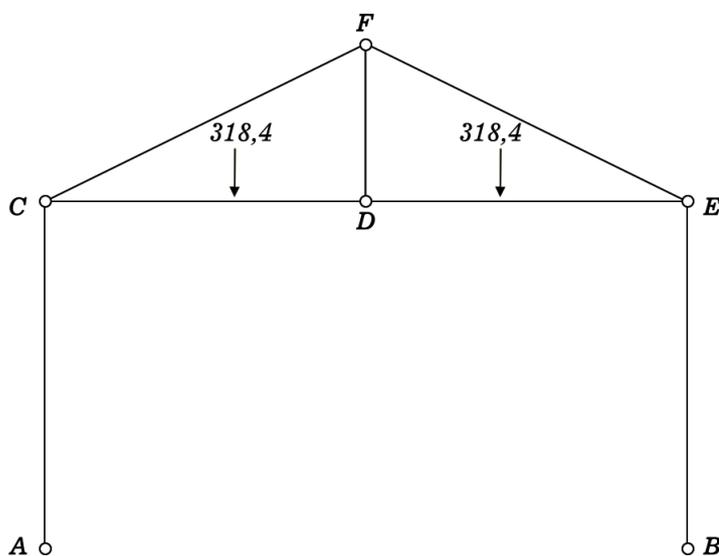


Figura A.36: Cargas concentradas devido às ações da carga acidental no forro.

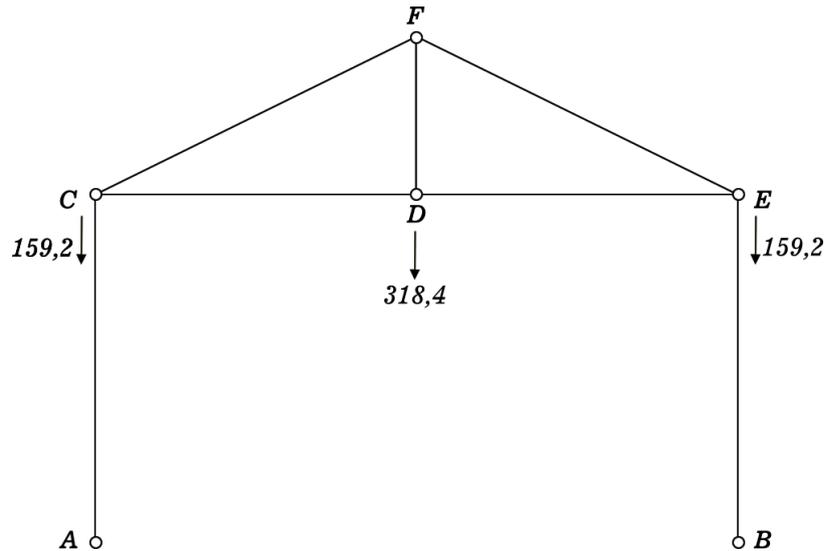


Figura A.37: Cargas dedido às ações da carga acidental no forro distribuídas nos nós.

Passo2: Cálculo dos esforços normais nas barras

Diagrama de corpo livre no nó D (Figura A.38):

$$F_p = 318,4 \text{ N (t)}$$

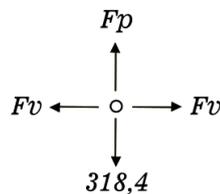


Figura A.38: Diagrama de corpo livre no nó D.

Diagrama de corpo livre no nó F (Figura A.39)

$$-2 \times F_e \times \sin(20^\circ) - 318,4 = 0$$

$$F_e = -465,47 \text{ N (c)}$$

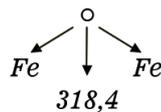


Figura A.39: Diagrama de corpo livre no nó F.

Diagrama de corpo livre no nó E (Figura A.40)

$$-465,47 \times \sin(20^\circ) - F_m = 0$$

$$F_m = -159,2 \text{ N (t)}$$

$$465,47 \times \cos(20^\circ) - F_v = 0$$

$$F_v = 437,4 \text{ N (t)}$$

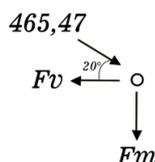


Figura A.40: Diagrama de corpo livre no nó E.

Passo3: Cálculo do momento fletor na viga

$$M_v = \frac{0,2 \times 1592^2}{8} = 63361,6 \text{ Nmm}$$

RESUMO DAS AÇÕES SOLICITANTES

	Ações permanentes	Vento	Sobrecarga	Carga acidental
Empena	272,67 N (c)	309,92 N (t)	229,78 N (c)	465,47 N (c)
Viga	232,57 N (t)	253,23 N (c)	186,95 N (t)	437,4 N (t)
Pendural	53,305 N (t)	0,016 N (t)	1 N (t)	318,4 N (t)
Montante	199,97 N (c)	212 N (t)	158,18 N (c)	159,2 N (t)

A.3.3 Cálculo das reações resistentes

Os dados necessários nos cálculos seguintes estão apresentados nas Tabelas A.2 e A.3, faltando apenas os comprimentos efetivos de flambagem que terão valores individuais para cada peça estrutural. Assim, tem-se:

Empena: $K_x L_x = K_y L_y = K_z L_z = 1.694,171014 \text{ mm}$

Montante: $K_x L_x = K_y L_y = K_z L_z = 3.000 \text{ mm}$

Pendural: $K_x L_x = K_y L_y = K_z L_z = 578,7126725 \text{ mm}$

Viga: $K_x L_x = K_y L_y = K_z L_z = 1.692 \text{ mm}$

Para o cálculo da flambagem à compressão, foi utilizada a norma NBR 14762:2010, em seu Anexo C, que emprega o Método da Resistência Direta. No cálculo de flambagem à flexão foi adotado o Método da Seção Efetiva. Desta forma, todas as equações presentes

são de autoria da norma, sendo alterado apenas o roteiro de cálculo para facilitar o entendimento.

A.3.3.1 Flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção na empena

Passo 1 - Encontrar a força axial de flambagem global (Ne).

Ne é o menor valor obtido em a)Ney e b)Nexy.

a)

$$Ney = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 32.800 \text{ mm}^4}{(1694, 171014 \text{ mm})^2} = 22557, 4026 \text{ N} \quad (\text{A.14})$$

b)

$$Nex = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 188.400 \text{ mm}^4}{(1694, 171014 \text{ mm})^2} = 129567, 5198 \text{ N} \quad (\text{A.15})$$

$$\begin{aligned} Nez &= \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \\ &= \frac{1}{(51, 1 \text{ mm})^2} \left[\frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 59.460.000 \text{ mm}^6}{(1694, 171014 \text{ mm})^2} + 77.000 \text{ N/mm}^2 \times 28 \text{ mm}^4 \right] \\ &= 16485.91 \text{ N} \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

$$\begin{aligned} Nexy &= \frac{Nex + Nez}{2 \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 Nex Nez \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(Nex + Nez)^2}} \right] \\ &= \frac{129567, 5198 \text{ N} + 16485.91 \text{ N}}{2 \left[1 - \left(\frac{32,3 \text{ mm}}{51,1 \text{ mm}} \right)^2 \right]} \times \\ &\quad \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 129567, 5198 \text{ N} \times 16485.91 \text{ N} \left[1 - \left(\frac{32,3 \text{ mm}}{51,1 \text{ mm}} \right)^2 \right]}{(129567, 5198 \text{ N} + 16485.91 \text{ N})^2}} \right] \\ &= 15629.32 \text{ N} \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

Então, $N_e = N_{ey} = 15629.32 N$

Passo 2 - Encontrar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0).

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{141 \text{ mm}^2 \times 250 \text{ N/mm}^2}{15629.32 \text{ N}} \right)^{0,5} = 1,501 \quad (\text{A.18})$$

Passo 3 - Encontrar o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global ($N_{c,Re}$).

$$N_{c,Re} = \left(0,658 \lambda_0^2 \right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (\text{A.19})$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2} \right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (\text{A.20})$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0,877}{1,501^2} \right) 141 \text{ mm}^2 \times 250 \text{ N/mm}^2 = 13706.92 \text{ N} \quad (\text{A.21})$$

A.3.3.2 Flambagem local da empena

Passo 1 - Encontrar o coeficiente de flambagem local para a seção completa (kl). Para encontrar kl , deve-se antes encontrar o valor de η , onde,

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{40 \text{ mm}}{90 \text{ mm}} = 0,4\bar{4}$$

Como os valores de η possui variação de 0,1, será necessário interpolar valores para encontrar kl quando $\eta = 0,4\bar{4}$. Utilizando os η mais próximos do valor encontrado, a interpolação linear ficou:

$$kl = 5,55 + (0,4\bar{4} - 0,4) \left(\frac{5,40 - 5,55}{0,5 - 0,4} \right) = 5,483$$

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b	Caso c	Caso d
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola	Seção rack	Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
0,1	4,25	-	-	-
0,2	4,52	6,04	-	5,67
0,3	4,33	5,73	5,76	5,44
0,4	3,71	5,55	5,61	5,29
0,5	2,88	5,40	5,47	5,16
0,6	2,17	5,26	5,35	5,03
0,7	1,67	5,11	5,23	4,87
0,8	1,32	4,89	5,10	4,66
0,9	1,06	4,56	4,85	4,37
1,0	0,88	4,10	4,56	4,00

NOTA 1 b_f , b_w , b_s e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas Figuras da Tabela 9.

NOTA 2 Para o caso b, os valores são válidos para $0,1 \leq D/b_w \leq 0,3$.

NOTA 3 Para o caso c, os valores são válidos para $0,1 \leq D/b_w \leq 0,3$ e $0,1 \leq b_f/b_w \leq 0,4$.

NOTA 4 Para valores intermediários, interpolar linearmente.

Figura A.41: Valores do coeficiente de flambagem local k_l para barras sob compressão centrada. Fonte: NBR 14762.

Passo 2 - Achar a força axial de flambagem local elástica (Nl).

$$\begin{aligned}
 Nl &= kl \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} A \\
 &= 5,483 \frac{\pi^2 200.000 \text{ N/mm}^2}{12(1 - 0,3^2) \left(\frac{90 \text{ mm}}{0,80 \text{ mm}}\right)^2} 141 \text{ mm}^2 \\
 &= 11.041,7883 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{A.22}$$

Passo 3 - Achar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local (λ_l).

$$\lambda_l = \left(\frac{N_{c,Re}}{Nl}\right)^{0,5} = \left(\frac{12659,56123 \text{ N}}{11.041,7883 \text{ N}}\right)^{0,5} = 1.11 \tag{A.23}$$

Passo 4 - Encontrar o valor característico da força axial de compressão resistente,

associado à flambagem local ($N_{c,Rl}$).

$$N_{c,Rl} = N_{c,Re} \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (\text{A.24})$$

$$N_{c,Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_l > 0,776 \quad (\text{A.25})$$

$$\begin{aligned} N_{c,Rl} &= \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} \\ &= \left(1 - \frac{0,15}{1,11^{0,8}}\right) \frac{12659,56123}{1,11^{0,8}} \\ &= 10842,04 \text{ N} \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

A.3.3.3 Resistência final a compressão da empena

Finalizando o resultado da resistência a compressão do montante, tem-se que o valor característico da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}$) é o menor valor entre o global e o local (esta norma não trata do problema de flambagem distorcional a compressão).

Assim,

$$N_{c,Rk} = 10842,04 \text{ N}$$

A força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{N_{c,Rk}}{\gamma}$$

Onde γ é o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral. Nesse caso assume o valor de 1,2.

Então,

$$N_{c,Rd} = \frac{10842,04 \text{ N}}{1,2} = 9035 \text{ N}$$

A.3.3.4 Flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção na viga

Passo 1 - Encontrar a força axial de flambagem global (N_e).

N_e é o menor valor obtido em a) N_{ey} e b) N_{exy} .

a)

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 32.800 \text{ mm}^4}{(1592 \text{ mm})^2} = 25545,67943 \text{ N} \quad (\text{A.27})$$

b)

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 188.400 \text{ mm}^4}{(1592 \text{ mm})^2} = 146731,8904 \text{ N} \quad (\text{A.28})$$

$$\begin{aligned} N_{ez} &= \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \\ &= \frac{1}{(51,1 \text{ mm})^2} \left[\frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 59.460.000 \text{ mm}^6}{(1592 \text{ mm})^2} + 77.000 \text{ N/mm}^2 \times 28 \text{ mm}^4 \right] \\ &= 18560,4881 \text{ N} \end{aligned} \quad (\text{A.29})$$

$$\begin{aligned} N_{exy} &= \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 N_{ex} N_{ez} \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \\ &= \frac{146731,8904 \text{ N} + 18560,4881 \text{ N}}{2 \left[1 - \left(\frac{32,3 \text{ mm}}{51,1 \text{ mm}} \right)^2 \right]} \times \\ &\quad \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 146731,8904 \text{ N} \times 18560,4881 \text{ N} \left[1 - \left(\frac{32,3 \text{ mm}}{51,1 \text{ mm}} \right)^2 \right]}{(146731,8904 \text{ N} + 18560,4881 \text{ N})^2}} \right] \\ &= 17601,8541 \text{ N} \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

Então, $N_e = N_{exy} = 17601,8541 \text{ N}$

Passo 2 - Encontrar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0).

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{141 \text{ mm}^2 \times 250 \text{ N/mm}^2}{17601,8541 \text{ N}} \right)^{0,5} = 1,41 \quad (\text{A.31})$$

Passo 3 - Encontrar o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global ($N_{c,Re}$).

$$N_{c,Re} = \left(0,658^{\lambda_0^2} \right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (\text{A.32})$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2} \right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (\text{A.33})$$

$$N_{c,Re} = \left(0,658^{1,41^2} \right) 141 \text{ mm}^2 \times 250 \text{ N/mm}^2 = 15338,19 \text{ N} \quad (\text{A.34})$$

A.3.3.5 Flambagem local da viga

Os passos 1 e 2 são os mesmos da flambagem local da empena com $Nl = 11.041,7883 \text{ N}$.

Passo 3 - Achar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local (λ_l).

$$\lambda_l = \left(\frac{N_{c,Re}}{Nl} \right)^{0,5} = \left(\frac{15338,19 \text{ N}}{11.041,7883 \text{ N}} \right)^{0,5} = 1,1786 \quad (\text{A.35})$$

Passo 4 - Encontrar o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local ($N_{c,Rl}$).

$$N_{c,Rl} = N_{c,Re} \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (\text{A.36})$$

$$N_{c,Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_l > 0,776 \quad (\text{A.37})$$

Então,

$$N_{c,Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{1,1786^{0,8}} \right) \frac{15338,19}{1,1786^{0,8}} = 11679,92 \text{ N} \quad (\text{A.38})$$

A.3.3.6 Resistência final a compressão da viga

Finalizando o resultado da resistência a compressão do montante, tem-se que o valor característico da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}$) é o menor valor entre o global e o local (esta norma não trata do problema de flambagem distorcional a compressão).

Assim,

$$N_{c,Rk} = 11679,92 \text{ N}$$

A força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{N_{c,Rk}}{\gamma}$$

Onde γ é o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral. Nesse caso assume o valor de 1,2.

Então,

$$N_{c,Rd} = \frac{11679,92 \text{ N}}{1,2} = 9733,2658 \text{ N}$$

A.3.3.7 Flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção no montante

Passo 1 - Encontrar a força axial de flambagem global (N_e).

N_e é o menor valor obtido em a) N_{ey} e b) N_{ex} .

a)

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 32.800 \text{ mm}^4}{(3.000 \text{ mm})^2} = 7.193,844986 \text{ N} \quad (\text{A.39})$$

b)

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 188.400 \text{ mm}^4}{(3.000 \text{ mm})^2} = 41.320,74376 \text{ N} \quad (\text{A.40})$$

$$\begin{aligned}
N_{ez} &= \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(KzLz)^2} + GJ \right] \\
&= \frac{1}{(51,1 \text{ mm})^2} \left[\frac{\pi^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2 \times 59.460.000 \text{ mm}^6}{(3.000 \text{ mm})^2} + 77.000 \text{ N/mm}^2 \times 28 \text{ mm}^4 \right] \\
&= 5.819,921524 \text{ N}
\end{aligned} \tag{A.41}$$

$$\begin{aligned}
N_{exy} &= \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 N_{ex} N_{ez} \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \\
&= \frac{41.320,74376 \text{ N} + 5.819,921524 \text{ N}}{2 \left[1 - \left(\frac{32,3 \text{ mm}}{51,1 \text{ mm}} \right)^2 \right]} \times \\
&\quad \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 41.320,74376 \text{ N} \times 5.819,921524 \text{ N} \left[1 - \left(\frac{32,3 \text{ mm}}{51,1 \text{ mm}} \right)^2 \right]}{(41.320,74376 \text{ N} + 5.819,921524 \text{ N})^2}} \right] \\
&= 5.486,38536 \text{ N}
\end{aligned} \tag{A.42}$$

Então, $N_e = N_{exy} = 5.486,38536 \text{ N}$

Passo 2 - Encontrar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0).

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{141 \text{ mm}^2 \times 250 \text{ N/mm}^2}{5.486,38536 \text{ N}} \right)^{0,5} = 2,534757439 \tag{A.43}$$

Passo 3 - Encontrar o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global ($N_{c,Re}$).

$$N_{c,Re} = \left(0,658^{\lambda_0^2} \right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \tag{A.44}$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2} \right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \tag{A.45}$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0,877}{2,534757439^2} \right) 141 \text{ mm}^2 \times 250 \text{ N/mm}^2 = 4.811,559961 \text{ N} \quad (\text{A.46})$$

A.3.3.8 Flambagem local do montante

Os passos 1 e 2 são os mesmos da flambagem local da empena com $Nl = 11.041,7883 \text{ N}$.

Passo 3 - Achar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local (λ_l).

$$\lambda_l = \left(\frac{N_{c,Re}}{Nl} \right)^{0,5} = \left(\frac{4811,559961 \text{ N}}{11.041,7883 \text{ N}} \right)^{0,5} = 0,660120535 \quad (\text{A.47})$$

Passo 4 - Encontrar o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local ($N_{c,Rl}$).

$$N_{c,Rl} = N_{c,Re} \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (\text{A.48})$$

$$N_{c,Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_l > 0,776 \quad (\text{A.49})$$

$$N_{c,Rl} = N_{c,Re} = 4.811,559961 \text{ N}$$

A.3.3.9 Resistência final a compressão do montante

Finalizando o resultado da resistência a compressão do montante, tem-se que o valor característico da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}$) é o menor valor entre o global e o local (esta norma não trata do problema de flambagem distorcional a compressão).

Assim,

$$N_{c,Rk} = 4.811,559961 \text{ N}$$

A força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{N_{c,Rk}}{\gamma}$$

Onde γ é o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral. Nesse caso assume o valor de 1,2.

Então,

$$N_{c,Rd} = \frac{4.811,559961 N}{1,2} = 4.009,6333088 N$$

A.3.3.10 Início de escoamento da seção efetiva para a empena e viga

Passo 1 - Encontrar o coeficiente de flambagem local para a seção completa (kl)(não é o mesmo da compressão).

Conforme a Tabela 13, página 47, para encontrar kl deve-se ter os valores de η e μ , sendo:

$$\eta = \frac{b_f}{b_4} = \frac{40 mm}{90 mm} = 0,4\bar{4}$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{12 mm}{90 mm} = 0,1\bar{3}$$

Novamente, vai ser preciso interpolar linearmente para encontrar kl ,

$$kl = 24,8 + (0,4\bar{4} - 0,4) \frac{18,7 - 24,8}{0,5 - 0,4} = 22,09$$

Passo 2 - Calcular o momento fletor de flambagem local elástica (Ml)

$$\begin{aligned} Ml &= kl \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} W_c \\ &= 22,09 \frac{\pi^2 200.000 N/mm^2}{12(1 - 0,3^2) \left(\frac{90 mm}{0,80 mm}\right)^2} 2.450 mm^3 \\ &= 772.972,1702 Nmm \end{aligned} \tag{A.50}$$

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b			Caso c
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido			Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
		$\mu \leq 0,2$	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,3$	
0,2	18,4	32,0	25,8	21,2	31,0
0,3	9,6	29,3	23,8	19,7	28,9
0,4	5,6	24,8	20,7	18,2	25,6
0,5	3,6	18,7	17,6	16,0	19,5
0,6	2,6	13,6	13,3	13,0	14,2
0,7	1,9	10,2	10,1	10,1	10,6
0,8	1,5	7,9	7,9	7,9	8,2
0,9	1,2	6,2	6,3	6,3	6,6
1,0	1,0	5,1	5,1	5,1	5,3

NOTA 1 b_f , b_w e D são a largura nominal da mesa, da alma e do enrijecedor de borda, respectivamente.

NOTA 2 $\mu = D/b_w$.

NOTA 3 Para valores intermediários interpolar linearmente.

Figura A.42: Valores do coeficiente de flambagem local k_l da seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia. Fonte: NBR 14762.

Passo 3 - Achar o índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa (λ_p).

$$\lambda_p = \left(\frac{W f_y}{Ml} \right)^{0.5} = \left(\frac{2.450 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2}{772.972,1702 \text{ Nmm}} \right)^{0.5} = 0,890166236$$

Passo 4 - Encontrar o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento (W_{ef}).

$$W_{ef} = W \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{ef} = W \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

Então,

$$W_{ef} = 2.450 \text{ mm}^3 \left(1 - \frac{0,22}{0,890166236} \right) \frac{1}{0,890166236} = 2.072,0794 \text{ mm}^3$$

Passo 5 - Encontrar momento fletor resistente de cálculo (M_{rd}).

$$M_{rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \text{ com } \gamma = 1,10$$

Assim,

$$M_{rd} = \frac{2.072,0794 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2}{1,10} = 470.927,1363 \text{ Nmm} \quad (\text{A.51})$$

A.3.3.11 Flambagem lateral com torção na viga

Passo 1 - Encontrar a força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y (N_{ey}).

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 2.000 \text{ N/mm}^2 \times 32.800 \text{ mm}^4}{(1692 \text{ mm})^2} = 22.615,32677 \text{ N}$$

Passo 2 - Calcular a força axial de flambagem global elástica por torção (N_{ez}).

$$\begin{aligned} N_{ez} &= \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \\ &= \frac{1}{51,1 \text{ mm}^2} \left[\frac{\pi^2 \times 2.000 \text{ N/mm}^2 \times 59.460.000 \text{ mm}^6}{(1692 \text{ mm})^2} + 77.000 \text{ N/mm}^2 \times 28 \text{ mm}^4 \right] \\ &= 16.526,12187 \text{ N} \end{aligned}$$

Passo 3 - Encontrar o momento fletor de flambagem global elástica (M_e).

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} = 1 \times 51,1 \text{ mm} (22.615,32677 \text{ N} \times 16.526,12187 \text{ N})^{0,5} = 987.888,2256 \text{ Nmm}$$

Passo 4 - Encontrar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0).

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{2.450 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2}{987.888, 2256 \text{ Nmm}} \right)^{0,5} = 0,787406765$$

Passo 5 - Calcular o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção (χ_{FLT}).

$$\chi_{FLT} = 1 \quad \text{para } \lambda_0 \leq 0,6$$

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278 \lambda_0^2) \quad \text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336$$

$$\chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 \geq 1,336$$

Então,

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278 \times 0,787406765^2) = 0,918677495$$

Passo 6 - Achar o índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa (λ_p).

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi_{FLT} W_c f_y}{M_l} \right)^{0,5} = \left(\frac{0,918677495 \times 2.450 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2}{772.972, 1702 \text{ Nmm}} \right)^{0,5} = 0,853203554$$

Passo 7 - Encontrar o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida ($W_{c,ef}$).

$$W_{c,ef} = W_c \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{c,ef} = W_c \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p > 0,673$$

Então,

$$W_{c,ef} = 2.450 \text{ mm}^3 \left(1 - \frac{0,22}{0,853203554} \right) \frac{1}{0,853203554} = 2.131,101411 \text{ mm}^3$$

Passo 8 - Calcular o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}).

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma}$$

Sendo $\gamma = 1,10$, então M_{Rd} fica:

$$M_{Rd} = \frac{0,918677495 \times 2.131,101411 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2}{1,10} = 444.953,3877 \text{ Nmm}$$

A.3.3.12 Flambagem lateral com torção na empena

Passo 1 - Encontrar a força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y (N_{ey}).

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 2.000 \text{ N/mm}^2 \times 32.800 \text{ mm}^4}{(1694,171014 \text{ mm})^2} = 22.557,4026 \text{ N}$$

Passo 2 - Calcular a força axial de flambagem global elástica por torção (N_{ez}).

$$\begin{aligned} N_{ez} &= \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \\ &= \frac{1}{51,1 \text{ mm}^2} \left[\frac{\pi^2 \times 2.000 \text{ N/mm}^2 \times 59.460.000 \text{ mm}^6}{(1694,171014 \text{ mm})^2} + 77.000 \text{ N/mm}^2 \times 28 \text{ mm}^4 \right] \\ &= 16.485,90863 \text{ N} \end{aligned}$$

Passo 3 - Calcular o momento fletor de flambagem global elástica (M_e).

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} = 1 \times 51,1 \text{ mm} (22.557,4026 \text{ N} \times 16.485,90863 \text{ N})^{0,5} = 985.421,1738 \text{ Nmm}$$

Passo 4 - Encontrar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0).

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{2.450 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2}{985.421, 1738 \text{ Nmm}} \right)^{0,5} = 0,788391805$$

Passo 5 - Encontrar o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção (χ_{FLT}).

$$\chi_{FLT} = 1 \quad \text{para } \lambda_0 \leq 0,6$$

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278 \lambda_0^2) \quad \text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336$$

$$\chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 \geq 1,336$$

Então,

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278 \times 0,788391805^2) = 0,918198509$$

Passo 6 - Achar o índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa (λ_p).

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi_{FLT} W_c f_y}{M_l} \right)^{0,5} = \left(\frac{0,918198509 \times 2.450 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2}{772.972, 1702 \text{ Nmm}} \right)^{0,5} = 0,852981101$$

Passo 7 - Encontrar o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida ($W_{c,ef}$).

$$W_{c,ef} = W_c \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{c,ef} = W_c \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p > 0,673$$

Então,

$$W_{c,ef} = 2.450mm^3 \left(1 - \frac{0,22}{0,852981101} \right) \frac{1}{0,852981101} = 2.131,46404 mm^3$$

Passo 8 - Calcular o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}).

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma}$$

Sendo $\gamma = 1,10$, então M_{Rd} fica:

$$M_{Rd} = \frac{0,918677495 \times 2.131,46404 mm^3 \times 250 N/mm^2}{1,10} = 444.797,0691 Nmm$$

A.3.3.13 Flambagem distorcional na viga e empena

A NBR 14762:2010 não apresenta uma formulação para o cálculo de flambagem distorcional à flexão. Contudo, Grossi e Malite (2013) elaboraram uma formulação que será aplicada neste trabalho.

Passo 1 - Encontrar α .

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,001 \left(\frac{b_f}{t} \right)^{1,1} \left(\frac{b_w}{D} \right)^{0,8} \frac{f_y}{300} \\ &= 0,001 \left(\frac{40 mm}{0,80 mm} \right)^{1,1} \left(\frac{90 mm}{12 mm} \right)^{0,8} \frac{250 N/mm^2}{300} \\ &= 0,308840871 \end{aligned}$$

Passo 2 - Encontrar χ_{dist} .

$$\chi_{dist} = -0,098 \alpha^3 + 0,536 \alpha^2 - 1,056 \alpha + 1,1 = 0,822102267$$

Passo 3 - Calcular o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}).

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma}$$

Sendo $\gamma = 1,10$, então M_{Rd} fica:

$$M_{Rd} = \frac{0,822102267 \times 2.450 \text{ mm}^3 \times 250 \text{ N/mm}^2}{1,10} = 457.761,4899 \text{ Nmm}$$

A.4 Dificuldades encontradas

Um dos fundamentos primordiais para a execução deste trabalho é a programação, e Ruby facilita bastante a vida de um programador por oferecer tipagem dinâmica de variáveis e um alto grau de ortogonalidade que dá a liberdade de criar vetores com variáveis de quaisquer tipos, inclusive um único vetor composto por valores inteiros, reais ou do tipo texto.

Apesar disso, o SketchUp apresenta algumas restrições que merecem ser mencionadas. Durante a elaboração do código gerador do *plugin*, vários erros de programação ocorreram, o que é comum em um ambiente de produção em computador. Contudo, o SketchUp não oferece, ao menos até o momento, um ambiente robusto para a programação.

Todo estudante de programação começa seu progresso criando pequenos códigos, compilando-os e esperando não encontrar nenhum tipo de erro, mas quando esse acontece, o compilador logo avisa a linha onde o mesmo ocorreu e geralmente especifica qual é o problema que o ocasiona. Ruby é uma linguagem interpretada, portanto não existe um compilador que leia o código fonte e gere um arquivo executável. O próprio código fonte é o executável, cabendo somente ao interpretador o poder de executá-lo.

Dito isso, as formas de um interpretador ou compilador lerem o código fonte são basicamente as mesmas, e por isso mesmo, o seu *feedback* para o programador lhe informando possíveis erros deveria ser o mesmo. Infelizmente a IDE do SketchUp é bastante simples e esse útil recurso de apontar o erro do código não ocorre de forma eficiente, mostrando apenas erros simples com mais exatidão. Quando o código vai ganhando volume e complexidade, os erros encontrados são apenas apontados como “existe um erro no seu código”. Não há uma maior especificação, nem indicação do local do erro, deixando para o programador a tarefa de encontrá-lo. Também ocorreram casos onde o SketchUp acusava erro para comandos corretos, fenômeno esse conhecido na computação

por *bug*⁶.

Problemas de aproximação numérica também foram constantes. A Figura A.43 exemplifica um caso em erros de aproximação podem tornar o desenho impreciso. As arestas das linhas em azul e preta deveriam se encontrar. Mesmo utilizando o máximo valor de aproximação numérica que o Ruby permite, o erro persiste. Uma solução é refazer o algoritmo com métodos que evitem esses problemas. Não tratar esses pequenos erros podem acarretar em erros bem maiores, através do acúmulo de aproximações.

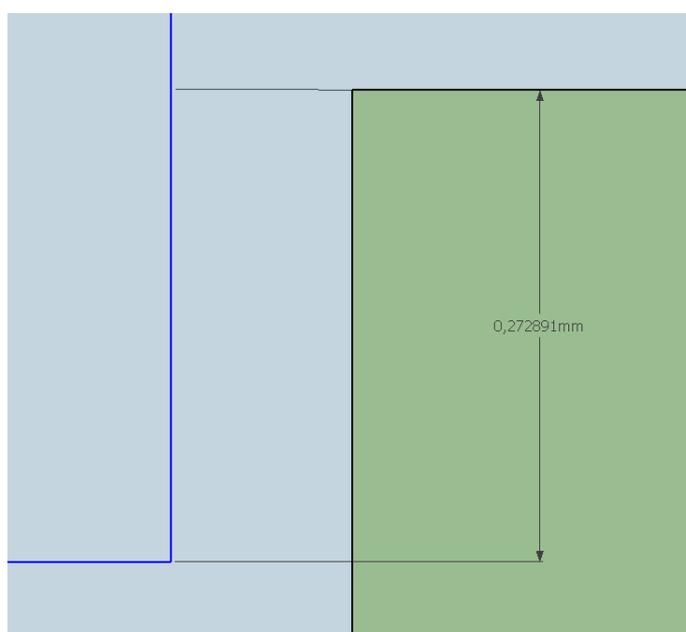
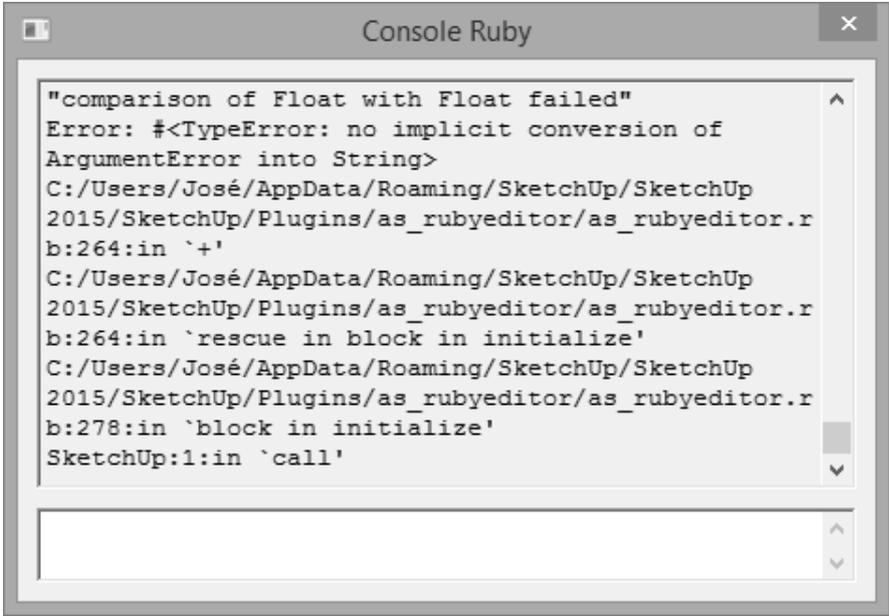


Figura A.43: Desenho gerado pelo algoritmo pode nem sempre representar uma solução numericamente exata.

A Figura A.44 exemplifica o *feedback* do SketchUp quando o interpretador encontrou um erro durante a implementação da ferramenta. É possível notar que o erro, entre aspas, não faz nenhum sentido lógico, apenas informando que “a comparação de um número real com um número real fracassou”, em uma tradução livre. As linhas que se seguem são referentes ao plugin *Ruby Editor*, e não ao erro.

⁶Problema inesperado com um *software* ou *hardware* que faz com que ele falhe, ou é apenas irritante para o usuário. Erros de *hardware* são corrigidos por um novo projeto de circuitos, erros de *software* demandam arquivos de atualização, que eventualmente também podem conter *bugs*. Fonte: <http://www.businessdictionary.com/definition/bug.html#ixzz3QXY3pVvx>

A screenshot of a 'Console Ruby' window. The window title is 'Console Ruby' and it has a close button in the top right corner. The main area contains a stack trace for a Ruby error. The error message is: "comparison of Float with Float failed". Below it, the error details are: Error: #<TypeError: no implicit conversion of ArgumentError into String>. The stack trace shows the following frames from top to bottom: C:/Users/José/AppData/Roaming/SketchUp/SketchUp 2015/SketchUp/Plugins/as_rubyeditor/as_rubyeditor.r b:264:in `+'; C:/Users/José/AppData/Roaming/SketchUp/SketchUp 2015/SketchUp/Plugins/as_rubyeditor/as_rubyeditor.r b:264:in `rescue in block in initialize'; C:/Users/José/AppData/Roaming/SketchUp/SketchUp 2015/SketchUp/Plugins/as_rubyeditor/as_rubyeditor.r b:278:in `block in initialize'; and SketchUp:1:in `call'. There is a scrollbar on the right side of the text area, and an empty input field is visible at the bottom of the window.

```
"comparison of Float with Float failed"
Error: #<TypeError: no implicit conversion of
ArgumentError into String>
C:/Users/José/AppData/Roaming/SketchUp/SketchUp
2015/SketchUp/Plugins/as_rubyeditor/as_rubyeditor.r
b:264:in `+'
C:/Users/José/AppData/Roaming/SketchUp/SketchUp
2015/SketchUp/Plugins/as_rubyeditor/as_rubyeditor.r
b:264:in `rescue in block in initialize'
C:/Users/José/AppData/Roaming/SketchUp/SketchUp
2015/SketchUp/Plugins/as_rubyeditor/as_rubyeditor.r
b:278:in `block in initialize'
SketchUp:1:in `call'
```

Figura A.44: Um dos erros encontrados durante a implementação.

APÊNDICE B - Exemplo teste

B.1 Resultados gerados em arquivo

DADOS DA EDIFICAÇÃO

largura máxima = 3184.0000000000005 mm
 profundidade máxima = 4200.0 mm
 angulo = 19.99998814309794

DADOS GERAIS DO AÇO

Módulo de Elasticidade (E) = 200000.0 N/mm²
 Módulo de Elasticidade Transversal (G) = 77000 N/mm²
 Coeficiente de Poisson (ν) = 0.3 (adimensional)
 Resistência ao Escoamento do Aço (f_y) = 250 N/mm²

DADOS DO PERFIL

Área da seção transversal = 141.0 mm²
 bw = 90.0 mm
 bf = 40.0 mm
 d = 12.0 mm
 t = 0.8000000000000002 mm
 I_y = 32800.0 mm⁴
 I_x = 188400.0 mm⁴
 C_w = 59460000.0 mm⁶
 J = 28.0 mm⁴
 r₀ = 51.1 mm
 x₀ = 32.3 mm
 W = W_c = W_y = 2450.0 mm³

 # AÇÕES SOLICITANTES #
 #####

DADOS DO VENTO

v_k = 26.07
 h = 3000.0
 a = 4200.0
 b = 3184.0000000000005
 h.b = 0.9422110552763818
 a.b = 1.3190954773869346
 Caso 1: C_{pe}(0) + C_{pi}(cpi-1)
 -0.9
 -0.9
 -0.8
 -0.8
 Caso 2: C_{pe}(0) + C_{pi}(cpi-2)
 -0.6000000000000001

-0.6000000000000001
 -0.5
 -0.5
 Caso 3: Cpe(90) + Cpi(cpi_1)
 0.7
 -0.5
 -0.7000007114141236
 -0.5000002371380412
 Caso 4: Cpe(90) + Cpi(cpi_2)
 1.0
 -0.2
 -0.4000007114141236
 -0.20000023713804121

carga de tração distribuída do vento = 0.133319143584

Legenda

f_ = força axial
 m_ = momento fletor
 .e = empena
 .v = viga
 .m = montante
 .p = pendural

Causas:

q1 = vento
 q2 = sobrecarga
 q3 = carga acid.

(c) = compressão
 (t) = tração

Valores em N

AÇÕES PERMANENTES

fp = 53.3046191475178 (t)
 fe = 272.703659360359 (c)
 fm = 199.93616611128988 (c)
 fv = 232.59434505416246 (t)
 me = 29303.59629329239
 mv = 9969.472548000005

AÇÕES DO VENTO

fm_q1 = 212.24407659188506 (t)
 fe_q1 = 310.28025893951474 (t)
 fv_q1 = 252.9428533931183 (c)
 fp_q1 = 0.0 (t)
 me_q1 = -47831.825574946124

AÇÕES DA SOBRECARGA NA EMPENA

```

=====
fm_q2 = 159.20000000461832 (c)
fe_q2 = 232.73496258548752 (c)
fv_q2 = 189.72733141939767 (t)
fp_q2 = 0.0 (t)
me = 29303.59629329239

```

```

=====
AÇÕES DA CARGA ACIDENTAL NA VIGA
=====
fp_q3 = 318.4000000000001 (t)
fe_q3 = 465.4699251574721 (c)
fm_q3 = 159.20000000000005 (t)
fv_q3 = 437.3986868134182 (t)
mv_q3 = 63361.600000000035

```

```

=====
AÇÕES DE COMPRESSÃO
=====
compressão maxima na empena = 970.9085471033186
compressão maxima na viga = 20.34850833895584
compressão maxima no montante = 359.13616611590817

```

```

=====
AÇÕES DE MOMENTO FLETOR
=====
m_e = 65181.28368993313
m_v = 73331.07254800004

```

```

#####
# REAÇÕES RESISTENTES #
#####

```

```

=====
FLEXÃO NA EMPENA
=====
Início do escoamento da seção efetiva
Ml = 772933.2902567459
lambda p = 0.8901886242752042
w_efetivo = 2072.0443938147027
Mrd (item 9.8.2.1) = 470919.1804124324 Nmm

```

```

Flambagem lateral com torção
Me = 985421.3186125275
lambda_zero = 0.7883917476531628
Xflt = 0.9181985375898716
w_efetivo = 2131.429042372896
lambda_p = 0.8530025677355968
Mrd (item 9.8.2.2) = 444789.779473494 Nmm

```

```

Flambagem torcional
alfa = 0.30884087160027557
x_dist = 0.7961202483704088
Mrd (grossi) = 443294.22920625034 Nmm

```

```

Mrd (final) = 443294.22920625034 Nmm

```

=====
 COMPRESÃO NA EMPENA
 =====

FLAMBAGEM GLOBAL

Ney = 22557.40599838951
 Nex = 129567.53933221291
 Nez = 16485.91098762923
 Nexz = 15629.319148879924
 Ne = 15629.319148879924
 lambda zero = 1.5017911160823476
 Ncre = 13706.91289356769

FLAMBAGEM LOCAL

kl = 5.483333333333333
 Nl = 11042.459574298904
 lambda.l = 1.114132690743555
 Ncrl = 10842.042485482649

Ncrd (final) = 9035.035404568875 N

=====
 FLEXÃO NA VIGA
 =====

Início do escoamento da seção efetiva

Ml = 772933.2902567459
 lambda p = 0.8901886242752042
 w_efetivo = 2072.0443938147027
 Mrd (item 9.8.2.1) = 470919.1804124324 Nmm

Flambagem lateral com torção

Me = 1112690.3621402725
 lambda.zero = 0.741935041711782
 Xft = 0.9401367061035325
 w_efetivo = 2115.0057497541648
 lambda.p = 0.8631326493595022
 Mrd (item 9.8.2.2) = 451907.84976452554 Nmm

Flambagem torcional

alfa = 0.30884087160027557
 x_dist = 0.7961202483704088
 Mrd (grossi) = 443294.22920625034 Nmm

Mrd (final) = 443294.22920625034 Nmm

=====
 COMPRESÃO NA VIGA
 =====

FLAMBAGEM GLOBAL

Ney = 25545.679430106786
 Nex = 146731.89038512556
 Nez = 18560.488158351098
 Nexz = 17601.85419791111
 Ne = 17601.85419791111
 lambda zero = 1.4151430767644233
 Ncre = 15245.19050797437

FLAMBAGEM LOCAL

kl = 5.483333333333333

$Nl = 11042.459574298904$
 $\lambda_l = 1.1749882371519165$
 $Ncr1 = 11633.307106908904$

$Ncrd \text{ (final)} = 9694.422589090753 \text{ N}$

=====
 COMPRESÃO NO MONTANTE
 =====

FLAMBAGEM GLOBAL
 $Ney = 4641181.030963186$
 $Nex = 26658491.043703176$
 $Nez = 3222916.43063466$
 $Nexz = 3063946.824084318$
 $Ne = 3063946.824084318$
 $\lambda \text{ zero} = 0.1072602855515441$
 $Ncre = 35080.66781553438$

FLAMBAGEM LOCAL
 $kl = 5.483333333333333$
 $Nl = 11042.459574298904$
 $\lambda_l = 1.782382941791232$
 $Ncr1 = 20006.459695703685$

$Ncrd \text{ (final)} = 16672.04974641974 \text{ N}$