

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO
DE COBERTURAS METÁLICAS DE QUADRAS
POLIESPORTIVAS EXECUTADAS COM PERFIS DE AÇO
FORMADOS A FRIO

Autor: Phelippe Mendonça de Paiva
Orientador: Dr. Michell Macedo Alves

RIO VERDE - GO
Outubro – 2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO
DE COBERTURAS METÁLICAS DE QUADRAS
POLIESPORTIVAS EXECUTADAS COM PERFIS DE AÇO
FORMADOS A FRIO

Autor: Phelippe Mendonça de Paiva
Orientador: Dr. Michell Macedo Alves

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

RIO VERDE - GO
Outubro - 2020

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Paiva, Phelippe
P149a Avaliação e Otimização de Coberturas Metálicas de
Quadras Poliesportivas Executadas com Perfis de Aço
Formados a Frio / Phelippe Paiva; orientador
Michell Macedo Alves; co-orientador Flavio Hiochio
Sato. -- Rio Verde, 2020.
85 p.

Tese (Doutorado em Programa de Pós Graduação em
Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) --
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

1. Galpões de uso geral. 2. Consumo de aço. 3.
Pórticos Treliçados. I. Macedo Alves, Michell ,
orient. II. Hiochio Sato, Flavio, co-orient. III.
Título.



INSTITUTO FEDERAL
Goiano

Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano
Sistema Integrado de Bibliotecas

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia - Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Phelippe Mendonça de Paiva

Matrícula: 2018202331440086

Título do Trabalho: Avaliação e Otimização de Coberturas Metálicas de Quadras Poliesportivas Executadas com Perfis de Aço Formados a Frio

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 07/12/2020

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde - GO, 18/11/2020.

Local Data

Phelippe Mendonça de Paiva

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

M. Daniel Mendes da Silva

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 49/2020 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA Nº/32
BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 16 dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte, às 13h30min (treze horas e trinta minutos), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada por videoconferência, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **Phelippe Mendonça de Paiva**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Michell Macedo Alves, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor para, em 30 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a Dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade**, na área de concentração em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa dissertação em periódicos após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

Membros da Banca Examinadora

Nome	Instituição	Situação no Programa
Prof. Dr. Michell Macedo Alves	IF Goiano – Campus Rio Verde	Presidente
Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis	IF Goiano – Campus Rio Verde	Membro interno

Prof. Dr. Adnauer Tarquínio Daltro	UFMT - Cuiabá	Membro externo
------------------------------------	---------------	----------------

Documento assinado eletronicamente por:

- Adnauer Tarquínio Daltro, Adnauer Tarquínio Daltro - 234310 - Professor de engenharia - Ufimt (33004540000100), em 06/11/2020 18:54:23.
- Idakci Cruvinel dos Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/10/2020 07:21:35.
- Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 16/10/2020 16:03:47.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/07/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar_documento/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 164012

Código de Autenticação: 2320cd2e16



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio incansável em toda minha trajetória acadêmica, pois sempre fizeram o máximo para me ajudar e apoiar nas minhas decisões, o que foi fundamental para a minha formação pessoal e profissional.

A minha noiva amada que é minha melhor amiga e meu poço infindável de coragem e inspiração, e que também contribuiu muito para minha formação pessoal por se tratar de uma pessoa admirável e com princípios nobres.

Aos três orientadores que tive durante o trabalho, os professores: Aleksandro dos Santos Felipe, Flávio Hiochio Sato e Michell Macedo Alves. Cada um teve sua contribuição que permitiu chegar ao final da pesquisa e do programa, por isso sou eternamente grato aos três professores.

Ao meu chefe Tyrone César Furquim de Oliveira que possibilitou algumas janelas semanais para que eu pudesse cursar o programa de pós-graduação de engenharia aplicada enquanto trabalhava, o que foi uma das maiores realizações pessoais da minha vida, porque tive a oportunidade de desenvolver como profissional e paralelamente construir minha vida acadêmica, e mostrou que os dois caminhos estão muito conectados.

A todos meus colegas de trabalho que de certa forma me apoiaram nos momentos que eu estava ausente, o que foi essencial para eu poder conciliar a carreira acadêmica com a rotina de trabalho.

Aos meus colegas de classe da pós-graduação os quais tive o prazer de compartilhar de muitos momentos de aprendizado. E, a todos os professores do programa que tive o prazer de cursar suas respectivas disciplinas, com atenção especial para os professores: Cristiane Alvarenga Gajo, Eloiza da Silva Nunes e Idalci Cruvinel dos Reis que me ajudaram durante o percurso e de certa forma me inspiraram a tornar um profissional mais gabaritado.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Phelippe Mendonça de Paiva, nascido em Rio Verde – GO, filho de Julia Maria Mendonça de Paiva e Odélio Silva de Paiva. Concluiu o ensino médio no Colégio da Polícia Militar de Goiás, Unidade Carlos Cunha Filho – com sede em Rio Verde – GO. Engenheiro Civil pela Universidade de Uberaba (UNIUBE), pós-graduado em engenharia de estruturas pela Faculdade de Estudos Administrativos de Minas Gerais (FEAD). Mestrando no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, nível de mestrado profissional, na linha de tecnologia e ciência dos materiais, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde – GO. Formado em inglês pela escola Dominion English Center em Uberaba – MG. Engenheiro Civil da Secretaria de Infraestrutura e Desenvolvimento Urbano de Rio Verde – GO, com experiência em projetos estruturais, obras públicas/privadas, orçamentos e licitações.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	xii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Composição da Estrutura de Galpões de Uso Geral	3
1.2.1 Tipos de pórticos para galpões de uso geral.....	3
1.2.1.1 Pórticos com vigas laminadas tipo I	4
1.2.1.2 Pórticos com vigas treliçada	5
1.3 Perfis de Aço Formados a Frio.....	5
1.3.1 Método da largura efetiva.....	6
1.4 Dimensionamento do Modelo Teórico VTT da Obra do Céu Azul.....	7
1.4.1 Características geométricas do modelo VTT	7
1.4.2 Softwares utilizados.....	9
1.4.2.1 Dimensionamento dos perfis formados a frio.....	11
No software Dimperfil são realizados todos os cálculos de verificação da resistência de um perfil dobrado (tração, compressão, força cortante, flexão, flexocompressão, flexotorção e esforços combinados), através do método da largura efetiva.	
	11

1.4.2.1.1	Dimensionamento à tração.....	11
1.4.2.1.2	Dimensionamento à compressão	12
1.4.2.1.2.1	Força resistente de cálculo em razão da instabilidade por flexão, torção ou por flexotorção.....	13
1.4.2.1.2.2	Força resistente de cálculo por instabilidade distorcional.....	13
1.4.2.1.3	Dimensionamento à flexão	14
1.4.2.1.3.1	Momento fletor do escoamento da seção efetiva	14
1.4.2.1.3.2	Momento fletor em virtude da instabilidade lateral com torção	15
1.4.2.1.3.3	Momento fletor pela instabilidade por distorção da seção	16
	No cálculo de barras com seção aberta sujeitas à instabilidade por distorção, o momento fletor resistente de cálculo é dimensionado conforme a equação 17.....	16
1.4.2.1.4	Dimensionamento do esforço cortante	16
1.4.3	Análise estrutural.....	17
1.4.3.1	Carregamento do vento	18
1.4.3.1.1	Coeficientes de pressão externa e de forma.....	19
1.4.3.1.2	Coeficientes de pressão interna.....	21
1.4.4	Dimensionamento dos perfis	23
1.4.4.1	Estados limites últimos	23
1.4.4.2	Estados limites de serviço.....	23
1.5	Referências Bibliográficas	24
2.	OBJETIVOS.....	27
2.1	Objetivo Geral.....	27
2.2	Objetivo Específicos	27
3.	CAPÍTULO I.....	28
3.1	Introdução	30
3.2	Método	31
3.2.1	Softwares utilizados	31
3.2.2	Modelos de cálculo	32

3.2.3 Geometria das estruturas analisadas e ações atuantes	33
3.2.3.1 Edificações analisadas	33
3.2.3.1.1 Características geométricas das edificações analisadas	34
3.2.3.2 Ações atuantes	36
3.2.3.2.1 Ação do vento	37
3.2.4 Análise e dimensionamento	39
3.2.4.1 Combinações empregadas.....	40
3.3 Resultados e Discussões.....	41
3.3.1 Análise do consumo de aço	41
3.3.1.1 Variação da taxa de consumo de aço das edificações pela alteração da tipologia dos pórticos	41
3.3.1.2 Variação da taxa de consumo de aço das edificações pela alteração da tipologia dos pórticos e seção transversal das vigas de cobertura	44
3.3.2 Deslocamentos verticais	45
3.3.2.1 Variação do deslocamento vertical das edificações pela alteração da tipologia dos pórticos	45
3.3.2.2 Variação do deslocamento vertical das edificações pela alteração da tipologia dos pórticos e seção transversal das vigas de cobertura	48
3.3.3 Panorama geral das edificações e modelos analisados	50
3.3.3.1 Consumo de aço e deslocamento vertical dos modelos estruturais da cobertura da quadra do céu azul.....	50
3.3.3.2 Consumo de aço e deslocamento vertical dos modelos estruturais da cobertura do ginásio do Residencial Gameleira II.....	51
3.3.3.3 Consumo de aço e deslocamento vertical dos modelos estruturais da cobertura do módulo esportivo	51
3.3.4 Principais observações realizadas com relação ao projeto e execução das coberturas estudadas	52
3.3.4.1 Observações da cobertura da quadra do Céu Azul	52
3.3.4.2 Observações da cobertura do ginásio do Gameleira.....	53

3.3.4.3 Observações da cobertura do módulo esportivo	54
3.4 Conclusão	56
3.5 Referências Bibliográficas	56
4. CONCLUSÃO GERAL.....	59
APÊNDICE.....	61
5. APÊNDICE.....	62
5.1 Apêndice A: Discretização dos Modelos Estruturais	62

ÍNDICE DE TABELAS

INTRODUÇÃO

Tabela 1. Cargas de vento no modelo teórico VTT	22
Tabela 2. Resumo de aço do modelo teórico VTT	24

CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE COBERTURAS METÁLICAS DE QUADRAS POLIESPORTIVAS SITUADAS EM RIO VERDE - GO

Tabela 1. Características geométricas das edificações analisadas.....	34
Tabela 2. Ação do vento nas edificações analisadas	38
Tabela 3. Ação do vento nos modelos teóricos com tipologia da viga em arco.....	39
Tabela 4. Ação do vento nos modelos teóricos com tipologia da viga com banzos paralelos e trapezoidal.....	39
Tabela 5. Comparativo do consumo de aço referente aos dados da Figura 9.....	42
Tabela 6. Relação da taxa de consumo de aço das seções U (seção 1) e 2L (seção 2)...	45
Tabela 7. Comparativo do deslocamento vertical referente aos dados da Figura 12.....	46
Tabela 8. Relação do deslocamento vertical das seções U (seção 1) e 2L (seção 2).....	49
Tabela 9. Consumo de aço e deslocamento vertical da cobertura do Céu Azul.....	50
Tabela 10. Consumo de aço e deslocamento vertical da cobertura do Gameleira.....	51
Tabela 11. Consumo de aço e deslocamento vertical da cobertura do Módulo.....	51
Tabela 12. Modelos otimizados das edificações analisadas	52
Tabela 13. Principais apontamentos encontrados através da inspeção visual e análise do projeto da cobertura do Céu Azul	53
Tabela 14. Principais apontamentos encontrados através da inspeção visual e análise do projeto da cobertura do Gameleira.....	54

Tabela 15. Principais apontamentos encontrados através da inspeção visual e análise do projeto da cobertura do Módulo.....	55
--	----

APÊNDICES

Tabela 1A. Diferença de esforços normais e deslocamento vertical dos dois modelos .	63
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

INTRODUÇÃO

Figura 1. Exemplo de galpão de uso geral.....	2
Figura 2. Galpão composto por perfis do tipo I.....	4
Figura 3. Tipos de treliças.....	5
Figura 4. Seção efetiva do perfil.....	6
Figura 5. Modelo teórico VTT.....	8
Figura 6. Cobertura da quadra do Céu Azul, (a) vista lateral da cobertura; (b) vista do apoio da treliça no pilar.	8
Figura 7. Mastan2.	10
Figura 8. Ftool.....	10
Figura 9. DimPerfil.	11
Figura 10. Coeficientes de pressão externa C_{pe} do perímetro da edificação.	20
Figura 11. Coeficientes de pressão externa e de forma: (a) vento 0° ; (b) vento 90° ; (c) coeficientes de forma médios.	20
Figura 12. Esforços internos do vento	21
Figura 13. Combinação dos coeficientes de pressão externa e interna para o vento a 0°	21
Figura 14. Combinação dos coeficientes de pressão externa e interna para o vento a 90°	22
Figura 15. Cargas de parede e de cobertura.....	22

CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE COBERTURAS METÁLICAS DE QUADRAS POLIESPORTIVAS SITUADAS EM RIO VERDE - GO

Figura 1. Representação de um modelo estrutural do software Mastan2.	32
---	----

Figura 2. Modelos estruturais teóricos.....	32
Figura 3. Tipologia das seções transversais da pesquisa: (a) seção 1-composta inteiramente por perfil ‘U’ (b) seção 2.-composta por diagonais/montantes com cantoneiras duplas.....	33
Figura 4. Coberturas analisadas: (a) quadra do Céu Azul; (b) ginásio do Gameleira e (c) cobertura do Módulo esportivo.....	34
Figura 5. Planta de localização dos pórticos da quadra do Céu Azul, medidas em mm..	35
Figura 6. Planta de localização dos pórticos do ginásio do Gameleira, medidas em mm.	35
Figura 7. Planta de localização dos pórticos do Módulo esportivo, medidas em mm. ...	36
Figura 8. Ação do vento nas estruturas de planta regular.	38
Figura 9. Consumo de aço das três edificações analisadas e dos seus modelos teóricos.	42
Figura 10. Consumo de aço dos modelos teóricos com seção transversal com perfil ‘U’.	44
Figura 11. Consumo de aço dos modelos teóricos com seção transversal com cantoneiras duplas.	44
Figura 12. Deslocamento vertical das três edificações analisadas e dos seus modelos otimizados.....	46
Figura 13. Deslocamento vertical dos modelos teóricos com seção transversal com perfil ‘U’.....	48
Figura 14. Deslocamento vertical dos modelos teóricos com seção transversal com cantoneiras duplas.....	48

APÊNDICES

Figura 1A Viga treliçada de cobertura sobre apoios fixos.....	62
Figura 2A Viga treliçada de cobertura apoiada em pilares.....	63

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALB	Frame with arched lattice beam
CBCA	Centro brasileiro da construção em aço
CFS	Cold formed steel profiles
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
LBP	Frame with lattice beam with parallel flanges
MLE	Método da largura efetiva
MRD	Método da resistência direta
MSE	Método da seção efetiva
PPF	Perfis de aço formados a frio
TLB	Frame with trapezoidal lattice beam
VTA	Pórtico com viga treliçada em arco
VTP	Pórtico com viga treliçada com banzos paralelos
VTT	Pórtico com viga treliçada trapezoidal

SIMBOLOS

Letras Romanas Maiúsculas

A	Área bruta da seção transversal da barra
A_{n0}	Área líquida da seção transversal da barra fora da ligação
A_n	Área líquida da seção transversal da barra
C_{pe}	Coefficiente de pressão externa
C_e	Coefficiente de forma
C_{pi}	Coefficiente de pressão interna

CP	Carga permanente
E	Módulo de elasticidade do aço
$F_{Gi,k}$	Representa os valores característicos das ações permanentes
$F_{Q1,k}$	É o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação
$F_{Qi,k}$	Representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar juntamente com a ação variável principal
L	Vão teórico entre pilares
k_v	Coefficiente de flambagem local por cisalhamento
$N_{t,Rd}$	Força normal de tração
PP	Peso próprio
M_{rd}	Momento resistente de cálculo
SC	Sobrecarga de utilização
S1	Fator topográfico
S2	Fator rugosidade
S3	Fator estatístico
V_{rd}	Cortante resistente de cálculo
V_k	Velocidade característica do vento
V_0	Vento paralelo a geratriz longitudinal
V_{90}	Vento perpendicular a geratriz longitudinal

Letras Romanas Minúsculas

a	Distância entre enrijecedores
b	Largura do elemento
d_f	Diâmetro do furo
f_y	Tensão do aço
k	Coefficiente de flambagem
n_f	Número de furos
qc	Carga na cobertura
qp	Carga nas paredes
t	Espessura do elemento
w	Módulo de resistência

Letras Gregas Minúsculas

$\alpha 0^\circ$	Vento paralelo a geratriz longitudinal
$\alpha 90^\circ$	Vento perpendicular a geratriz longitudinal
γ_{Gi}	Coefficiente de ponderação das ações permanentes
γ_{qj}	Coefficiente de ponderação das ações variáveis
λ_p	Índice de esbeltez reduzido
ρ	Fator de redução relacionado a compressão
χ	Fator de redução da força axial
ψ_{0j}	Fator de combinação de ações
ψ_{2j}	Fator de redução de ações

RESUMO

PAIVA, PHELIPPE MENDONÇA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, outubro de 2020. **Avaliação e otimização de coberturas metálicas de quadras poliesportivas executadas com perfis de aço formados a frio.** Orientador: Dr. Michell Macedo Alves. Coorientadores: Dr. Flavio Hiochio Sato e Dr. Alessandro do S. Felipe

O uso de perfis de aço formados a frio (PFF) cresceu significativamente pela alta resistência, baixo peso e facilidade nos processos de fabricação, montagem e produção. Os galpões de uso geral são um dos tipos de edificações mais beneficiadas com a implementação desses perfis na construção civil, uma vez que, os mesmos permitiram o desenvolvimento de coberturas otimizadas em relação ao consumo de aço e comportamento estrutural. Apesar do desenvolvimento dos métodos construtivos e da tecnologia da construção ainda é possível observar edificações projetadas e/ou executadas em desacordo com prescrições normativas, o que resulta em obras com diversas patologias construtivas, sem contar as edificações que não são projetadas de forma a explorar todo o seu potencial resultando em obras mais caras e com a capacidade estrutural reduzida. Dessa forma, neste trabalho foram estudadas três coberturas de quadras poliesportivas executadas com PFF com o objetivo de avaliar e otimizar o desempenho estrutural destas. A avaliação foi realizada por meio de uma análise computacional numérica, e a otimização ocorreu através da modificação da tipologia dos pórticos transversais e da permuta das seções das vigas de cobertura. Após a aplicação da metodologia foi notado que a mudança dos tipos de pórticos promoveu a otimização, em relação ao consumo de aço, em duas das três edificações avaliadas.

PAVAVRAS-CHAVES: galpões de uso geral, consumo de aço, pórticos treliçados.

ABSTRACT

PAIVA, PHELIPPE MENDONÇA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, outubro de 2020. **Avaliação e otimização de coberturas metálicas de quadras poliesportivas executadas com perfis de aço formados a frio.** Orientador: Dr. Michell Macedo Alves. Co-orientadores: Dr. Flavio Hiochio Sato e Dr. Alexsandro do S. Felipe

The use of cold formed steel profiles (PFF) has grown significantly due to the high strength, low weight and ease in the manufacturing, assembly and production processes. General purpose sheds are one of the types of buildings most benefited from these profiles implementation in civil construction, since they allowed the development of optimized roofs in relation to steel consumption and structural behavior. Despite the development of construction methods and construction technology, it is still possible to observe buildings designed and / or executed in disagreement with normative prescriptions, which results in buildings with various construction pathologies, not to mention buildings that are not designed to exploit their full potential resulting in more expensive buildings with reduced structural capacity. Thus, in this work three coverings of multisport courts performed with PFF were studied in order to evaluate and optimize their structural performance. The evaluation was carried out by means of a numerical computational analysis, and the optimization occurred through the typology modification of the transversal frames and the sections exchange of the roof beams. After applying the methodology, it was noticed that the change in the types of frames promoted the optimization, in relation to the consumption of steel, in two of the three buildings evaluated.

KEY WORDS: general purpose sheds, steel consumption, latticed frames

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Em decorrência da expansão do mercado digital, cujas barreiras geográficas já não são tão relevantes como antes, os profissionais desse novo contexto de mercado globalizado devem apresentar soluções otimizadas para atender esse atual modelo de competitividade. A engenharia civil é uma das atividades produtiva em que essa característica é marcante, pois os projetos devem ser seguros, econômicos e duráveis.

Na área de projeto, em particular, na área de estruturas metálicas, o projetista tem a possibilidade de explorar todas ou quase todas as vantagens desse método construtivo, dependendo das características do empreendimento, como: resistência elevada em relação ao peso próprio, boa resistência a vãos maiores, resistência à tração, módulo de elasticidade elevado, redução no cronograma de obra, fundações mais leves, entre outros. Desse modo, pode-se dizer que o custo final de uma edificação está diretamente ligado ao método construtivo e aos parâmetros escolhidos pelo engenheiro projetista.

No ramo da construção civil as estruturas metálicas são utilizadas para diversos propósitos, com ênfase para montagem e execução de viadutos, pontes, pórticos, torres, edifícios, grandes antenas e galpões de uso geral (FALEIROS, TEIXEIRA E SANTANA, 2012). Entre os diversos tipos de edificações, os galpões de uso geral são um dos mais utilizados (PRAVIA; DREHMER e MESACASA, 2010), principalmente em regiões do interior.

Os galpões em aço são estruturas, compostas geralmente por pórticos planos iguais e regularmente espaçados, conforme ilustrado na Figura 1, os mesmos apresentam fins diversos como: cobertura de quadras poliesportivas, oficinas, salões de festa, estacionamentos, construções rurais, depósitos, etc. O dimensionamento dessas estruturas pode ser realizado pela NBR 8800 (ABNT, 2008), quando se tratar de estruturas compostas por perfis laminados, ou pela NBR 14762 (ABNT, 2010) quando se tratar de edificações constituídas por perfis de aço formados a frio.



Figura 1. Exemplo de galpão de uso geral. Fonte: Autor

Os galpões metálicos se tornaram obras comuns por sua infinidade de uso associado ao baixo custo por m^2 , porém, com a enorme demanda para esse tipo de construção nota-se que existem coberturas irregulares e subdimensionadas, conforme verificado por Maraveas e Tsavdaridis (2019) e Brencich (2010). Ou, o que ainda é pior, edificações executadas sem projeto estrutural, uma vez que essa prática é comum no Brasil por exigência de apenas um projeto arquitetônico para aprovação do alvará de construção.

Nesse caminho, percebe-se que as coberturas metálicas de uso geral são bem difundidas, porém ainda são edificações precárias em relação a aplicação das boas práticas da engenharia civil, uma vez que, conforme comentado é possível encontrar diversas obras que não possuem projeto estrutural e/ou que não foram projetadas de forma a explorar a sua capacidade máxima. Isso resulta em edificações antieconômicas, pouco seguras e com vida útil limitada, o que é exatamente o contrário dos princípios empregados pela engenharia.

Dessa forma, o estudo voltado para a análise e otimização de coberturas metálicas é importante por promover a avaliação de uma amostra das coberturas de Rio Verde – GO com relação aos padrões da NBR 14762 (ABNT, 2010), além de contribuir

com o meio técnico através da informação e apresentação da importância da escolha do modelo estrutural otimizado para um empreendimento, pois conforme apresentado por Nogueira (2009) a escolha correta dos parâmetros de uma estrutura pode promover avanço no comportamento estrutural e diminuição do consumo de aço de uma edificação.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação e otimização do desempenho estrutural de três coberturas metálicas de quadras poliesportivas de pequeno e médio porte situadas em Rio Verde – GO, com o intuito de verificar se as mesmas atendem as prescrições normativas e para mostrar qual é o modelo otimizado de cada uma delas de acordo com os resultados obtidos através das análises numéricas computacionais.

1.2 Composição da Estrutura de Galpões de Uso Geral

Os galpões são estruturas com a finalidade de cobrir áreas específicas para proteger produtos, instalações e/ou para fornecer abrigo, e, geralmente são construções térreas. Apresentam ampla diversidade de uso e podem ser executados com diferentes tipos de tecnologia de construção, como: concreto pré-moldado comum, concreto pré-moldado protendido, estrutura de aço com perfis laminados, estrutura de aço com perfis formados a frio e estruturas mistas.

Para os galpões de uso geral existe grande variedade de sistemas estruturais que podem ser utilizados em seus projetos, pelas diversas finalidades de uso e das múltiplas possibilidades de concepção. Para todos os tipos de galpões sempre é possível analisar a composição dos sistemas estruturais que formam a estrutura com intuito de promover alguma melhoria (NOGUEIRA, 2009).

Perante aos mais variados tipos de composições estruturais adotadas aos galpões de uso geral, a tipologia composta por pórticos planos, que compõe a estrutura principal, estabilizados longitudinalmente por elementos de travejamento, é um dos tipos mais comuns para os galpões metálicos, nesse sentido é apresentado, a seguir, algumas das tipologias de pórticos planos que podem ser utilizados para esse tipo de edificação.

1.2.1 Tipos de pórticos para galpões de uso geral

O modelo padrão de pórtico plano transversal é composto por uma viga de cobertura e duas colunas (similar às traves e travessão de um gol). A composição das diferentes tipologias de pórtico ocorre, basicamente, pela permuta entre pilares e vigas do pórtico formando diferentes composições para a estrutura principal.

Devido às diferentes combinações das vigas de cobertura com os pilares, nota-se que é possível amplificar ou minimizar a transmissão de momentos fletores, de acordo com o grau de continuidade entre essas peças estruturais. E essa diferença pode ser muito bem verificada por análises computacionais conforme verificado por Hanisha e Kishore (2020).

Outro ponto notável em relação aos pórticos transversais está relacionado ao tipo de vinculação dos pilares com a fundação, uma vez que, os esforços transmitidos para as fundações e o deslocamento horizontal da estrutura são influenciados pelo tipo de vínculo das fundações com os pilares (PARK et al., 2016).

1.2.1.1 Pórticos com vigas laminadas tipo I

Os galpões de uso geral formados por estruturas metálicas podem ser formados por treliças (compostas por perfis laminados ou perfis formados a frio) ou por perfis do tipo I, que são formados por aço laminado.

As estruturas compostas por pórticos formados por perfis I, geralmente são economicamente recomendáveis para vãos de aproximadamente 20 metros (NOGUEIRA, 2009), além de apresentar as seguintes vantagens: travamento reduzido, menor custo de limpeza e pintura, e menor tempo de obra, a Figura 2 apresenta um exemplo de pórtico composto por perfis I nas vigas e nos pilares.

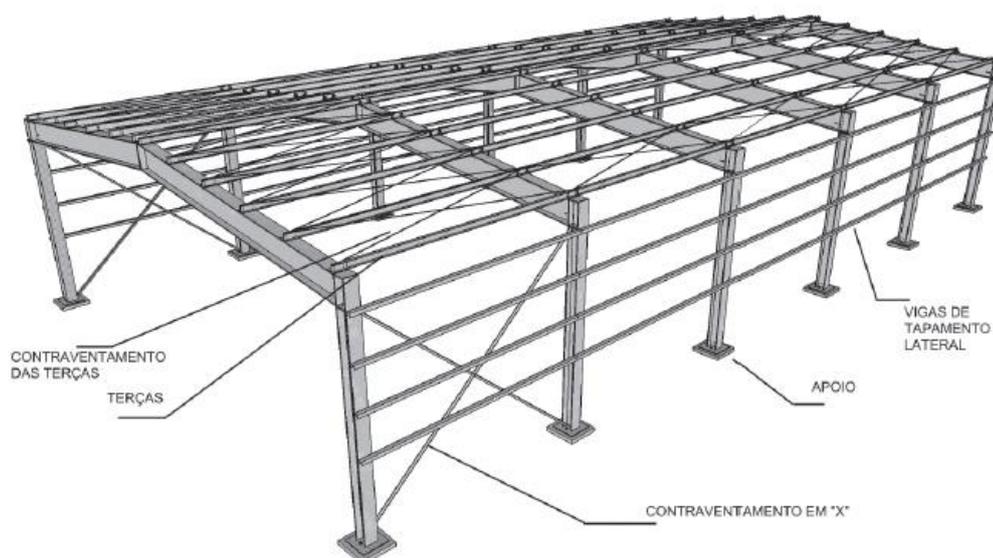


Figura 2. Galpão composto por perfis do tipo I. Fonte: Pravia et al.

1.2.1.2 Pórticos com vigas treliçada

Os pórticos formados por vigas treliçadas apresentam uma infinidade de tipologias, conforme apresentado na Figura 3. A disposição dos elementos estruturais da treliça podem ser escolhidas de acordo com parâmetros econômicos, estruturais e/ou estéticos, porém a escolha da formação da treliça está vinculada a análise estrutural do engenheiro projetista, uma vez que, para cada caso sempre há uma solução estrutural com melhor desempenho.

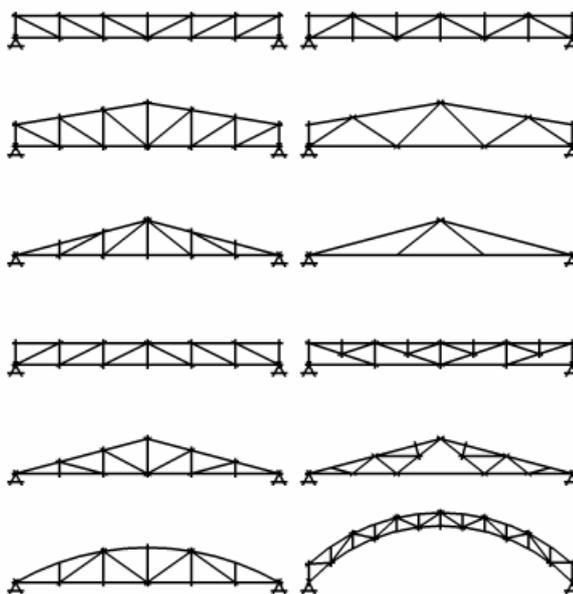


Figura 3. Tipos de treliças. Fonte: Nogueira

1.3 Perfis de Aço Formados a Frio

Os perfis de aço formados a frio são confeccionados a partir do dobramento de chapas finas, uma vez que a maleabilidade dessas chapas permite a fabricação de grande variedade de perfis, desde a mais simples cantoneira até os perfis que apresentam seção composta, como por exemplo, a seção caixão (SILVA et al., 2014). Esses perfis são dimensionados de acordo com as prescrições da NBR 14762 (ABNT, 2010) e padronizados de acordo com a NBR 6355 (ABNT, 2012).

Os perfis de aço formados a frio são bastante úteis na construção civil, pela agilidade e economia que são geradas com o uso dos mesmos. Esses perfis geralmente são bastante utilizados em galpões de pequeno e médio porte, mezaninos, coberturas,

edifícios de pequeno porte e em casas populares, além do uso de *light steel framing* que são os painéis formadas por perfis formados a frio (SILVA et al., 2014).

Para as chapas utilizadas na confecção dos perfis a NBR 14762 (ABNT, 2010) recomenda que sejam formadas por aço com capacidade estrutural e que possuam as devidas propriedades mecânicas para receber o trabalho a frio.

O dimensionamento dessas peças estruturais segundo a NBR 14762 (ABNT, 2010) pode ser realizado por três métodos: método da largura efetiva (MLE), método da seção efetiva (MSE) e método da resistência direta (MRD). Na pesquisa foi utilizado o MLE.

1.3.1 Método da largura efetiva

A NBR 14762 (ABNT, 2010) considera que um perfil é formado por um conjunto de elementos (mesa, alma e enrijecedor), dessa forma cada elemento é analisado separadamente em relação a flambagem local. Nesse caminho, encontra-se a área efetiva do perfil, conforme a Figura 4, que é composta pela área de cada um dos elementos que foram analisados em separados, ou seja, encontra-se as propriedades geométricas efetivas do perfil.

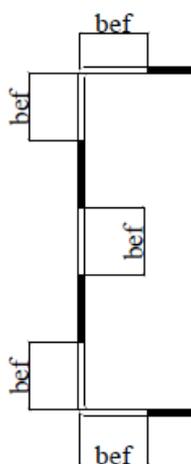


Figura 4. Seção efetiva do perfil. Fonte: Autor

Na norma são tratadas as seguintes peças estruturais: colunas, vigas e vigas-colunas. Essa classificação é base para as equações de flambagem global, contudo, é considerado que a tensão varia linearmente e que os esforços atuantes são: tensão axial, flexão e esforço cortante.

A fórmula geral do MLE segundo NBR 14762 (ABNT, 2010) é:

$$b_{ef} = \frac{b \left(1 - \frac{0,22}{\lambda p}\right)}{\lambda p} \leq b \quad (1)$$

Em que o índice de esbeltez reduzido λp é:

$$\lambda p = \frac{\frac{b}{t}}{0,95 \sqrt{\frac{KE}{\sigma}}} \quad (2)$$

Com $\lambda p \leq 0,673$ tem $b_{ef}=b$

Em que:

t= espessura do elemento

b= largura do elemento

E= módulo de elasticidade do aço = 20.000,00 kN/cm²

σ = tensão de compressão dada por: $\sigma = \rho \cdot f_y$, com ρ correspondente ao fator de redução relacionado a compressão centrada e $\sigma = \rho_{FLT} \cdot f_y$, com ρ_{FLT} correspondente ao fator de redução relacionado a flexão simples.

k = coeficiente de flambagem local (tabelado)

1.4 Dimensionamento do Modelo Teórico VTT da Obra do Céu Azul

1.4.1 Características geométricas do modelo VTT

Com intuito de esclarecer a respeito da metodologia de cálculo aplicada no dimensionamento das edificações estudadas, optou-se em demonstrar a análise completa de um dos modelos teóricos. Para a demonstração, foi selecionado o modelo teórico VTT da cobertura da quadra da praça do Céu Azul, conforme indicado nas Figuras 5 e 6.

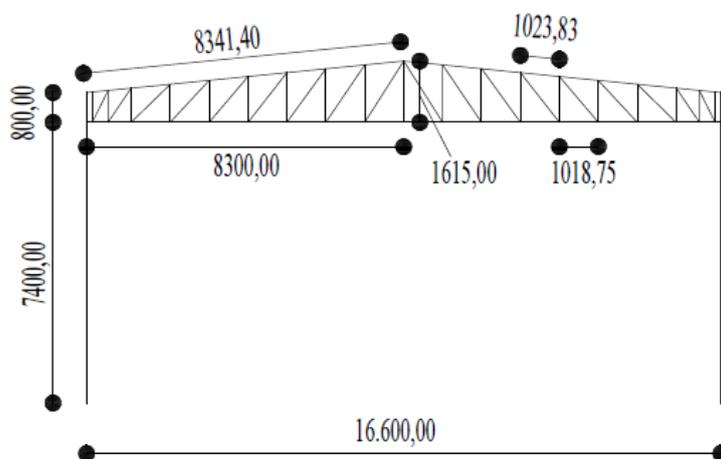


Figura 5. Modelo teórico VTT. Fonte: Autor



(a)

(b)

Figura 6. Cobertura da quadra do Céu Azul, (a) vista lateral da cobertura; (b) vista do apoio da treliça no pilar. Fonte: Autor

O modelo de pórticos com viga treliçada de cobertura trapezoidal (VTT) corresponde a um dos modelos teóricos propostos para a otimização das coberturas analisadas: quadra do Céu Azul, ginásio do Residencial Gameleira II e ginásio do Módulo Esportivo (conforme descrito no item 3.2.3.1). Os modelos teóricos de otimização foram divididos em: pórticos com viga treliçada de cobertura com banzos paralelos (VTP),

pórticos com viga treliçada de cobertura em arco (VTA) e VTT, conforme descrito no item 3.2.2.

Essa tipologia teórica é composta por pórtico com viga treliçada trapezoidal, possui vão teórico de 16,6 m, distância entre pórticos de 6,0 m e altura dos pilares de 7,4 m, conforme demonstrados nas Figuras 5 e 6. O cálculo das diversas tipologias foi realizado utilizando o modelo de pórticos planos porque os galpões são formados por repetições de pórticos planos e estabilizados longitudinalmente, dessa forma o dimensionamento ocorre pela análise do comportamento dos pórticos e pela verificação dos elementos de transição (contraventamento e terças).

Com relação aos elementos dos pórticos, nota-se que os perfis que compõem a viga de cobertura são tratados como elementos de barras de treliça no plano, sujeitos apenas a esforços normais. Os pilares são considerados como elementos de barra de pórtico no plano, solicitados por esforços normais, cortantes e momentos fletores. As colunas foram consideradas engastadas na base e livres no topo, com uma carga-momento no topo devido ao apoio excêntrico das vigas de cobertura, conforme mostrado na Figura 6 (b)

Nesse modelo de cálculo foi considerado que os banzos inferiores estão travados no eixo 'x' a cada 2,04 m devido ao uso de mãos francesas, e que os banzos superiores estão travados lateralmente a cada 2,05 m pelas terças de cobertura, as terças são consideradas contínuas.

1.4.2 Softwares utilizados

Para análise e dimensionamento das três coberturas das quadras poliesportivas e dos seis modelos teóricos foram utilizados três softwares: Mastan 2, Ftool e DimPerfil, cada um para uma finalidade diferente, conforme demonstrado nas Figuras 7 a 9.

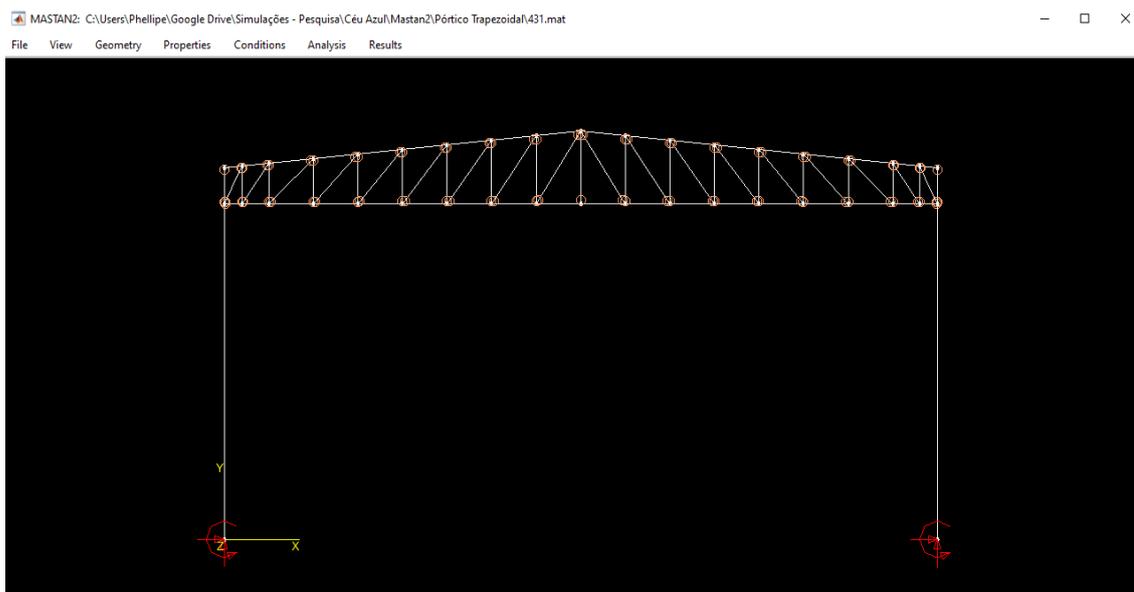


Figura 7. Mastan2. Fonte: Autor

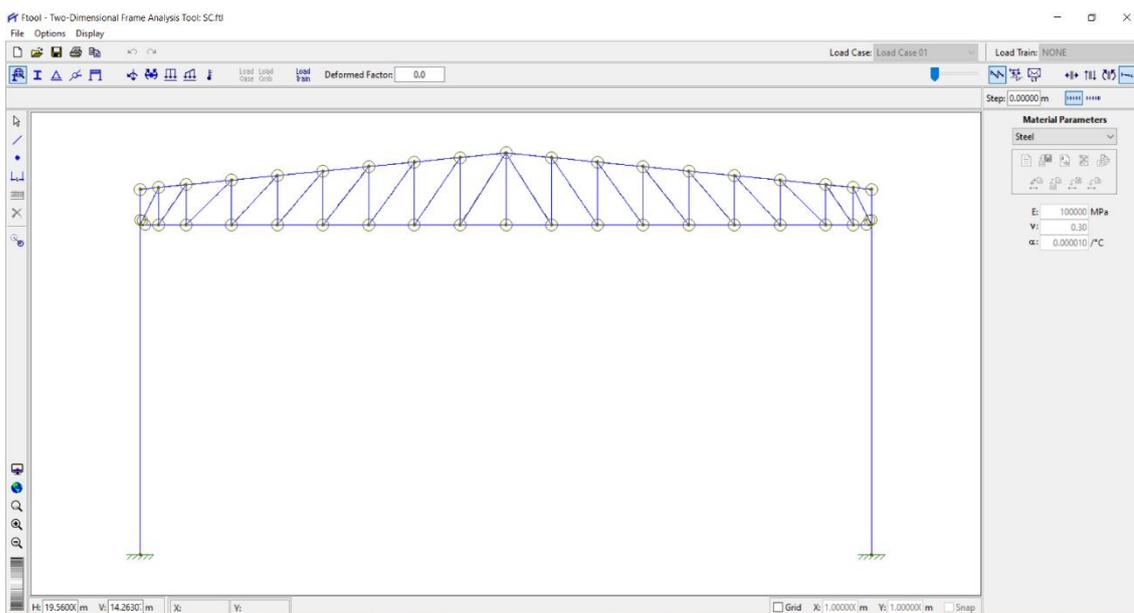


Figura 8. Ftool. Fonte: Autor

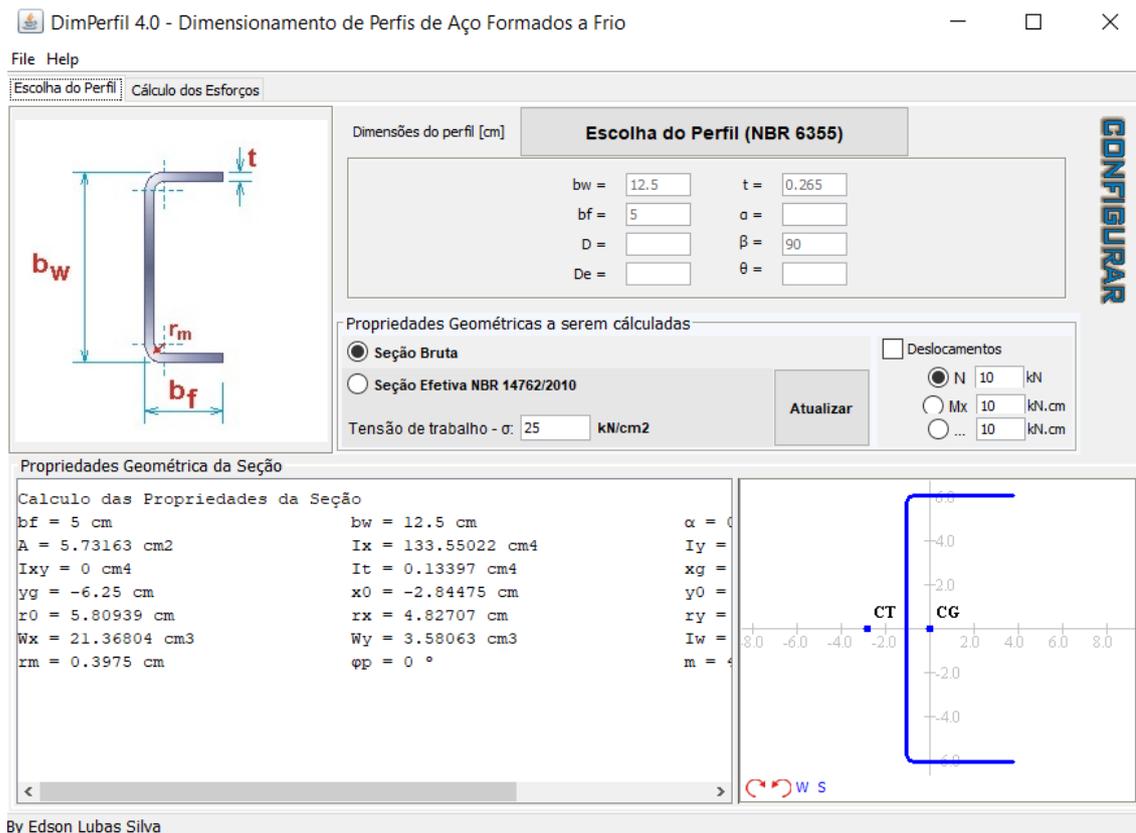


Figura 9. DimPerfil. Fonte: Autor

O Mastan2 foi utilizado para a obtenção dos esforços nas barras através da análise estrutural de cada um dos carregamentos, esses esforços foram conferidos no software Ftool, e por último todos os perfis foram dimensionados no DimPerfil 4.0, utilizando-se o método das larguras efetivas.

1.4.2.1 Dimensionamento dos perfis formados a frio

No software Dimperfil são realizados todos os cálculos de verificação da resistência de um perfil dobrado (tração, compressão, força cortante, flexão, flexocompressão, flexotorção e esforços combinados), através do método da largura efetiva.

1.4.2.1.1 Dimensionamento à tração

Para o dimensionamento à tração dos perfis formados a frio são realizadas duas verificações: a primeira é a verificação ao escoamento da seção bruta, que trata em observar se a força resistente, considerando a resistência ao escoamento, é superior aos esforços solicitantes. A segunda verificação, corresponde a verificação da capacidade

última da seção efetiva, ocorre na região das ligações, em que pode haver diminuição da seção transversal pela presença de furos para a colocação de parafusos. É também necessário verificar a capacidade última da seção efetiva fora da região das ligações, ou seja, em locais que ocorrem a diminuição da seção, mas que não estejam associados com a ligação.

O Valor da força normal de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser o menor valor das equações 3 a 5.

$$N_{tRd} = \frac{A f_y}{1,10} \quad (3)$$

$$N_{tRd} = \frac{A_{n0} f_u}{1,35} \quad (4)$$

$$N_{tRd} = \frac{C_t A_n f_u}{1,65} \quad (5)$$

Em que: A = área bruta da seção transversal da barra;

A_{n0} = área líquida da seção transversal da barra fora da ligação

A_n = área líquida da seção transversal da barra, que para as ligações parafusadas é calculada de acordo com a equação 6.

$$A_n = 0,9 \left(A - n_f d_f t + \frac{\sum t s^2}{4g} \right) \quad (6)$$

Em que, d_f é o diâmetro do furo, t é a espessura da chapa conectada, n_f é o número de furos inseridos na linha de ruptura escolhida, s e g são os espaçamentos dos furos nas direções paralela e perpendicular à sollicitação, respectivamente. Para as ligações soldadas $A_n = A$, para casos específicos de soldas deve-se consultar material complementar.

1.4.2.1.2 Dimensionamento à compressão

A ABNT NBR 14762:2010, estipula que a força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser assumida como o menor valor entre:

I_ Força de compressão resistente de cálculo pela instabilidade da barra por flexão, torção ou por flexotorção.

II_ Força de compressão resistente de cálculo devido à instabilidade por distorção da seção transversal.

1.4.2.1.2.1 Força resistente de cálculo devido à instabilidade por flexão, torção ou por flexotorção.

A equação que define a força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, é determinada conforme a equação 7.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{1,20} \quad (7)$$

Em que χ corresponde ao fator de redução oriundo da instabilidade global, calculado pela equação 8.

$$\begin{aligned} \chi &= 0,658\lambda_0^2 \quad \text{para } \lambda \leq 1,5 \\ \chi &= 0,877/\lambda_0^2 \quad \text{para } \lambda > 1,5 \end{aligned} \quad (8)$$

Em que λ_0 corresponde ao índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade global, dado pela equação 9.

$$\lambda = \left(\frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (9)$$

‘A’ corresponde a área bruta da seção transversal da barra e A_{ef} se trata da área efetiva da seção transversal, calculada através das larguras efetivas dos elementos, considerado $\sigma = \chi f_y$.

A força crítica de flambagem elástica ‘ N_e ’ é calculada conforme a teoria de resistência dos materiais (HIBBELER, 2010).

1.4.2.1.2.2 Força resistente de cálculo devido à instabilidade distorcional.

A força axial resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ para barras sujeitas a instabilidade distorcional é calculada conforme a equação 10.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi_{dist} A f_y}{1,20} \quad (10)$$

‘ χ_{dist} ’ corresponde ao valor de redução da força axial de compressão por instabilidade distorcional, o mesmo é calculado pela equação 11.

$$\chi_{dist} = 1,0 \text{ para } \lambda_{dist} \leq 0,561$$

$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{1}{\lambda_{dist}^{1,2}} \text{ para } \lambda_{dist} > 0,561 \quad (11)$$

Em que λ_{dist} corresponde ao índice de esbeltez distorcional reduzido, calculado pela equação 12.

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{A f_y}{N_{dist}}\right)^{0,5} \quad (12)$$

‘ N_{dist} ’ corresponde a força normal crítica de flambagem distorcional elástica, a mesma é calculada por meio da análise de estabilidade elástica, que vai além do escopo dessa pesquisa. O software DimPerfil 4.0 possui os valores de N_{dist} de todos os perfis determinados pela NBR 6355 (ABNT, 2012).

1.4.2.1.3 Dimensionamento à flexão

Para o dimensionamento de barras sob flexão, deve-se admitir o menor valor para o momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} entre os seguintes momentos:

- I_ Momento resistente de cálculo do escoamento da fibra mais solicitada.
- II_ Momento resistente de cálculo da instabilidade lateral com torção.
- III_ Momento resistente de cálculo devido à instabilidade distorcional.

1.4.2.1.3.1 Momento fletor do escoamento da seção efetiva

O momento fletor resistente de cálculo relacionado ao escoamento da fibra mais solicitada da seção efetiva, é calculado pela equação 13.

$$M_{Rd} = \frac{W_{eff} f_y}{1,1} \quad (13)$$

‘ W_{ef} ’ se trata do módulo de resistência elástico da seção efetiva, obtido através das larguras efetivas dos elementos. Para essa equação σ está relacionado ao estado limite último de escoamento ($\sigma = f_y$).

1.4.2.1.3.2 Momento fletor por instabilidade lateral com torção

Em vigas fletidas ocorre a instabilidade lateral com torção quando essas não são contidas lateralmente. O momento fletor resistente de cálculo relacionado a esse fenômeno é calculado pela equação 14, considerando o comprimento de barra entre as contenções laterais.

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{1,1} \quad (14)$$

‘ W_{ef} ’ se trata do módulo de resistência elástico da seção efetiva, relacionado à fibra comprimida, obtido por meio do cálculo das larguras efetivas dos elementos, considerando $\sigma = \chi_{FLT} f_y$, em que χ_{FLT} se trata do valor de redução associado à instabilidade lateral com torção, obtido pela equação 15.

$$\begin{aligned} \chi_{FLT} &= 1,0 \text{ para } \lambda_0 \leq 0,6 \\ \chi_{FLT} &= 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) \text{ para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \\ \chi_{FLT} &= 1,0/\lambda_0^2 \text{ para } \lambda_0 \geq 1,336 \end{aligned} \quad (15)$$

λ_0 se trata do índice de esbeltez reduzido, descrito pela equação 16.

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (16)$$

‘ W_c ’ se trata do módulo de resistência elástico da seção bruta relacionado à fibra comprimida, e M_e corresponde ao momento fletor crítico de flambagem lateral com torção, que apresenta diferentes equações de cálculo conforme a geometria da peça a ser analisada, essas equações podem ser encontradas em material complementar.

1.4.2.1.3.3 Momento fletor devido a instabilidade por distorção da seção

No cálculo de barras com seção aberta sujeitas à instabilidade por distorção, o momento fletor resistente de cálculo é dimensionado conforme a equação 17.

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{1,1} \quad (17)$$

Em que, W representa o módulo de resistência elástico da seção bruta, relacionado com à fibra mais solicitada que atinge o escoamento, e χ_{dist} corresponde o fator de redução relacionado à instabilidade distorcional, dimensionado de acordo com a equação 18.

$$\chi_{dist} = 1,0 \text{ para } \lambda_{dist} \leq 0,673$$

$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \frac{1}{\lambda_{dist}} \text{ para } \lambda_{dist} > 0,673 \quad (18)$$

λ_0 se trata do índice de esbeltez distorcional, descrito pela equação 19.

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{W f_y}{M_{dist}}\right)^{0,5} \quad (19)$$

‘ M_{dist} ’ corresponde o momento fletor crítico de flambagem distorcional elástica, o mesmo é calculado por meio da análise de estabilidade elástica, e vai além do escopo desta pesquisa. O software DimPerfil 4.0 possui os valores de M_{dist} de todos os perfis determinados pela NBR 6355 (ABNT, 2012).

1.4.2.1.4 Dimensionamento do esforço cortante

Os perfis de aço formados a frio também podem estar sujeitos à instabilidade local devido aos esforços de cisalhamento. Dessa forma, deve-se verificar um valor menor do que 1,0 para a relação entre os esforços solicitantes e resistente de cálculo, o dimensionamento da força cortante resistente relacionado a esbeltez da alma (h/t) é verificado pela equação 20.

$$\begin{aligned}
 V_{Rd} &= \frac{0,6f_y h t}{1,1} \text{ para } h/t \leq 1,08 \left(\frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,65t^2 (Ek_v f_y)^{0,5}}{1,1} \text{ para } 1,08 \left(\frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5} < h/t < 1,4 \left(\frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,905Ek_v t^3}{1,1h} \text{ para } h/t > 1,4 \left(\frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Em que:

E= Módulo de elasticidade do aço;

t= Espessura da alma;

h= Largura da alma (altura da alma de um perfil);

k_v = Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, calculado pela equação

21.

$$\begin{aligned}
 K_v &= 5,0 + \frac{5,0}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} \text{ para } a/h \leq 3,0 \\
 K_v &= 5,0 \text{ para } a/h > 3,0
 \end{aligned} \tag{21}$$

‘a’ representa a distância entre enrijecedores transversais de alma. Para perfis sem enrijecedores transversais pode-se admitir $K_v = 5,0$.

1.4.3 Análise estrutural

Para o modelo VTT foram consideradas as seguintes ações: peso próprio (PP), carga permanente (CP), sobrecarga (SC), vento a 0° (V_0) e 90° (V_{90}). O peso próprio dessa estrutura corresponde a todos os elementos de barras que fazem parte da estrutura (banzos, diagonais, montantes, terças, contraventamentos, travamento das terças, terças e pilares). A carga permanente corresponde ao peso dos elementos apoiados na estrutura, que para esse caso considerou uma carga de 5 kg/m^2 correspondente a carga da telha metálica da cobertura, e a sobrecarga utilizada foi a indicada pela NBR 8800 (ABNT, 2008) de 25 kg/m^2 . Com relação às cargas de vento considerou-se as determinações da NBR 6123 (ABNT, 1988).

1.4.3.1 Carregamento do vento

O levantamento do carregamento de vento seguiu os procedimentos da NBR 6123 (ABNT, 1988), e de acordo com as características do local e edificação foram encontrados os seguintes resultados:

$V_0 = 35$ m/s – Velocidade básica do vento de acordo com o mapa de isopleias;

$S_1 = 1,0$ – Fator topográfico (o terreno da edificação foi considerado plano);

$S_2 = 0,85$ – Fator Rugosidade do terreno para V_0 (categoria IV e Classe A);

$S_2 = 0,82$ – Fator Rugosidade do terreno para V_{90} (categoria IV e Classe B).

Obs. A rugosidade do terreno e dos obstáculos do vento em seu entorno é classificada em cinco categorias de acordo com a norma, para esse caso foi considerado a categoria IV que representa terrenos em zona urbanizada e sem prédios altos ao seu redor. A classe de uma estrutura está relacionada com a dimensão na qual o vento está incidindo, uma vez que a velocidade média do vento é calculada de acordo com o tempo de duração de uma rajada de vento suficiente para transpassar a fachada de estudo, assim quanto maior a fachada maior será o tempo de rajada, por isso, neste exemplo há duas classes, uma para a menor dimensão (classe A) e a outra para a maior (classe B).

$S_3 = 1,0$ – Fator estatístico (edificações com alto fator de ocupação)

$$V_k = S_1 S_2 S_3 V_0 \quad (22)$$

Cálculo da pressão dinâmica do vento, com q em N/m^2 e V em m/s.

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (23)$$

Para os dois valores de S_2 serão encontrados q_1 , com $S_2 = 0,85$, e q_2 com $S_2 = 0,82$:

$$q_1 = 0,54 \frac{kN}{m^2} \quad (23)$$

$$q_2 = 0,50 \frac{kN}{m^2}$$

1.4.3.1.1 Coeficientes de pressão externa e de forma

Os valores dos coeficientes de pressão externa (C_{pe}) e de forma (C_e) estão relacionados com as características aerodinâmicas (formas) da edificação, e são determinados pelo teorema de Bernoulli, uma vez que perante um regime permanente de fluxo e um fluido incompressível, afirma-se que a soma das pressões cinéticas, estática e de posição gera uma constante (GONÇALVES, R. M et al., 2007).

$$\left(\frac{1}{2}\right)\rho V^2 + P + \rho g z = \text{constante} \quad (24)$$

O C_{pe} é encontrado por ensaios de ponto a ponto, em que algumas regiões apresentam valores elevados, e dificulta a sua aplicação a nível de dimensionamento. Por esse motivo a NBR 6123 (ABNT, 1988) prevê o uso de valores médios do coeficiente de pressão, os quais são classificados como coeficientes de forma. Porém é preciso saber que os valores extremos de C_{pe} não devem ser ignorados, dessa forma a norma prevê o uso do C_e médio para o dimensionamento de elementos estruturais como: telhas, terças, caixilhos entre outros.

Nas Figuras 10 e 11 estão representados os valores de C_{pe} para as paredes e para a cobertura de duas águas, respectivamente. Nota-se que as superfícies em que o vento bate diretamente estão sob pressão (o valor do coeficiente é positivo), e as superfícies de contorno, em relação a direção do vento, estão sob sucção (o valor do coeficiente é negativo).

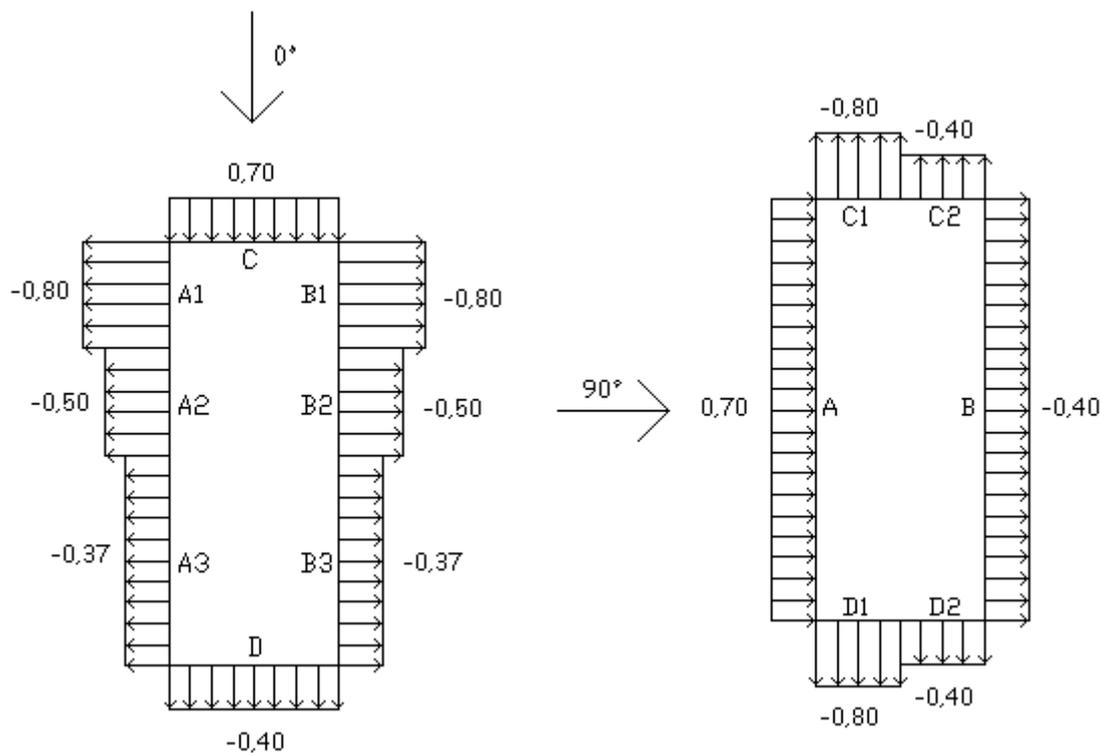


Figura 10. Coeficientes de pressão externa C_{pe} do perímetro da edificação. Fonte: Autor

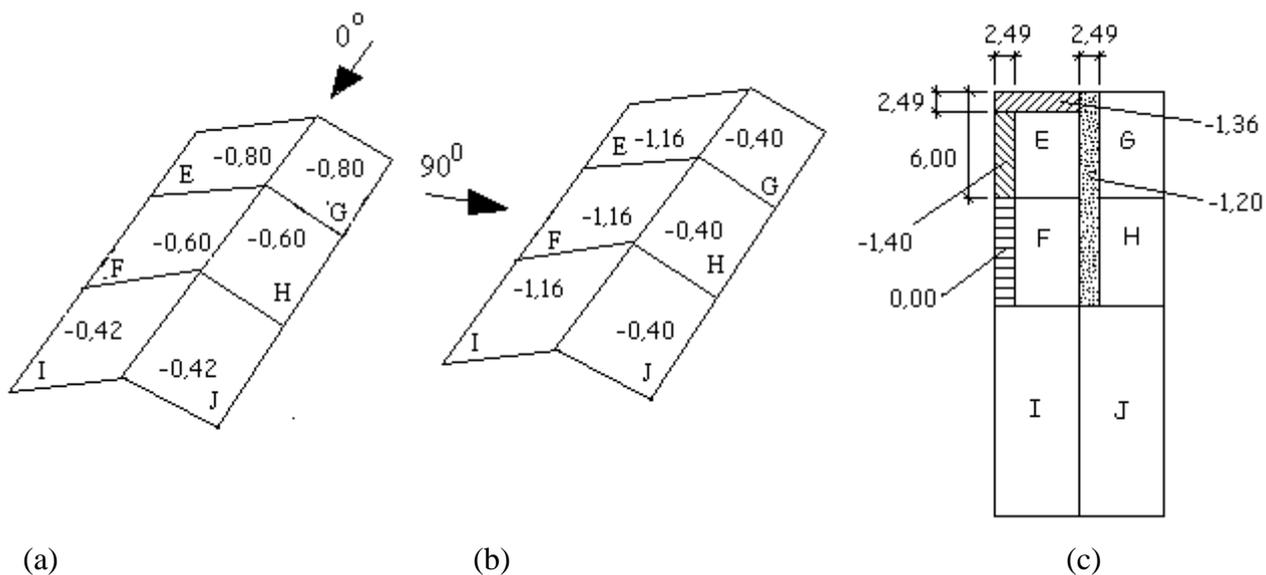


Figura 11. Coeficientes de pressão externa e de forma: (a) vento 0° ; (b) vento 90° ; (c) coeficientes de forma C_{ef} médios. Fonte: Autor

A norma traz os valores médios de C_e e C_{pe} tabelados, que de acordo com as características geométricas da edificação de análise, ela indica os coeficientes externos de parede e de cobertura conforme demonstrado nas Figuras 10 e 11.

1.4.3.1.2 Coeficientes de pressão interna

O coeficiente de pressão interna (C_{pi}) está relacionado a existência de aberturas em uma edificação, onde o vento pode entrar ou sair. Dessa forma, esse coeficiente é encontrado de acordo com valores de sucções e pressões que atuam nas diversas partes internas de um imóvel em relação das aberturas existentes (janelas, portais, portas, frestas, etc). De acordo com Gonçalves et al (2007) pode ser dito, de forma a exemplificar, que a pressão interna é a diferença entre a quantidade de ar que entrou e a quantidade que saiu. Para facilitar a determinação do C_{pi} a NBR 6123 (ABNT, 1988) apresenta algumas hipóteses de cálculo pré-estabelecidas para o projetista escolher qual destas se trata do modelo mais próximo com a edificação a ser dimensionada. Para o exemplo do modelo teórico VTT foi considerado a hipótese das quatro faces igualmente permeáveis com $C_{pi} = -0,3$ ou $C_{pi} = 0$

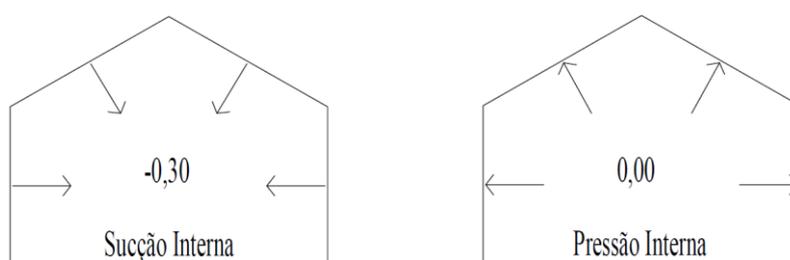


Figura 12. Esforços internos do vento. Fonte: Autor

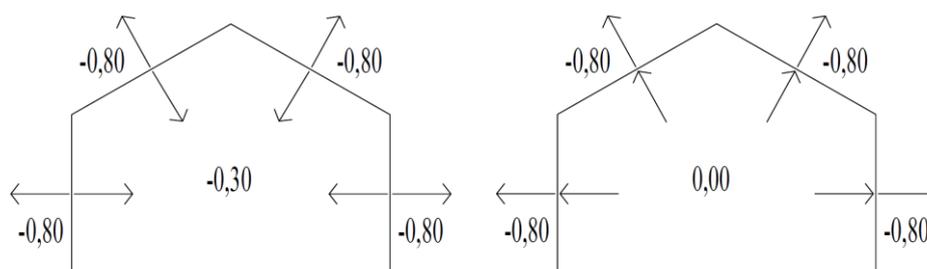


Figura 13. Combinação dos coeficientes de pressão externa e interna para o vento a 0° . Fonte: Autor

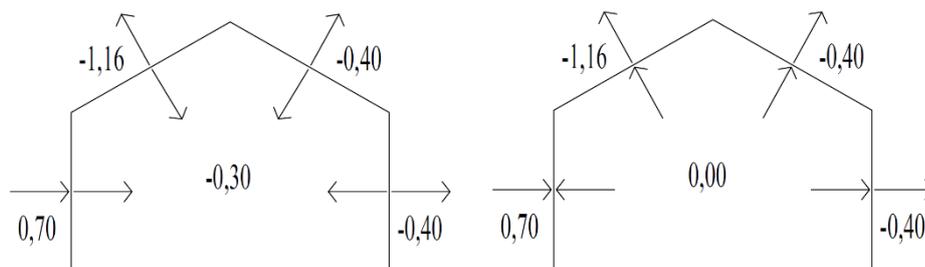


Figura 14. Combinação dos coeficientes de pressão externa e interna para o vento a 90° . Fonte: Autor

Nas Figuras 12 a 14 é possível notar a relação entre os coeficientes de pressão externa e interna, essa relação ocorre para a determinação do coeficiente de pressão que é igual a diferença entre C_{pe} e C_{pi} ($C_p = C_{pe} - C_{pi}$). Após a determinação do coeficiente de pressão multiplica-se o mesmo pela carga de pressão de obstrução “ q ” para encontrar a força do vento atuante nas diversas superfícies de uma edificação.

Assim, as cargas de vento em kN/m para o modelo teórico VTT da cobertura da quadra do bairro Céu Azul ficaram de acordo com os valores da Tabela 1, em que q_p representa as cargas de vento atuantes nas paredes e q_c as cargas da cobertura, conforme ilustrado na Figura 15.

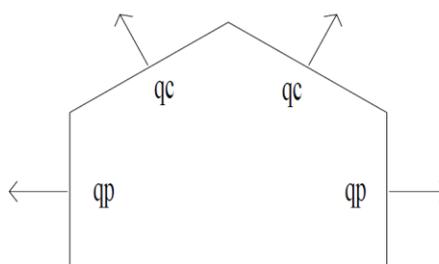


Figura 15. Cargas de parede e de cobertura. Fonte: Autor

Tabela 1. Cargas de vento no modelo teórico VTT

Ação do Vento no Modelo Teórico VTT					
Edificações	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$			
	$q_p = q_c$ (kN/m)	q_{p1} (kN/m)	q_{p2} (kN/m)	q_{c1} (kN/m)	q_{c2} (kN/m)
Céu Azul	-2,59	2,1	-1,2	-3,48	-1,2

Fonte: Autor

1.4.4 Dimensionamento dos perfis

1.4.4.1 Estados limites últimos

Após realizar o carregamento da estrutura e obter os esforços dos elementos no Mastan2 cada perfil foi analisado separadamente e de forma que atendessem a combinação de esforços mais desfavorável, ver a descrição das combinações utilizadas no item 3.2.4.1 do capítulo 3, uma vez que, os perfis foram dimensionados de forma a atender o método dos estados limites.

Para esta primeira análise pontual as peças da estrutura foram verificadas em relação aos estados de limites últimos (ELU). De acordo com Pfeil e Pfeil (2009) o ELU está relacionado a ação de cargas excessivas que podem ocasionar o colapso da estrutura por meio da: ruptura por fadiga, perda de equilíbrio como corpo rígido, ruptura de uma ligação ou seção, plastificação total de um elemento estrutural ou de uma seção, entre outros.

1.4.4.2 Estados limites de serviço

A verificação dos estados limites de serviço (ELS) tem como parâmetro verificar as deformações excessivas de uma edificação, ou seja, é o parâmetro que garante a sensação de conforto e segurança dos ocupantes do imóvel.

Dessa forma, com a obtenção dos perfis que suportam os esforços solicitantes é realizado uma retroanálise no Mastan2 para verificar o comportamento estrutural da edificação em relação aos deslocamentos atuantes. Lembrando que os deslocamentos foram analisados conforme o Anexo C da NBR 8800 (ABNT, 2008), que para a verificação dos deslocamentos verticais das vigas treliçadas de cobertura estabelece o valor máximo de $L/250$.

Assim, após verificado os estados limites (ELU e ELS) foi obtido os seguintes perfis para o modelo VTT.

Tabela 2. Resumo de aço do modelo teórico VTT

Descrição	Perfil	Peso (kg/m)	Comprimento Total (m)	Peso (kg)
Banzos superior/inferior	U125x50x2,65	4,5	32,68	147,06
Diagonais e Montantes	LL40x2,25	1,35	98,29	132,69
Terças	Ue150x60x20x2,65	6,09	72	438,48
Perfil de travamento das terças (linha de corrente)	Barra lisa com ponta roscável Ø 12,5 mm	0,9633	16,38	15,78
Contraventamento	Barra lisa com ponta roscável Ø 12,5 mm	0,9633	57,73	55,61
Mão-Francesa	L30x2,25	0,99	34,39	34,05
Travamento entre Diagonais	L40x2,65	1,57	0,77	1,21
			Peso Total (kg)	824,88

Fonte: Autor

Importante ressaltar que todos os perfis utilizados para o cálculo dos modelos teóricos são perfis padronizados que atendem às especificações da NBR 6355 (ABNT, 2012). Isto torna-se necessário porque o dobramento da chapa provoca estricção local gerando o surgimento de fissuras e redução da ductilidade do perfil. Por isso, as relações entre medidas do perfil tais como espessura e raio de dobramento de chapa são importantes.

Dessa forma, deve ser evitado o uso de perfis que não estão de acordo com a NBR 6355 (ABNT, 2012), porque além do problema de dobramento, as dimensões de um perfil devem seguir uma lógica de cálculo que resulte em um perfil com as características geométricas necessárias para que o mesmo possa ser utilizado para fins estruturais.

1.5 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-14762**. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 87p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-6355**. Perfis estruturais de aço formados a frio - padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-8800**. Projeto de estruturas de aço e de estrutura mistas de aço e concreto de edifícios procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 237p.

BRENCICH, A.. Collapse of an industrial steel shed: a case study for basic errors in computational structural engineering and control procedures. **Engineering Failure Analysis**, [s.l.], v. 17, n. 1, p. 213-225, jan. 2010. Elsevier BV.

FALEIROS, J. P; TEIXEIRA, J. R. J; SANTANA, B. M. O crescimento da indústria brasileira de estruturas metálicas e o boom da construção civil: um panorama do período 2001-2010. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDS**. Rio de Janeiro, 2012.

GONÇALVES, R. M et al. **Ação do vento nas edificações teoria e exemplos**. 2. ed. São Carlos: SET/EESC/USP, 2007. 138 p.

HANISHA, C. S. S; KISHORE, I. S. Experimental and finite element analysis of cold formed steel beam-column joint. **Materials Today: Proceedings**, 2020. Elsevier BV.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MARAVEAS, C.; TSAVDARIDIS, K.d.. Assessment and retrofitting of an existing steel structure subjected to wind-induced failure analysis. **Journal Of Building Engineering**, [s.l.], v. 23, p. 53-67, maio 2019. Elsevier BV.

MCGUIRE, W., GALLAGHER, R. H., ZIEMIAN, R. D. **Matrix Structural Analysis**, 2nd Edition, 2000.

NOGUEIRA, Gilcimar Saraiva. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. 2009. 156 f. Dissertação (Mestrado em estruturas). Universidade federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

PARK, Keum-sung; MOON, Jiho; LEE, Sang-sup; BAE, Kyu-woong; ROEDER, Charles W.. Embedded steel column-to-foundation connection for a modular structural system. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 110, p. 244-257, mar. 2016. Elsevier BV.

PFEIL, W.; PFEIL M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 357 p.

PRAVIA, Z.M.C; DREHMER, G.A; MESCASA, E.J. Manual de construção em aço: **Galpões para usos gerais**. Rio de Janeiro: IBS/ CBCA. 2010.

SILVA, E. L; PIERIN, I; PIGNATTA, V. S. Manual de construção em aço: **Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme NBR 14762 e NBR 6355**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2014.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar e otimizar o desempenho estrutural de três coberturas metálicas de quadras poliesportivas de pequeno e médio porte situadas em Rio Verde - GO.

2.2 Objetivo Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Verificar o dimensionamento estrutural das três coberturas metálicas selecionadas: Céu Azul, Residencial Gameleira II e Módulo Esportivo, através de ferramentas computacionais de cálculo e dimensionamento de estruturas metálicas;
- Realizar um levantamento estrutural das três coberturas metálicas selecionadas para verificar as conformidades dos projetos e das obras com as prescrições normativas vigentes;
- Otimizar as estruturas executadas através da modificação de dois parâmetros: tipologia de pórticos planos transversais e seções transversais das vigas treliçadas de cobertura.

3. CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a Journal of Constructional Steel Research - Elsevier)

AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE COBERTURAS METÁLICAS DE QUADRAS POLIESPORTIVAS SITUADAS EM RIO VERDE - GO

Resumo

A construção em aço é um dos tipos mais utilizados em coberturas de quadras poliesportivas pelas diversas características dentre as quais destacam-se: custos reduzidos, menor tempo de execução da obra e maior capacidade de resistir grandes vãos quando comparadas às estruturas convencionais de concreto armado. Todavia, por mais que se trate de um método construtivo conhecido, percebe-se que ainda há certo desconhecimento entre os profissionais da área com relação aos diversos tipos de geometria das coberturas metálicas e quando utilizar cada uma delas. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo em que foram analisadas três coberturas de quadras poliesportivas existentes, situadas em Rio Verde - GO, para verificar se as mesmas estão de acordo com as determinações normativas vigentes e para promover a otimização destas. A otimização foi disposta em duas fases: na primeira foram propostas três novas tipologias de pórticos planos: pórtico com viga treliçada com banzos paralelos 'VTP', pórtico com viga treliçada trapezoidal 'VTT' e pórtico com viga treliçada em arco 'VTA'; na segunda etapa foram analisadas duas seções transversais das vigas de cobertura: seção 1 (composta inteiramente por perfil 'U') e seção 2 (composta por banzos com perfil 'U' e diagonais/montantes com cantoneiras duplas). Após as análises dos resultados foi verificado que a mudança de tipologia dos pórticos promoveu a otimização do consumo

de aço em duas das três edificações analisadas, enquanto a variação de seção transversal não apresentou nenhuma mudança expressiva no comportamento estrutural e taxa de consumo de aço das edificações analisadas.

Palavras-chave: vigas treliçadas; perfis formados a frio; análise linear; estados limites.

Abstract

Steel construction is one of the most used types in multi-sports court roofs due to several characteristics, among which the following stand out: reduced costs, shorter construction time and greater capacity to resist large spans when compared to conventional reinforced concrete structures. However, as much as it is a known construction method, it is clear that there is still a certain lack of knowledge among professionals in the area regarding the different types metal roofs geometry and when to use each one. In this context, this work presents a study in which three coverings of existing sports courts, located in Rio Verde – GO, were analyzed, to verify if they are in accordance with the current normative determinations and to promote their optimization. The optimization was arranged in two phases: in the first, three new types of flat frames were proposed: frame with lattice beam with parallel flanges 'LBP', frame with trapezoidal lattice beam 'TLB' and frame with arched lattice beam 'ALB'; in the second stage, two cross sections of the roof beams were analyzed: section 1 (composed entirely of 'U' profile) and section 2 (composed of 'U' profile flanges and diagonal / uprights with double angles). After analysis of the results it was verified that the change in frame typology promoted the optimization of steel consumption in two of the three buildings analyzed, while the variation in cross section did not show any significant change in the structural behavior and rate of steel consumption of the buildings analyzed.

Key-words: lattice beams; cold formed profiles; linear analysis; limit states.

3.1 Introdução

O projeto estrutural de edificações em aço é um dos principais documentos que garante a qualidade final do empreendimento. Patologias construtivas são evitadas quando o projeto apresenta detalhamento completo de toda a fabricação, montagem e execução da estrutura, além do mais, quando se tem o detalhamento preciso de todas as etapas construtivas as chances de erros são minimizadas e o tempo de obra é encurtado.

O cálculo e dimensionamento de um projeto de estruturas metálicas no Brasil é regido por duas normas distintas, a NBR 8800 (ABNT, 2008) e a NBR 14762 (ABNT, 2010), que especificam o dimensionamento de estruturas compostas por perfis laminados/soldados e perfis dobrados (formados a frio), respectivamente. Dessa forma, dependendo das características da edificação, o projetista deverá utilizar mais de uma metodologia de cálculo, além de realizar todo o dimensionamento das ligações que podem ser soldadas e/ou aparafusadas, logo, por mais simples que seja uma edificação, a mesma deve conter um projeto estrutural completo e bem detalhado.

Em obras como galpões de uso geral a estrutura tem uma representatividade considerável no orçamento da edificação, uma vez que, nesse tipo de obra, os elementos de acabamento geralmente são limitados. Em certos casos algumas edificações nem possuem alvenaria de vedação, por isso, para obtenção de resultados otimizados em relação ao consumo de materiais e comportamento estrutural, deve-se realizar uma avaliação minuciosa para a escolha da tipologia de pórtico e todas as outras características geométricas de uma cobertura metálica.

Os galpões de uso geral muitas vezes são dimensionados com base na experiência dos projetistas, com pouco ou nenhum estudo prévio das possíveis soluções estruturais para a edificação a ser analisada (NOGUEIRA, 2009). Em casos mais críticos a estrutura é construída sem projeto estrutural, deixando a cargo do serralheiro a responsabilidade pela execução e montagem da estrutura.

Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar e otimizar o desempenho estrutural de três coberturas metálicas de quadras poliesportivas de pequeno e médio porte situadas em Rio Verde - GO. A otimização foi realizada através de duas etapas complementares, na primeira, verificou-se o comportamento das coberturas metálicas com a variação dos três modelos de pórticos (VTP, VTT e VTA), e, na segunda foi analisado os resultados obtidos por meio da permuta dos dois tipos de seções transversais (seções 1 e 2), com o intuito de verificar a economia de aço e desempenho

estrutural obtidos entre as diversas combinações das seções transversais e tipologias de pórticos planos.

3.2 Método

3.2.1 Softwares utilizados

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o software Mastan2 (McGuire e Ziemian., 2000) por se tratar de uma ferramenta computacional de uso livre e com capacidade satisfatória para verificações numéricas de diversos modelos estruturais. O Mastan 2 permite a análise de pórticos planos e tridimensionais, além de possibilitar quatro tipos de análises (primeira ordem elástica, segunda ordem elástica, primeira ordem inelástica e segunda ordem inelástica), na Figura 1 é ilustrado um modelo estrutural desenvolvido nesse software e verificado por meio da análise de primeira ordem. Nesse trabalho todos os cálculos foram realizados com modelos de pórticos planos e utilizando análise de primeira ordem elástica, uma vez que, segundo Nogueira (2009), estruturas de pequeno e médio porte, como as que aqui foram analisadas, apresentam bons resultados sob a análise de primeira ordem.

O Mastan2 é um software que trabalha com análise matricial de estruturas, permitindo verificações com quantidades diferentes de elementos, e desta maneira possibilita a gradual aproximação entre os modelos matemático e real da estrutura. Esta capacidade de aproximação está explícita nos trabalhos de Richen e Rasmussen (2019) e Hou et al. (2019) que provaram a similaridade dos resultados dos modelos teóricos com o comportamento real de uma estrutura

Os resultados obtidos no software Mastan2 foram validados pelo software brasileiro Ftool v4.00.04 (Martha., 2002) que também trata de um software de uso livre, que realiza análises de primeira ordem em pórticos planos. Outro ponto importante a ser destacado é que o software Mastan2 foi utilizado apenas para obtenção dos esforços das barras e verificação dos deslocamentos dos pórticos planos. Para o dimensionamento dos perfis foi utilizado o software DimPerfil 4.0 (Pignatta et al., 2014) que é uma ferramenta gratuita desenvolvida pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), que auxilia no dimensionamento de perfis formados a frio conforme as exigências da norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010).

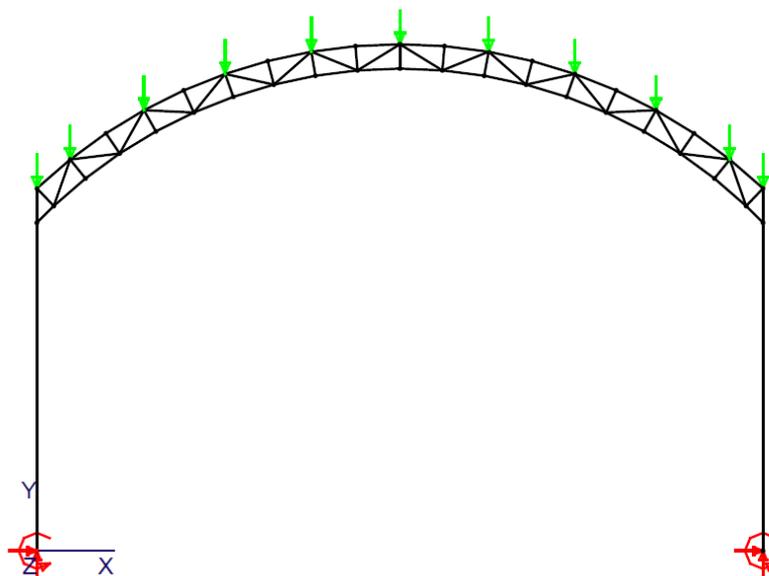


Figura 1. Representação de um modelo estrutural do software Mastan2. Fonte: Autor.

3.2.2 Modelos de cálculo

Para a análise e otimização das edificações selecionadas foram mantidos os parâmetros originais de cada estrutura como: vão transversal, distância entre pórticos, velocidade do vento, vinculações das bases, comprimento da edificação e altura dos pilares. A otimização das coberturas metálicas foi realizada em duas etapas, na primeira, foram utilizadas diferentes tipologias estruturais com três diferentes modelos de pórticos: VTP, VTT e VTA, conforme a Figura 2.

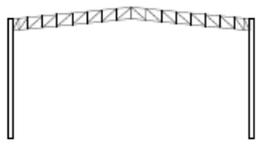
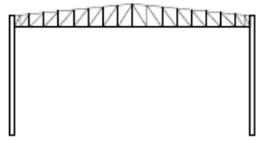
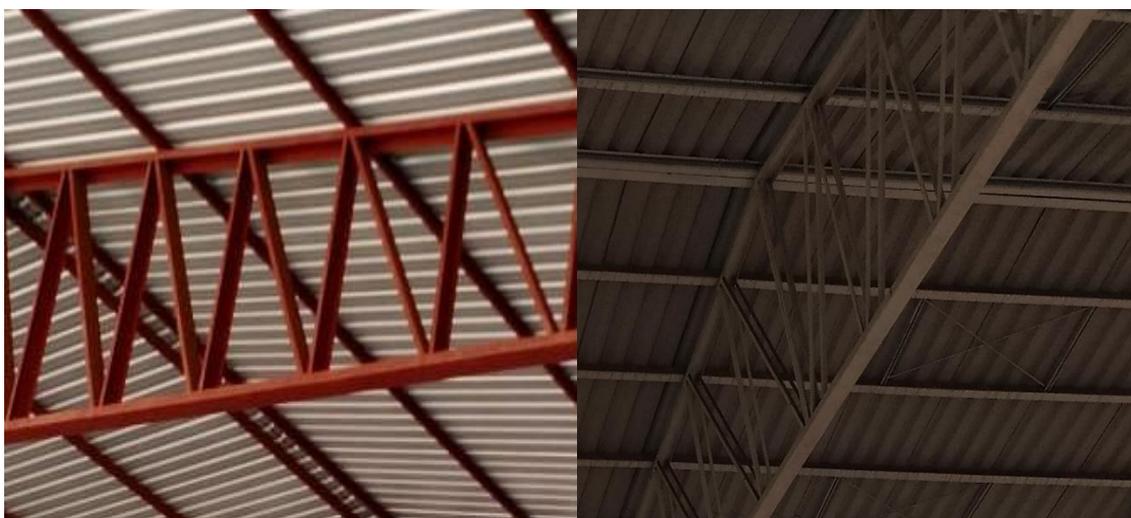
Modelos Estruturais			
Nomenclatura	Pórtico com viga de cobertura treliçada com banzos paralelos “VTP”	Pórtico com viga de cobertura treliçada trapezoidal “VTT”	Pórtico com viga de cobertura treliçada em arco “VTA”

Figura 2. Modelos estruturais teóricos. Fonte: Autor.

Na segunda etapa da otimização foi realizado a análise de cada modelo variando a seção transversal das vigas treliçadas entre as seções 1 e 2. Em que a seção 1 corresponde as vigas treliçadas de cobertura compostas por diagonais e montantes

utilizando perfil ‘U’, e a seção 2 é composta por perfil duplo ‘L’ nas diagonais e montantes. Conforme ilustrado na Figura 3.



(a)

(b)

Figura 3. Tipologia das seções transversais da pesquisa: (a) seção 1-composta inteiramente por perfil ‘U’ (b) seção 2.-composta por diagonais/montantes com cantoneiras duplas. Fonte: Autor.

3.2.3 Geometria das estruturas analisadas e ações atuantes

3.2.3.1 Edificações analisadas

Sabendo-se que os galpões industriais em aço possuem diversas funcionalidades, como: cobertura de quadras/ginásios, oficinas, estacionamentos, lojas, centros de distribuição, construções rurais, entre outros (PRAVIA; DREHMER e MESACASA, 2010), foram selecionadas estruturas que possuem tipo de uso similar, ou seja, que serão submetidas a solicitações similares durante a sua vida útil, dessa forma, foram selecionadas três coberturas metálicas de quadras poliesportivas, que representam uma amostra das coberturas de Rio Verde-GO e que contemplam três tamanhos de vãos diferentes, porém apresentam a mesma distância entre pórticos, aproximadamente. O que permite uma análise estrutural mais abrangente devido a variação crescente dos vãos.

A primeira Edificação de estudo foi a cobertura da quadra da praça Céu Azul, situada nas seguintes coordenadas -17,7549768 e -50,9098265, a mesma tem sua estrutura formada por pórticos trapezoidais com a seção da viga de cobertura formada por perfil ‘U’ nos banzos, e com perfis duplo ‘L’ nas diagonais e montantes. A segunda Edificação do trabalho foi a cobertura do ginásio do Residencial Gameleira II, situada nas seguintes

coordenadas -17.8157284 e -50.9138879, essa estrutura é composta por arco parabólico com seção transversal da viga de cobertura formada com perfil duplo L afastados nas diagonais/montantes e banzos com perfil 'U'. E a terceira Edificação da pesquisa foi a cobertura do ginásio do Módulo esportivo, situada a -17.7928981 e -50.9165692, a mesma tem sua estrutura formada por arco circular com seção transversal composta por perfil 'U' nos banzos, diagonais e montantes. Todas as edificações analisadas se encontram na cidade de Rio Verde, Goiás. A Figura 4 representa as três edificações:

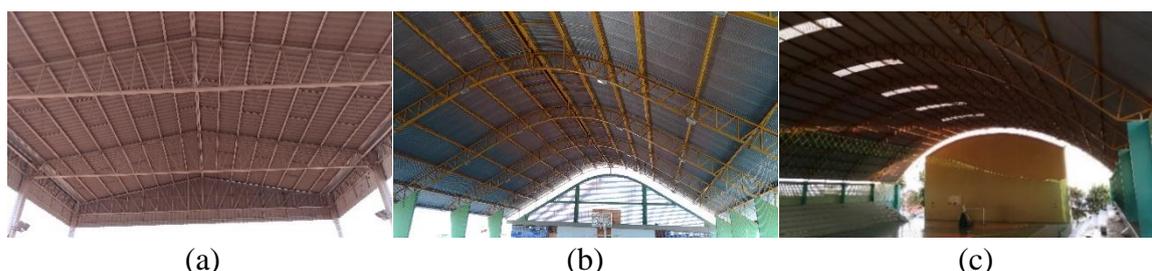


Figura 4. Coberturas analisadas: (a) quadra do Céu Azul; (b) ginásio do Gameleira e (c) cobertura do Módulo esportivo. Fonte: Autor

3.2.3.1.1 Características geométricas das edificações analisadas

As dimensões das obras analisadas estão compiladas na Tabela 1 e ilustradas nas Figuras 5 a 7.

Tabela 1. Características geométricas das edificações analisadas.

	Quadra da Praça Céu Azul	Ginásio do Gameleira	Módulo Esportivo
Vão livre	16,60 m	20,99 m	34,95 m
Distância entre pórticos	6,0 m	6,0 m	6,05m
Número de pórticos	5 Und	7 Und	9 Und
Comprimento Longitudinal	24,0 m	36,0 m	48,4 m
Pilares/seção	Metálico/2Uef 300x150x10x6,30 (mm)	Concreto/Seção Variável – Base=20x60; Topo= 20x170 (cm)	Concreto/20x65 (cm)

Fonte: Autor

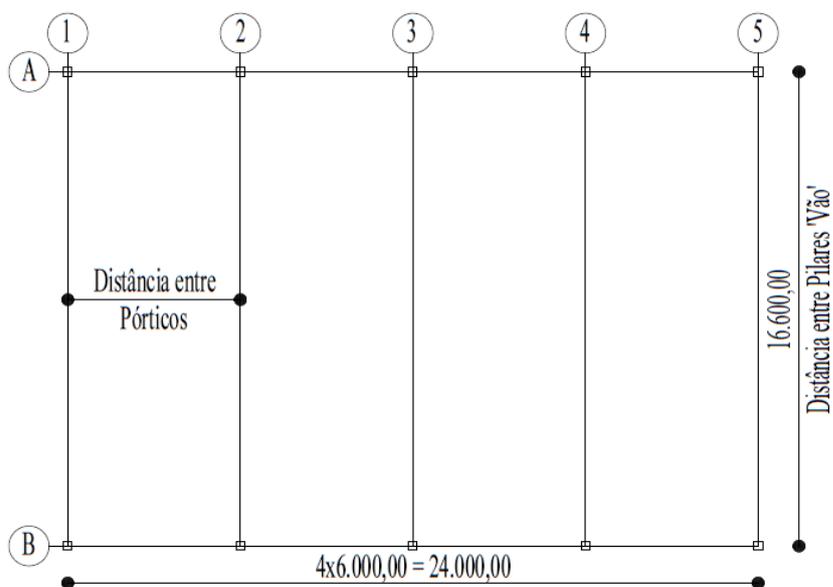


Figura 5. Planta de localização dos pórticos da quadra do Céu Azul, medidas em mm.
Fonte: Autor.

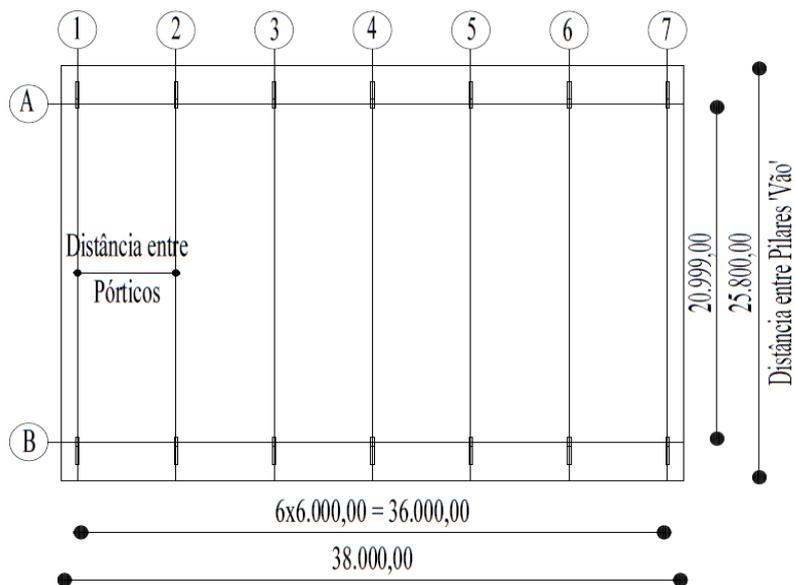


Figura 6. Planta de localização dos pórticos do ginásio do Gameleira, medidas em mm.
Fonte: Autor.

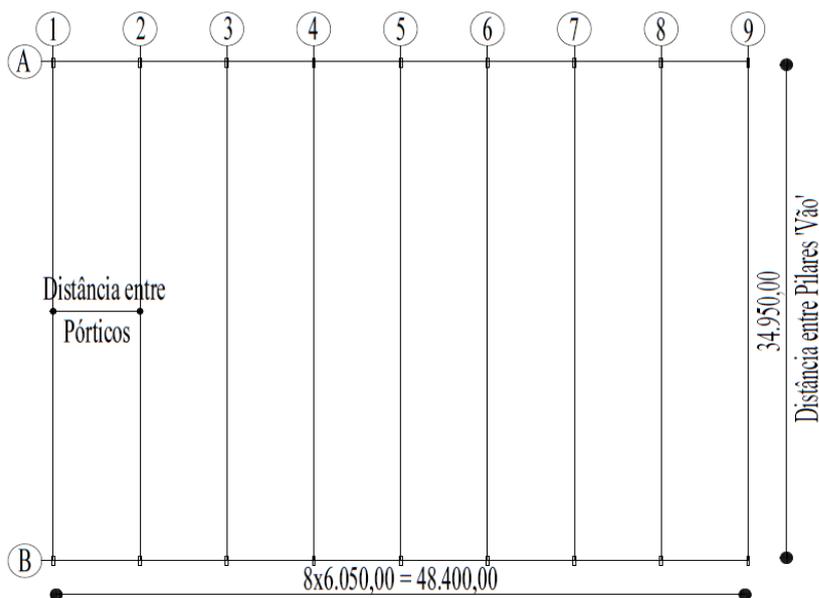


Figura 7. Planta de localização dos pórticos do Módulo esportivo, medidas em mm.
Fonte: Autor

As Figuras 5 a 7 representam a localização e número de pórticos transversais de cada uma das obras, em que a cota longitudinal é composta pela somatória das distâncias teóricas entre pórticos e a cota transversal representa o vão teórico entre pilares, os eixos alfabéticos representam os eixos centrais dos pilares no sentido longitudinal e os eixos numéricos representam os eixos centrais dos pilares no sentido transversal.

A análise das três edificações e dos seus modelos teóricos, foram realizadas considerando os modelos estruturais com base engastadas e topo dos pilares livres. Lembrando também, que conforme descrito na Tabela 1 a edificação do Céu Azul é composta por pórticos com pilares metálicos e as coberturas do Gameleira e do Módulo são compostas por pórticos com pilares de concreto.

3.2.3.2 Ações atuantes

As ações para efeito de cálculo de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010) são divididas em ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais. Para a análise de estruturas como as coberturas metálicas deste trabalho, geralmente não são consideradas as ações excepcionais, pois, são ações com probabilidade muito baixa de ocorrer na vida útil de uma edificação (tais como explosões, enchentes, choques de veículos ou embarcações, e etc.). Dessa forma, na pesquisa não foram abordadas as possíveis causas de ações excepcionais e seus efeitos sobre as estruturas analisadas.

As **ações permanentes (G)** para galpões de uso geral são as ações provenientes do peso próprio dos elementos estruturais e dos materiais/elementos constituintes da edificação. Para os modelos analisados, considerou-se o peso próprio de todos os elementos e a carga permanente proveniente das telhas, com valor de $0,05 \text{ kN/m}^2$.

As **ações variáveis (Q)** correspondem as ações que proporcionam efeitos significativos na edificação durante sua vida útil, para os modelos analisados as ações variáveis são a sobrecarga da cobertura e a ação do vento. Para a sobrecarga a NBR 8800 (ABNT, 2008) recomenda $0,25 \text{ kN/m}^2$. E, para a ação dos ventos, utilizou-se as prescrições da NBR 6123 (ABNT, 1988).

3.2.3.2.1 Ação do vento

A análise do vento é uma parte essencial para o estudo das edificações e modelos teóricos, uma vez que, de acordo com Maraveas e Tsavdaridis (2019) o desenvolvimento de danos permanentes em coberturas metálicas pode ser atribuído a fatores ambientais como o vento. A ação do vento nas coberturas analisadas seguiu as características da NBR 6123 (ABNT, 1988). Nessa pesquisa foi considerada a velocidade básica do vento igual $V_0 = 35 \text{ m/s}$, que representa a velocidade básica de Rio Verde – GO no mapa das isopleias da norma brasileira. Além disso foi considerado que as edificações analisadas estão instaladas em terrenos planos ou fracamente acidentado e com numerosos obstáculos, uma vez que todas as estruturas estão localizadas na zona urbana.

Para a análise dos esforços foram verificados dois casos distintos: edificação com planta regular com cobertura de duas águas e edificação com planta regular com cobertura em arco, conforme ilustrado na Figura 8. E, em todas as análises estruturais a pressão interna, C_{pi} , foi de 0 ou -0,30 (considerando o valor mais nocivo entre os dois). Nas Tabelas 2 a 4 estão representados os valores da ação do vento para cada modelo estudado.

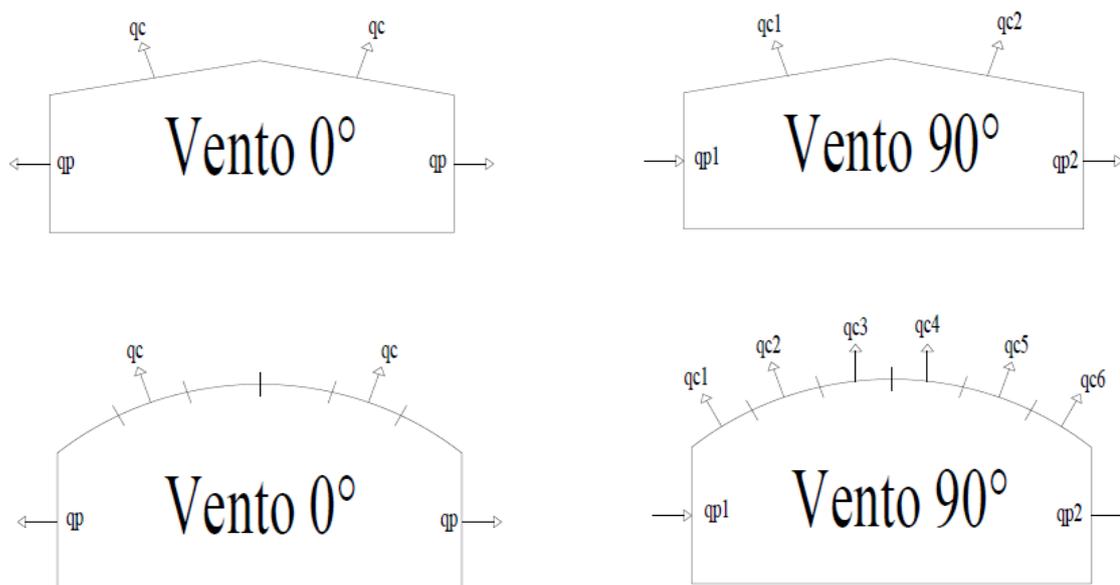


Figura 8. Ação do vento nas estruturas de planta regular. Fonte: Autor.

A Figura 8 representa a ação do vento nas edificações de planta regular formadas por coberturas de duas águas e em arco, as duas imagens do lado esquerdo representam as cargas de cobertura “qc” e cargas de parede “qp” oriundas do vento incidente a 0° “ V_0 ” em relação a geratriz da cobertura (cumeeira), e as duas imagens do lado direito representam as cargas oriundas do vento incidente a 90° “ V_{90} ”, as cargas qc e qp estão em kN/m.

Nas Tabelas 2 a 4 estão descritos os valores de qc e qp para as edificações existentes, para a tipologia VTA e para os modelos teóricos VTP e VBP, respectivamente.

Tabela 2. Ação do vento nas edificações analisadas.

Ação do Vento nas Coberturas Existentes									
Edificações	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$							
	qp=qc (kN/m)	qp1 (kN/m)	qp2 (kN/m)	qc1 (kN/m)	qc2 (kN/m)	qc3 (kN/m)	qc4 (kN/m)	qc5 (kN/m)	qc6 (kN/m)
Céu Azul	-2,59	2,1	-1,2	-2,82	-1,2	-	-	-	-
Gameleira	-2,35	2,06	-1,18	-2,65	-1,76	-2,35	-2,35	-1,18	-0,59
Módulo	-2,66	2,33	-1,33	-2,1	-1,76	-2,43	-2,43	-1,76	-0,67

Fonte: Autor

Tabela 3. Ação do vento nos modelos teóricos com tipologia da viga em arco.

Ação do Vento nos Modelos Teóricos (VTA)									
Edificações	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$							
	qp=qc (kN/m)	qp1 (kN/m)	qp2 (kN/m)	qc1 (kN/m)	qc2 (kN/m)	qc3 (kN/m)	qc4 (kN/m)	qc5 (kN/m)	qc6 (kN/m)
Céu Azul	-2,64	2,18	-1,25	-3,74	-2,18	-2,81	-2,5	-0,94	-0,62
Gameleira	-2,3	2,02	-1,15	-2,59	-1,73	-2,3	-2,3	-1,15	-0,58
Módulo	-2,76	2,41	-1,38	-2,17	-1,83	-2,52	-2,52	-1,83	-0,79

Fonte: Autor

Tabela 4. Ação do vento nos modelos teóricos com tipologia da viga com banzos paralelos e trapezoidal.

Ação do Vento nos Modelos Teóricos (VTP e VTT)					
Edificações	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$			
	qp=qc (kN/m)	qp1 (kN/m)	qp2 (kN/m)	qc1 (kN/m)	qc2 (kN/m)
Céu Azul	-2,59	2,1	-1,2	-3,48	-1,2
Gameleira	-2,11	1,85	-1,06	-2,48	-1,06
Módulo	-2,42	2,12	-1,21	-2,84	-1,21

Fonte: Autor.

As tabelas de 2 a 4 retratam os valores das cargas de vento das edificações existentes, dos modelos teóricos com formato em arco e dos modelos teóricos com cobertura com formato em duas águas, respectivamente. Conforme é possível notar os valores das qp e qc são iguais para todos os casos com V_0 , para os casos com V_{90} , percebe-se que qp e qc são diferentes e que os valores de qc são distribuídos em duas faixas para edificações de duas águas e em seis faixas para as coberturas em arco.

3.2.4 Análise e dimensionamento

A análise dos pórticos planos foi realizada de forma sistêmica, em que se verificou a combinação mais desfavorável dos esforços em cada peça separadamente, com posterior análise dos deslocamentos.

O dimensionamento dos perfis estruturais foi realizado de acordo com as prescrições da NBR 14762 (ABNT, 2010), dentre os distintos métodos apresentados pela norma foi utilizado o método das larguras efetivas (MLE), por se tratar do método de cálculo utilizado pelo software DimPerfil 4.0.

Todas as considerações de cálculo das obras e dos modelos otimizados foram baseadas na hipótese que as estruturas eram formadas por aço CF - 26, devido à incerteza

do tipo de aço utilizado nas edificações, dessa forma, foi considerado esse material por ser um aço mais comum nas obras e por se tratar de um dos aços com resistências próximas as mínimas requeridas para as tipologias de aço estrutural, conforme as características da NBR 6650 (ABNT, 2014).

3.2.4.1 Combinações empregadas

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008) o carregamento para uma estrutura é definido pela combinação de ações que têm probabilidade não desprezível de atuar sobre a estrutura durante a sua vida útil. Os coeficientes de ponderação são retirados da NBR 14762 (ABNT, 2010). De acordo a seguinte expressão:

$$F_d = \sum(\gamma_{Gi}F_{Gi,k}) + \gamma_{q1}F_{Q1,k} + \sum(\gamma_{qj}\psi_{0j}F_{Qj,k}) \quad (1)$$

Em que:

$F_{Gi,k}$: Representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$: É o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$: Representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

Para a pesquisa foram utilizadas as seguintes combinações:

$$1^\circ 1,25 \cdot PP + 1,35 \cdot CP + 1,5 \cdot SC + 1,4 \cdot 0,6 \cdot V_0 \quad (2)$$

$$2^\circ 1,25 \cdot PP + 1,35 \cdot CP + 1,5 \cdot SC + 1,4 \cdot 0,6 \cdot V_{90} \quad (3)$$

$$3^\circ 1,25 \cdot PP + 1,35 \cdot CP + 1,4 \cdot V_0 + 1,5 \cdot 0,8 \cdot SC \quad (4)$$

$$4^\circ 1,25 \cdot PP + 1,35 \cdot CP + 1,4 \cdot V_{90} + 1,5 \cdot 0,8 \cdot SC \quad (5)$$

$$5^\circ 1,0 \cdot PP + 1,0 \cdot CP + 1,4 \cdot V_0 \quad (6)$$

$$6^\circ 1,0 \cdot PP + 1,0 \cdot CP + 1,4 \cdot V_{90} \quad (7)$$

$$7^\circ 1,25 \cdot PP + 1,35 \cdot CP + 1,5 \cdot SC \quad (8)$$

As expressões de 5 a 7 caracterizam a atuação do vento de sucção, ou seja, apresenta um carregamento com esforço vetorial contrário ao restante dos outros esforços (PP, CP e SC), nesse caso pode ser que uma das três equações represente a pior situação de carregamento dependendo dos esforços de vento atuantes.

Em que:

PP_ Peso Próprio;

CP_ Carga Permanente;

SC_ Sobrecarga de utilização;

V₀_ Vento paralelo a geratriz longitudinal;

V₉₀_ Vento perpendicular a geratriz longitudinal.

As combinações acima são referentes ao ELU (estado limite último), para o ELS (estado limite de serviço) foi usado a seguinte combinação:

ψ_{2j} : Fator de redução de ações;

$$F_d = \sum F_{Gi,k} + \sum (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (9)$$

$$1^\circ \text{ PP} + \text{CP} + 0,6 \cdot \text{SC} \quad (10)$$

3.3 Resultados e Discussões

3.3.1 Análise do consumo de aço

3.3.1.1 Variação da taxa de consumo de aço das edificações devido à alteração da tipologia dos pórticos

A taxa de consumo de aço é a relação do peso da cobertura com a projeção horizontal da área de atuação de cada pórtico. No caso, para o levantamento do peso da cobertura foram contabilizados todos os elementos da mesma com exceção dos pilares, pois, dois dos três casos analisados possuem pilares de concreto. A Figura 9 apresenta a taxa de consumo de aço das edificações existentes comparadas com as taxas dos modelos teóricos de tipologias VTA, VTP e VTT.

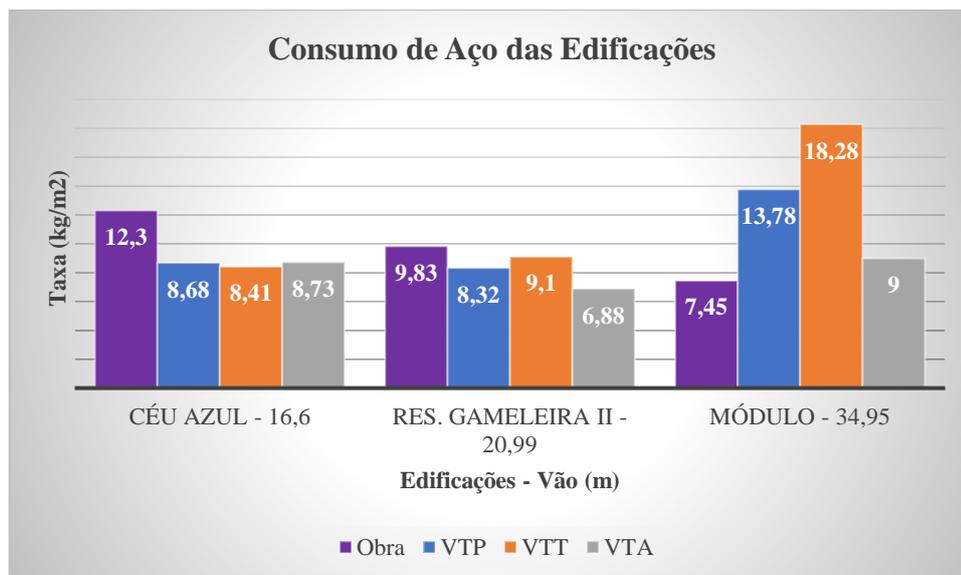


Figura 9. Consumo de aço das três edificações analisadas e dos seus modelos teóricos.
Fonte: Autor.

Tabela 5. Comparativo do consumo de aço referente aos dados da Figura 9.

Relação do Consumo de Aço Entre a Obra e os Modelos Teóricos		
	Média do consumo de aço das tipologias teóricas em relação a obra	Desvio Padrão do consumo de aço da obra e dos modelos teóricos
Céu Azul	0,7	1,6
Res. Gameleira II	0,82	1,09
Módulo	1,84	4,25

Fonte: Autor

Na Tabela 5 é possível verificar a diferença do consumo de aço dos modelos teóricos com a edificação existente, conforme observado na Figura 9. Na primeira coluna é retratado a relação entre a média de peso dos modelos teóricos com a obra, nessa coluna percebe-se que nas coberturas do Céu Azul e do Gameleira a média do consumo de aço dos modelos teóricos foi 30% e 28% menor do que o consumo de aço da obra, respectivamente, já na edificação do Módulo a média de consumo de aço das tipologias teóricas foi 84% superior ao consumo de aço da cobertura existente. Na segunda coluna está representado o desvio padrão do consumo de aço dos modelos teóricos juntamente com o consumo da obra, esses dados indicam maior uniformidade de consumo na cobertura do Gameleira seguido pelas coberturas do Céu Azul e do Módulo, respectivamente.

A Figura 9 mostra a taxa de consumo de aço das obras em estudo e dos modelos teóricos, lembrando que nessa primeira análise não houve variação da seção transversal das vigas de cobertura. Na quadra do Céu Azul, percebe-se que o consumo de aço da obra está bem elevado em relação aos modelos teóricos propostos, cerca de 40,89% maior do que o modelo VTA (segundo mais pesado), isso ocorre devido ao projeto da obra especificar perfis estruturais não normativos, de acordo com a NBR 6355 (ABNT, 2012), e que possuem área da seção transversal ligeiramente maior do que os perfis utilizados nos modelos teóricos, ainda em relação a quadra do Céu Azul percebe-se que o modelo VTT foi o que apresentou o menor consumo de aço, com economia de aproximadamente 31,63% correspondente a relação da taxa de consumo de aço da edificação existente com a taxa desse modelo estrutural.

Com relação ao ginásio do Gameleira, nota-se que os valores estão mais homogêneos, mas que a obra ainda foi a tipologia com maior taxa de consumo de aço, uma vez que apresentou um consumo maior de 18,15%, 8,0% e 42,88% em relação os modelos VTP, VTT e VTA, respectivamente. Isso ocorre devido ao sistema de travamento proposto no centro da cobertura do arco parabólico que apresenta uma taxa de aço bem concentrada naquela região. Já em relação aos perfis foram utilizados alguns perfis não normativos, mas os mesmos não apresentavam diferença de peso notável em relação aos utilizados nos modelos teóricos, e mostra que a diferença maior de peso entre os diversos modelos está relacionada aos perfis utilizados. Para essa edificação o modelo VTA foi o que apresentou a menor taxa de consumo de aço.

Em relação ao Módulo Esportivo, percebe-se que a Obra foi a que apresentou a menor taxa de consumo de aço, a cerca de 17,22% inferior em relação ao modelo VTA (o segundo mais leve), isso ocorre porque, de acordo com as análises realizadas, a edificação não está em conformidade com os padrões normativos, e será mostrado nos itens subsequentes. Com relação ao consumo de aço, percebe-se que a tipologia VTA foi a que se destacou em relação ao menor consumo de aço e em contrapartida o modelo VTT foi o que apresentou a maior taxa com aumento de aproximadamente 145,37% correspondente a relação da taxa de consumo de aço da obra com a taxa desse modelo teórico. Isso ocorreu porque nesse caso de estudo o vão é consideravelmente elevado, 34,95 m, e como a altura da treliça está relacionada ao vão, a parte central da viga trapezoidal é alta, promovendo a necessidade de perfis mais robustos para suportar os esforços solicitantes devido ao maior comprimento destravado.

3.3.1.2 Variação da taxa de consumo de aço das edificações devido a alteração da tipologia dos pórticos e seção transversal das vigas de cobertura

Nas Figuras 10 e 11 estão representadas as taxas de consumo de aço dos modelos teóricos formados por vigas treliçadas de cobertura com seção transversal com diagonais e montantes com perfis U e duplo L, respectivamente:

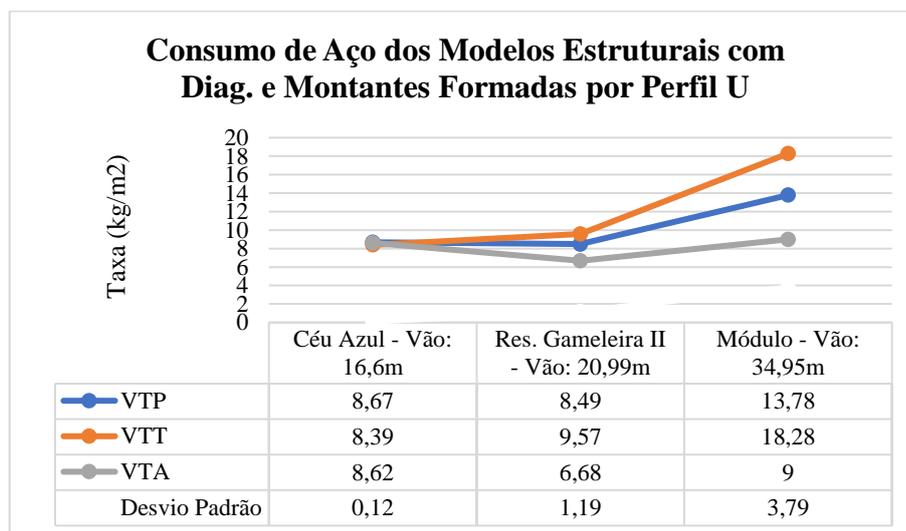


Figura 10. Consumo de aço dos modelos teóricos com seção transversal com perfil ‘U’.
Fonte: Autor.

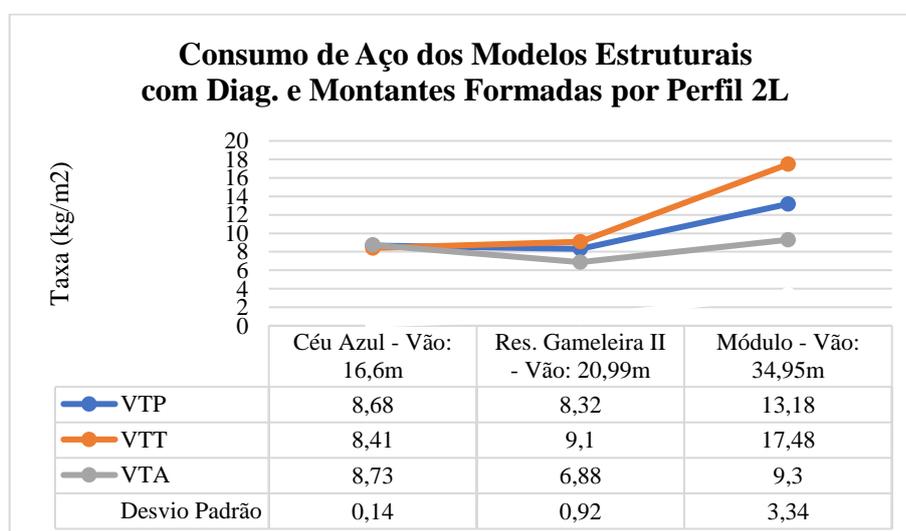


Figura 11. Consumo de aço dos modelos teóricos com seção transversal com cantoneiras duplas. Fonte: Autor.

Nas Figuras 10 e 11, nota-se que os três modelos de pórticos propostos para otimização das edificações estudadas obtiveram resultados similares, em relação ao consumo de aço, para o vão de 16,6 m. E à medida que o vão aumentou os resultados

ficaram cada vez mais díspares, conforme é possível observar nos dados do desvio padrão, referente ao consumo de aço, de cada uma das coberturas estudadas.

Analisando as duas figuras também é possível verificar a diferença da taxa de consumo de aço entre as seções transversais 1 e 2 para cada um dos modelos de pórticos. Nessa comparação, nota-se que a diferença de consumo de aço com a variação da seção não foi expressiva, conforme é possível verificar nos resultados da relação do consumo de aço da seção 1 com a 2 apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Relação da taxa de consumo de aço das seções U (seção 1) e 2L (seção 2).

Relação do consumo de aço: seção 1/ seção 2			
	Céu Azul	Res. Gameleira II	Módulo
VTP	0,999	1,02	1,046
VTT	0,998	1,052	1,046
VTA	0,987	0,971	0,968

Fonte: Autor.

Na Tabela 6 é possível observar que todos os valores para as três edificações analisadas e para os três modelos teóricos estão próximos de '1', ou seja, a variação da taxa de consumo de aço quase não mudou devido a variação da tipologia da seção transversal das vigas treliçadas de cobertura. Nesta tabela, nota-se também que a seção 1 obteve maior consumo de aço para as coberturas do Gameleira e do Módulo quando associada aos modelos VTP e VTT, para todos os outros casos a mesma foi a mais econômica.

3.3.2 Deslocamentos verticais

3.3.2.1 Variação do deslocamento vertical das edificações devido a alteração da tipologia dos pórticos

O deslocamento vertical também é um parâmetro essencial para analisar o comportamento estrutural das obras selecionadas e dos modelos teóricos propostos como meio de otimização, além de auxiliar na predição de falhas de elementos estruturais, conforme verificado por Kooi e Hoult (2018) que observaram a diferença no deslocamento entre uma treliça padrão com e sem elementos avariados. Nesse sentido, a

Figura 12 representa os deslocamentos verticais das edificações em estudos e dos modelos de pórticos analisados apenas, ou seja, não há comparação entre seções neste gráfico.

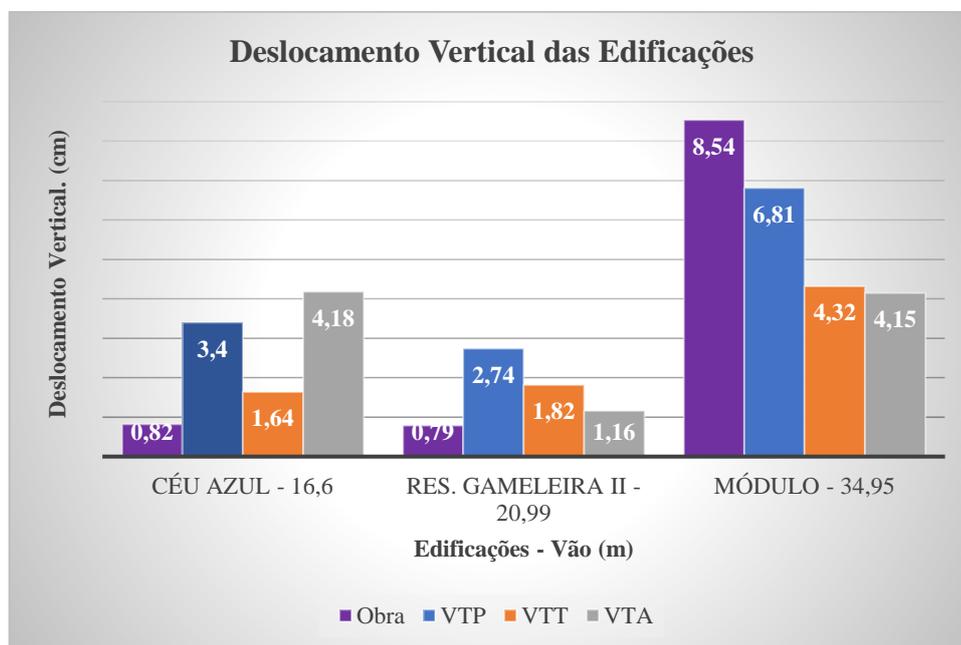


Figura 12. Deslocamento vertical das três edificações analisadas e dos seus modelos otimizados. Fonte: Autor.

Tabela 7. Comparativo do deslocamento vertical referente aos dados da Figura 12.

Relação do Deslocamento Vertical entre a Obra e os Modelos Teóricos		
	Média do deslocamento vertical das tipologias teóricas em relação a obra	Desvio Padrão do deslocamento vertical da obra e modelos teóricos
Céu Azul	3,75	1,34
Res. Gameleira II	2,41	0,74
Módulo	0,6	1,83

Fonte: Autor.

Na Tabela 7 é possível verificar a diferença do deslocamento vertical dos modelos teóricos com a edificação existente, conforme observado na Figura 12. Na primeira coluna é retratado a relação entre a média de deslocamento vertical, dos modelos teóricos, com o deslocamento vertical da obra, nessa coluna percebe-se que nas coberturas do Céu Azul e do Gameleira a média do deslocamento vertical dos modelos teóricos foi 275% e 141% maior do que o deslocamento vertical da obra, respectivamente, já na edificação do Módulo a média de deslocamento vertical das tipologias teóricas foi 40%

menor do que o deslocamento da cobertura existente. Na segunda coluna está representado o desvio padrão do deslocamento vertical dos modelos teóricos juntamente com o da obra, esses dados indicam maior uniformidade de deslocamento vertical na cobertura do Gameleira seguido pelas coberturas do Céu Azul e do Módulo, respectivamente.

Na Figura 12 é possível verificar a diferença de deslocamento vertical entre os modelos de pórticos teóricos e suas respectivas obras. Na edificação do Céu Azul fica claro que para vãos a cerca de 15 metros, os modelos 'VTT' são os que apresentaram o melhor comportamento, uma vez que, os dois menores valores para deslocamentos foram encontrados para a obra e para o modelo teórico que também possui a tipologia VTT. Os modelos VTP, VTT e VTA apresentaram aumento no deslocamento de 314,63%, 100% e 409,76%, respectivamente, Nesse caso em específico, os modelos teóricos apresentaram maior deslocamento do que o modelo da obra executada devido ao maior consumo de aço e rigidez que a edificação apresenta em relação as outra tipologias, mas que, para essa análise representa um gasto desnecessário de material, uma vez que todos os casos apresentaram deslocamento vertical abaixo do máximo permitido por norma ($L/250$).

No caso do ginásio do Residencial Gameleira II os deslocamentos já não foram tão disformes quanto nas outras duas edificações e apresentou resultados que demonstraram que para vãos na faixa de 20 metros a tipologia 'VTA' foi a que apresentou os melhores resultados em relação ao deslocamento vertical, uma vez que, houve aumento do deslocamento dos modelos propostos VTP, VTT e VTA nas seguintes proporções: 246,84%, 130,38% e 46,84%, respectivamente, ou seja, os dois menores deslocamentos encontrados para as condições de contorno dessa edificação são para a obra e para o modelo VTA. Outro ponto importante é que, diferente do caso da cobertura da quadra do Céu Azul, que apresenta menor deslocamento vertical na obra pelo gasto desnecessário de materiais, aqui o menor deslocamento da obra está relacionado com a diferença de comportamento entre arco parabólico (modelo da obra) e arco circular (modelo teórico), que vai de acordo com Nunes (2011), que afirma que arcos parabólicos costumam apresentar melhor comportamento estrutural do que os arcos circulares.

Em relação ao Módulo Esportivo é possível notar um deslocamento vertical acentuado da obra que ocorre porque vigas treliçadas de cobertura da mesma apresentam rigidez reduzida, ocasionada pela pequena altura da seção transversal, conforme será visto. Para as situações de contorno dessa cobertura foi notado que o modelo teórico VTA foi o que apresentou o menor deslocamento vertical, uma vez que os modelos estudados

VTP, VTT e VTA obtiveram a redução no deslocamento nas seguintes proporções: 20,26%, 49,41% e 51,41%, e comprova o melhor comportamento dos pórticos com a tipologia VTA para vãos na faixa de 35 metros.

3.3.2.2 Variação do deslocamento vertical das edificações devido a alteração da tipologia dos pórticos e seção transversal das vigas de cobertura.

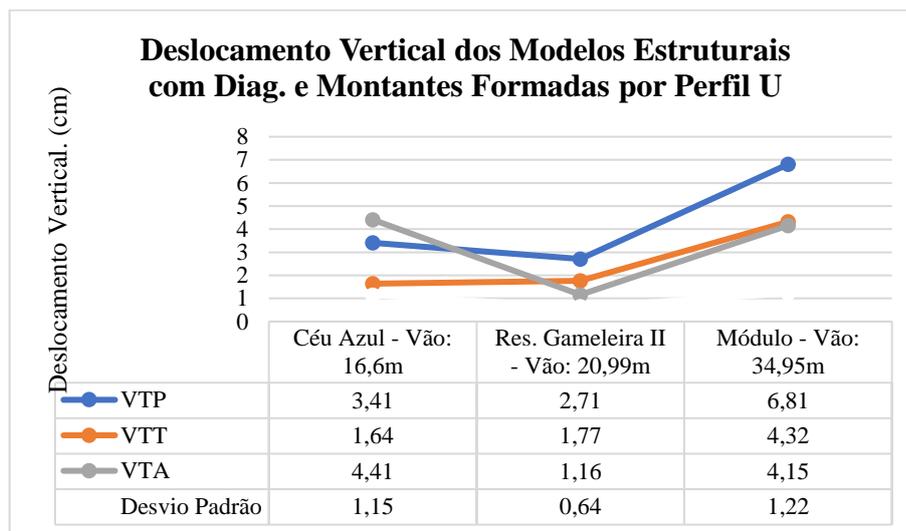


Figura 13. Deslocamento vertical dos modelos teóricos com seção transversal com perfil 'U'. Fonte: Autor.

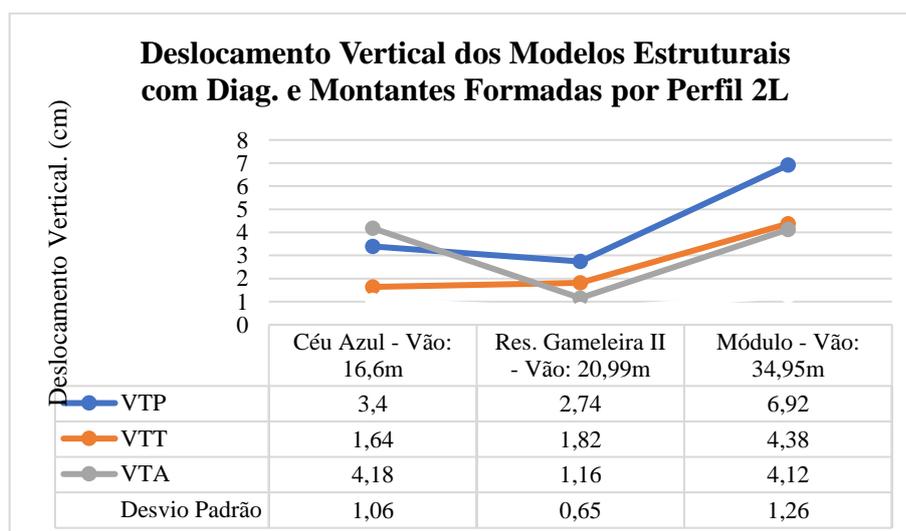


Figura 14. Deslocamento vertical dos modelos teóricos com seção transversal com cantoneiras duplas. Fonte: Autor.

Nas Figuras 13 e 14, nota-se que para vãos próximos de 15 metros o modelo VTT apresenta os menores deslocamentos verticais, enquanto para os vãos próximos de 20 e

35 metros o modelo VTA é o que apresenta melhores resultados. É possível notar também, que essas duas tipologias VTT e VTA apresentaram deslocamentos similares para os vãos de 20,99 e 34,95 metros, e que a tipologia VTP foi a que apresentou os piores resultados para as análises de deslocamento vertical. Nas Figuras 13 e 14, observa-se também o desvio padrão referente ao deslocamento vertical de cada uma das edificações analisadas, esses dados mostram que os modelos teóricos da cobertura do Res. Gameleira II foram os que apresentaram a maior uniformidade de deslocamento vertical, seguidos pelos modelos propostos da quadra do Céu Azul e do Módulo, respectivamente.

Nas figuras, também é possível verificar a diferença de deslocamento entre as seções 1 e 2, conforme demonstrado na relação entre os deslocamentos das seções 1 e 2 na Tabela 8.

Tabela 8. Relação do deslocamento vertical das seções U (seção 1) e 2L (seção 2).

Relação do deslocamento vertical: seção 1/ seção 2			
	Céu Azul	Res. Gameleira II	Módulo
VTP	1,003	0,989	0,984
VTT	1	0,973	0,986
VTA	1,055	1	1,007

Fonte: Autor

Na Tabela 8, nota-se que todos os resultados estão próximos de '1', isso mostra que a variação da seção transversal das vigas treliças de cobertura pouco alteraram os resultados de deslocamento vertical. Dentro da pequena variação do deslocamento vertical proveniente da modificação das seções transversais é possível notar que: na cobertura da quadra do Céu Azul as tipologias que utilizaram a seção 2 apresentaram menores deslocamentos verticais, para os modelos VTP e VTA. Já em relação a cobertura metálica do ginásio do Gameleira a seção 1 foi a que obteve melhores resultados. E, com relação aos modelos da cobertura do Módulo Esportivo foram encontrados resultados variados em relação ao comportamento das seções analisadas. Para os modelos VTP e VTT foi notado um resultado melhor em relação ao deslocamento vertical para a seção 1, e para o modelo VTA o melhor resultado foi encontrado no pórtico com seção tipo 2.

3.3.3 Panorama geral das edificações e modelos analisados

Nas Tabelas 9 a 11 estão descritos, de forma compilada, os resultados de consumo de aço e deslocamento vertical, de forma que é possível verificar quais são os modelos otimizados para cada uma das edificações analisadas.

3.3.3.1 Consumo de aço e deslocamento vertical dos modelos estruturais da cobertura da quadra do céu azul

Tabela 9. Consumo de aço e deslocamento vertical da cobertura do Céu Azul.

Cobertura do Céu Azul - Seção Formada com Perfis 'U' e '2L'					
		Obra	VTP	VTT	VTA
Seção 1 Perfil 'U'	Consumo de Aço (kg/m ²)	-	8,67	8,39	8,62
	Deslocamento Vertical (cm)	-	3,41	1,64	4,41
Seção 2 Perfil '2L'	Consumo de Aço (kg/m ²)	12,3	8,68	8,41	8,73
	Deslocamento Vertical (cm)	0,82	3,4	1,64	4,18

Fonte: Autor

Na Tabela 9 é possível verificar qual modelo estrutural apresentou o melhor comportamento estrutural para vãos próximos de 15 metros. Nesse caso, nota-se que a tipologia VTT foi a que apresentou o melhor comportamento, relacionado ao consumo de aço e deslocamento vertical. Com relação ao tipo de seção, é possível verificar que a seção 1 foi a que apresentou melhores resultados, ou seja, para essa cobertura o modelo otimizado é o VTT com seção composta por perfil 'U'.

3.3.3.2 Consumo de aço e deslocamento vertical dos modelos estruturais da cobertura do ginásio do Residencial Gameleira II

Tabela 10. Consumo de aço e deslocamento vertical da cobertura do Gameleira.

Cobertura do Gameleira - Seção Formada com Perfis 'U' e '2L'					
		Obra	VTP	VTT	VTA
Seção 1 Perfil 'U'	Consumo de Aço (kg/m ²)	-	8,49	9,57	6,68
	Deslocamento Vertical (cm)	-	2,71	1,77	1,16
Seção 2 Perfil '2L'	Consumo de Aço (kg/m ²)	9,83	8,32	9,1	6,88
	Deslocamento Vertical (cm)	0,79	2,74	1,82	1,16

Fonte: Autor

Na Tabela 10 nota-se que a tipologia VTA foi a que apresentou melhores resultados para a cobertura com vão teórico intermediário (20,99 m). Para essa cobertura nota-se que a seção 1 apresentou menor consumo de aço e o deslocamento vertical igual, para o arredondamento de duas casas decimais, dessa forma, o modelo otimizado para essa cobertura é formado pela tipologia VTA com seção transversal composta por perfis 'U'.

3.3.3.3 Consumo de aço e deslocamento vertical dos modelos estruturais da cobertura do módulo esportivo

Tabela 11. Consumo de aço e deslocamento vertical da cobertura do Módulo.

Cobertura do Módulo - Seção Formada com Perfis 'U' e '2L'					
		Obra	VTP	VTT	VTA
Seção 1 Perfil 'U'	Consumo de Aço (kg/m ²)	7,45	13,78	18,28	9
	Deslocamento Vertical (cm)	8,54	6,81	4,32	4,15
Seção 2 Perfil '2L'	Consumo de Aço (kg/m ²)	-	13,18	17,48	9,3
	Deslocamento Vertical (cm)	-	6,92	4,38	4,12

Fonte: Autor

Na Tabela 11 fica claro que a tipologia VTA foi a que apresentou os melhores resultados em relação ao consumo de aço e deslocamento vertical. Nessa edificação também é possível notar que os resultados das duas seções ficaram bem próximos, a seção

1 apresentou o menor consumo de aço, porém com o maior deslocamento vertical, como ambos os deslocamentos estão dentro da faixa de deslocamento limite ($l/250$) considera-se que a seção 1 obteve o resultado superior devido ao menor consumo de aço, assim o modelo otimizado para essa cobertura é composto pela combinação da seção 1 com a tipologia VTA.

A Tabela 12 descreve os modelos otimizados das coberturas, ou seja, ela mostra a associação, entre tipologia de pórtico e seção transversal, que obteve o melhor resultado para cada uma das edificações analisadas.

Tabela 12. Modelos otimizados das edificações analisadas.

Modelos Otimizados		
Edificações	Modelo	Seção Transversal
Céu Azul	VTT	Diag./Mont. c/ perfil 'U'
Gameleira	VTA	Diag./Mont. c/ perfil 'U'
Módulo Esportivo	VTA	Diag./Mont. c/ perfil 'U'

Fonte: Autor

3.3.4 Principais observações realizadas com relação ao projeto e execução das coberturas estudadas

Nas edificações visitadas foram encontrados diversos casos contraditórios com as prescrições normativas, tanto na parte de projeto como de execução. As observações referentes a execução das obras da pesquisa foram verificadas somente com uma inspeção visual da cobertura, uma vez que conforme descrito anteriormente, em nenhuma das edificações foi possível fazer um levantamento completo de todos os pontos, por causa da falta de equipamentos de proteção individual e guindastes com plataformas elevatórias.

3.3.4.1 Observações da cobertura da quadra do Céu Azul

Na cobertura da quadra do Céu Azul, nota-se que houve gasto excessivo de aço, conforme descrito na Tabela 5, mas, apesar disso, o banzo inferior da viga de cobertura se encontra em desacordo com as normas vigentes pela falta de mãos-francesas para promover o travamento dessa peça no eixo x, que leva a um comprimento destravado excessivo. E, como consequência há redução da capacidade de suporte do banzo pela diminuição da carga crítica de flambagem da peça, conforme indicado na NBR 14762 (ABNT, 2010). Nesta obra também foi verificado os seguintes apontamentos: o uso de

perfis não normativos, travamento incomum das terças e terças fora dos nós da treliça. A Tabela 13 apresenta um compilado das observações levantadas e suas possíveis soluções:

Tabela 13. Principais apontamentos encontrados através da inspeção visual e análise do projeto da cobertura do Céu Azul.

Revisões a serem executadas na cobertura da quadra do Céu Azul		
Nº	Observações de Projeto/execução	Soluções
1	Banzo inferior destravado no eixo 'x'	Utilizar mão-francesa
2	Uso de perfis não normativos	Especificar em projeto apenas perfis normativos de acordo com a NBR 6355: 2012
3	Travamento irregular das terças	Detalhar em projeto um sistema de travamento efetivo do eixo 'y' das terças
4	Terças fora dos nós da treliça	Reposicionar as terças nos nós das treliças, e caso haja alguma treliça com nó desalinhado, deve-se criar um nó intermediário na posição correta

Fonte: Autor

Na Tabela 13, nota-se que as revisões de 1 a 3 são referentes as observações de projeto e somente o a de número 4 corresponde um apontamento referente a execução da edificação, o que vai de acordo com a problemática da pesquisa, pois muitas das obras não tem um projeto estrutural completo, e quando tem, em alguns casos, são bem simplórios, com poucos detalhes referente a fabricação, montagem e transporte da estrutura.

3.3.4.2 Observações da cobertura do ginásio do Gameleira

Na cobertura do ginásio do Gameleira, nota-se que existe um projeto bem fundamentado, em que foram bem especificados os travejamentos da cobertura e todos os elementos estruturais do arco treliçado como os de ligação. Nessa edificação foram encontrados apontamentos relativos a execução da obra, como: terças fora dos nós das treliças, pilares desalinhados, que provocaram pequeno desalinhamento da treliça de cobertura, e alguns pontos em que houve empenamento local da peça devido ao aumento excessivo de temperatura durante o processo de soldagem.

Tabela 14. Principais apontamentos encontrados através da inspeção visual e análise do projeto da cobertura do Gameleira.

Revisões a serem executadas na cobertura da quadra do Céu Azul		
Nº	Observações de Projeto/execução	Solução
1	Terças fora dos nós da treliça	Reposicionar as terças nos nós das treliças, e caso haja alguma treliça com nó desalinhado, deve-se criar um nó intermediário na posição correta
2	Pilares com pequenos desalinhamentos	Deve-se realizar uma análise estrutural das treliças empenadas devido ao desalinhamento de pilares e caso seja observado a necessidade de reforço o mesmo deverá ser executado
3	Empenamento local da peça	Deve-se realizar uma análise numérica de cada ponto empenado para verificar a necessidade de reforço local

Fonte: Autor.

Na Tabela 14, verifica-se que todas as revisões são relativas à execução da cobertura, pois para esse caso em específico a cobertura dispunha de um projeto estrutural bom, em relação as prescrições normativas, nota-se também que os apontamentos referentes a execução não são graves, no geral essa obra foi relativamente bem executada.

3.3.4.3 Observações da cobertura do módulo esportivo

A cobertura do Módulo Esportivo foi a obra em que foram verificados a maior quantidade de observações, iniciando pela altura da seção considerada baixa para o vão, pois de acordo com o que foi verificado no trabalho de Nogueira (2009), os arcos são pré-dimensionados com altura próximo de $L/30$, algo próximo a 116,5 cm para o vão de 34,95m, e a cobertura em questão se encontra com altura de 78 cm, e pode levar a diminuição da rigidez da estrutura dessa cobertura, pois para Song et al. (2019) a altura e o comprimento são fatores que alteram significativamente a rigidez de uma viga treliçada, comprovando a importância de uma seção com altura proporcional ao vão. Outro ponto importante é a inconformidade estrutural do banzo inferior pela falta de mão-francesa para travar o perfil no eixo x, e essa questão é agravada devido a cobertura ter forma de arco que aumenta ainda mais o comprimento destravado desse perfil, e combinado ao perfil com geometria não normativa e pouca área na seção transversal, gera resistência bem abaixo dos esforços solicitantes. Nessa cobertura também foi notado terças fora de

nós, linhas de corrente sem enrijecedores, o uso de perfis não normativos e ligações com pontos de falha na solda, que podem causar perda de resistência da viga, pois segundo Zeynalian, Shelley e Ronagh (2016) o comportamento estrutural de uma treliça está diretamente ligado à capacidade das ligações.

Tabela 15. Principais apontamentos encontrados através da inspeção visual e análise do projeto da cobertura do Módulo.

Revisões a serem executadas na cobertura da quadra do Céu Azul		
Nº	Observações de Projeto/execução	Solução
1	Viga de cobertura com rigidez reduzida devido a pequena altura da seção transversal	Aumentar a altura da seção transversal da viga através de uma composição de seção
2	Banzo inferior destravado no eixo 'x'	Utilizar mão-francesa
3	Terças fora dos nós da treliça	Reposicionar as terças nos nós das treliças, e caso haja alguma treliça com nó desalinhado, deve-se criar um nó intermediário na posição correta
4	Linhas de corrente sem enrijecedores nas extremidades	Especificar em projeto o uso de enrijecedores nas extremidades das linhas de correntes para promover o perfeito apertamento das mesmas
5	Uso de perfis não normativos	Especificar em projeto apenas perfis normativos de acordo com a NBR 6355: 2012
6	Solda de ligação com falha	Deve-se reforçar os pontos das ligações mal executadas com chapas de ligação e reexecutar a solda no entorno dessas chapas

Fonte: Autor

Na Tabela 15, nota-se que apenas as observações de número 3 e 6 são referentes a execução da cobertura, o restante são apontamentos de projeto, o que reforça a carência de projetos estruturais bem detalhados para essa tipologia de construção. Por fim, com relação às observações foi verificado que as três coberturas analisadas apresentam apontamentos similares como: o uso de perfis não normativos, terças fora dos nós da treliça e, com exceção da cobertura do ginásio do Gameleira, também foi notado a falta de travamento dos banzos inferiores.

3.4 Conclusão

Após a análise das três edificações, no que diz respeito ao dimensionamento, foi verificado que as obras do Céu Azul e do Módulo apresentaram o banzo inferior em discordância com o dimensionamento normativo, pela falta de travamento no eixo 'x', além disso foi verificado curta rigidez elástica nas vigas treliçadas de cobertura do Módulo por causa da altura reduzida da seção transversal em relação ao vão entre pilares. Na edificação do Residencial Gameleira II foi verificado que a cobertura metálica atende a todos os requisitos normativos relacionados aos estados limites (ELU e ELS), ou seja, apresenta dimensionamento de acordo as determinações normativas atuais. Com relação ao levantamento das obras e projetos das coberturas analisadas, destacaram-se diversas incoerências normativas, sendo que a maior parte destas estão relacionadas com a falta de projetos mais detalhados e com as indicações das etapas de fabricação, transporte e execução da estrutura. E, no que diz respeito a otimização das edificações analisadas foi notado que a variação da tipologia dos pórticos foi a maior responsável por otimizar as coberturas estudadas. Especificamente sobre as obras do Céu Azul e Gameleira, os modelos otimizados apresentaram economia no consumo de aço, em relação a obra, de 31,6% e 30,0%, respectivamente. Referente à obra do Módulo, pela mesma estar em desacordo com as determinações normativas, foi necessário redimensionamento que assegurasse o ELS e ELU; notou-se o acréscimo no consumo de aço entre 20,81% e 145,37% utilizando as diferentes tipologias, sendo o modelo com viga treliçada em arco (VTA) o responsável pelo menor consumo de aço em seu novo projeto que atendeu as determinações da NBR 14762 (ABNT, 2010).

3.5 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-6650**. Bobinas e chapas finas a quente de aço-carbono para uso estrutural - especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-14762**. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 87p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-6123**. Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 80p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-6355**. Perfis estruturais de aço formados a frio - padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-8800**. Projeto de estruturas de aço e de estrutura mistas de aço e concreto de edifícios procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 237p.

HOU, Yanguo et al. Structural responses of a modular thin-walled steel trestle structure. **Journal Of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 158, p.502-521, jul. 2019. Elsevier BV.

KOOI, Kyle van Der; HOULT, Neil A.. Assessment of a steel model truss using distributed fibre optic strain sensing. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 171, p. 557-568, set. 2018. Elsevier BV.

MARAVEAS, C.; TSAVDARIDIS, K.d.. Assessment and retrofitting of an existing steel structure subjected to wind-induced failure analysis. **Journal Of Building Engineering**, [s.l.], v. 23, p.53-67, maio 2019. Elsevier BV.

MARTHA, L. F. (2002) **Ftool: A Frame Analysis Educational Software**. Rio de Janeiro, Brasil.

MCGUIRE, W., GALLAGHER, R. H., ZIEMIAN, R. D. **Matrix Structural Analysis**, 2nd Edition, 2000.

NOGUEIRA, Gilcimar Saraiva. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. 2009. 156 f. Dissertação (Mestrado em estruturas). Universidade federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

NUNES, Rosana Aparecida Ferreira. **Avaliação do desempenho estrutural de coberturas em estrutura de aço na forma de arco circular e parabólico**. 110 f. Dissertação (Mestrado em estruturas). Universidade federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

PRAVIA, Z.M.C; DREHMER, G.A; MESCASA, E.J. Manual de construção em aço: **Galpões para usos gerais**. Rio de Janeiro: IBS/ CBCA. 2010.

RINCHEN; RASMUSSEN, Kim J.r.. Numerical modelling of cold-formed steel single C-section portal frames. **Journal Of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 158, p.143-155, jul. 2019. Elsevier BV.

SILVA, E. L; PIERIN, I; PIGNATTA, V. S. Manual de construção em aço: **Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme NBR 14762 e NBR 6355**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2014.

SONG, Linlin et al. Flexural behavior investigation of the CFS truss beams with self-piercing riveted connection. **Journal Of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 156, p.28-45, maio 2019. Elsevier BV.

ZEYNALIAN, Mehran; SHELLEY, Adele; RONAGH, H.r.. An experimental study into the capacity of cold-formed steel truss connections. **Journal Of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 127, p.176-186, dez. 2016. Elsevier BV.

4. CONCLUSÃO GERAL

Através das análises de desempenho estrutural das três coberturas selecionadas, observou-se que cada uma destas possuía um nível de confiabilidade no que se refere aos padrões normativos. O mesmo foi observado com referência à otimização do consumo de aço e comportamento estrutural. Desta maneira, destacam-se as seguintes conclusões:

- Cobertura da quadra poliesportiva do Céu Azul: Nessa edificação foi verificado que todos os elementos estruturais, com exceção do banzo inferior, pela falta de travamento (mão-francesa) no eixo x, atendem as prescrições normativas da NBR 14762 (ABNT, 2010) com relação aos estados limites últimos e de serviço (ELS e ELU).
- Cobertura do ginásio do Residencial Gameleira II: A cobertura do ginásio do Gameleira foi a estrutura que apresentou os melhores resultados, uma vez que, foi verificado que todos os perfis estavam de acordo com as prescrições normativas, além da estrutura principal ter apresentado bons resultados com relação ao consumo de aço e desempenho estrutural.
- Cobertura do Módulo Esportivo: A cobertura do módulo foi a estrutura que apresentou os resultados mais distintos em relação aos padrões normativos, uma vez que a mesma se encontra com uma viga de cobertura com pouca rigidez para o vão existente, por causa da pequena altura da seção da viga de cobertura, nessa edificação, também foi notada incoerência normativa do perfil do banzo inferior pela falta de mãos-francesas que promovem o travamento dessa peça no eixo x, essa falta de travamento é agravada pelo fato da cobertura apresentar um vão considerável (34,95m) e por ter a sua geometria em arco, que aumenta ainda mais o comprimento do banzo inferior. Porém, conforme comentado a priori a estrutura

se encontra em funcionamento sem grandes deformações. O que pode ser afirmado, de acordo com a visita técnica no local e com as análises computacionais, é que a mesma se encontra aquém dos padrões normativos da NBR 14762 (ABNT, 2010), e para uma análise mais completa seria necessário o acesso a recursos que permitissem realizar uma inspeção local completa e a realização de alguns testes de laboratório com os perfis da cobertura.

Com relação as divergências normativas encontradas nas obras, nota-se que há um balanço entre os apontamentos executivos e os de projeto, comprovando a falta de uma análise aprofundada desse tipo de estrutura durante a concepção do projeto para eliminar as divergências mais recorrentes de execução e de projeto como: terças fora dos nós de treliça e a falta de travamento do banzo inferior (mão-francesa).

Por fim, nas análises de otimização foi notado que para as coberturas verificadas (Céu Azul, Residencial Gameleira II e Módulo Esportivo) os modelos otimizados foram VTT, VTA e VTA, respectivamente, e de acordo com os resultados, nota-se que a troca do tipo da seção transversal das vigas de cobertura pouco contribui para a redução do consumo de aço e para o aprimoramento do comportamento estrutural, ou seja, os resultados mais expressivos foram obtidos com a alteração das tipologias dos pórticos da estrutura principal.

Nessa linha de pesquisa, são indicadas as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Realizar pesquisa em relação aos tipos de seções transversais para vigas treliçadas, abordando o comportamento das mesmas para diferentes situações de aplicação;
- Desenvolver um estudo comparativo entre vigas de coberturas treliçadas e compostas por perfis caixa (2xUe), ambas formadas por PFF, para verificar os vãos limites de aplicação de cada um desses dois modelos de estrutura;
- Produzir um estudo dos modelos teóricos considerando o dimensionamento dos pilares para a obtenção do modelo otimizado.
- Promover um estudo qualitativo, em Rio Verde – GO e região, das vantagens e desvantagens da aplicação de perfis formados a frio no canteiro de obras de galpões de uso geral.

APÉNDICE

5. APÊNDICE

5.1 Apêndice A: Discretização dos Modelos Estruturais

Esse apêndice traz orientações importantes em relação à modelagem estrutural das vigas de cobertura e apoios analisadas na pesquisa. Demonstra-se aqui a diferença de comportamento de uma viga treliçada de cobertura apoiada em pilares para uma mesma viga treliçada sobre apoios fixos (ou do segundo gênero) que restringem os esforços horizontais e verticais, conforme ilustrado nas figuras 1A e 2A.

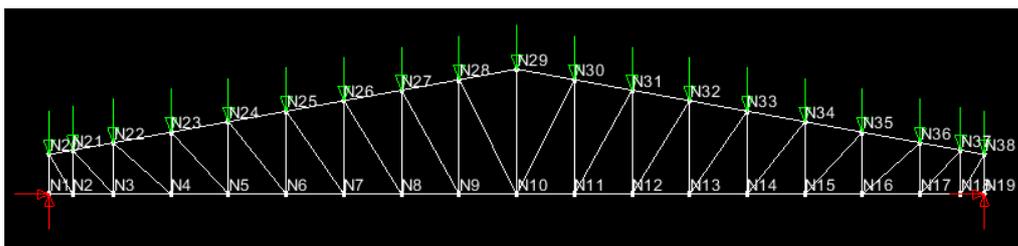


Figura 1A Viga treliçada de cobertura sobre apoios fixos. Fonte: Autor.

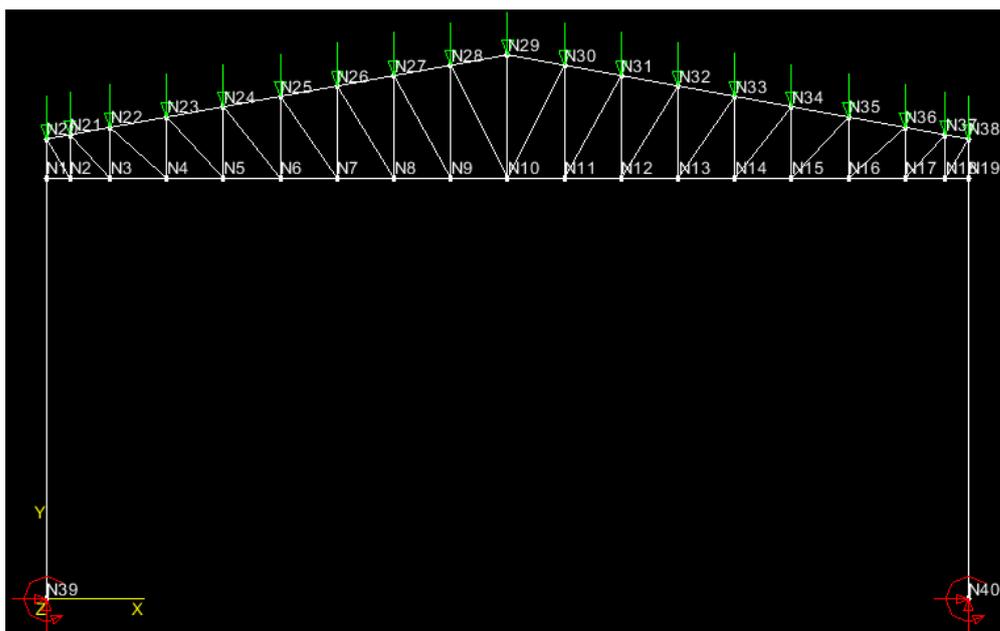


Figura 16 Viga treliçada de cobertura apoiada em pilares. Fonte: Autor.

Nas Figuras 1A e 2A é possível notar que todas as características dos dois modelos estruturais são exatamente iguais exceto pelo tipo de apoio. Esse único ponto da modelagem estrutural quando não realizado de forma correta promove comportamentos estruturais distintos para as mesmas vigas treliçadas.

A viga treliçada apoiada no topo de pilares reproduz de maneira satisfatória o comportamento estrutural padrão para pórticos de cobertura em que existem deslocamentos horizontais no topo dos pilares, conforme acontece com as estruturas reais. Já no modelo sobre apoios fixos ocorre alteração nos esforços solicitantes e deformações da viga treliçada, devido os apoios restringirem qualquer tipo de deformação horizontal, conforme indicado na Tabela 1A.

Tabela 1A. Diferença de esforços normais e deslocamento vertical dos dois modelos.

Comportamento estrutural dos dois modelos matemáticos de cálculo						
Nó/Barras	Pórtico			Apoios do segundo gênero		
	Esforços Normais (kN)		Deslocamento Vertical (cm)	Esforços Normais (kN)		Deslocamento Vertical (cm)
	Compressão	Tração		Compressão	Tração	
Nó N10			0,64			0,42
Barra N1 - N2	-0,14			-20,43		
Barra N20 - N21	-6,39			-6,44		
Barra N29 - N10		6,77			6,91	
Barra N22 - N4		8,97			8,97	

Na Tabela 1A, nota-se que o modelo de cálculo considerando pórtico apresenta deslocamento vertical de 52,38% maior do que o modelo composto por apoios do segundo gênero. E, em relação aos esforços normais é possível verificar que entre os 4 elementos de barras analisados apenas o elemento (N22 – N4) apresentou o mesmo valor.

Dessa forma, para a correta modelagem estrutural utilizando apenas a viga treliçada (sem os pilares), devem ser utilizados apoios elásticos (rotação/translação) que promovam deformações similares às que ocorreriam no topo dos pilares do pórtico, sendo que os coeficientes de deformabilidade das molas devem ser relacionados com a rigidez axial (EA) e rigidez à flexão (EI) dos pilares.