



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

RAFAEL PIMENTA ALVES

**LEVANTAMENTO E ANÁLISE NUMÉRICA DAS PRINCIPAIS PATOLOGIAS EM
ESTRUTURAS METÁLICAS ENCONTRADAS EM PALMAS-TO.**

PALMAS

2021

RAFAEL PIMENTA ALVES

**LEVANTAMENTO E ANÁLISE NUMÉRICA DAS PRINCIPAIS PATOLOGIAS EM
ESTRUTURAS METÁLICAS ENCONTRADAS EM PALMAS-TO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenheiro Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Dr. Thiago Dias de Araújo

**PALMAS
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

A4741 Alves, Rafael Pimenta
Levantamento e análise numérica da principais patologias em estruturas metálicas em Palmas-TO. / Rafael Pimenta Alves. – Palmas, TO, 2021.
33 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Thiago Dias de Araújo Silva

1. Aço. 2. Estrutura. 3. Estabilidade. I. Silva, Thiago Dias de Araújo. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAFAEL PIMENTA ALVES

LEVANTAMENTO E ANÁLISE NUMÉRICA DAS PRINCIPAIS PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS ENCONTRADAS EM PALMAS-TO.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil
Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas,
como exigência à obtenção do grau em
Engenheiro Civil.

Aprovado em: 25/06/2021

BANCA AVALIADORA

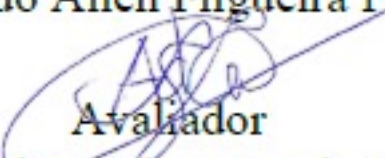
Thiago D. A. Silva
Orientador

Thiago Dias de Araújo e Silva



Avaliador

Ricardo Allen Filgueira Pontes



Avaliador

Adriano dos Guimarães de Carvalho

DEDICATÓRIA

Ao senhor de todas as coisas.

À minha família Lourdes Aparecida Pimenta Alves, Marajá Alves, Ana Carlina Pimenta Alves e Sarah Cristina da Costa Sousa.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que eu pudesse chegar até aqui. Em especial, agradeço:

A Deus, que me deu forças, saúde e paz todos esses anos.

A minha família Marajá Alves, Lourdes Aparecida Pimenta Alves, Ana Carolina Pimenta Alves e Sarah Cristina da Costa Sousa que me deram atenção, carinho e amor.

Ao Prof. Dr. Thiago Dias de Araújo, por ser um ótimo professor, por todos ensinamentos e orientações para conclusão do curso.

Aos meus amigos Davi, Matheus, Paulo, Edson, Celso, Paulo Ricardo, Jabson, Amanda, Rodrigo e Indiara, Isabel, Valeria e Ramiz que me acompanharam até o fim dessa jornada.

A todos os professores e funcionários do IFTO.

Ao IFTO – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins.

RESUMO

ALVES, Rafael Pimenta. **Levantamento e análise numérica das principais patologias em estruturas metálicas encontradas em palmas.** 2020. 28 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2020.

As estruturas metálicas vêm sendo frequentemente utilizadas em coberturas de edificações residenciais, comerciais e industriais em todo país. Com o aumento da necessidade energética, a energia solar fotovoltaica está cada vez mais sendo utilizada. As placas solares do sistema na sua grande maioria são instaladas nas coberturas, entretanto essas não foram dimensionadas para receber o peso do sistema solar. Esse acréscimo de carga faz com a estrutura metálica das coberturas atinjam seu estado limite último e ou estado limite de serviço. Desta forma esse trabalho tem como objetivo estudar as principais falhas que ocorrem nestas estruturas, bem como estudar o reforço em forma de contraventamento das mesmas. Inicialmente será feito um estudo dos principais problemas encontrados em 08 laudos técnicos de coberturas metálicas realizado pela empresa Avenza Engenharia e a análise numérica da estrutura após a inserção do contraventamento.

Palavras-chave: Estruturas metálicas. Patologias. Análise numérica. Painel Solar.

ABSTRACT

ALVES, Rafael Pimenta. **Survey and numerical analysis of the main pathologies in metal structures found in Palmas.** 2020. 28 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2018.

Metal structures often used in roofing residential, commercial and industrial buildings across the country. With the increase in energy demand, photovoltaic solar energy is increasingly used. The system's solar plates are mostly installed on the roofs, however these plates were not sized to receive the weight of the solar system. This increase in load makes a metallic structure of the roofs reach their ultimate limit state and/or service limit state. Thus, this work aims to study the main failures that occur before, as well as to study the reinforcement in the form of bracing them. Initially, a study will be made of the main problems found in 08 technical reports on metallic roofs carried out by the company Avenza Engenharia and a numerical analysis of the structure after the insertion of the bracing.

Keywords: Metallic structures. Pathologies. Numerical analysis. Solar panel.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA.....	11
3	ANÁLISE NUMÉRICA NO SAP2000.....	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
4.1	Análise linear e dimensionamento no SAP2000.....	14
5	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

O crescente uso dos sistemas estruturais de aço em todo mundo se deve principalmente pela sua praticidade na execução, rapidez de montagem, organização do canteiro de obra e alta resistência a tração, compressão e flexão dos elementos estruturais, no qual possibilita o emprego de peças mais esbeltas fazendo com que a edificação fique mais leve, quando comparado com concreto armado, tornando-se uma opção muito interessante para coberturas de edifícios.

A partir dessas premissas, as coberturas de edificações residenciais, comerciais e industriais em todo país vem, cada vez mais, utilizando essas estruturas. Elas são formadas por elementos principais e secundários, tais como, tesouras ou treliças, pilares, contraventamentos, terças, mão francesa, corrente rígida, linha de corrente, suporte de terça e tirantes.

Segundo Silva (2019, p.05), “A energia fotovoltaica, que utiliza os raios solares para a produção de energia elétrica, está em constante e significativo desenvolvimento, tanto em termos mundiais quanto no Brasil”. Devido sua localidade, a cidade de Palmas, no Tocantins, tornou-se referência em produção energética solar, pois a região apresenta características que propicia uma produção abundante e de qualidade. Atualmente podemos observar a crescente implantação e uso de placas solares, isso ocorre principalmente pela busca de um sistema cada vez mais eficiente, tecnológico e economicamente mais viável.

Investir nessa prática tem se tornado algo bastante comum, pois o sistema apresenta grande viabilidade, principalmente a longo prazo.

Um fato que deve ser levado em consideração quando o assunto é energia fotovoltaica no Brasil é a sua localização privilegiada. Para Pereira *et al* (2006, p. 12)

O Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região inter-tropical, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano. A utilização da energia solar traz benefícios a longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento, regulando a oferta de energia em períodos de estiagem, diminuindo a dependência do mercado de petróleo e reduzindo as emissões de gases poluentes à atmosfera como estabelece a Conferência de Kyoto.

A instalação de placas é algo comum principalmente nas coberturas de edificações, porém os elementos estruturais não foram dimensionados para receber o acréscimo de carga

gerada pelo peso próprio do sistema de geração de energia solar. Esse aumento de carga nos elementos da cobertura de estrutura metálica, faz com que ela atinja seu estado limite último que está relacionado com a ruína da estrutura ou qualquer tipo de colapso, no qual fique determinado a paralização ou uso da mesma e/ou seu estado limite de serviço que está relacionada principalmente com deformações e vibrações excessivas nos elementos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Sendo assim, muitas falhas são encontradas por simulações em software e outras são facilmente detectadas apenas por uma inspeção visual, tais como flambagens globais, locais e deslocamentos excessivos, portanto é importante estudar alguns reforços para resolver tais falhas.

Segundo Neto, Nascimento e Lima (2018, p. 11)

O estudo das patologias nas estruturas de aço necessita ser tratada de uma forma mais aprofundada, sistematizando os dados coletados através das inspeções visuais para manter um maior nível do controle tecnológico, fiscalização e uma melhor execução (mão de obra) para diminuir essas causas e ao mesmo tempo ter um controle rigoroso sobre o desenvolvimento das patologias em aço na edificação e suas possíveis causas.

“A finalidade da análise estrutural é determinar a resposta da estrutura, ou seja, tensões, deformações, forças atuantes solicitações resultantes e deslocamentos, sob determinada condições de contorno e carregamento” (SILVA, 2009).

Desta forma, o presente trabalho propõe-se a estudar as principais falhas em coberturas metálicas, encontradas a partir do levantamento de dados de 08 laudos técnicos realizados pela empresa Avenza Engenharia, bem como identificar suas origens, estudar reforços em forma de contraventamento. Ao final, pretende-se verificar se a inserção do contravento é suficiente para garantir a estabilidade as treliças de cobertura.

2 DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS

Descrição da cobertura	Descrição do elemento	Falhas	Solução
Galpão dividido de 07 subestruturas de cobertura formadas por pilares em perfis metálicos de aço dobrado, 05 destas subestruturas são formadas por pilares, vigas, terças coberto por telha de aço galvanizado. 01 destas subestruturas é formada por estrutura de madeira e telha cerâmica e 01 desta subestrutura é formada por treliça e telha de aço galvanizado.	Banzo superior e inferior da treliça	<ol style="list-style-type: none"> Limite de esbeltez superior ao limite da norma. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante. 	<ol style="list-style-type: none"> Contraventar os banzos. Aumentar a área de aço da seção.
	Terças	<ol style="list-style-type: none"> Limite de esbeltez em torno de x e y superior ao limite de norma. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante. Terça fora do nó da treliça. Ligação sem solda e sem parafuso. 	<ol style="list-style-type: none"> Colocar linhas de correntes, tirantes, mão francesa e suporte de terça. Aumentar a área de aço da seção. Criar nós intermediários com montantes e diagonais. Soldar ou parafusar as ligações das terças.
	Tirantes	Tirante com cordoalhas	Substituir as cordoalhas por barra redonda ou cantoneiras.
	Pilaretes	Apoiado na alvenaria	Colocar chapa base de ligação.
	Vigas	<ol style="list-style-type: none"> Limite de esbeltez em torno de x e y superior ao limite de norma. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante. 	<ol style="list-style-type: none"> Colocar linhas de correntes, tirantes e mão francesa. Aumentar a área de aço da seção.
Estrutura dividida em 03 subestruturas compostas de coberturas metálicas	Banzo superior e inferior da treliça	1. Limite de esbeltez superior ao limite da norma.	1. Contraventar os banzos.

treliçadas. 01 subestrutura de 02 águas e 02 subestruturas em 01 água, as telhas são espaçadas a cada 1,65m e as treliças estão a 4,65m de distância uma da outra.		1. 2. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante.	2. Aumentar a área de aço da seção.
	Terças	1. Limite de esbeltez em torno de x e y superior ao limite de norma. 1. 2. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante.	1. Colocar tirantes nas linhas de correntes, mão francesa e suporte de terça.
Edificação com 4 coberturas, sendo 01 de estrutura de madeira, telha cerâmica em duas águas e 02 em estrutura metálicas com telha galvanizada em duas águas e 01 em estrutura metálica disposta em uma água.	Vigas	1. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante. Flexão excessiva em torno de x.	1. Aumentar a área de aço da seção. Colocar mão francesa.
	Terças	1. Limite de esbeltez em torno de x e y superior ao limite de norma. 2. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante.	1. Colocar linhas de correntes, tirantes e mão francesa. 2. Aumentar a área de aço da seção.
Cobertura metálica apoiada sobre laje e alvenaria e telha de cerâmica tipo plan.	Vigas	2. Limite de esbeltez superior ao limite da norma. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante.	1. Contraventar os banzos. 2. Aumentar a área de aço da seção.
	Terças	Limite de esbeltez em torno de x e y superior ao limite de norma.	Colocar linhas de correntes e mão francesa.
Cobertura metálica treliçada disposta em 01 água com treliça de 12m de comprimento apoiada em pilares de concreto armado e com telha galvanizada trapezoidal.	Treliça	1. Apoio indevido das treliças. Corrosão dos elementos.	1. Colocar chapa de topo. Fazer pintura com tinta antiferrugem
	Banzo superior e inferior da treliça	1. Flambagem global e lateral com torção das peças. 2. Corrosão dos elementos.	1. Diminuir o comprimento livre destravado da peça. 2. Fazer pintura com tinta antiferrugem.

		Limite de esbeltez superior ao limite da norma.	Colocar mão francesa.
	Terças	Limite de esbeltez em torno de x superior ao limite da norma.	Colocar mão francesa.
Cobertura metálica treliçada em 4 águas com 13 treliças apoiado sobre pilares de concreto armado e diagonais e montantes com perfis cantoneira unidos por presilhas.	Banzo superior e inferior da treliça	1. Limite de esbeltez superior ao limite da norma. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante.	1. Contraventar os banzos. Aumentar a área de aço da seção.
	Terças	Limite de esbeltez em torno de x e y superior ao limite de norma.	Colocar linhas de correntes e mão francesa.
Galpão em estrutura de aço dobrado com 04 águas. A estrutura de apoio da cobertura são tesouras com 19m de vão e 12,20m de distância uma da outra, com montantes e diagonais apoiados sobre pilares em perfis enrijecidos soldados, com terças apoiadas nos nós das treliças e sobre a estrutura telha em aço galvanizado trapezoidal.	Banzo superior e inferior da treliça	1. Limite de esbeltez superior ao limite da norma. Esforço resistente inferior ao esforço solicitante.	1. Contraventar os banzos. Aumentar a área de aço da seção.
	Terças	Limite de esbeltez em torno de x e y superior ao limite de norma.	1. Colocar linhas de correntes, mão francesa e suporte de terça.

3 ANÁLISE NUMÉRICA NO SAP2000

As análises de estabilidade das coberturas foram caracterizadas no software Sap2000 com cargas tipo buckling (flambagem), o procedimento de cálculo retorna o valor do α crítico, parâmetro usando como critério de estabilidade de acordo com o EN 1993-1-1.

Neste estudo, objetivamos verificar se as treliças ou vigas de coberturas atingem um α crítico igual ou superior a 10, após a inserção do contraventamento. Assim podemos considerar a estrutura de nós fixos, permitindo que seja realizada apenas uma análise de primeira ordem.

As estruturas com α crítico $3 < \alpha_{cr} < 10$ são classificadas de nós móveis, porém poderão ser realizadas análises de segunda ordem simplificada utilizando o método de ampliação de esforços. Para $\alpha_{cr} < 3$ a estrutura é classificada de nós fixos, porém é necessário que faça uma análise mais rigorosa da estabilidade estrutural.

Os elementos principais das estruturas de coberturas analisados foram caracterizados tipo frame (barra). As treliças e vigas de coberturas recebem cargas das terças, que no dimensionamento foram consideradas cargas de peso próprio, forro, painel solar, sobrecarga, vento 0, vento 90 e carga referente ao peso do operário que irá instalar a placa solar, juntamente com a área de influência de cada estrutura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Análise linear e dimensionamento no SAP2000

Estrutura 01

As coberturas de aço analisadas neste estudo são modelos extraídos de 08 laudos técnicos do acervo da empresa Avenza Engenharia, os elementos principais das estruturas são compostos por treliças ou vigas de cobertura. A primeira análise foi realizada em uma das 07 coberturas de uma distribuidora de bebidas presente no parecer N° 01/2020. As treliças possuem vão livre de 9,10 m, espaçada a cada 5 m e as terças são apoiadas sobre o banzo superior a cada 2,7 m, conforme a **Figura 1**.

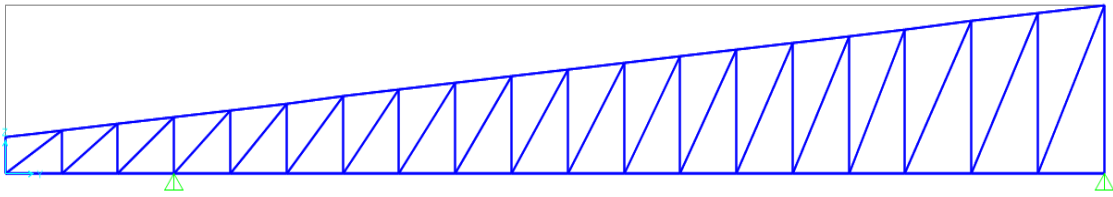


Figura 1 – Treliça principal da estrutura 01

A análise de estabilidade da estrutura foi realizada no Sap2000, utilizando os perfis nela existente, ou seja, para os banzos o perfil 100x40#3,35 mm, montantes e diagonais o perfil 92x30#2,28 mm em aço A36 dobrado. Os parâmetros atuantes na estrutura foi considerando juntamente com o acréscimo de carga proveniente do peso próprio dos painéis solares, conforme a **Tabela 01**.

Tabela 1 – Cargas atuantes nos nós da estrutura 01

Tipo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
P.P: Estrutura	-	-	-	PP
P.P: Telha	81	Kgf	Nós das terças	TL
P.P: Paine Solar	216	kgf	Nós das terças	PS
P.P: Forro	243	Kgf	Nós das terças	FR
Sobrecarga	202,5	Kgf	Nós das terças	SC
Homem	100	Kgf	Nós das terças	H
Vento 0	-648	Kgf	Nós das terças	V0
Vento 90	-580,5	Kgf	Nós das terças	V90
Buckling 01	1287,67	Kgf	Nós das terças	BK01
Buckling 02	1133,9	Kgf	Nós das terças	BK02
Buckling 03	-120,08	kgf	Nós das terças	BK03

As cargas Buckling (Flambagem) são obtidas através das combinações consideradas no dimensionamento da estrutura e lançadas no ponto de apoio das terças na treliça. As combinações e cargas Buckling são calculadas conforme o descrito a seguir.

$$BK01 = 1,25 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,5 \cdot SC$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,5 \cdot H$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,4 \cdot V0$$

$$BK01 = 1,25 \cdot (47,12 + 81 + 216 + 243) + 1,5 \cdot 202,5 = 1287,67kgf$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (47,12 + 81 + 216 + 243) + 1,5 \cdot 100 = 1133,9kgf$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (47,12 + 81 + 216 + 243) + 1,4 \cdot (-648) = -120,08kgf$$

Para a verificação da estabilidade de treliça, foi considerado caso com o menor α crítico, ou seja, a carga com a maior modulo de intensidade. Portanto para a verificação da estabilidade da estrutura foi considerado a carga Bk01.

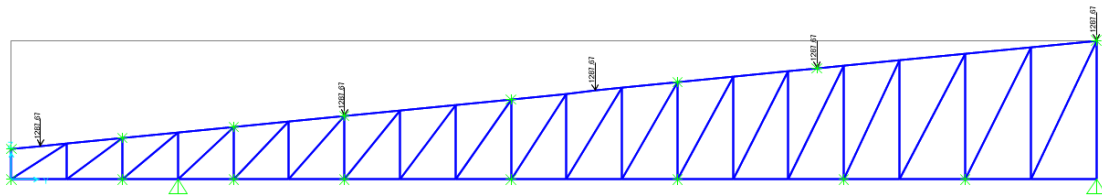


Figura 2 – Treliça contraventada

Na análise constatou-se que a treliça é totalmente instável, obtendo um α crítico igual a $-7,74 \times 10^{-13}$. Segundo o Eurocode-8, a estrutura é classificada de nós moveis, sendo assim, devemos simular a estrutura com os reforços propostos no Parecer Técnico para que ela atinja a estabilidade. Desta forma utilizamos o software Cype 3D para dimensionar a estrutura de modo que ela obedeça ao estado limite último. Constatamos que é necessário aumentar a área de aço dos banzos e contraventar os nós dos banzos inferior e superior, como mostra a figura a seguir.

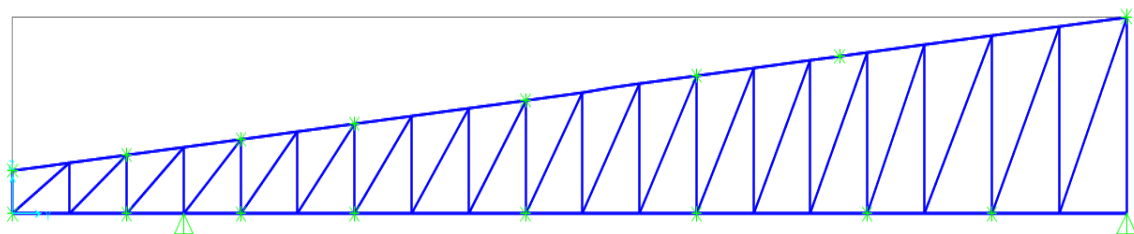


Figura 3 – Treliça com reforço estrutural

Com a inserção destes reforços a estrutura atinge a estabilidade, obtendo um α crítico igual a 10,16 e atende os estados limites último e de serviço solicitado na estrutura.

Estrutura 02

A estrutura analisada é referente a uma das três coberturas do Posto de combustível estudado no Parecer Técnico N° 02/2020. A treliça principal possui vão livre de 6,6 m, espaçadas a cada 4,65 m e as terças estão apoiadas sobre o banzo superior a cada 1,65 m, conforme a **Figura 4**.

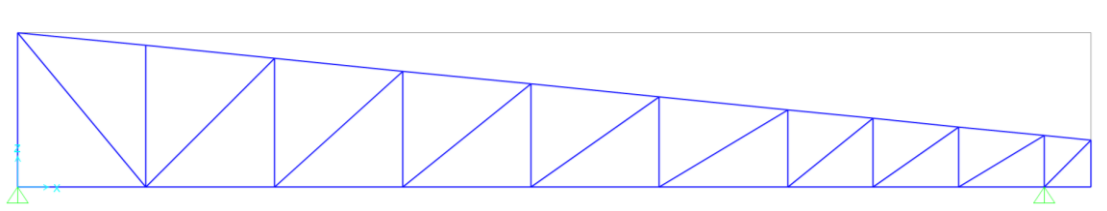


Figura 4 – Treliça principal da estrutura 02

Os banzos são formados pelo perfil 100x40#2,0 mm, montantes e diagonais pelo perfil 95x40#2,0mm em aço dobrado A36. Para o dimensionamento foram consideradas as cargas expressas na **Tabela 02**.

Tabela 2 – Cargas atuantes nos nós da estrutura 02

Tipo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
P.P: Estrutura	-	-	-	PP
P.P: Telha	46,04	Kgf	Nós das terças	TL
P.P: Pannel Solar	115,05	kgf	Nós das terças	PS
P.P: Forro	76,7	Kgf	Nós das terças	FR
Sobrecarga	115,05	Kgf	Nós das terças	SC
Homem	100	Kgf	Nós das terças	H
Vento 0	-484,74	Kgf	Nós das terças	V0
Vento 90	-475,70	Kgf	Nós das terças	V90
Buckling 01	526,18	Kgf	Nós das terças	BK01

Buckling 02	503,61	Kgf	Nós das terças	BK02
Buckling 03	-395,75	kgf	Nós das terças	BK03

As cargas Buckling são calculadas utilizando as combinações de dimensionamento da estrutura, são elas:

$$BK01 = 1,25 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,5 \cdot SC$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,5 \cdot H$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,4 \cdot V0$$

$$BK01 = 1,25 \cdot (45,09 + 46,04 + 115,05 + 76,7) + 1,5 \cdot 115,05 = 526,18kgf$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (45,09 + 46,04 + 115,05 + 76,7) + 1,5 \cdot 100 = 503,61kgf$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (45,09 + 46,04 + 115,05 + 76,7) + 1,4 \cdot (-484,74) = -395,75kgf$$

Na análise foi verificado que a estrutura se encontra com instabilidade no banzo quando é aplicado a força BK01, como mostra a **Figura 5**. Admitindo um alpha crítico de 9,59, ou seja, segundo o Eurocode-8 a estrutura é considerada de nós moveis, porém é permitido fazer uma análise simplificada da estrutura.

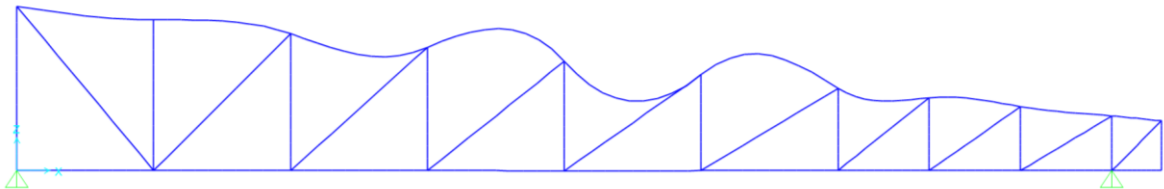


Figura 5 – Treliça com flambagem no banzo superior

Para torná-la estável, adotaremos a proposta de reforço contida no parecer. Criamos um apoio intermediário no vão central da treliça sobre a laje para travar os elementos com flambagem lateral. Ao final, de fato a estrutura se encontra estável com alpha crítico igual a 88,48.

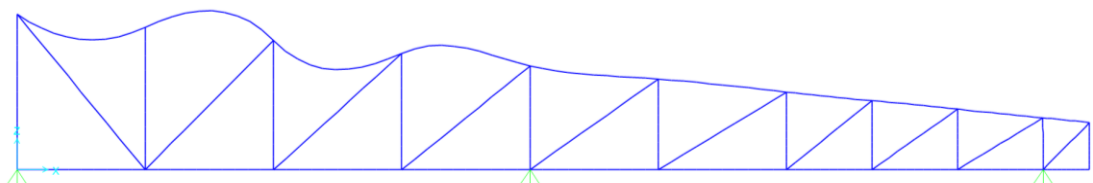


Figura 6 – Treliça com apoio intermediário

Estrutura 04

A análise foi realizada em uma das 04 coberturas de uma agência de publicidade em Palmas descrita no parecer técnico 04/2020. A cobertura é composta por vigas metálicas com vão central de 8,4 m apoiadas sobre pilares e estão espedaçadas a cada 4 metros, como mostra a **Figura 07**.

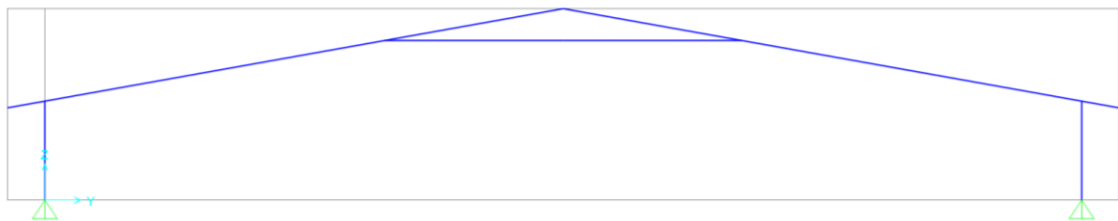


Figura 7 – Viga de cobertura

A viga principal e pilares são formados por perfil tubo 150x100#2,66mm, já a viga de travamento é composta pelo perfil 150x50x17#2,66 em aço A36. Para a verificação do dimensionamento e da estabilidade da estrutura, após o acréscimo de carga, foram consideradas as seguintes cargas.

Tabela 3 – Cargas atuantes nos nós da estrutura 03

Tipo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
P.P: Estrutura	-	-	-	PP
P.P: Telha	63,96	Kgf	Nós das terças	TL
P.P: Painel Solar	170,56	kgf	Nós das terças	PS
Sobrecarga	159,9	Kgf	Nós das terças	SC
Homem	100	Kgf	Nós das terças	H
Vento 0	-330,46	Kgf	Nós das terças	V0
Vento 90	-319,46	Kgf	Nós das terças	V90
Buckling 01	550,7	Kgf	Nós das terças	BK01

Buckling 02	460,85	Kgf	Nós das terças	BK02
Buckling 03	-213,96	kgf	Nós das terças	BK03

No entanto, verificou-se que a estrutura perde a estabilidade em torno do eixo y, obtendo um α crítico de $1,55 \times 10^{-13}$, quando submetida ao esforço buckling 01. A **Figura 8** mostra a instabilidade da estrutura na direção do eixo x.

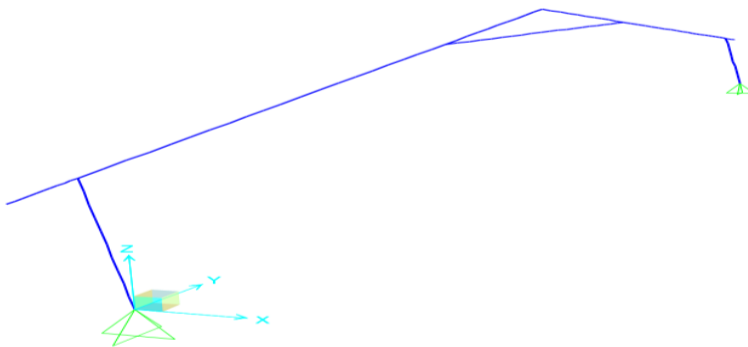


Figura 8 – Instabilidade da viga de cobertura

A carga buckling foi calculado através das combinações utilizadas no dimensionamento dos perfis da estrutura, são elas.

$$BK01 = 1,25 \cdot (PP + TL + FR) + 1,5 \cdot SC$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (PP + TL + FR) + 1,5 \cdot H$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (PP + TL + FR) + 1,4 \cdot V0$$

$$BK01 = 1,25 \cdot (14,16 + 63,96 + 170,56) + 1,5 \cdot 159,9 = 550,7kgf$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (14,16 + 63,96 + 170,56) + 1,5 \cdot 100 = 460,85kgf$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (14,16 + 63,96 + 170,56) + 1,4 \cdot (-330,46) = -213,96kgf$$

Para garantir a estabilidade estrutural da cobertura foi proposto o contraventamento da viga principal e da viga de travamento, conforme a **Figura 9**. A inserção deste elemento foi suficiente para que a estrutura atinja um α crítico de 14,15 no pior caso, no entanto, segundo o Eurocode 8 devemos considerar a estrutura de nós fixo, e assim a estrutura está apta para receber as cargas provenientes do peso próprio dos painéis solares.

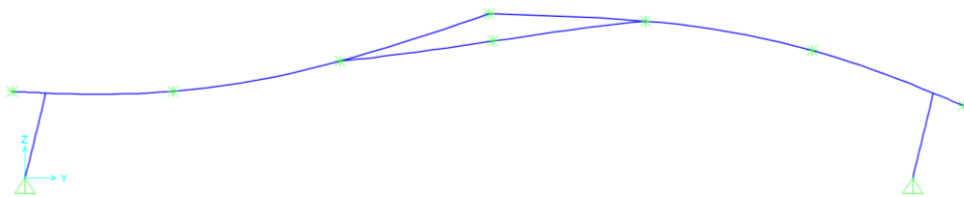


Figura 9 – Viga de cobertura contraventada

Estrutura 05

A estrutura trata-se de uma cobertura metálica presente em uma edificação de uso comercial/residencial presente no parecer N° 05/2020. A cobertura é formada por um pórtico de vigas inclinadas que se apoiam na laje através de pilaretes metálicos simplesmente apoiados, conforme a **Figura 10**.

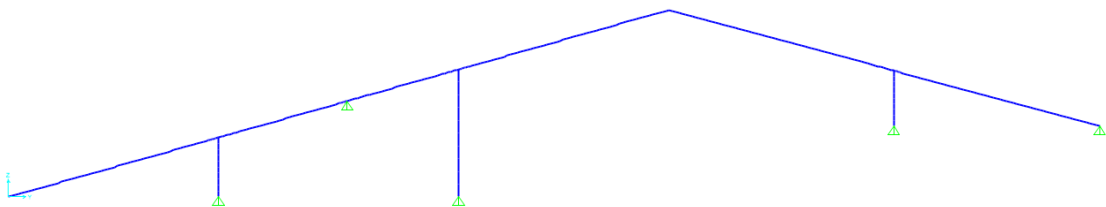


Figura 20 – Estrutura em viga de cobertura

A análise de estabilidade da estrutura foi realizada no Sap2000, utilizando os perfis nela existente, ou seja, para as vigas o perfil tubo composto por dois perfis C 100x40x17#2,00 mm e pilaretes o perfil 50x25#1,90 mm em aço A36 dobrado. Os parâmetros atuantes na estrutura

foram considerados juntamente com o acréscimo de carga proveniente do peso próprio dos painéis solares, conforme a **Tabela 04**.

Tabela 4 – Cargas atuantes nos nós da estrutura 04

Tipo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
P.P: Estrutura	-	-	-	PP
P.P: Telha	18	Kgf	Nós das terças	TL
P.P: Paine Solar	6	kgf	Nós das terças	PS
Sobrecarga	6	Kgf	Nós das terças	SC
Homem	100	Kgf	Nós das terças	H
Vento 0	-29	Kgf	Nós das terças	V0
Vento 90	-24	Kgf	Nós das terças	V90
Buckling 01	58,5	Kgf	Nós das terças	BK01
Buckling 02	199,5	Kgf	Nós das terças	BK02
Buckling 03	-1,00	kgf	Nós das terças	BK03

As cargas Buckling (Flambagem) são obtidas através das combinações consideradas no dimensionamento da estrutura e lançada no ponto de apoio das terças na treliça, que nesse caso é a cada 40 cm. As combinações e cargas Buckling são calculadas conforme o descrito a seguir.

$$BK01 = 1,25 \cdot (PP + TL + FR) + 1,5 \cdot SC$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (PP + TL + FR) + 1,5 \cdot H$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (PP + TL + FR) + 1,4 \cdot V0$$

$$BK01 = 1,25 \cdot (18 + 6 + 15,6) + 1,5 \cdot 6 = 58,5kgf$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (18 + 6 + 15,6) + 1,5 \cdot 100 = 199,5kgf$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (18 + 6 + 15,6) + 1,4 \cdot (-29) = -1,00kgf$$

Para a verificação da estabilidade de treliça, foi considerado o caso com o menor α crítico, ou seja, a carga com o maior modulo de intensidade. Portanto para a verificação da estabilidade da estrutura foi considerado a carga BK02.

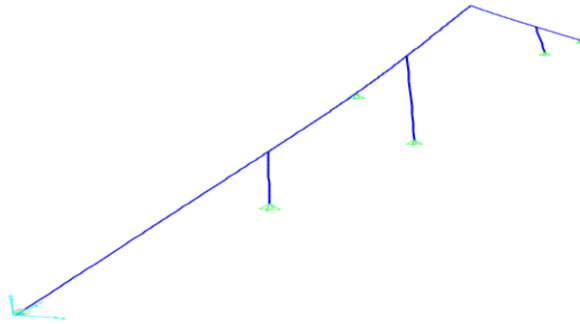


Figura 11 – Instabilidade da estrutura da viga de cobertura

Na análise constatou-se que a treliça é totalmente instável, obtendo um α crítico igual a 0,92. Assim, constatamos que a estrutura atinge a estabilidade com α crítico de 15,43 quando os nós apoiados são travados por contraventamento, como sugere o Parecer Técnico. Os nós contraventados podem ser vistos na **Figura 12**.

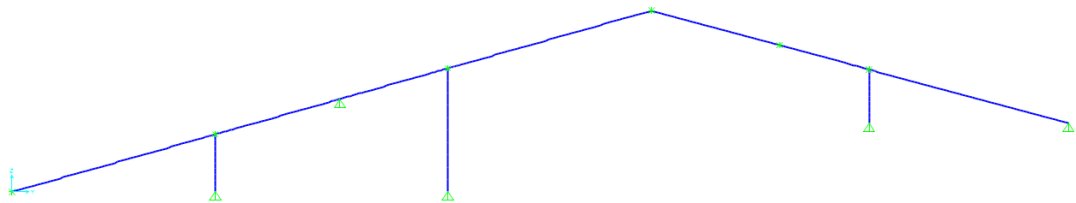


Figura 12 – Estrutura da viga de cobertura contraventada

Estrutura 06

A análise foi realizada em uma cobertura de uma distribuidora de bebidas presente no parecer N° 06/2020. As treliças possuem vão livre de 6,0 m, espaçada a cada 6 m e as terças são apoiadas sobre o banzo superior a cada 1,65 m, conforme a **Figura 13**.

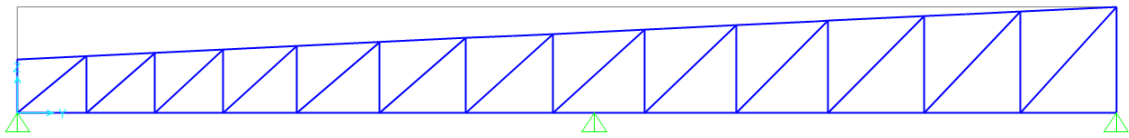


Figura 13 – Estrutura treliçada

Os banzos são formados por perfil C 127x50#2,33mm, montantes e diagonais são compostos pelos perfis 120x40#2,00 em aço A36. Para a verificação do dimensionamento e da estabilidade da estrutura, após o acréscimo de carga, foram consideradas as seguintes cargas.

Tabela 5 – Cargas atuantes nos nós da estrutura 06

Tipo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
P.P: Estrutura	-	-	-	PP
P.P: Telha	72	Kgf	Nós das terças	TL
P.P: Paine Solar	192	kgf	Nós das terças	PS
P.P: Forro	120	Kgf	Nós das terças	FR
Sobrecarga	180	Kgf	Nós das terças	SC
Homem	100	Kgf	Nós das terças	H
Vento 0	-678,0	Kgf	Nós das terças	V0
Vento 90	-654,0	Kgf	Nós das terças	V90
Buckling 01	807,5	Kgf	Nós das terças	BK01
Buckling 02	687,5	Kgf	Nós das terças	BK02
Buckling 03	-519,20	kgf	Nós das terças	BK03

As cargas Buckling (Flambagem) são obtidas através das combinações consideradas no dimensionamento da estrutura e lançadas no ponto de apoio das terças na treliça. As combinações e cargas Buckling são calculadas conforme o descrito a seguir.

$$BK01 = 1,25 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,5 \cdot SC$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,5 \cdot H$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (PP + TL + PS + FR) + 1,4 \cdot V0$$

$$BK01 = 1,25 \cdot (46,63 + 72 + 192 + 120) + 1,5 \cdot 180 = 807,5kgf$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (46,63 + 72 + 192 + 120) + 1,5 \cdot 100 = 687,5kgf$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (46,63 + 72 + 192 + 120) + 1,4 \cdot (-678) = -519,2kgf$$

Na análise utilizando a carga buckling 01, constatou-se que a treliça é totalmente instável, obtendo um alpha crítico igual a $-7,11 \times 10^{-14}$. Assim, constatamos que a estrutura atinge a estabilidade com alpha crítico de 10,37 quando os nós apoiados são travados por contraventamento, como sugere o Parecer Técnico. Os nós contraventados podem ser vistos na **Figura 14**.

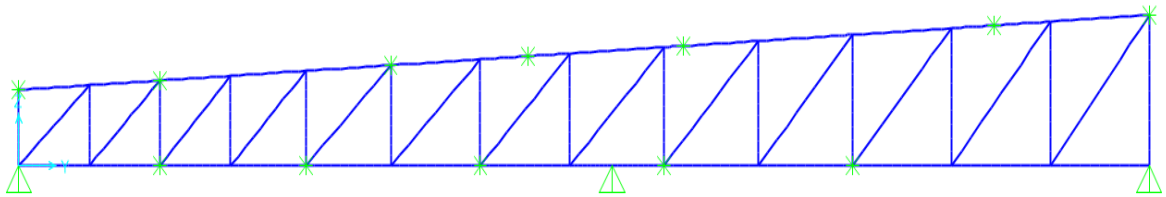


Figura 14 – Estrutura treliçada contraventada

Estrutura 07

A análise foi realizada em uma cobertura de uma concessionária de veículos em Palmas descrita no Parecer Técnico 07/2020. A cobertura é composta por treliças com vão 9,0 m apoiadas sobre pilares e possuem mãos francesas para travamento das terças, como mostra a **Figura 15**.

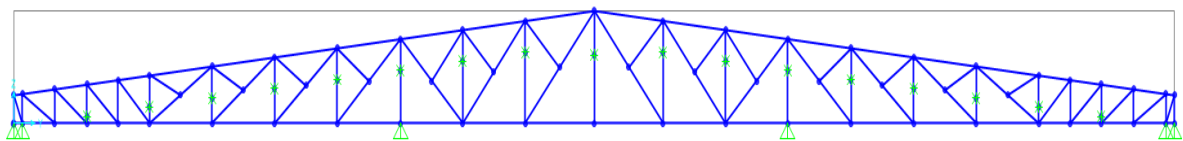


Figura 15 – Treliça principal da estrutura 07

Os banzos são formados por perfil C 100x40#2,25mm, montantes e diagonais são compostos pelos perfis 92x30#2,30 em aço A36. Para a verificação do dimensionamento e da estabilidade da estrutura, após o acréscimo de carga, foram consideradas as seguintes cargas.

Tabela 6 – Cargas atuantes nos nós da estrutura 06

Tipo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
P.P: Estrutura	-	-	-	PP
P.P: Telha	91,8	Kgf	Nós das terças	TL
P.P: Paine Solar	234,6	kgf	Nós das terças	PS
P.P: Forro	153	Kgf	Nós das terças	FR
Sobrecarga	377,4	Kgf	Nós das terças	SC
Homem	100	Kgf	Nós das terças	H
Vento 0	-816	Kgf	Nós das terças	V0
Vento 90	-816	Kgf	Nós das terças	V90
Buckling 01	1267,35	Kgf	Nós das terças	BK01
Buckling 02	851,25	Kgf	Nós das terças	BK02
Buckling 03	-581,4	kgf	Nós das terças	BK03

A carga buckling foi calculado através das combinações utilizadas no dimensionamento dos perfis da estrutura, são elas.

$$BK01 = 1,25 \cdot (PP + FR + TL + FR) + 1,5 \cdot SC$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (PP + FR + TL + FR) + 1,5 \cdot H$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (PP + FR + TL + FR) + 1,4 \cdot V0$$

$$BK01 = 1,25 \cdot (81,6 + 153 + 91,8 + 234,6) + 1,5 \cdot 377,4 = 1267,35kgf$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (81,6 + 153 + 91,8 + 234,6) + 1,5 \cdot 100 = 851,25kgf$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (81,6 + 153 + 91,8 + 234,6) + 1,4 \cdot (-816) = -581,4kgf$$

No entanto, verificou-se que os montantes perdem a estabilidade localmente em do eixo y, obtendo um alpha crítico de $4,41 \times 10^{-17}$, quando submetida ao esforço buckling 01. A **Figura 16** mostra a instabilidade da estrutura na direção do eixo x.

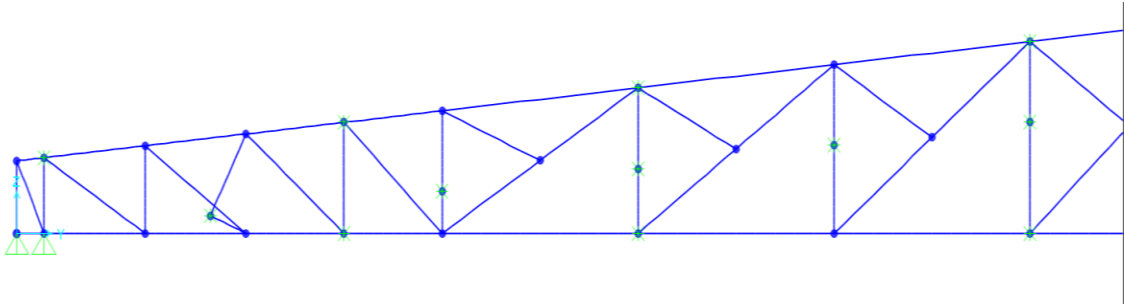


Figura 16 – Flambagem local do montante

Para resolver o problema de instabilidade local dos montantes, foram inseridos apoios intermediários para diminuir o comprimento livre destravado da peça, com isso há uma redistribuição dos esforços e o problema de instabilidade passa a ser global nos banzos superiores. A carga crítica da estrutura passa a ser $2,89 \times 10^4$, como mostra a **Figura 17**.

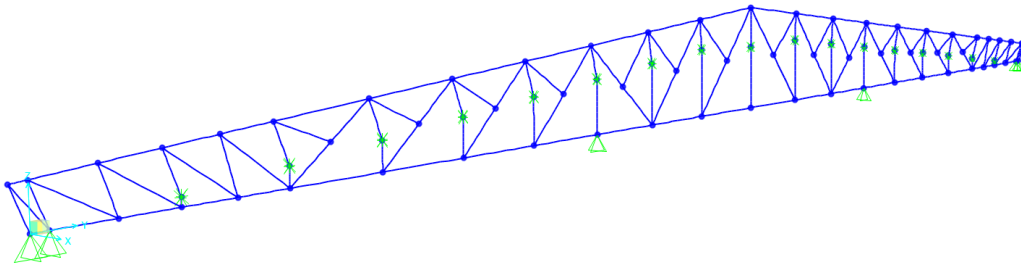


Figura 17 – Flambagem global da treliça

Para minimizar a instabilidade da estrutura da cobertura foi proposto o contraventamento dos banzos, a cada dois nós, conforme a **Figura 18**. A inserção desse elemento não foi suficiente para que a estrutura atinja a estabilidade, porém a carga crítica é elevada para 1,25. Então, recomenda-se que faça a substituição de alguns perfis ou aumente a área de aço dos mesmos.

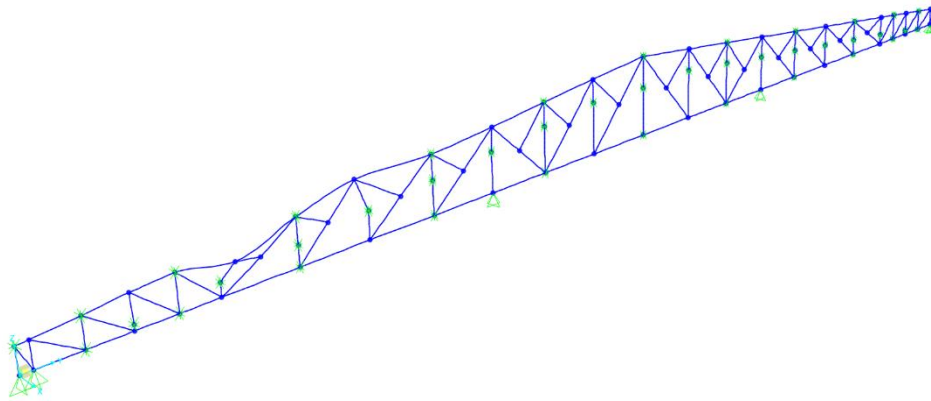


Figura 18 – Flambagem local do banzo

Estrutura 08

A estrutura analisada é referente a uma cobertura da concessionária de veículos em Palmas-TO e foi estudada no parecer técnico N° 09/2020. A treliça principal possui vão livre de 19,0 m, estão espaçadas a cada 6,0 m e as terças estão apoiadas sobre o banzo superior a cada 1,50 m, conforme a **Figura 19**.

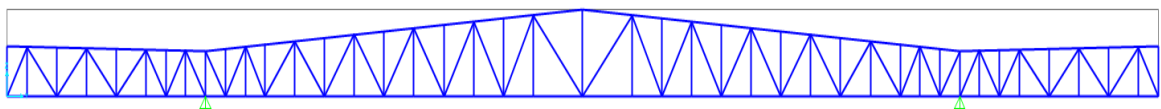


Figura 19 – Treliça de cobertura da estrutura 09

A análise de estabilidade da estrutura foi realizada no Sap2000, utilizando os perfis nela existente, ou seja, para os banzos o perfil C 127x50#3,20 mm, montantes e diagonais em perfis 120x40#2,30 mm em aço A36 dobrado. Os parâmetros atuantes na estrutura foi considerando juntamente com o acréscimo de carga proveniente do peso próprio dos painéis solares, conforme a **Tabela 07**.

Tabela 7 – Cargas atuantes nos nós da estrutura 09

Tipo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
P.P: Estrutura	-	-	-	PP
P.P: Telha	72	Kgf	Nós das terças	TL
P.P: Paine Solar	192	kgf	Nós das terças	PS
Sobrecarga	180	Kgf	Nós das terças	SC
Homem	100	Kgf	Nós das terças	H
Vento 0	-540	Kgf	Nós das terças	V0
Vento 90	-324	Kgf	Nós das terças	V90
Buckling 01	684,68	Kgf	Nós das terças	BK01
Buckling 02	564,68	Kgf	Nós das terças	BK02
Buckling 03	-424,26	kgf	Nós das terças	BK03

As cargas Buckling (Flambagem) são obtidas através das combinações consideradas no dimensionamento da estrutura e lançadas no ponto de apoio das terças na treliça. As combinações e cargas Buckling são calculadas conforme o descrito a seguir.

$$BK01 = 1,25 \cdot (PP + TL + FR) + 1,5 \cdot SC$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (PP + TL + FR) + 1,5 \cdot H$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (PP + TL + FR) + 1,4 \cdot V0$$

$$BK01 = 1,25 \cdot (67,74 + 72 + 192) + 1,5 \cdot 180 = 684,68kgf$$

$$BK02 = 1,25 \cdot (67,74 + 72 + 192) + 1,5 \cdot 100 = 564,68kgf$$

$$BK03 = 1,0 \cdot (67,74 + 72 + 192) + 1,4 \cdot (-540) = -424,26kgf$$

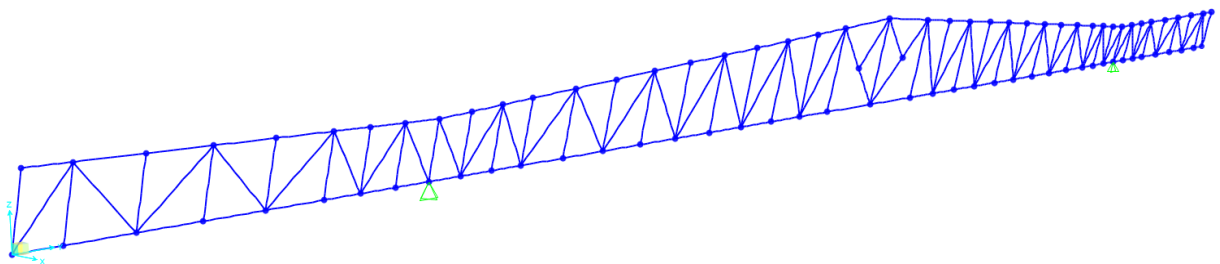


Figura 20 – Instabilidade da treliça de cobertura da estrutura 09

Na análise da estrutura constatamos que a treliça perde a estabilidade global na direção do eixo X, contudo é de suma importância verificar a contribuição do contraventamento para tornar a estrutura estática. A estrutura apresenta carga crítica de $1,11 \times 10^{-13}$, portanto é essencial travar os banzos para conter a translação dos elementos submetidos aos esforços geradores de instabilidade.

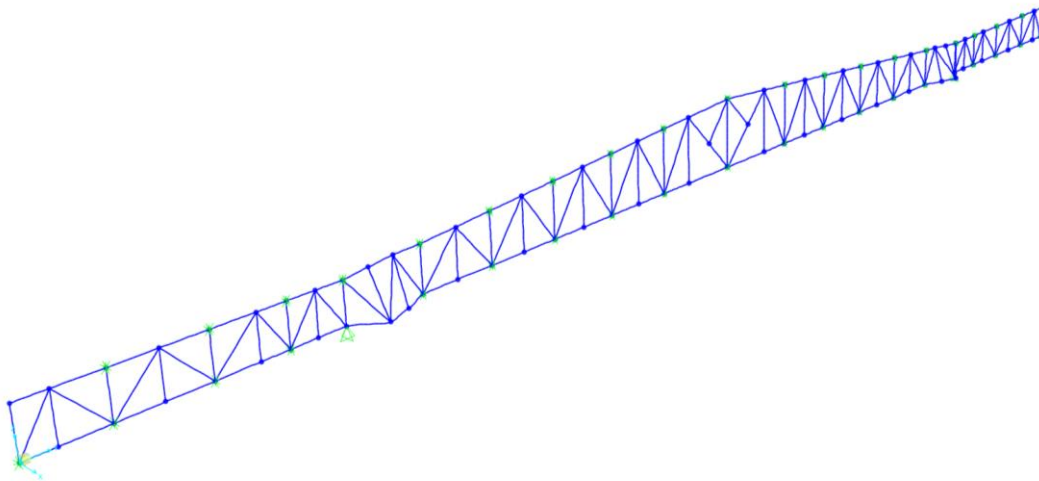


Figura 21 – Instabilidade local do banzo inferior

Contraventando a treliça a cada dois nós, verificamos que o problema de instabilidade global da estrutura é contido, no entanto, há uma redistribuição dos esforços e o banzo inferior da estrutura é submetido aos esforços de compressão e perde a estabilidade local e o α crítico passa a ser 1,65, como mostra a **Figura 21**.

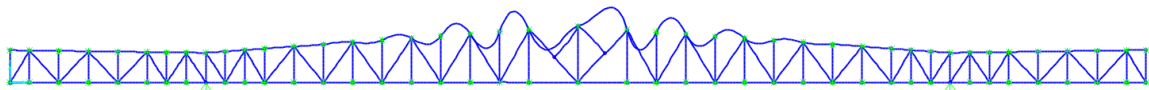


Figura 22 – Instabilidade local do banzo superior

Não resolvendo o problema de instabilidade e com α crítico de 1,65, onde deve ser realizado um estudo mais aprofundado da estrutura. Foi realizado o travamento de todos os nós da treliça, porém o banzo superior perde a estabilidade localmente na direção do eixo Z, atingindo o α crítico de 6,16, como mostra a **Figura 22**. A estrutura não pode ser

classificada como nós fixos apenas com a inserção do contraventamento, porém com a inserção do contraventamento a estrutura pode ser analisada de forma simplificada com o método de ampliação de esforços.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, objetivamos verificar a eficiência do contraventamento em casos de estruturas com problemas de instabilidades após o acréscimo de carga de painéis solares. Das estruturas estudadas, apenas uma não houve a necessidade de adicionar reforços em seus elementos estruturais, já as demais, foram necessários propostas para garantir que a estrutura não venha a colapso ou não perca a estabilidade.

O contraventamento tem como função principal diminuir o comprimento livre destravado das peças, reduz a esbeltez dos elementos e promover a estabilidade global da estrutura. Portanto é um elemento essencial na concepção estrutural de um edifício em estruturas metálicas, principalmente porque estruturas em aço permitem peças mais esbeltas.

Problemas de instabilidade faz com que os elementos venham a colapso com uma carga muito inferior do que ele suportaria na compressão, isso faz com que muitas vezes a inserção deste elemento resolva o problema e torne a estrutura segura e eficiente.

Foram analisados 8 laudos técnicos, dentre estes apenas a **Estrutura 03** não foi necessário reforço, pois a estrutura apresentava-se com todos os elementos necessários na concepção de um projeto de estrutura de aço, contraventamento, suporte de terça, linha de correntes e tirantes.

Neste trabalho verificou-se que a inserção do contraventamento nas estruturas de coberturas aumenta significativamente a estabilidade estrutural das mesmas, pois aumentando a rigidez global e possibilitando valores de α crítica maior do que 10 na maioria dos casos, classificando a grande parte das estruturas analisadas como de nós fixos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 247 p.

SILVA, Carlos A. F.; **Estudo de mercado para implementação e uso de sistemas Fotovoltaicos: uma alternativa mais barata de energia a longo Prazo em palmas – to**. 2019. 103 f. Trabalho de conclusão de curso – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Luterana do Brasil, Tocantins, 2019.

PEREIRA, Enio B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 1ª Edição, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 238. 2014.

NETO, José A. S.; NASCIMENTO, Irenildo F.; LIMA, Marcos S. **Principais ocorrências patológicas nas estruturas metálicas no município de campina grande-pb**. Conapesc. 2018, Campina Grande, PB, Brasil.

SILVA, Andréia R. D. **Sistemas Computacional para Análise Avançada Estática e Dinâmica de Estruturas Metálicas**. 341 f. Tese de programa de Pós-Graduação – Departamento de engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.