

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Análise e Dimensionamento
de Estruturas de Concreto Armado e Aço

Adriel Camilo Faria Costa

ENGENHARIA DE ESTRUTURAS VOLTADA PARA O
AGRONEGÓCIO: análise e dimensionamento da estrutura
de aço de um *compost barn*

Belo Horizonte

2021

Adriel Camilo Faria Costa

**ENGENHARIA DE ESTRUTURAS VOLTADA PARA O
AGRONEGÓCIO: análise e dimensionamento da estrutura
de aço de um *compost barn***

Versão final

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Orientador: Prof. Hermes Carvalho, D.Sc.
DEES – UFMG

Belo Horizonte

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DA DEFESA DE ADRIEL CAMILO FARIA COSTA

ENGENHARIA DE ESTRUTURAS VOLTADA PARA O AGRONEGÓCIO: ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE AÇO DE UM COMPOST BARN

Trabalho Final submetido à Banca Examinadora, como parte dos requisitos necessários para obtenção do certificado de Especialista em ESTRUTURAS.

Prof. Hermes Carvalho - Universidade Federal de Minas Gerais

Avaliador 1 - Orientador Nota: 90 (noventa pontos)

Prof. Rodrigo Barreto Caldas - Universidade Federal de Minas Gerais

Avaliador 2 Nota: 90 (noventa pontos)

Aprovada em 01 de março de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Hermes Carvalho, Professor do Magistério Superior**, em 22/04/2021, às 22:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 23/04/2021, às 08:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Marcio da Silva, Membro**, em 28/07/2021, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0688566** e o código CRC **5BCA1C3F**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus pela oportunidade de realizar o sonho de cursar a especialização em estruturas em uma grande universidade como a UFMG. Além disso, agradeço aos meus pais, minha irmã, minha avó materna pelo apoio nas incontáveis idas e vindas de Belo Horizonte a Piumhi. Aos meus tios, tias e amigos pela ajuda e pelas estadias na capital mineira para que fosse possível a conclusão de mais essa etapa na minha vida acadêmica. À empresa Camilo Estruturas Metálicas e Engenharia pelo apoio e contribuição com este estudo.

Por fim, agradeço ao Prof. Hermes pela atenção que me foi dada durante o curso e sua pronta disposição a me orientar neste trabalho.

Resumo

Muito comum em regiões que possuem a economia voltada para a pecuária leiteira como é o caso da microrregião de Piumhi-MG / Serra da Canastra, o *Compost Barn* (do inglês “Celeiro de Compostagem”) é um galpão com estrutura de aço voltado para o bem estar animal visando praticidade e aumento de produtividade do gado de leite. Este trabalho foi realizado devido à pouca abordagem e a necessidade de aprofundar no tema que é tão importante para o agronegócio brasileiro que abastece o mercado nacional com o leite e seus derivados (queijo, manteiga, iogurte, etc.) além de exportar esses produtos para outros países. Este trabalho tem como objetivo o dimensionamento da estrutura de aço de um *Compost Barn* com perfis do tipo “I” laminados conforme a NBR 8800:2008, bem como a abordagem de aspectos construtivos e informações peculiares a esse tipo de estrutura.

Palavras chave: *Compost Barn*. Estruturas de Aço. Agronegócio. Galpões Rurais. Dimensionamento Estrutural.

Abstract

Very common in regions that have an economy focused on milk farming production, as is the case of the micro-region of Piumhi-MG/ Serra da Canastra, the compost barn is a shed with a steel structure focused in the animal welfare aiming at practicality and increased productivity of dairy cattle. This work is a result of our due to the lack of approach and the need to delve deeper into the subject that is so important for Brazilian agribusiness that supplies the national market with milk and its derivatives (cheese, butter, yogurt, etc.) and export to other countries. This work aims to design the steel structure of a compost barn with “I” laminated beams according to NBR 8800:2008, as well as to approach constructive aspects and specific information to this kind of structure.

Keywords: Compost Barn. Steel Structures. Agribusiness. Rural Sheds. Structural Calculation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

NBR – Norma Brasileira

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Justificativa.....	10
1.2 Metodologia.....	11
2 OBJETIVO	11
2.1 Objetivo Geral	11
3 EXEMPLOS DE COMPOST BARN E DETALHES CONSTRUTIVOS	11
3.1.1 <i>Compost barn</i> na Fazenda do Sino, Bambuí-MG.....	11
3.1.2 <i>Compost barn</i> na Fazenda Santa Luzia, Passos-MG	16
3.1.3 <i>Compost barn</i> da Fazenda Lagoa Grande, Piumhi-MG	19
4 ASPECTOS NORMATIVOS APLICÁVEIS AO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE AÇO	22
4.1 Considerações Iniciais	22
4.2 Definição de Aço.....	22
4.3 Aços Estruturais.....	23
4.4 Processo de Laminação a Quente e Perfis I ou H Laminados	25
4.5 Ações nas estruturas	26
4.6 Método dos Estados Limites.....	27
4.6.1 Estados limites últimos	27
4.6.2 Estados limites de serviço.....	28
4.7 Análise estrutural e classificação da estrutura quanto à deslocabilidade	29
5 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E AÇÕES	31
5.1 Descrição e Geometria.....	31

5.2	Ações	34
5.2.1	Peso próprio	34
5.2.2	Telhas.....	34
5.2.3	Placas fotovoltaicas	34
5.2.4	Sobrecarga de cobertura conforme NBR 8800:2008.....	35
5.2.5	Vento.....	35
5.2.6	Carga Nocional	45
5.3	Combinações de Ações adotadas.....	45
6	RESULTADOS	65
6.1	Classificação da Estrutura quanto à deslocabilidade	65
6.2	Diagrama de Momento Fletor do Pórtico Típico.....	68
6.3	Diagrama de Força Cortante do Pórtico Típico	68
6.4	Forças Axiais Solicitantes do Pórtico Típico.....	69
6.5	Verificação Quanto aos Estados Limites Últimos – ELU	69
6.5.1	Verificação E.L.U pilar central.....	70
6.5.2	Verificação E.L.U. pilar externos	82
6.5.3	Verificação E.L.U. viga principal.....	94
6.6	Verificação dos Estados Limites de Serviço - ELS	113
7	CONCLUSÃO	115
8	REFERÊNCIAS	116

INTRODUÇÃO

O *Compost Barn* (do inglês “Celeiro de Compostagem”) é um galpão voltado para a pecuária leiteira, totalmente pensado para obter eficiência no manejo, bem estar e na produtividade do gado de leite. O galpão é composto por subespaços, a saber: (i) uma pista central onde são abastecidas as cocheiras dos animais de ambos os lados; (ii) uma pista de trato que é a pista para o acesso dos animais à cocheira para alimentação; (iii) uma “cama” que é a região de convivência do gado e, por último vem a pista de manejo que é o local por onde os animais transitam quando vão entrar ou sair do *Compost Barn*.

A estrutura (pilares e vigas) pode ser treliçada composta por perfis formados a frio ou de “alma cheia” com perfis I laminados. Neste trabalho, será realizado o dimensionamento da estrutura composta por perfis I laminados. Ventiladores são fixados nas tesouras principais através de cabos de aço ou correntes o que garantem um ambiente agradável para os animais, além de proporcionar a secagem da cama. A cama necessita de secagem pois é uma camada sobre o piso de concreto composta por casca de café, serragem, casca de arroz ou casca de amendoim, ou ainda uma mistura desses produtos. Essa composição tem por objetivo proporcionar conforto quando do pisoteio do animal e pode ser posteriormente utilizado como adubo nas lavouras após ser misturado às fezes e urina do próprio gado.

Este de tipo de galpão é muito comum em regiões onde a economia gira em torno da pecuária leiteira e seus derivados (queijo, manteiga, iogurte, etc), como é o caso da microrregião de Piumhi-MG / Serra da Canastra.

1.1 Justificativa

Poucas são as abordagens sobre galpões de uso rural e suas particularidades. Um dentre os vários tipos de galpões necessários a infraestrutura do agronegócio é o *Compost Barn*. Neste trabalho optou-se por esse tema devido a importância desse tipo de estrutura para os produtores rurais e conseqüentemente toda a sociedade que consome os produtos derivados do leite. Segundo o CONAB (2018 *apud* COLDATO, 2019, p.10), o Brasil está em 5º lugar entre os

maiores países produtores de leite. Entre os estados brasileiros o maior produtor é Minas Gerais responsável por 7% da produção nacional. A par da parcela que a produção de leite em Minas Gerais representa para o Brasil, fica clara a necessidade de utilização destas estruturas e, afim de assegurar os estados limites últimos e de serviço, um estudo mais aprofundado sobre o dimensionamento da estrutura do *Compost Barn*.

1.2 Metodologia

Inicialmente será realizada uma revisão da literatura onde será analisado o estado atual da arte, para isso, através de artigos técnicos, livros, dissertações de mestrado e teses de doutorado. Em seguida, será realizado o dimensionamento de uma estrutura tipo de um “*Compost Barn*” com o auxílio do software Cype 3D, com base nas prescrições da ABNT NBR 8800:2008.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Dimensionar a estrutura de galpão em aço do tipo *Compost Barn* e apresentar suas particularidades construtivas.

3 Exemplos de *Compost Barn* e detalhes construtivos

3.1.1 *Compost barn* na Fazenda do Sino, Bambuí-MG

O *Compost Barn* da Fazenda do Sino (Figura 1 a 4) possui dimensões de 53x150 metros e tem capacidade para 480 animais. A estrutura de aço foi calculada e projetada pela empresa Camilo Estruturas Metálicas e Engenharia da cidade de Piumhi-MG.



Figura 1 – Pista central do *Compost Barn* (Acervo pessoal)

Neste caso, a solução consistiu de um pilarete de concreto com 1,5 metros de comprimento, ligado diretamente aos blocos de fundação e com a continuação composta por um pilar de aço. Pode-se optar iniciar diretamente com o pilar de aço a partir do bloco de fundação, realizando a devida proteção quanto aos agentes degradantes do ambiente (urina e fezes dos animais) através do “envelopamento” de 1,5 metros do pilar de aço com concreto. A especificação da pintura adequada também garante a proteção do elemento de aço, garantindo a durabilidade da estrutura.



Figura 2 – Perspectiva do *Compost Barn* (Acervo pessoal)

Sob a parte da estrutura em balanço, existe a pista de manejo dos animais que os permite ter acesso ao *Compost Barn*. E, entre as linhas de pilares da lateral e de centro temos a chamada “cama”, local onde os animais ficam durante a maior parte do tempo descansando e também é onde acontece a compostagem. Entre os pilares de centro e as cocheiras fica a chamada pista de trato que é onde os animais ficam para se alimentar e beber água. A pista central é onde o trator passa para abastecer os cochos.



Figura 3 – Lateral esquerda do *Compost Barn* (Acervo pessoal)



Figura 4 – Lateral direita do *Compost Barn* (Acervo pessoal)

Neste caso, o produtor optou por construir a estrutura por partes (Figura 5), e posteriormente terminar a obra de forma completa. Indica-se por veterinários, revistas e estudos agropecuários que esse sistema aumenta a produtividade de leite do gado em torno de 30%. Dessa forma, o produtor consegue fazer um abatimento dos custos da obra com o aumento da produtividade até chegar ao retorno do investimento total.



Figura 5 – Visão geral da obra (Acervo pessoal)

3.1.2 *Compost barn* na Fazenda Santa Luzia, Passos-MG

Na fazenda Santa Luzia também foi construído um *Compost Barn* com pista central e perfis laminados, como pode ser visto nas Figuras 6 a 8.

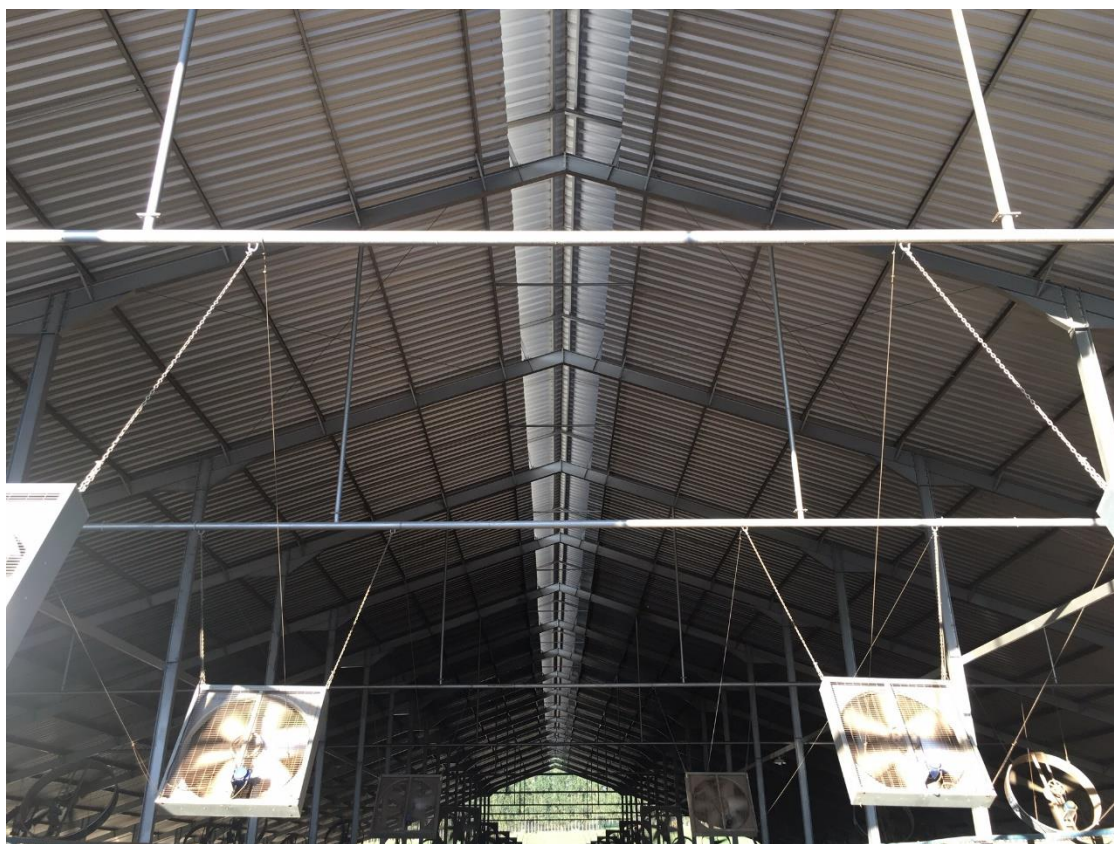


Figura 6 - Visão geral do *Compost Barn* (Acervo pessoal)



Figura 7 – Detalhe da cama dos animais (Acervo pessoal)



Figura 8 – Detalhe da pista de trato (Acervo pessoal)

3.1.3 *Compost barn* da Fazenda Lagoa Grande, Piumhi-MG

Compost Barn da Fazenda Lagoa Grande (Figuras 9 a 11) tem estrutura do tipo geminada, pista central e capacidade para 198 animais. A estrutura de aço foi calculada e projetada pela empresa Camilo Estruturas Metálicas e Engenharia da cidade de Piumhi-MG.



Figura 9 – Visão geral do *Compost Barn* (Acervo pessoal)

Neste *Compost Barn* os pilares de aço saem direto do bloco de fundação.



Figura 10 – Pista central do *Compost Barn* (Acervo pessoal)

Na Figura 11 é possível observar o trator revirando a cama dos animais, com o objetivo de promover aeração e facilitar a compostagem posteriormente utilizada na lavoura. A cama pode ser feita de cerragem, cascas de amendoim, café ou arroz.



Figura 11 – Cama do *Compost Barn* (Acervo pessoal)

4 ASPECTOS NORMATIVOS APLICÁVEIS AO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE AÇO

4.1 Considerações Iniciais

Na concepção de um projeto estrutural é de fundamental importância por parte do engenheiro o conhecimento sobre o comportamento do material utilizado, bem como as normas vigentes. Dessa forma, será possível um dimensionamento estrutural que alie economia, segurança e desempenho estrutural.

4.2 Definição de Aço

De acordo com Chiaverini (1996 *apud* PFEIL; PFEIL, 2008, p.1) o aço é uma liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11%. “O carbono aumenta a resistência do

aço, porém o torna mais frágil. Os aços com baixo teor de carbono têm menor resistência à tração, porém são mais dúcteis.”. (PFEIL; PFEIL, 2008, p.1)

“Aço é uma liga metálica constituída basicamente de ferro e carbono, obtida pelo refino de ferro-gusa em equipamentos apropriados. Como refino do ferro-gusa entende-se a diminuição dos teores de carbono e de silício e enxofre (que são prejudiciais ao aço, em princípio)”. (DIAS, 2015, p.59). “Ferro-gusa (ou simplesmente gusa) é o produto da primeira fusão do minério de ferro e contém cerca de 3,5 a 4,0% de carbono.”. (DIAS, 2015, p.59)

4.3 Aços Estruturais

Considerando perfis de seção aberta e chapas grossas, a ABNT normatiza os seguintes aços estruturais (Tabela 1):

NBR 7007:2002			NBR 6648:1984		
Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral			Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural		
Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)
MR 250	250	400-560	CG-26	255	410
AR 350	350	450	CG-28	275	440
AR 350 COR	350	485			
AR 415	415	520			

NBR 5000:1981			NBR 5008:1997		
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas grossas e bobinas grossas, de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural		
Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)
G-30	300	415	CGR 400	250	380
G-35	345	450	CGR 500 e CGR 500A	370	490
G-42	415	520			
G-45	450	550			

Tabela 1 – Aços estruturais padronizados pela ABNT (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016, p.17)

“Os aços aprovados para uso nesta Norma para perfis, barras e chapas são aqueles [...] que possuam resistência de escoamento máxima de 450MPa e relação entre as resistências à ruptura

(f_u) e ao escoamento (f_y) não inferior a 1,18.”. (ABNT NBR 8800, 2008, p.11). Conforme Fakury, Silva e Caldas (2016) aços com resistência ao escoamento inferior a 250 MPa não são abordados por não de comum utilização em estruturas. ”[...] a sigla MR significa média resistência mecânica, a sigla AR, alta resistência e a sigla COR, resistência à corrosão atmosférica”. (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016, p.17).

No mercado é muito comum também nos depararmos com os aços estruturais que atendam as especificações norte-americanas da linha ASTM (*American Society for Testing and Materials*), ver Tabela 2.

Classificação	Denominação	Produto	Grupo ¹⁾	Grau	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Aços-carbono	A36	Perfis laminados	–	–	250	400 a 550
		Chapas e barras redondas lisas	$t \leq 200$ mm			
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	Perfis laminados	–	42	290	415
				50	345	450
				55	380	485
				60	415	520
				65	450	550
	Chapas e barras redondas lisas	$t \leq 150$ mm	42	290	415	
		$t \leq 100$ mm	50	345	450	
		$t \leq 50$ mm	55	380	485	
		$t \leq 31,5$ mm	60	415	520	
			65	450	550	
A992 ²⁾	Perfis laminados	–	–	345 a 450	450	
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica	A242	Perfis laminados	$t_f \leq 37,5$ mm	–	345	485
			$37,5$ mm < $t_f \leq 50$ mm	–	315	460
			$t_f > 50$ mm	–	290	435
	Chapas e barras redondas lisas	$t \leq 19$ mm	–	345	480	
		19 mm < $t \leq 37,5$ mm	–	315	460	
		$37,5$ mm < $t \leq 100$ mm	–	290	435	
	A588	Perfis laminados	–	–	345	485
			$t \leq 100$ mm	–	345	485
			100 mm < $t \leq 125$ mm	–	315	460
	Chapas e barras redondas lisas	125 mm < $t \leq 200$ mm	–	290	435	

**Tabela 2 – Aços estruturais de especificação ASTM comumente usados no Brasil
(FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016, p.18)**

4.4 Processo de Laminação a Quente e Perfis I ou H Laminados

Conforme Dias (2015, p.69),

A laminação a quente do aço compreende seu aquecimento a uma temperatura na faixa de 1.000 a 1.200°C [...] Ao passar sob pressão entre os laminadores (cilindros de aço ou ferro fundido), o material é comprimido e em consequência a sua seção transversal se deforma, reduzindo assim a espessura da peça até a medida final desejada.

Ainda de acordo com Dias (2015, p.84),

O sistema universal de laminação consiste em um conjunto principal de três cadeiras em sequência conhecido como processo X-H. Esse processo possibilita menor ciclo de laminação, maior produtividade, bem como a obtenção de produtos homogêneos e de laminados de maior comprimento, alta eficiência e rendimento. Mediante passadas sucessivas, indo e voltando, os perfis são produzidos em ciclo não superior a três horas, desde a saída dos blocos do forno de reaquecimento até sua chegada ao setor de acabamento.

Em relação à produção dos perfis I ou H laminados, Fakury, Silva e Caldas (2016) afirmam que estes são produzidos por processos de laminação a quente com temperaturas superiores a 1.000°C, onde os blocos vão passando pelos cilindros e estes vão dando forma aos perfis que conhecemos no mercado.

4.5 Ações nas estruturas

Fakury, Silva e Caldas (2016, p.33) definem as ações nas estruturas como “[...] qualquer influência ou conjunto de influências capaz de produzir estados de tensão, deformação ou movimento de corpo rígido em uma estrutura”.

Quanto à classificação das ações, as mesmas são divididas em ações permanentes, variáveis ou excepcionais. As ações permanentes são subdivididas em diretas e indiretas. As ações permanentes diretas dizem respeito ao peso próprio da estrutura, demais componentes da construção e eventuais empuxos de terra. Nas ações permanentes indiretas se incluem protensão, recalques de apoio e retração de materiais. Já as ações variáveis são aquelas ações que variam durante a vida útil da estrutura. Essas são subdivididas em ações variáveis de natureza e intensidade normais e ações variáveis de natureza ou intensidade especial. A ação variável de natureza e intensidade normal atua com valor da ordem de grandeza do valor característico considerado em cálculo durante uma boa parte da vida útil da estrutura, porém também pode ser

nulo, como exemplo pode-se citar as sobrecargas de piso e cobertura. A ação variável de natureza ou intensidade especial ocorre durante um período muito curto da vida útil da estrutura e superam os valores das ações variáveis de natureza e intensidade normais, pode-se citar como exemplo os sismos. Por último temos as ações excepcionais que variam durante toda a vida útil da estrutura também, porém ocorrem durante um espaço de tempo muito curto e possuem baixa probabilidade de acontecer (explosões, ventos extraordinários, etc) como afirmam Fakury, Silva e Caldas (2016).

4.6 Método dos Estados Limites

4.6.1 Estados limites últimos

Fakury, Silva e Caldas (2016, p.40) definem os estados limites últimos como:

Os estados limites últimos são aqueles relacionados com a segurança estrutural. Sua ocorrência significa sempre colapso, total ou parcial, sendo associada à falha de material, instabilidade de um elemento ou de um conjunto estrutural, ou ainda, movimento de um corpo rígido.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2008) os estados limites últimos dizem respeito ao excesso de carregamentos na estrutura e por consequência o colapso. Como exemplo, é citado a perda de equilíbrio como corpo rígido, plastificação total de um elemento estrutural ou de uma seção, ruptura de uma ligação, flambagem de algum elemento e, por fim, ruptura por fadiga.

Conforme Fakury, Silva e Caldas (2016) temos que:

$$\frac{S_d}{R_d} \leq 1,0 \text{ ou ainda, } S_d \leq R_d$$

Sendo:

S_d : esforço solicitante de cálculo que causa o estado limite;

R_d : esforço resistente de cálculo correspondente a esse mesmo estado limite;

Os estados limites últimos são caracterizados pela seguinte combinação de ações:

$$C_{ult} = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} A_{Gi,k}) + \gamma_{q1} A_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} A_{Qj,k})$$

Sendo:

$A_{Gi,k}$: valores característicos das ações permanentes;

$A_{Q1,k}$: valor característico da ação variável principal;

$A_{Qj,k}$: valor característico da ação variável secundária;

γ_{gi} : coeficiente de ponderação das ações permanentes;

γ_{q1} : coeficiente de ponderação da ação variável principal;

γ_{qj} : coeficiente de ponderação das demais ações variáveis;

ψ_0 : fator de combinação para obtenção do valor reduzido das ações variáveis;

4.6.2 Estados limites de serviço

Fakury, Silva e Caldas (2016, p.44) definem os estados limites de serviço como:

Os estados limites de serviço relacionam-se à capacidade da estrutura de desempenhar satisfatoriamente as funções às quais se destina. A ocorrência desse tipo de estado limite pode prejudicar a aparência e a funcionalidade de uma edificação, o conforto dos seus ocupantes e o funcionamento de equipamentos, bem como causar rachaduras e trincas em alvenarias e danos diversos a portas, esquadrias, janelas, materiais de acabamento, etc.

Segundo Fakury, Silva e Caldas (2016), existem três tipos de combinações de ações de serviço: combinações quase permanentes, combinações frequentes e combinações raras. As combinações quase permanentes estão relacionadas à aparência da estrutura, para se evitar deslocamentos excessivos, além de atuarem por volta de metade da vida útil da estrutura, conforme combinação equação abaixo:

$$C_{qp,ser} = \sum_{i=1}^m A_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\psi_{2j} A_{Qj,k})$$

As combinações frequentes estão relacionadas ao conforto do usuário, quando o efeito da ação é reversível (vibrações excessivas, abertura de fissuras, movimentação lateral excessiva) conforme combinação abaixo:

$$C_{fr,ser} = \sum_{i=1}^m A_{Gi,k} + \psi_1 A_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} A_{Qj,k})$$

As combinações raras estão relacionadas a danos permanentes causados na estrutura, ou seja, danos não reversíveis (fissuras e danos aos fechamentos da estrutura) conforme combinação abaixo:

$$C_{ra,ser} = \sum_{i=1}^m A_{Gi,k} + A_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{1j} A_{Qj,k})$$

$A_{Gi,k}$: valores característicos das ações permanentes;

$A_{Q1,k}$: valor característico da ação variável principal;

$A_{Qj,k}$: valor característico da ação variável secundária;

ψ_1 e ψ_2 : fatores de redução;

4.7 Análise estrutural e classificação da estrutura quanto à deslocabilidade

“Denomina-se análise estrutural a obtenção das respostas da estrutura a um conjunto de ações por meio do estabelecimento de equações de equilíbrio.”. (FAKURY, SILVA, CALDAS, 2016, p.67). Segundo Fakury, Silva e Caldas (2016) as análises estruturais podem ser elásticas de primeira ordem e elásticas de segunda ordem. A análise elástica de primeira ordem é a mais simples pois considera a estrutura no seu estado indeformado e sempre em regime elástico linear. Já a análise elástica de segunda ordem, a estrutura é calculada com base na sua posição

deformada. Sendo assim, é possível captar os efeitos global e local de segunda ordem, mais pronunciados em estruturas muito deslocáveis.

Imperfeições geométricas da estrutura e imperfeições do material também estão previstas na análise estrutural. Fakury, Silva e Caldas (2016) relacionam as imperfeições geométricas ao desaprumo da estrutura. Para considerar esse fator no cálculo estrutural é introduzida no modelo uma força fictícia chamada de força nocional, equivalente a 0,3% da soma de todas as cargas gravitacionais do pavimento. Ela é aplicada em todas as direções e não é combinada com outras cargas horizontais. Para considerar as imperfeições do material, no caso o aço, é feita a redução da rigidez à flexão e axial. Isso é obtido através da redução do módulo de elasticidade em 80%, ou seja, $E_{a,red} = 160.000 \text{ MPa}$.

Em relação à deslocabilidade Fakury, Silva e Caldas (2016) classificam as estruturas como pequena, média e grande deslocabilidade. As estruturas classificadas como de pequena deslocabilidade são as que em nenhum andar a relação entre os deslocamentos de segunda ordem e os deslocamentos de primeira ordem não ultrapassem o valor de 1,10, se no cálculo as rigidezes não forem reduzidas como visto anteriormente. As estruturas classificadas como de média deslocabilidade são as que essa relação entre os deslocamentos de segunda ordem e os deslocamentos de primeira ordem permaneçam entre 1,10 e 1,4. Os autores ainda trazem que na prática não se trabalha com estruturas de grande deslocabilidade.

5 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E AÇÕES

5.1 Descrição e Geometria

Trata-se de uma estrutura de 53x60 metros com pilares e vigas em perfis de aço do tipo I laminados (aço ASTM A572 - Grau 50), espaçamento entre pórticos de 6 metros e quatro linhas de pilares conforme apresentado nas Figuras 12 a 17.

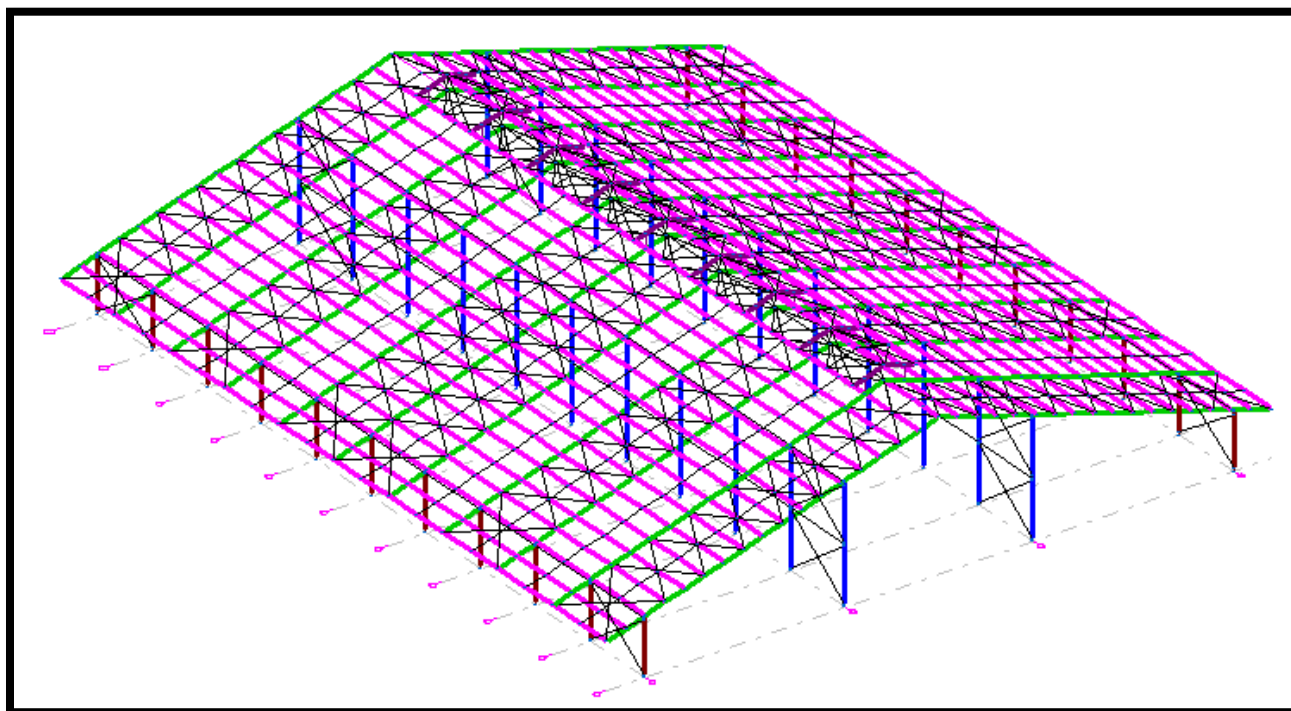


Figura 12 – 3D unifilar do modelo de cálculo da estrutura de aço do *Compost Barn*

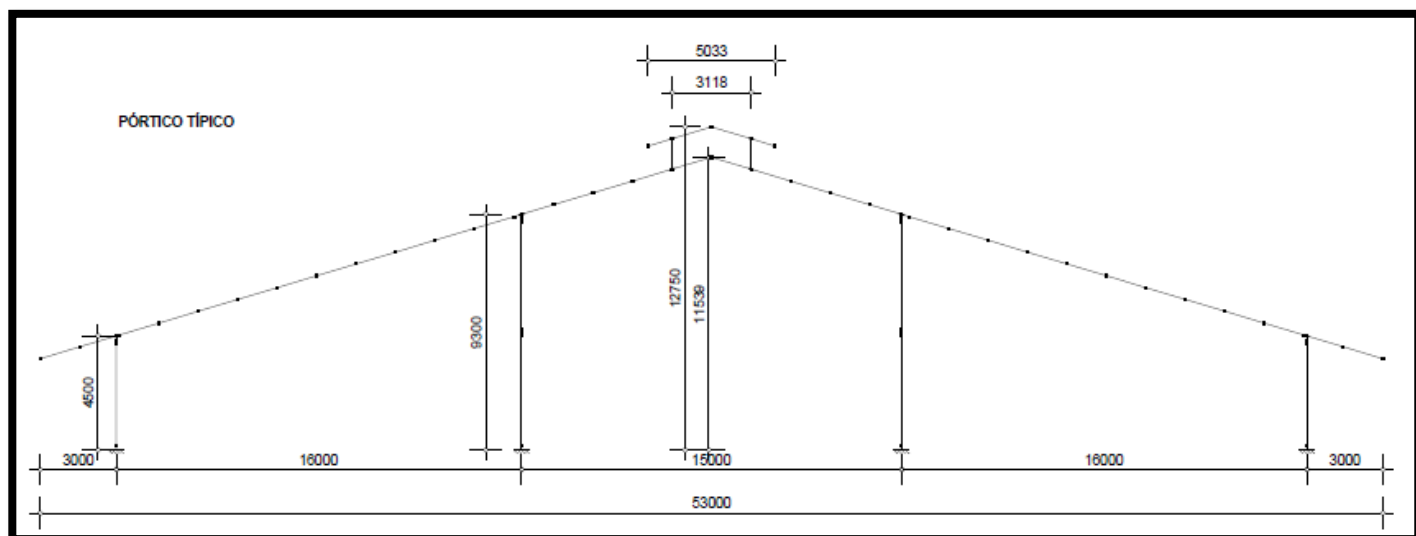


Figura 13 – Pórtico típico da estrutura de aço do *Compost Barn*

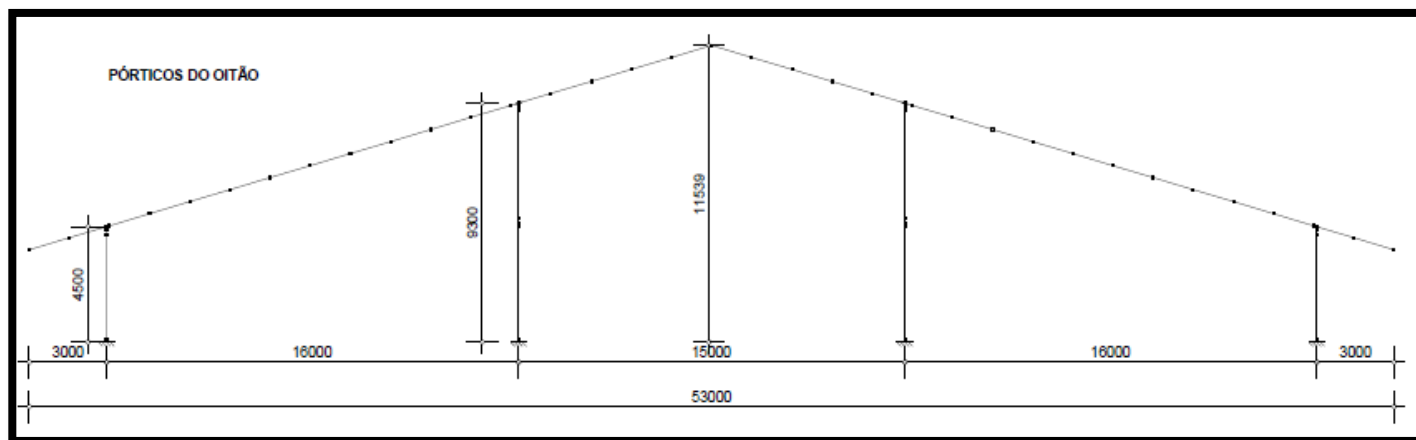


Figura 14 – Pórticos do oitão da estrutura de aço do *Compost Barn*

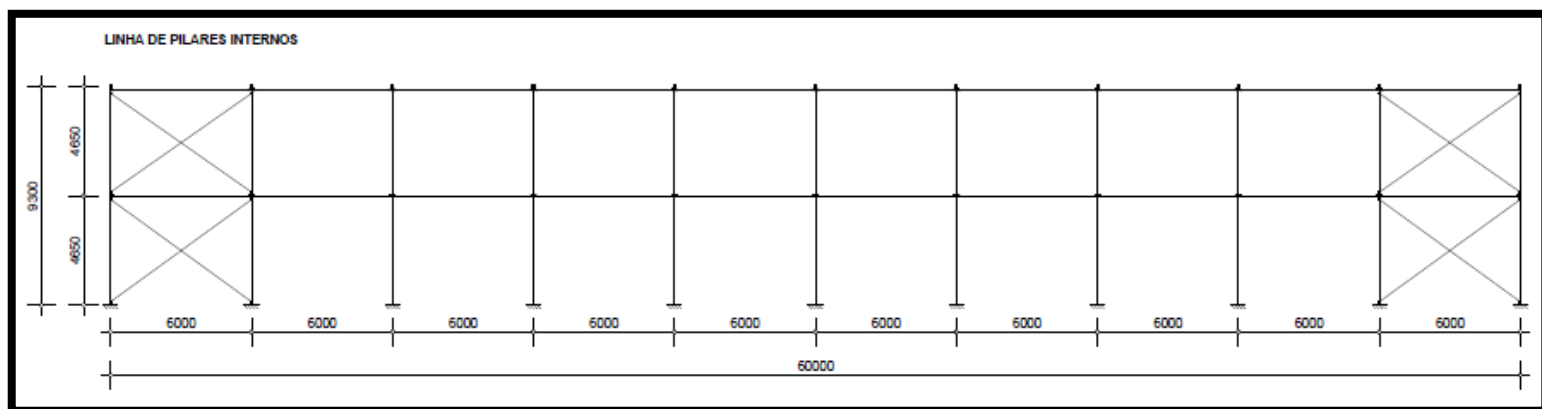


Figura 15 – Elevação longitudinal dos pilares internos do *Compost Barn*

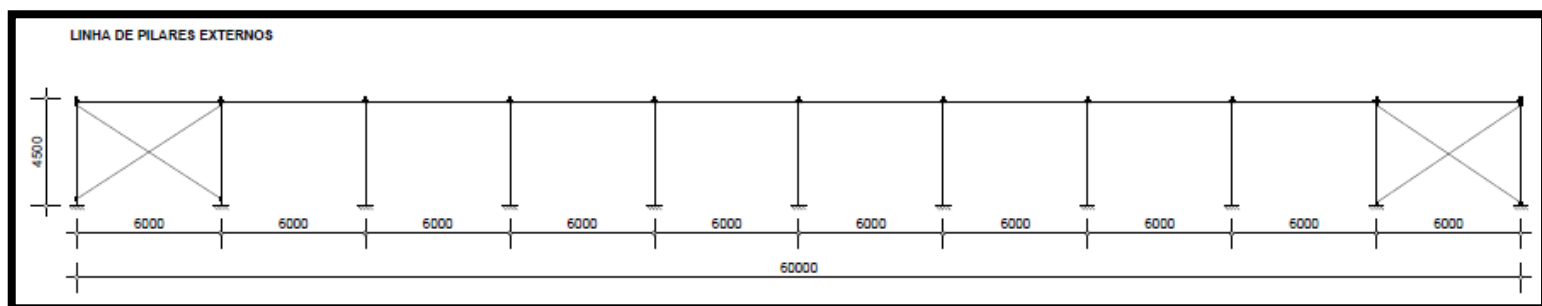


Figura 16 – Elevação longitudinal dos pilares externos do *Compost Barn*

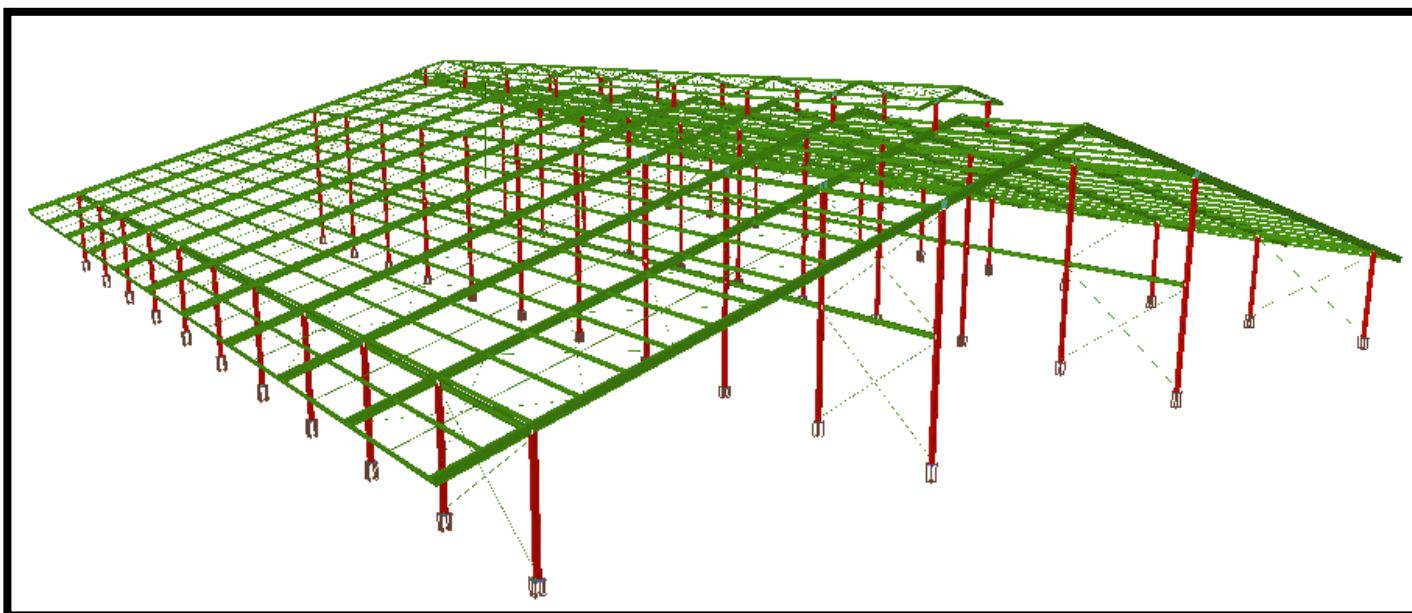


Figura 17 – Vista isométrica do modelo de cálculo do *Compost Barn*

5.2 Ações

5.2.1 Peso próprio

O software Cype 3D considera o peso próprio da estrutura automaticamente.

5.2.2 Telhas

As telhas utilizadas serão do tipo galvalume trapezoidal que possuem um peso próprio de **6kgf/m²**.

5.2.3 Placas fotovoltaicas

O galpão terá a estrutura prevista para receber placas fotovoltaicas para a geração de energia para toda a fazenda. As placas fotovoltaicas possuem um peso próprio de **15kgf/m²**.

5.2.4 Sobrecarga de cobertura conforme NBR 8800:2008

A NBR 8800:2008 prevê uma sobrecarga mínima em coberturas de **25kgf/m²**.

5.2.5 Vento

As ações devidas ao vento são calculadas de acordo com a ABNT NBR 6123:1988 e com o auxílio do software *Ciclone* da Escola de Engenharia de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (Figuras 18 a 33).

O local do *Compost Barn* será na região centro-oeste de Minas Gerais, adotando-se uma velocidade básica do vento de 35m/s. A força de vento nos pilares foi desconsiderada.

The screenshot displays the 'Ciclone' software interface. The main window is titled 'Ciclone' and contains a menu bar with 'Arquivo' and 'Ajuda'. Below the menu is a toolbar with icons for 'Vel. Básica', 'Planta', 'Fator S1', 'Fator S2', 'Fator S3', 'Vel. Carac.', 'Geometria', 'Ce Parede', 'Ce Telhado', 'Ce', 'Cpi - Hipot', 'Cp Crit', 'Carreg. Crit', 'Ca', 'Arrasto', and 'Sobre'. The central area is divided into three panels:

- Edificação:** A large empty white box for drawing the building plan.
- Velocidade Básica:** A panel titled 'Isopletas' showing a map of Brazil with wind speed contour lines. A text input field labeled 'Velocidade Básica' contains the value '35' m/s. Below the input are 'Cancelar' and 'OK' buttons.
- Dados de Cálculo:** A panel on the right showing calculation parameters:
 - Velocidade Básica: 35 m/s
 - Vento 0°: Z V_k (m/s) q(kN/m²)
 - Vento 90°: Z V_k (m/s) q(kN/m²)

On the left sidebar, there are sections for 'Relações de Interesse' (a/b, h/a, b/a, h/b) and 'Fatores' (Fator S1, Fator S3, Vento 0°, Vento Z(m), Fator S2 Z(m), Fator S2).

Figura 18 – Velocidade básica V_0

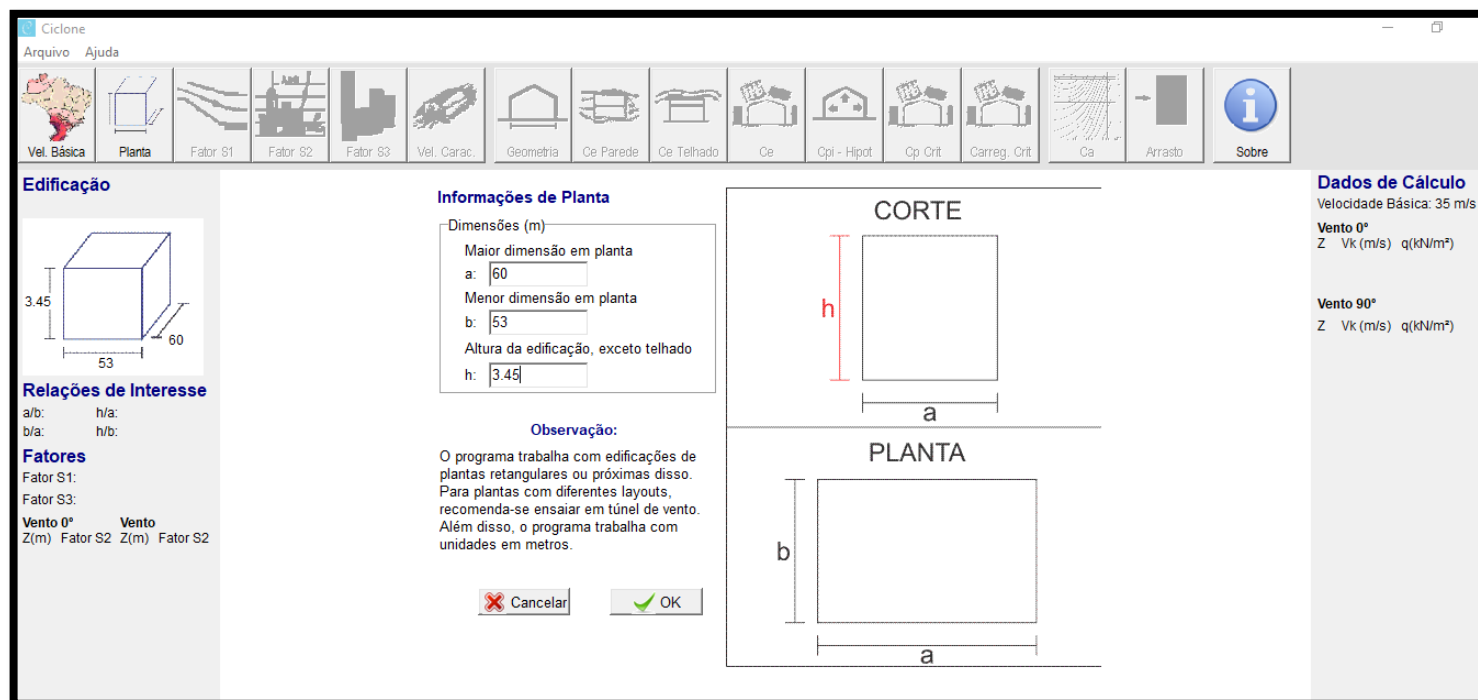


Figura 19 – Informações de planta da estrutura

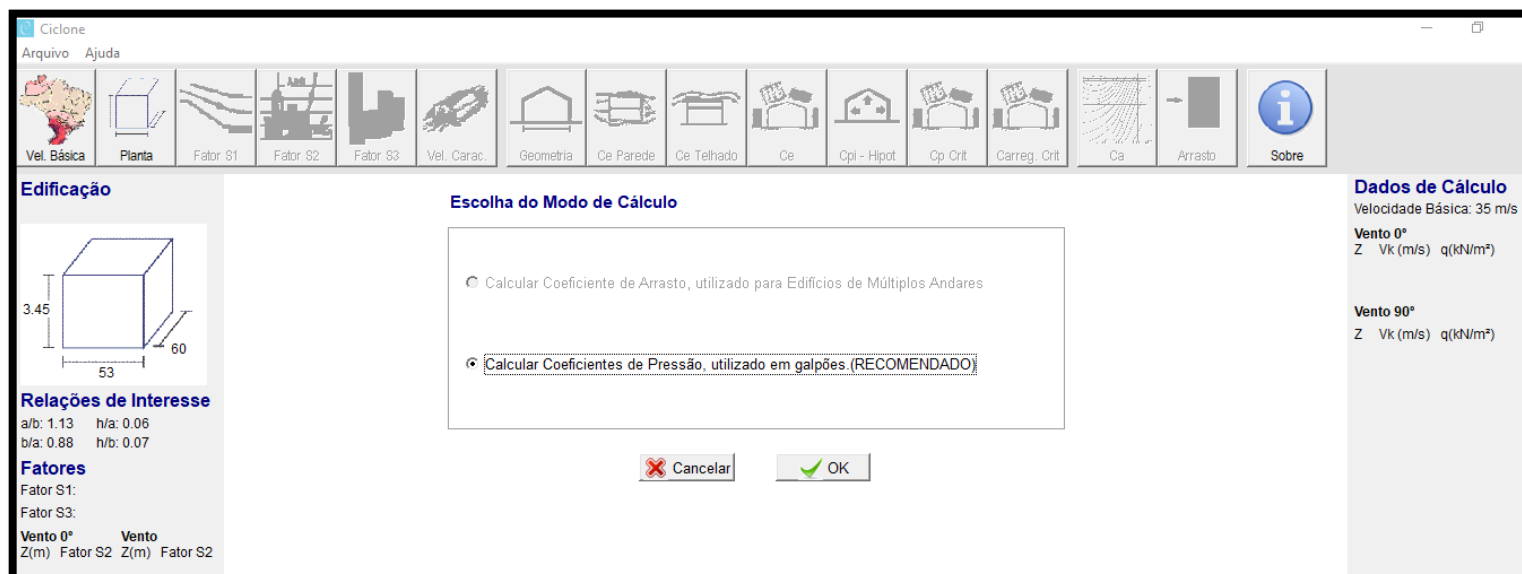


Figura 20 – Definição do modo de cálculo conforme definições da norma

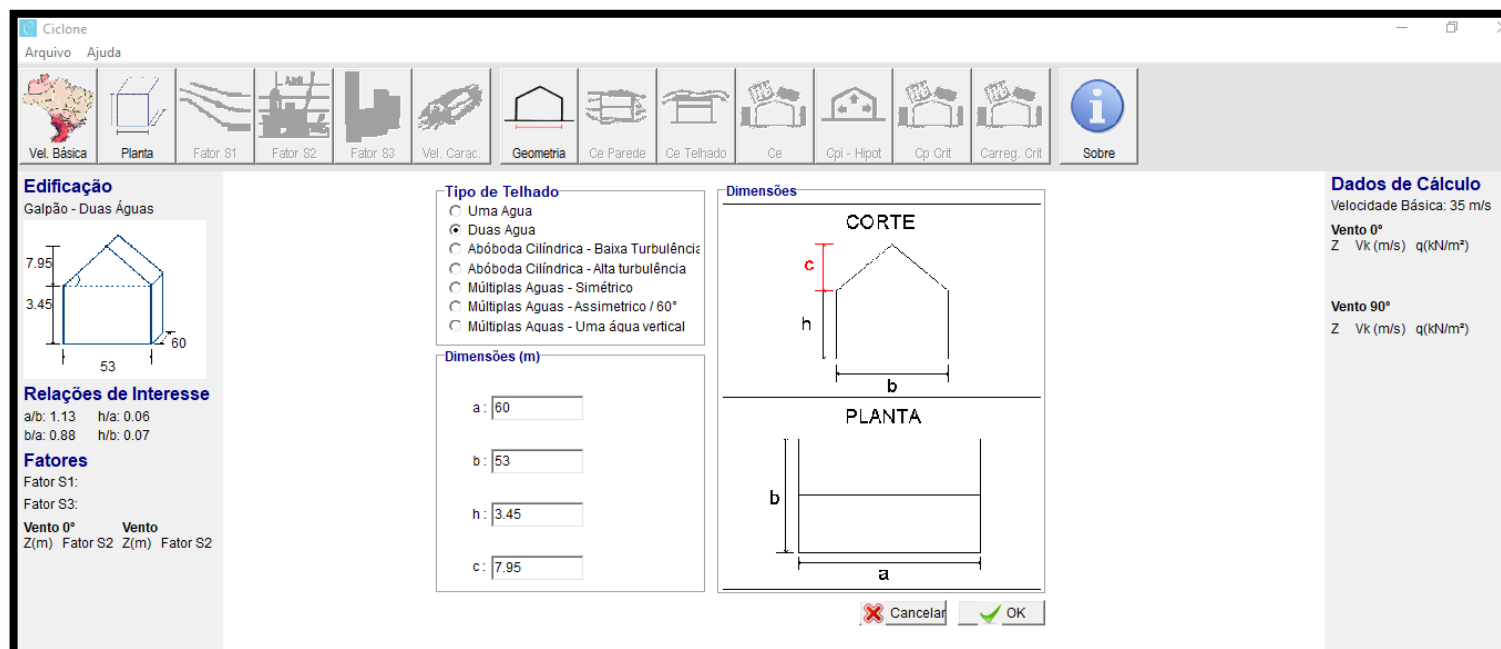
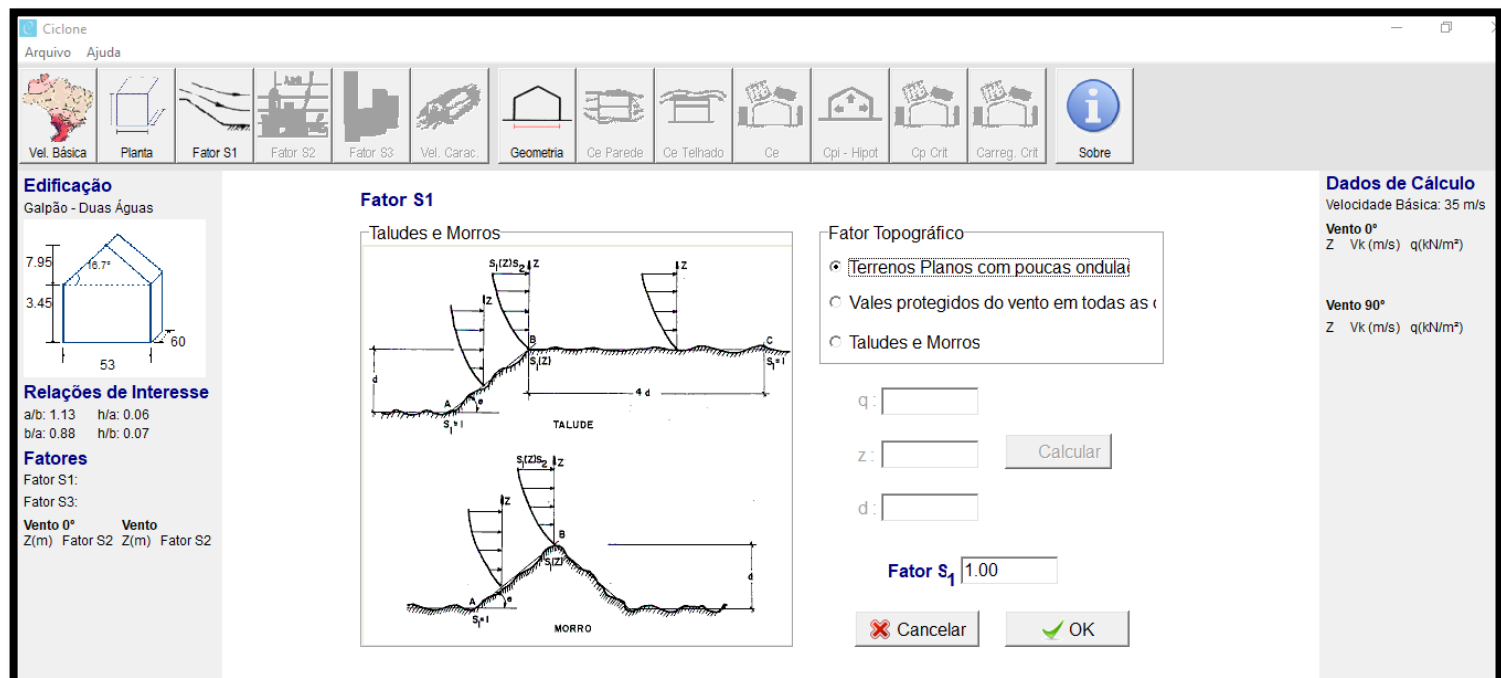


Figura 21 – Dimensões do galpão

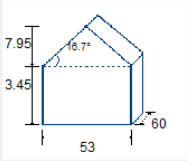
Figura 22 – Definição do fator S₁

Ciclone

Arquivo Ajuda

Vel. Básica Planta Fator S1 Fator S2 Fator S3 Vel. Carac. Geometria Ce Parede Ce Telhado Ce Cpi - Hipot Cp Crit Carreg. Crit Sobre

Edificação
Galpão - Duas Águas



Relações de Interesse
a/b: 1.13 h/a: 0.06
b/a: 0.88 h/b: 0.07

Fatores
Fator S1: 1.00
Fator S3:
Vento 0° Vento
Z(m) Fator S2 Z(m) Fator S2

Fator S2
Para se obter o Fator S2, tem que definir a Categoria do Terreno e a Classe da Edificação.

Fator de Rugosidade do Terreno e Dimensões da Edificação

CATEGORIA DO TERRENO CLASSE DA EDIFICAÇÃO

Categoria do terreno: III

Vento 0° Vento 90°
Classe da Edificação: C Classe da Edificação: C

Z (m)	Fator S2	Z (m)	Fator S2
11.4	0.897	11.4	0.897

Intervalo de Cálculo (m): 11.4

Dados de Cálculo
Velocidade Básica: 35 m/s
Vento 0°
Z Vk (m/s) q(kN/m²)
Vento 90°
Z Vk (m/s) q(kN/m²)

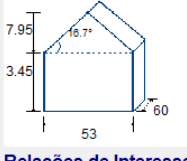
Figura 23 – Definição do fator S_2

Ciclone

Arquivo Ajuda

Vel. Básica Planta Fator S1 Fator S2 Fator S3 Vel. Carac. Geometria Ce Parede Ce Telhado Ce Cpi - Hipot Cp Crit Carreg. Crit Sobre

Edificação
Galpão - Duas Águas



Relações de Interesse
a/b: 1.13 h/a: 0.06
b/a: 0.88 h/b: 0.07

Fatores
Fator S1: 1.00
Fator S3:
Vento 0° Vento
Z(m) Fator S2 Z(m) Fator S2
11.4 0.897 11.4 0.897

Fator S3
Fator Estatístico

Grupo	Descrição
<input type="radio"/> 1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros, centrais
<input type="radio"/> 2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e industria com alto fator
<input checked="" type="radio"/> 3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc)
<input type="radio"/> 4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)
<input type="radio"/> 5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a fase de construção

Fator S_3 0.95

Dados de Cálculo
Velocidade Básica: 35 m/s
Vento 0°
Z Vk (m/s) q(kN/m²)
Vento 90°
Z Vk (m/s) q(kN/m²)

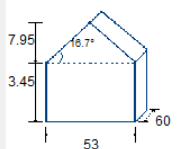
Figura 24 – Definição do fator S_3

Ciclone

Arquivo Ajuda

Vel. Básica Planta Fator S1 Fator S2 Fator S3 Vel. Carac. Geometria Ce Parede Ce Telhado Ce Cpi - Hipot Cp Crit Carreg. Crit Sobre

Edificação
Galpão - Duas Águas



Relações de Interesse
a/b: 1.13 h/a: 0.06
b/a: 0.88 h/b: 0.07

Fatores
Fator S1: 1.00
Fator S3: 0.95

Vento 0°	Z(m)	Fator S2	Z(m)	Fator S2
11.4	0.897	11.4	0.897	

Velocidade Característica e Pressão de Obstrução

Direção do Vento 1

Hi (m)	S2	Vk (m/s)	q (kN/m²)	qe q (kN/m)
11.4	0.897	29.82	0.55	32.71

Direção do Vento 2

Hi (m)	S2	Vk (m/s)	q (kN/m²)	qe q (kN/m)
11.4	0.90	29.82	0.55	28.89

Dados de Cálculo
Velocidade Básica: 35 m/s

Vento 0°
Z Vk (m/s) q(kN/m²)
11.4 29.82 0.55

Vento 90°
Z Vk (m/s) q(kN/m²)
11.4 29.82 0.55

Vk: $S1 \times S2 \times S3 \times V_0$
q = $0,625 \times V_k^2$

Calcular

Cancelar OK

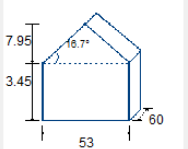
Figura 25 – Cálculo da velocidade característica e pressão de obstrução

Ciclone

Arquivo Ajuda

Vel. Básica Planta Fator S1 Fator S2 Fator S3 Vel. Carac. Geometria Ce Parede Ce Telhado Ce Cpi - Hipot Cp Crit Carreg. Crit Sobre

Edificação
Galpão - Duas Águas



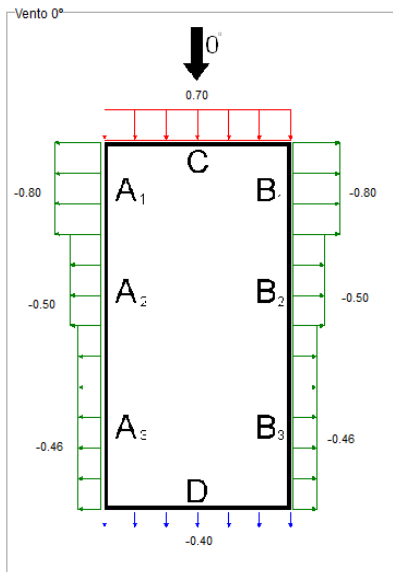
Relações de Interesse
a/b: 1.13 h/a: 0.06
b/a: 0.88 h/b: 0.07

Fatores
Fator S1: 1.00
Fator S3: 0.95

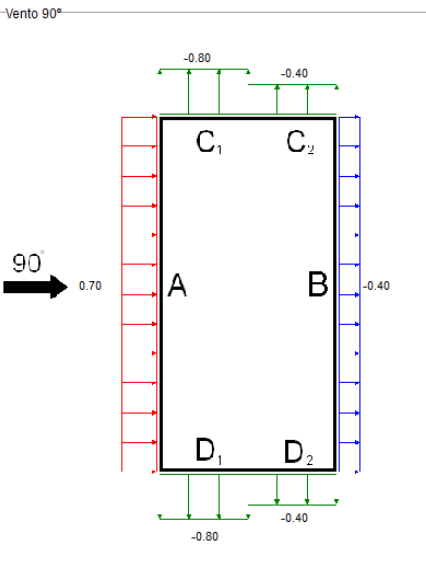
Vento 0°	Z(m)	Fator S2	Z(m)	Fator S2
11.4	0.897	11.4	0.897	

Coefficiente de Pressão Externa - Parede

Vento 0°



Vento 90°



Dados de Cálculo
Velocidade Básica: 35 m/s

Vento 0°
Z Vk (m/s) q(kN/m²)
11.4 29.82 0.55

Vento 90°
Z Vk (m/s) q(kN/m²)
11.4 29.82 0.55

Cancelar OK

Figura 26 – Coeficiente de pressão externa – paredes

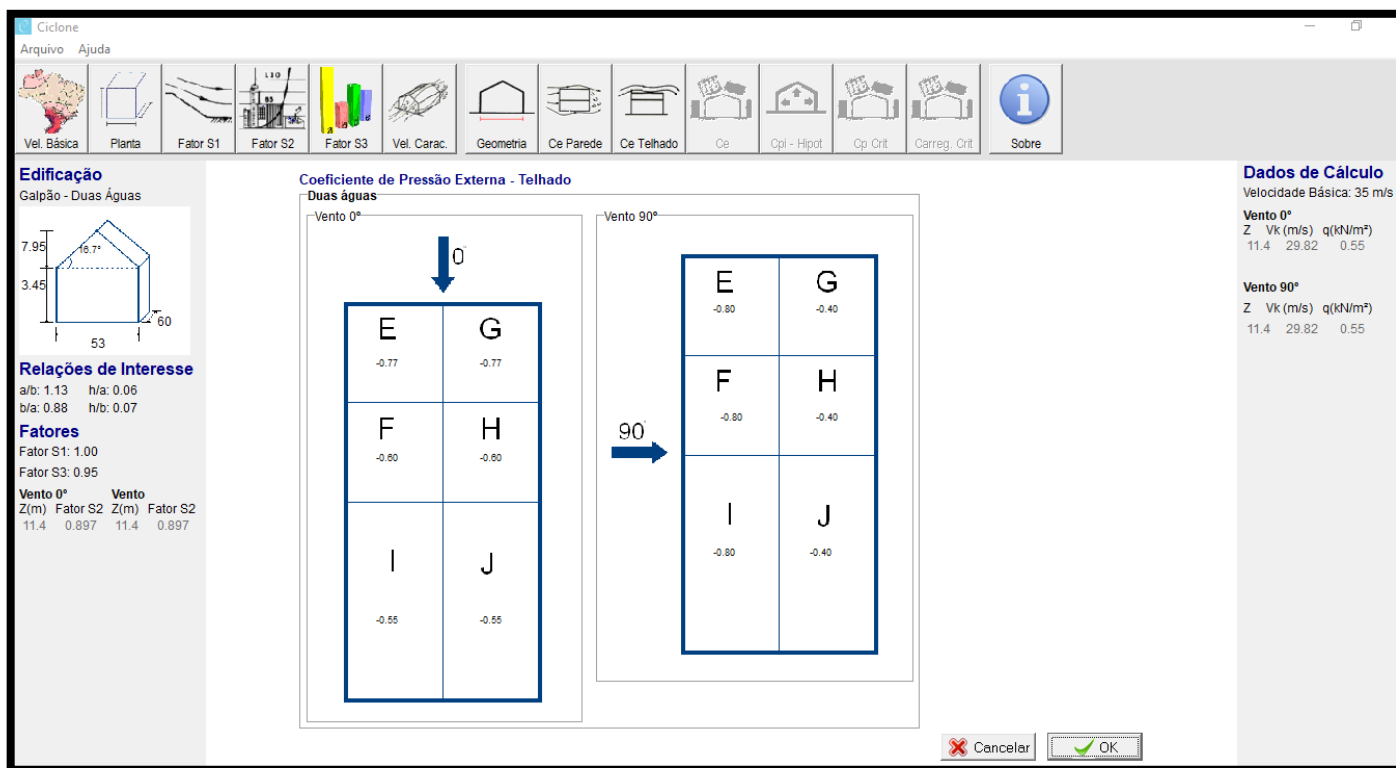


Figura 27 – Coeficiente de pressão externa – telhado

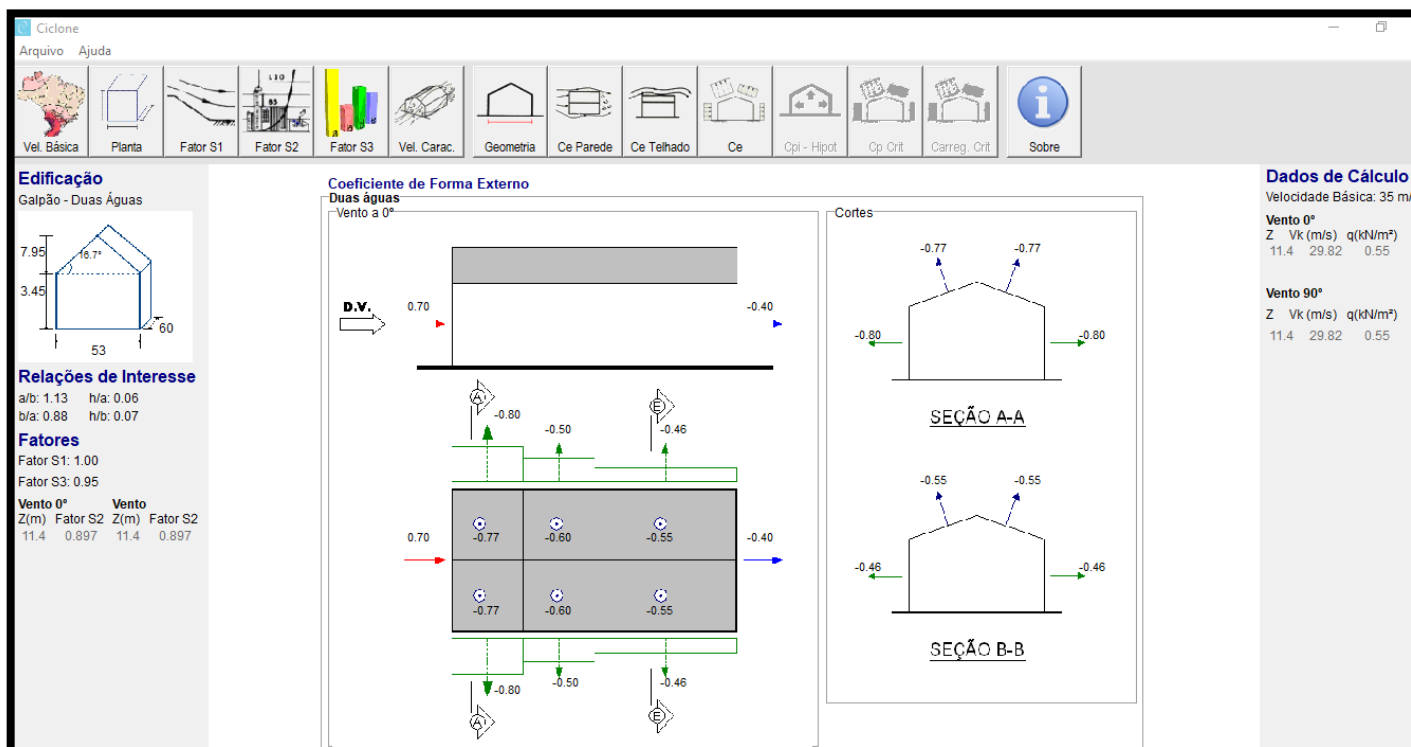


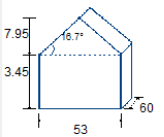
Figura 28 – Coeficiente de Forma Externo – Vento a 0°

Ciclone

Arquivo Ajuda

Vel. Básica Planta Fator S1 Fator S2 Fator S3 Vel. Carac. Geometria Ce Parede Ce Telhado Ce Cpi - Hipot Cp Crit Carreg. Crit Sobre

Edificação
Galpão - Duas Águas

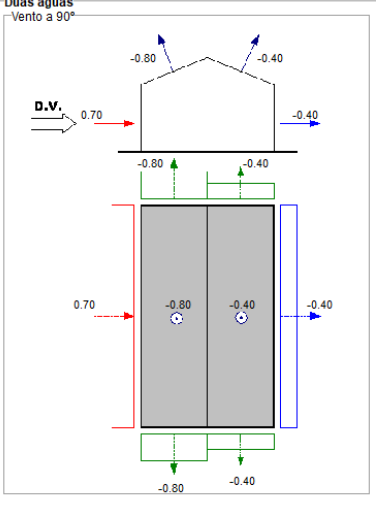


Relações de Interesse
a/b: 1.13 h/a: 0.06
b/a: 0.88 h/b: 0.07

Fatores
Fator S1: 1.00
Fator S3: 0.95

Vento 0°	Vento		
Z(m)	Fator S2	Z(m)	Fator S2
11.4	0.897	11.4	0.897

Coeficiente de Forma Externo
Duas águas
Vento a 90°



Dados de Cálculo
Velocidade Básica: 35 m/s

Vento 0°	Z	Vk (m/s)	q (kN/m²)
	11.4	29.82	0.55

Vento 90°	Z	Vk (m/s)	q (kN/m²)
	11.4	29.82	0.55

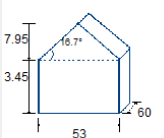
Figura 29 – Coeficiente de Forma Externo – Vento a 90°

Ciclone

Arquivo Ajuda

Vel. Básica Planta Fator S1 Fator S2 Fator S3 Vel. Carac. Geometria Ce Parede Ce Telhado Ce Cpi - Hipot Cp Crit Carreg. Crit Sobre

Edificação
Galpão - Duas Águas



Relações de Interesse
a/b: 1.13 h/a: 0.06
b/a: 0.88 h/b: 0.07

Fatores
Fator S1: 1.00
Fator S3: 0.95

Vento 0°	Vento		
Z(m)	Fator S2	Z(m)	Fator S2
11.4	0.897	11.4	0.897

Hipóteses - Vento 0°

a) 1ª Hipótese - Duas faces opostas permeáveis e as outras impermeáveis

a.1) Vento Perpendicular à face permeável.....: Cpi = + 0,2

a.2) Vento Perpendicular à face impermeável.....: Cpi = - 0,3

b) 2ª Hipótese - Quatro faces igualmente permeáveis.....: Cpi = - 0,3 ou Cpi = 0

c) 3ª Hipótese - Abertura dominante com as outras faces permeáveis

c.1) Existência de abertura dominante na face barlavento

Aad: Aad/Aas: Calcular

Aas: Cpi:

c.2) Existência de abertura dominante na face de sotavento

Cpi = 'Ce' correspondente à face de sotavento que contém esta abertura =

c.3) Existência de abertura dominante nas faces paralelas ao vento

c.3.1) Não situada em zona de alta sucção externa

Cpi = 'Ce' correspondente à região da abertura nesta face =

c.3.2) Situada em zona de alta sucção externa

Aad: Aad/Aase: Calcular

Aase: Cpi:

Dados de Cálculo
Velocidade Básica: 35 m/s

Vento 0°	Z	Vk (m/s)	q (kN/m²)
	11.4	29.82	0.55

Vento 90°	Z	Vk (m/s)	q (kN/m²)
	11.4	29.82	0.55

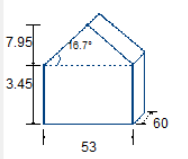
Figura 30 – Hipótese – Vento a 0°

Ciclone

Arquivo Ajuda

Vel. Básica Planta Fator S1 Fator S2 Fator S3 Vel. Carac. Geometria Ce Parede Ce Telhado Ce Cpi - Hipot Cpi Crit Carreg. Crit Sobre

Edificação
Galpão - Duas Águas



7.95
6.7°
3.45
53
60

Relações de Interesse
a/b: 1.13 h/a: 0.06
b/a: 0.88 h/b: 0.07

Fatores
Fator S1: 1.00
Fator S3: 0.95

Vento 0°	Vento	
Z(m)	Fator S2	Z(m) Fator S2
11.4	0.897	11.4 0.897

Hipóteses - Vento 90°

a) 1° Hipótese - Duas faces opostas permeáveis e as outras impermeáveis

a.1) Vento Perpendicular à face permeável.....: Cpi = + 0,2

a.2) Vento Perpendicular à face impermeável.....: Cpi = - 0,3

b) 2° Hipótese - Quatro faces igualmente permeáveis.....: Cpi = - 0,3 ou Cpi = 0

c) 3° Hipótese - Abertura dominante com as outras faces permeáveis

c.1) Existência de abertura dominante na face barlavento

Aad: Aad/Aas:

Aas: Cpi: **teste vento 90°**

c.2) Existência de abertura dominante na face de sotavento

Cpi = 'Ce' correspondente à face de sotavento que contém esta abertura:

c.3) Existência de abertura dominante nas faces paralelas ao vento

c.3.1) Não situada em zona de alta sucção externa

Cpi = 'Ce' correspondente à região da abertura nesta face:

c.3.2) Situada em zona de alta sucção externa

Aad: Aad/Aase:

Aase: Cpi:

Dados de Cálculo
Velocidade Básica: 35 m/s

Vento 0°
Z V_k (m/s) q (kN/m²)
11.4 29.82 0.55

Vento 90°
Z V_k (m/s) q (kN/m²)
11.4 29.82 0.55

Figura 31 – Hipótese – Vento a 90°

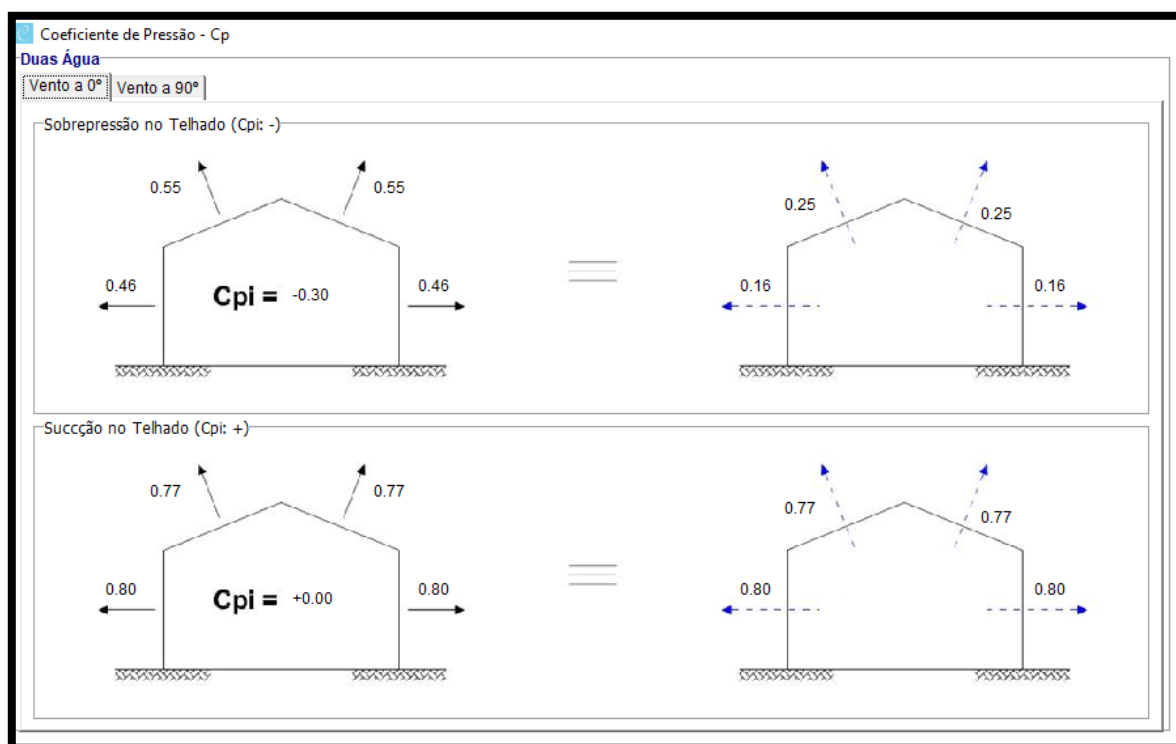


Figura 32 – Coeficiente de pressão – Vento a 0°

Conforme a ABNT NBR 6123:1988 (p.15), adota-se para lanternins C_{pe} médio = -2,0. Logo, na sobrepressão do telhado com vento a 0° temos:

$$2,0 - 0,3 = 1,7$$

Na sucção do telhado com vento a 0° temos:

$$2,0 - 0,0 = 2,0$$

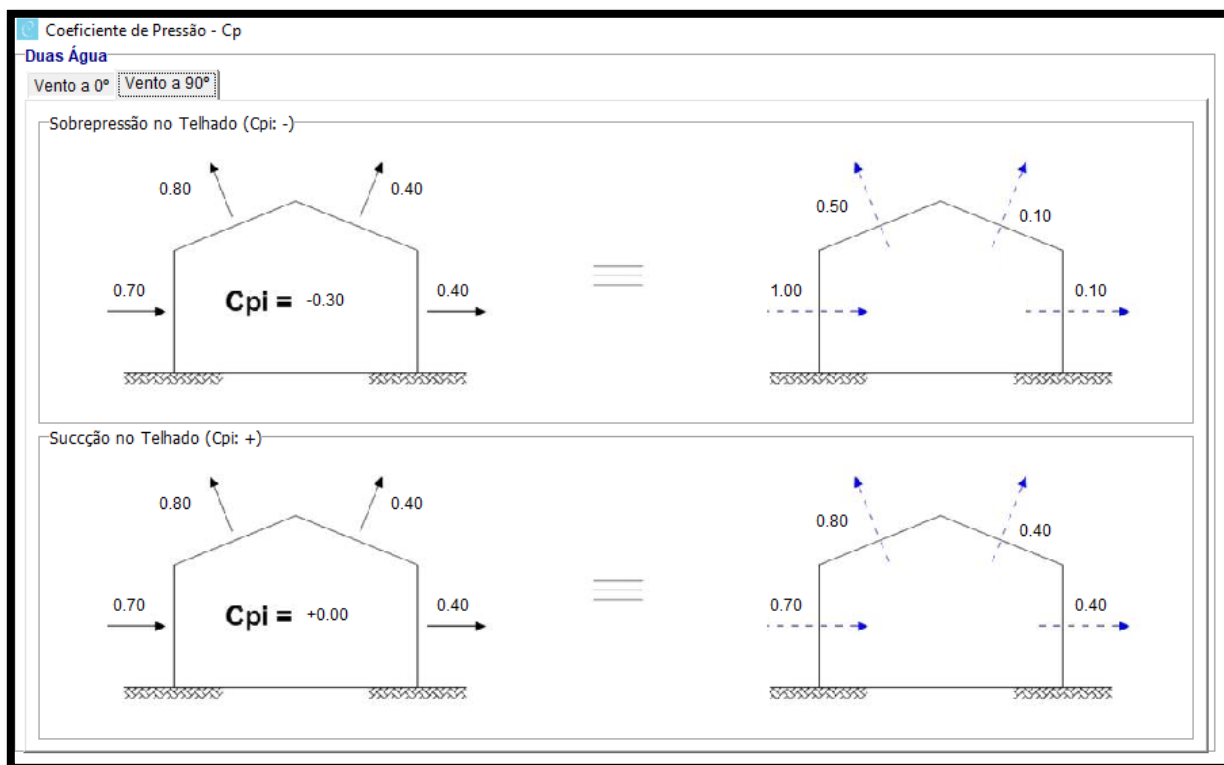


Figura 33 – Coeficiente de pressão – Vento a 90°

Conforme a ABNT NBR 6123:1988 (p.15), para lanternins é adotado C_{pe} médio = -2,0. Logo, na sobrepressão do telhado com vento a 90° temos:

$$2,0 - 0,3 = 1,7$$

Na sucção do telhado com vento a 90° temos:

$$2,0 - 0,0 = 2,0$$

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
57	1.00000	1.000	1.000	1.400		0.840								
58	1.40000	1.000	1.000	1.400		0.840								
59	1.04000	1.000	1.000	1.400		0.840								
60	1.44000	1.000	1.000	1.400		0.840								
61	1.00000	1.400	1.400	1.400		0.840								
62	1.40000	1.400	1.400	1.400		0.840								
63	1.04000	1.400	1.400	1.400		0.840								
64	1.44000	1.400	1.400	1.400		0.840								
65	1.00000	1.000					1.400							

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
66	1.40000	1.000	1.000				1.400							
67	1.04000	1.000	1.000				1.400							
68	1.44000	1.000	1.000				1.400							
69	1.00000	1.400	1.400				1.400							
70	1.40000	1.400	1.400				1.400							
71	1.04000	1.400	1.400				1.400							
72	1.44000	1.400	1.400				1.400							
73	1.00000	1.000	1.000	0.700			1.400							
74	1.40000	1.000	1.000	0.700			1.400							

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
75	1.000	1.040000	1.000	0.700			1.400							
76	1.000	1.044000	1.000	0.700			1.400							
77	1.000	1.000000	1.400	0.700			1.400							
78	1.000	1.040000	1.400	0.700			1.400							
79	1.000	1.040000	1.400	0.700			1.400							
80	1.000	1.044000	1.400	0.700			1.400							
81	1.000	1.000000	1.000	1.400			0.840							
82	1.000	1.040000	1.000	1.400			0.840							
83	1.000	1.040000	1.000	1.400			0.840							

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
84	1.4000	1.4000	1.000	1.400			0.840							
85	1.0000	1.0000	1.400	1.400			0.840							
86	1.4000	1.4000	1.400	1.400			0.840							
87	1.0000	1.4000	1.400	1.400			0.840							
88	1.4000	1.4000	1.400	1.400			0.840							
89	1.0000	1.0000	1.000					1.400						
90	1.4000	1.4000	1.000					1.400						
91	1.0000	1.4000	1.000					1.400						
92	1.4000	1.4000	1.000					1.400						

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovoltaicas	SC Norma	VENTO 0°: 1	VENTO 0°: 2	VENTO 90°: 1 (X+)	VENTO 90°: 1 (X-)	VENTO 90°: 2 (X+)	VENTO 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
93	1.0000	1.0000	1.400					1.400						
94	1.4000	1.0000	1.400					1.400						
95	1.0000	1.0400	1.400					1.400						
96	1.4000	1.4400	1.400					1.400						
97	1.0000	1.0000	1.000	0.700				1.400						
98	1.4000	1.0000	1.000	0.700				1.400						
99	1.0000	1.0400	1.000	0.700				1.400						
100	1.0000	1.4400	1.000	0.700				1.400						
101	1.0000	1.0000	1.400	0.700				1.400						

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
102000	1.1.4000	1.1.4000	1.400	0.700				1.400						
103000	1.1.4000	1.1.4000	1.400	0.700				1.400						
104000	1.1.4000	1.1.4000	1.400	0.700				1.400						
105000	1.1.4000	1.1.4000	1.000	1.400				0.840						
106000	1.1.4000	1.1.4000	1.000	1.400				0.840						
107000	1.1.4000	1.1.4000	1.000	1.400				0.840						
108000	1.1.4000	1.1.4000	1.000	1.400				0.840						
109000	1.1.4000	1.1.4000	1.400	1.400				0.840						
110000	1.1.4000	1.1.4000	1.400	1.400				0.840						

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
111	000	1.1.04000	1.400	1.400				0.840						
112	000	1.1.44000	1.400	1.400				0.840						
113	000	1.1.00000	1.000						1.400					
114	000	1.1.40000	1.000						1.400					
115	000	1.1.04000	1.000						1.400					
116	000	1.1.44000	1.000						1.400					
117	000	1.1.00000	1.400						1.400					
118	000	1.1.40000	1.400						1.400					
119	000	1.1.04000	1.400						1.400					

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
120000	1.1.44	1.1.44	1.400						1.400					
121000	1.1.00	1.1.00	1.000	0.700					1.400					
122000	1.1.40	1.1.40	1.000	0.700					1.400					
123000	1.1.04	1.1.04	1.000	0.700					1.400					
124000	1.1.44	1.1.44	1.000	0.700					1.400					
125000	1.1.00	1.1.00	1.400	0.700					1.400					
126000	1.1.40	1.1.40	1.400	0.700					1.400					
127000	1.1.04	1.1.04	1.400	0.700					1.400					
128000	1.1.44	1.1.44	1.400	0.700					1.400					

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
129000	1.0	1.0	1.000	1.400					0.840					
130000	1.0	1.0	1.000	1.400					0.840					
131000	1.0	1.0	1.000	1.400					0.840					
132000	1.0	1.0	1.000	1.400					0.840					
133000	1.0	1.0	1.400	1.400					0.840					
134000	1.0	1.0	1.400	1.400					0.840					
135000	1.0	1.0	1.400	1.400					0.840					
136000	1.0	1.0	1.400	1.400					0.840					
137000	1.0	1.0	1.000							1.400				

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
138	0000	1.1.4000	1.000							1.400				
139	0000	1.1.0400	1.000							1.400				
140	0000	1.1.4400	1.000							1.400				
141	0000	1.1.0000	1.400							1.400				
142	0000	1.1.4000	1.400							1.400				
143	0000	1.1.0400	1.400							1.400				
144	0000	1.1.4400	1.400							1.400				
145	0000	1.1.0000	1.000	0.700						1.400				
146	0000	1.1.4000	1.000	0.700						1.400				

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
147	0000	1.1.0400	1.000	0.700						1.400				
148	0000	1.1.4400	1.000	0.700						1.400				
149	0000	1.1.0000	1.400	0.700						1.400				
150	0000	1.1.4000	1.400	0.700						1.400				
151	0000	1.1.0400	1.400	0.700						1.400				
152	0000	1.1.4400	1.400	0.700						1.400				
153	0000	1.1.0000	1.000	1.400						0.840				
154	0000	1.1.4000	1.000	1.400						0.840				
155	0000	1.1.0400	1.000	1.400						0.840				

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Norma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
156	000	1.1.44	1.000	1.400						0.840				
157	000	1.1.00	1.400	1.400						0.840				
158	000	1.1.40	1.400	1.400						0.840				
159	000	1.1.04	1.400	1.400						0.840				
160	000	1.1.44	1.400	1.400						0.840				
161	000	1.1.00	1.000								1.000	1.000	1.000	1.000
162	000	1.1.10	1.000								1.000	1.000	1.000	1.000
163	000	1.1.01	1.000								1.000	1.000	1.000	1.000
164	000	1.1.11	1.000								1.000	1.000	1.000	1.000

C o m b.	P P	T e l h a	Placas Fotovoltaicas	SC Norma	VENTO 0°: 1	VENTO 0°: 2	VENTO 90°: 1 (X+)	VENTO 90°: 1 (X-)	VENTO 90°: 2 (X+)	VENTO 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
165000	1.1.	1.1.	1.100								1.000	1.000	1.000	1.000
166000	1.1.	1.1.	1.100								1.000	1.000	1.000	1.000
167000	1.1.	1.1.	1.100								1.000	1.000	1.000	1.000
168000	1.1.	1.1.	1.100								1.000	1.000	1.000	1.000
169000	1.1.	1.1.	1.000	0.300							1.000	1.000	1.000	1.000
170000	1.1.	1.1.	1.000	0.300							1.000	1.000	1.000	1.000
171000	1.1.	1.1.	1.000	0.300							1.000	1.000	1.000	1.000
172000	1.1.	1.1.	1.000	0.300							1.000	1.000	1.000	1.000
173000	1.1.	1.1.	1.100	0.300							1.000	1.000	1.000	1.000

C o m b.	P P h a	T e l h a	Placas Fotovol taicas	SC Nor ma	VEN TO 0°: 1	VEN TO 0°: 2	VENT O 90°: 1 (X+)	VENT O 90°: 1 (X-)	VENT O 90°: 2 (X+)	VENT O 90°: 2 (X-)	NOCI ONA L X+	NOCI ONA L X-	NOCI ONA L Y+	NOCI ONA L Y-
17 4	0 0 0	0 0 0	1.100	0.3 00							1.000	1.000	1.000	1.000
17 5	0 0 0	0 0 0	1.100	0.3 00							1.000	1.000	1.000	1.000
17 6	0 0 0	0 0 0	1.100	0.3 00							1.000	1.000	1.000	1.000

Tabela 4 – Combinações de ações geradas pelo software CYPE 3D

6 RESULTADOS

6.1 Classificação da Estrutura quanto à deslocabilidade

Para fazer a análise da estrutura quanto à deslocabilidade foi utilizado como referência o nó N62 que está localizado no Pórtico 6 (pórtico central) e é o ponto central de encontro das vigas principais, conforme mostram as Figuras 34 a 36.

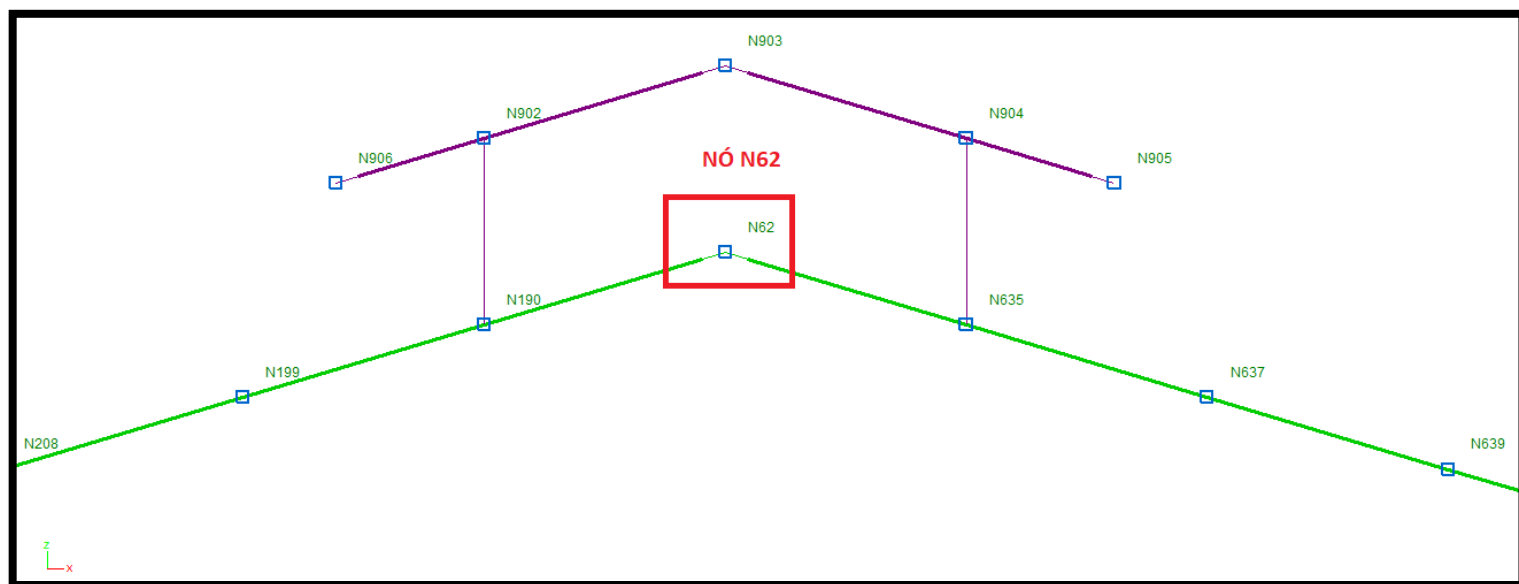


Figura 34 – Nó N62, Pórtico 6 (Central)

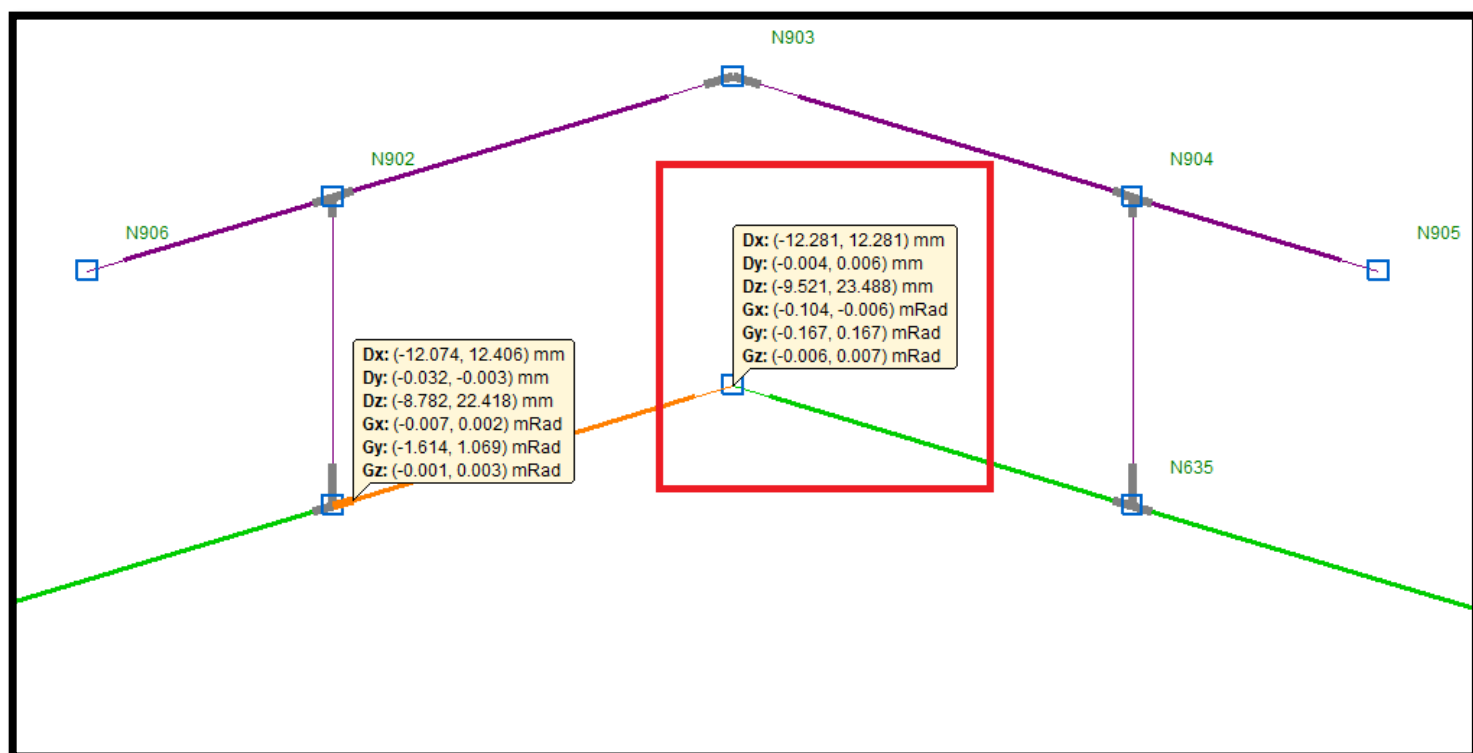


Figura 35 – Envoltória de deslocamentos obtidos com a análise de 2º ordem no nó N62

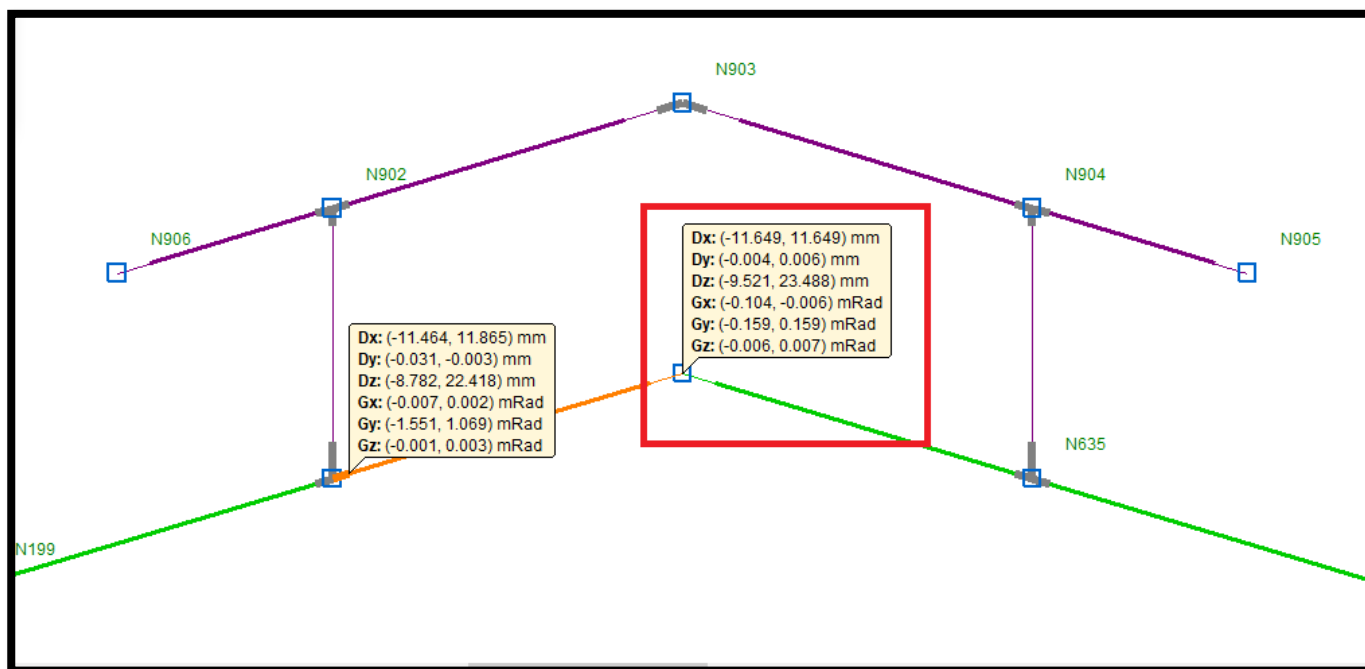


Figura 36 – Envoltória de deslocamentos obtidos com a análise de 1º ordem no nó N62

Fazendo a relação entre os deslocamentos de 2ª ordem e os deslocamentos de 1º ordem conforme o Tabela 5, temos:

Pórtico Central (Linha 6) - Nó N62 (Encontro das Vigas Principais no centro da estrutura)						
	Dx(mm)		Dy(mm)		Dz(mm)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Deslocamentos de 2ª Ordem	-12.281	12.281	-0.004	0.006	-9.521	23.488
Deslocamentos de 1ª Ordem	-11.649	11.649	-0.004	0.006	-9.521	23.488
Relação (D2ªordem/D1ªordem)	1.054	1.054	1	1	1	1

Tabela 5 – Relação entre os deslocamentos de 2ª Ordem e os deslocamentos de 1ª Ordem

Dessa forma podemos concluir que a estrutura é classificada como uma estrutura de pequena deslocabilidade ($D2^{\text{ªordem}}/D1^{\text{ªordem}} = 1,054 \leq 1,10$).

6.2 Diagrama de Momento Fletor do Pórtico Típico

A Figura 37 apresenta o diagrama de momento fletor para a seguinte combinação 1,4 (Peso próprio + Telhas + Placas Fotovoltaicas) + 1,4 Sobrecarga.

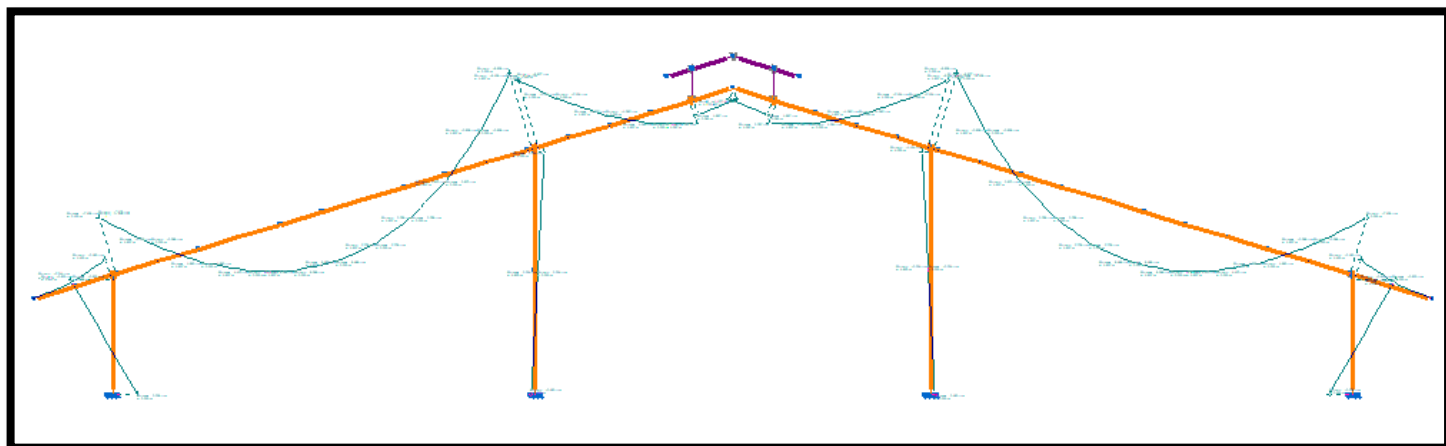


Figura 37 – Diagrama de Momento Fletor do Pórtico Típico

6.3 Diagrama de Força Cortante do Pórtico Típico

A Figura 38 apresenta o diagrama de força cortante para a seguinte combinação 1,4 (Peso próprio + Telhas + Placas Fotovoltaicas) + 1,4 Sobrecarga.

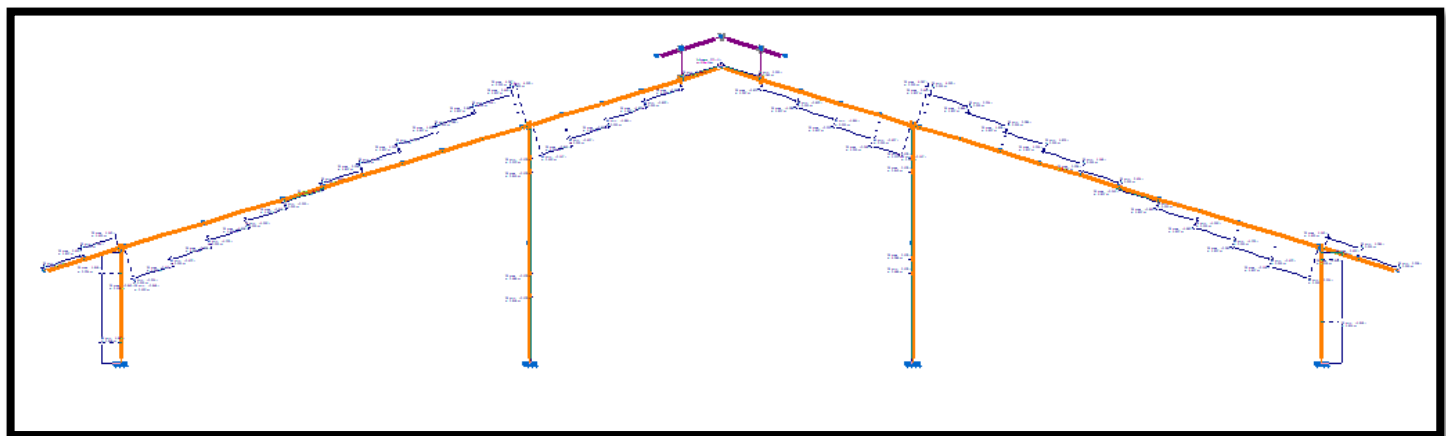


Figura 38 – Diagrama de Força Cortante do Pórtico Típico

6.4 Forças Axiais Solicitantes do Pórtico Típico

A Figura 39 apresenta o diagrama de forças axiais para a seguinte combinação 1,4 (Peso próprio + Telhas + Placas Fotovoltaicas) + 1,4 Sobrecarga.

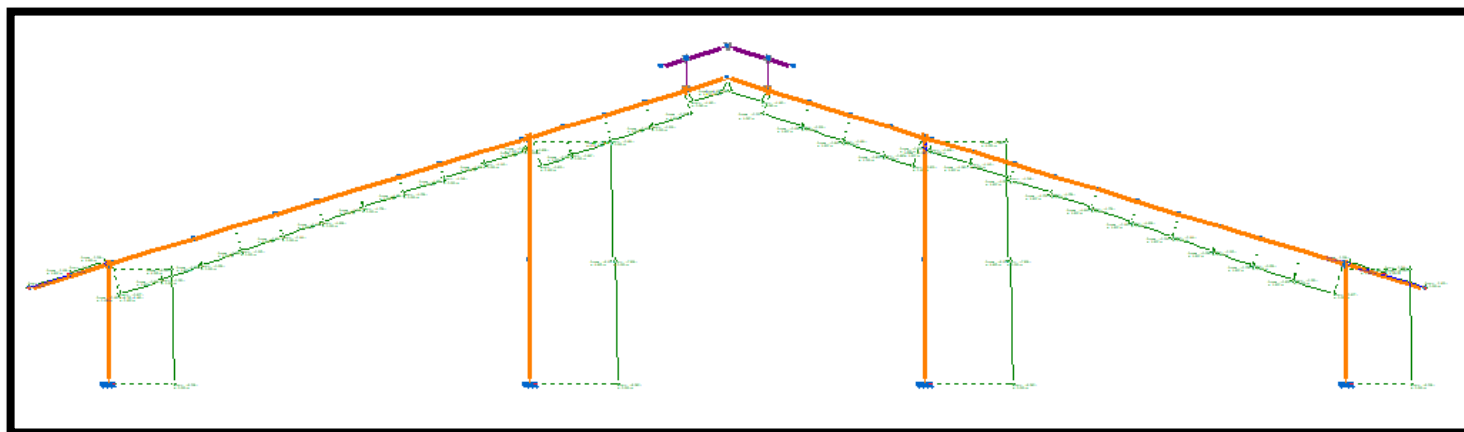


Figura 39 – Forças Axiais Solicitantes do Pórtico Típico

6.5 Verificação Quanto aos Estados Limites Últimos – ELU

Após a verificação quanto aos estados limites últimos pelo software Cype 3D as barras que estão aprovadas ficam na cor verde. Conforme a Figura 40 pode-se perceber que todas as barras do modelo estão aprovadas.

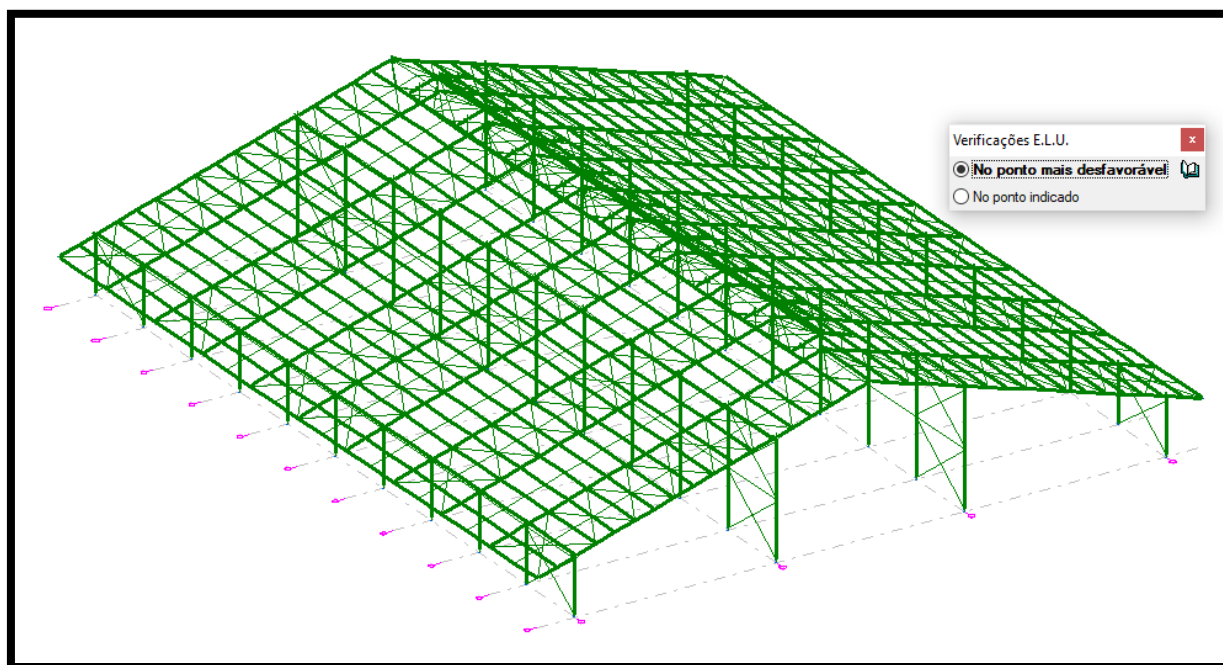


Figura 40 – Verificação aos Estados Limites Últimos das barras

6.5.1 Verificação E.L.U pilar central

A Figura 41 apresenta o percentual de utilização do pilar central.

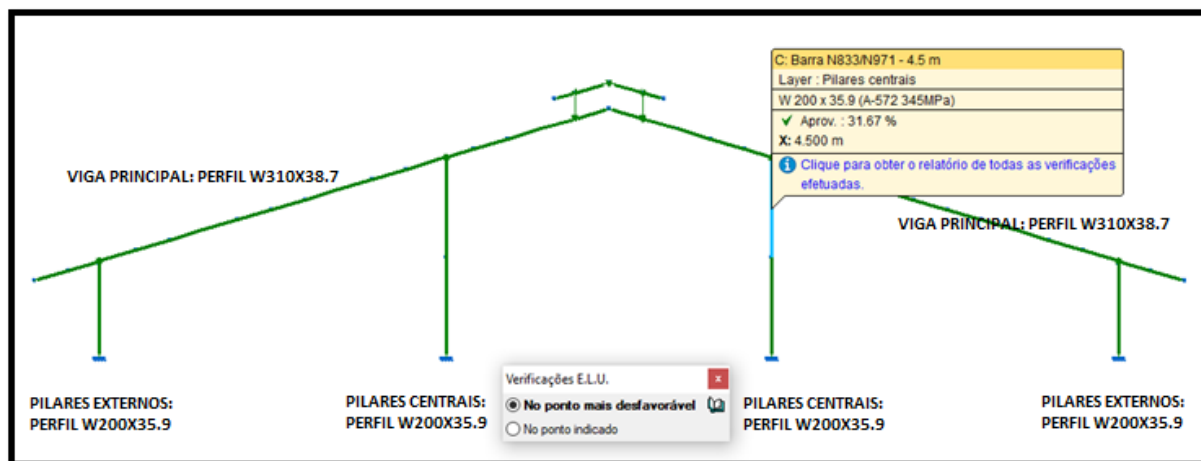
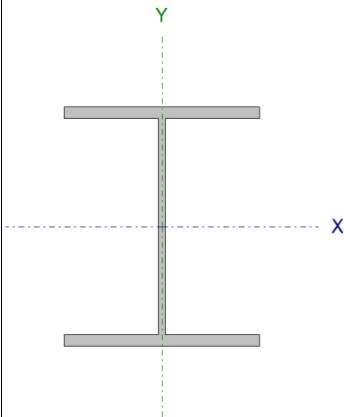


Figura 41 – Percentual de utilização dos pilares centrais

Verificação do software Cype 3D:

Barra N833/N971

Perfil: W 200 x 35.9							
Material: Aço (A-572 345MPa)							
	Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _x ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N833	N971	4.500	45.70	3437.00	764.00	14.51
	Notas:						
	(1) Inércia em relação ao eixo indicado						
	(2) Momento de inércia à torção uniforme						
	Flambagem		Flambagem lateral				
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.			
b	1.00	1.00	0.00	0.00			
L _K	4.500	4.500	0.000	0.000			
C _b	-		1.000				
Notação:							
<i>b</i> : Coeficiente de flambagem							
<i>L_K</i> : Comprimento de flambagem (m)							
<i>C_b</i> : Fator de modificação para o momento crítico							

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	l	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	s t f	
N833/N971	l ≤ 200.0 Passa	x: 4.5 m h = 2.9	x: 0 m h = 13.1	x: 4.5 m h = 28.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	h = 2.7	x: 4.5 m h = 31.7	N.P. ⁽³⁾	N.P. ⁽⁴⁾	N.P. ⁽⁵⁾	PASSA h = 31.7

Notação:

l: Limitação do índice de esbeltez*N_t*: Resistência à tração*N_c*: Resistência à compressão*M_x*: Resistência à flexão eixo X*M_y*: Resistência à flexão eixo Y*V_x*: Resistência ao esforço cortante X*V_y*: Resistência ao esforço cortante Y*NM_xM_y*: Resistência ao esforço axial e flexão combinados*T*: Resistência à torção*NMVT*: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante*s t f*: Resistência a interações de esforços e momento de torção*x*: Distância à origem da barra*h*: Coeficiente de aproveitamento (%)*N.P.*: Não procede

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	l	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	s t f	
<p><i>Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.P.):</i></p> <p>(1) <i>A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.</i></p> <p>(2) <i>A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.</i></p> <p>(3) <i>A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.</i></p> <p>(4) <i>Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.</i></p> <p>(5) <i>Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.</i></p>												

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$$l: \underline{110.1} \checkmark$$

Onde:

l: Índice de esbeltez.

$$l_x: \underline{51.9}$$

$$l_y: \underline{110.1}$$

Sendo:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

$$K_x \cdot L_x: \underline{4.500} \text{ m}$$

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$K_y \cdot L_y: \underline{4.500} \text{ m}$$

r_x, r_y : Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$r_x: \underline{8.67} \text{ cm}$$

$$r_y: \underline{4.09} \text{ cm}$$

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$h: \underline{0.029} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N971, para a combinação de ações PP+Telha+PlacasFotovoltaicas+1.4·VENTO90°:2(X-).

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. $N_{t,Sd} : \underline{4.294} \text{ t}$

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$N_{t,Rd} : \underline{146.108} \text{ t}$

Onde:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$A_g : \underline{45.70} \text{ cm}^2$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$g_{a1} : \underline{1.10}$

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$h : \underline{0.131} \checkmark$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N833, para a combinação de ações 1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

$N_{c,Sd} : \underline{7.906} \text{ t}$

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$N_{c,Rd} : \underline{60.234} \text{ t}$

Onde:

c : Fator de redução total associado à resistência à compressão.

$c : \underline{0.412}$

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$Q : \frac{1.000}{}$$

$$A_g : \frac{45.70}{} \text{ cm}^2$$

$$f_y : \frac{3516.82}{} \text{ kgf/cm}^2$$

$$g_{a1} : \frac{1.10}{}$$

Fator de redução c: (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$$c : \frac{0.412}{}$$

Onde:

l₀: Índice de esbeltez reduzido.

$$l_0 : \frac{1.455}{}$$

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

N_e: Força axial de flambagem elástica.

$$Q : \frac{1.000}{}$$

$$A_g : \frac{45.70}{} \text{ cm}^2$$

$$f_y : \frac{3516.82}{} \text{ kgf/cm}^2$$

$$N_e : \frac{75.915}{} \text{ t}$$

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, **N_e**, de uma barra com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica em relação a um ponto, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a), (b) e (c):

$$N_e : \frac{75.915}{} \text{ t}$$

(a) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia X da seção transversal:

$$N_{ex} : \frac{341.519}{} \text{ t}$$

Onde:

K_x·L_x: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$K_x \cdot L_x : \frac{4.500}{} \text{ m}$$

$$I_x : \frac{3437.00}{} \text{ cm}^4$$

$$E : \frac{2038736}{} \text{ kgf/cm}^2$$

(b) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y da seção transversal:

$$N_{ey} : \underline{75.915} \text{ t}$$

Onde:

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$K_y \cdot L_y : \underline{4.500} \text{ m}$$

I_y : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{764.00} \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

(c) Para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal Z:

$$N_{ez} : \underline{\text{¥}}$$

Onde:

$K_z \cdot L_z$: Comprimento de flambagem por torção.

$$K_z \cdot L_z : \underline{0.000} \text{ m}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : \underline{69502.00} \text{ cm}^6$$

G: Módulo de elasticidade transversal do aço.

$$G : \underline{784913} \text{ kgf/cm}^2$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{14.51} \text{ cm}^4$$

r_0 : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.

$$r_0 : \underline{9.59} \text{ cm}$$

Onde:

r_x, r_y : Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{8.67} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{4.09} \text{ cm}$$

X_0, Y_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$X_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$Y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) que não superam os valores limite dados na Tabela F.1.

Mesa: Elemento do Grupo 4 da Tabela F.1.

8.09 £ **13.48**

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura.

(b/t) : 8.09

Onde:

b: Largura.

b : 82.50 mm

t: Espessura.

t : 10.20 mm

(b/t)_{lim}: Relação limite entre largura e espessura.

(b/t)_{lim} : 13.48

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 2038736 kgf/cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 3516.82 kgf/cm²

Alma: Elemento do Grupo 2 da Tabela F.1.

29.13 £ **35.87**

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura.

(b/t) : 29.13

Onde:

b: Largura.

b : 180.60 mm

t: Espessura.

t : 6.20 mm

(b/t)_{lim}: Relação limite entre largura e espessura.

(b/t)_{lim} : 35.87

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 2038736 kgf/cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 3516.82 kgf/cm²

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

h : 0.288 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N971, para a combinação de ações
 PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+0.7·SCNorma+1.4·VENTO90°:1(X+).

M_{sa} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{sa} : \underline{3.493} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Já que $l \leq l_r$, deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G).

$$29.13 \leq 137.24$$

Onde:

$$l : \underline{29.13}$$

Sendo:

h : Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{180.60} \text{ mm}$$

t_w : Espessura da alma.

$$t_w : \underline{6.20} \text{ mm}$$

$$l_r : \underline{137.24}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} de vigas de alma não-esbelta deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

$$M_{Rd} : \underline{12.123} \text{ t}\cdot\text{m}$$

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} : \underline{16.401} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

$$W_x : \underline{341.99} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

(b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

Não é necessário, pois o comprimento de flambagem lateral é nulo.

(c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM
(ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

8.09 £ **9.15**

$M_{Rd} : \underline{12.123} \text{ t}\cdot\text{m}$

Onde:

$l : \underline{8.09}$

Sendo:

b_f : Largura da mesa comprimida.

$b_f : \underline{165.00} \text{ mm}$

t_f : Espessura da mesa comprimida.

$t_f : \underline{10.20} \text{ mm}$

$l_p : \underline{9.15}$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$

$M_{pl} : \underline{13.336} \text{ t}$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

$Z_x : \underline{379.20} \text{ cm}^3$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$g_{a1} : \underline{1.10}$

(d) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR
8800:2008, Anexo G):

29.13 £ **90.53**

$M_{Rd} : \underline{12.123} \text{ t}\cdot\text{m}$

Onde:

$l : \underline{29.13}$

Sendo:

$h : \underline{180.60} \text{ mm}$

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{6.20} \text{ mm}$$

$$I_p : \underline{90.53}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{pl} : \underline{13.336} \text{ t}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{379.20} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.027} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações

PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+0.7·SCNorma+1.4·VENTO90°:1(X+).

V_{sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{sd} : \underline{0.646} \text{ t}$$

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , é determinada pela expressão:

29.13 £ 59.22

 $V_{Rd} : \underline{23.905} \text{ t}$

Onde:

 $l : \underline{29.13}$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas. $h : \underline{180.60} \text{ mm}$ **t_w**: Espessura da alma. $t_w : \underline{6.20} \text{ mm}$ $l_p : \underline{59.22}$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem. $k_v : \underline{5.00}$ **E**: Módulo de elasticidade do aço. $E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$ **f_y**: Resistência ao escoamento do aço. $f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$ $V_{pl} : \underline{26.296} \text{ t}$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento. $A_w : \underline{12.46} \text{ cm}^2$ **d**: Altura total da seção transversal. $d : \underline{201.00} \text{ mm}$ **g_{a1}**: Coeficiente de segurança do material. $g_{a1} : \underline{1.10}$ **Resistência ao esforço axial e flexão combinados** (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Deve satisfazer:

 $h : \underline{0.317} \checkmark$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N971, para a combinação de ações

1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+0.7·SCNorma+1.4·VENTO90°:1(X+).

$N_{c,sa}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.	$N_{c,sa} : \underline{3.591} \text{ t}$
$M_{x,sa}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	$M_{x,sa} : \underline{3.478} \text{ t}\cdot\text{m}$
$M_{y,sa}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	$M_{y,sa} : \underline{0.000} \text{ t}\cdot\text{m}$

$$0.060 < 0.200$$

$$h : \underline{0.317}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3).	$N_{c,Rd} : \underline{60.234} \text{ t}$
$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).	$M_{x,Rd} : \underline{12.123} \text{ t}\cdot\text{m}$
	$M_{y,Rd} : \underline{4.012} \text{ t}\cdot\text{m}$

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

6.5.2 Verificação E.L.U. pilar externos

A Figura 42 apresenta o percentual de utilização do pilar externo.

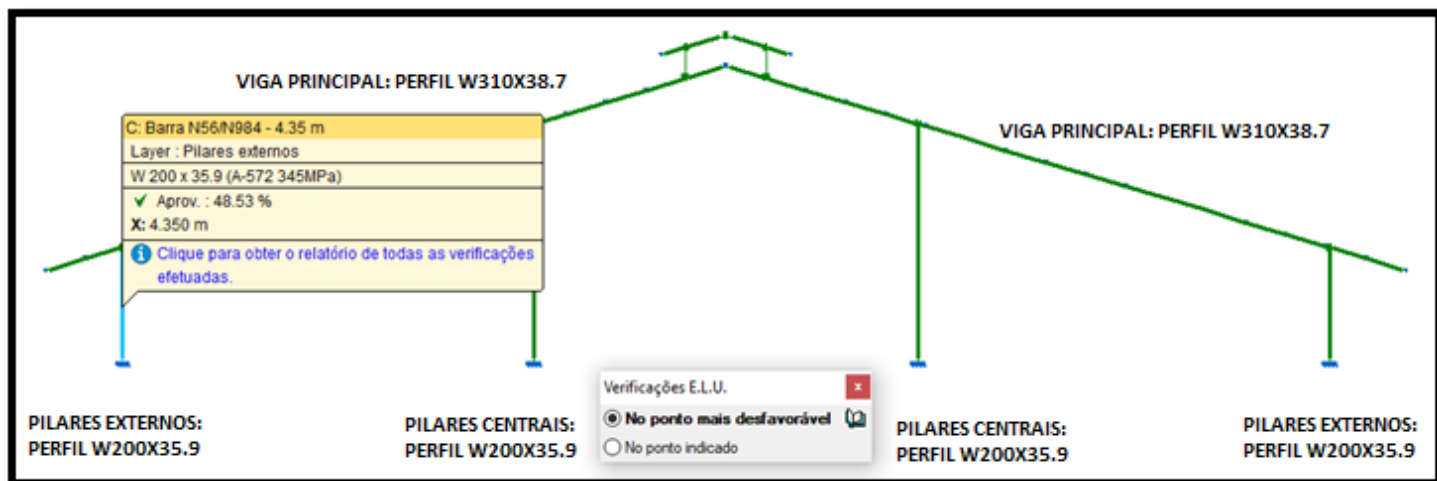
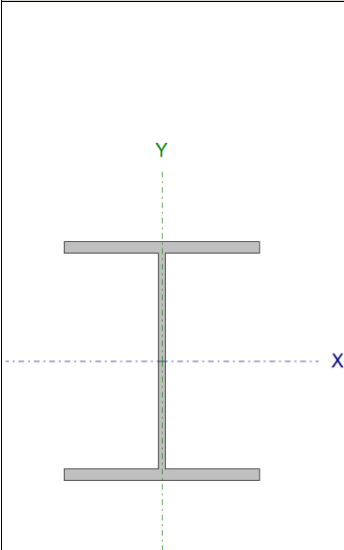


Figura 42 – Percentual de utilização dos pilares externos

Verificação do software Cype 3D:

Barra N56/N984

Perfil: W 200 x 35.9							
Material: Aço (A-572 345MPa)							
	Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _x ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N56	N984	4.350	45.70	3437.00	764.00	14.51
	Notas:						
	(1) Inércia em relação ao eixo indicado						
	(2) Momento de inércia à torção uniforme						
			Flambagem		Flambagem lateral		
			Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.	
	b		1.00	1.00	0.00	0.00	
	L _K		4.350	4.350	0.000	0.000	
C _b		-		1.000			
Notação:							
b: Coeficiente de flambagem							
L _K : Comprimento de flambagem (m)							
C _b : Fator de modificação para o momento crítico							

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	l	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	s t f	
N56/N984	l ≤ 200.0 Passa	x: 4.35 m h = 1.5	x: 0 m h = 9.8	x: 4.35 m h = 43.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	h = 8.0	x: 4.35 m h = 48.5	N.P. ⁽³⁾	N.P. ⁽⁴⁾	N.P. ⁽⁵⁾	PASSA h = 48.

Notação:

l: Limitação do índice de esbeltez

N_t: Resistência à tração

N_c: Resistência à compressão

M_x: Resistência à flexão eixo X

M_y: Resistência à flexão eixo Y

V_x: Resistência ao esforço cortante X

V_y: Resistência ao esforço cortante Y

NM_xM_y: Resistência ao esforço axial e flexão combinados

T: Resistência à torção

NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante

s t f: Resistência a interações de esforços e momento de torção

x: Distância à origem da barra

h: Coeficiente de aproveitamento (%)

N.P.: Não procede

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)										Estado
	l	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT _{s t f}	
<p><i>Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.P.):</i></p> <p>(1) A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.</p> <p>(2) A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.</p> <p>(3) A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.</p> <p>(4) Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.</p> <p>(5) Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momento fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.</p>											

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$$l : \underline{106.4} \checkmark$$

Onde:

l: Índice de esbeltez.

$$l_x : \underline{50.2}$$

$$l_y : \underline{106.4}$$

Sendo:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

$$K_x \cdot L_x : \underline{4.350} \text{ m}$$

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$K_y \cdot L_y : \underline{4.350} \text{ m}$$

r_x, r_y : Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{8.67} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{4.09} \text{ cm}$$

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.015} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N984, para a combinação de ações PP+Telha+PlacasFotovoltaicas+1.4·VENTO0°:2.

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. $N_{t,Sd} : \underline{2.241} \text{ t}$

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$N_{t,Rd} : \underline{146.108} \text{ t}$

Onde:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$A_g : \underline{45.70} \text{ cm}^2$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$g_{a1} : \underline{1.10}$

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$h : \underline{0.098} \checkmark$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N56, para a combinação de ações 1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

$N_{c,Sd} : \underline{6.238} \text{ t}$

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$N_{c,Rd} : \underline{63.837} \text{ t}$

Onde:

c : Fator de redução total associado à resistência à compressão.

$c : \underline{0.437}$

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$Q : \frac{1.000}{}$$

$$A_g : \frac{45.70}{} \text{ cm}^2$$

$$f_y : \frac{3516.82}{} \text{ kgf/cm}^2$$

$$g_{a1} : \frac{1.10}{}$$

Fator de redução c: (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$$c : \frac{0.437}{}$$

Onde:

l₀: Índice de esbeltez reduzido.

$$l_0 : \frac{1.407}{}$$

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

N_e: Força axial de flambagem elástica.

$$Q : \frac{1.000}{}$$

$$A_g : \frac{45.70}{} \text{ cm}^2$$

$$f_y : \frac{3516.82}{} \text{ kgf/cm}^2$$

$$N_e : \frac{81.241}{} \text{ t}$$

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, **N_e**, de uma barra com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica em relação a um ponto, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a), (b) e (c):

$$N_e : \frac{81.241}{} \text{ t}$$

(a) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia X da seção transversal:

$$N_{ex} : \frac{365.478}{} \text{ t}$$

Onde:

K_x·L_x: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$K_x \cdot L_x : \frac{4.350}{} \text{ m}$$

$$I_x : \frac{3437.00}{} \text{ cm}^4$$

$$E : \frac{2038736}{} \text{ kgf/cm}^2$$

(b) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y da seção transversal:

$$N_{ey} : \underline{81.241} \text{ t}$$

Onde:

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$K_y \cdot L_y : \underline{4.350} \text{ m}$$

I_y : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{764.00} \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

(c) Para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal Z:

$$N_{ez} : \underline{\text{¥}}$$

Onde:

$K_z \cdot L_z$: Comprimento de flambagem por torção.

$$K_z \cdot L_z : \underline{0.000} \text{ m}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : \underline{69502.00} \text{ cm}^6$$

G: Módulo de elasticidade transversal do aço.

$$G : \underline{784913} \text{ kgf/cm}^2$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{14.51} \text{ cm}^4$$

r_0 : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.

$$r_0 : \underline{9.59} \text{ cm}$$

Onde:

r_x, r_y : Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{8.67} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{4.09} \text{ cm}$$

X_0, Y_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$X_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$Y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) que não superam os valores limite dados na Tabela F.1.

Mesa: Elemento do Grupo 4 da Tabela F.1.

8.09 £ 13.48

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura.

(b/t) : 8.09

Onde:

b: Largura.

b : 82.50 mm

t: Espessura.

t : 10.20 mm

(b/t)_{lim}: Relação limite entre largura e espessura.

(b/t)_{lim} : 13.48

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 2038736 kgf/cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 3516.82 kgf/cm²

Alma: Elemento do Grupo 2 da Tabela F.1.

29.13 £ 35.87

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura.

(b/t) : 29.13

Onde:

b: Largura.

b : 180.60 mm

t: Espessura.

t : 6.20 mm

(b/t)_{lim}: Relação limite entre largura e espessura.

(b/t)_{lim} : 35.87

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 2038736 kgf/cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 3516.82 kgf/cm²

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

h : 0.438 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N984, para a combinação de ações
 1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

M_{sa} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. M_{sa} : 5.311 t·m

Já que $l \leq l_r$, deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G).

$29.13 \leq 137.24$

Onde:

l : 29.13

Sendo:

h : Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

h : 180.60 mm

t_w : Espessura da alma.

t_w : 6.20 mm

l_r : 137.24

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 2038736 kgf/cm²

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 3516.82 kgf/cm²

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} de vigas de alma não-esbelta deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

M_{Rd} : 12.123 t·m

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

M_{Rd} : 16.401 t·m

Onde:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

W_x : 341.99 cm³

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 3516.82 kgf/cm²

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

g_{a1} : 1.10

(b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

Não é necessário, pois o comprimento de flambagem lateral é nulo.

(c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$8.09 \leq 9.15$$

$$M_{Rd} : \underline{12.123} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$l : \underline{8.09}$$

Sendo:

b_f : Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{165.00} \text{ mm}$$

t_f : Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{10.20} \text{ mm}$$

$$l_p : \underline{9.15}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{pl} : \underline{13.336} \text{ t}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{379.20} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

(d) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$29.13 \leq 90.53$$

$$M_{Rd} : \underline{12.123} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$l : \underline{29.13}$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas. **h** : 180.60 mm

t_w: Espessura da alma. **t_w** : 6.20 mm

I_p : 90.53

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. **E** : 2038736 kgf/cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço. **f_y** : 3516.82 kgf/cm²

M_{pl} : 13.336 t

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástica. **Z_x** : 379.20 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. **f_y** : 3516.82 kgf/cm²

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material. **g_{a1}** : 1.10

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

h : 0.080 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações

1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

V_{sa}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

V_{sa} : 1.919 t

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , é determinada pela expressão:

$$29.13 \leq 59.22$$

$$V_{Rd} : \underline{23.905} \text{ t}$$

Onde:

$$l : \underline{29.13}$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{180.60} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{6.20} \text{ mm}$$

$$l_p : \underline{59.22}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{5.00}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$V_{pl} : \underline{26.296} \text{ t}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w : \underline{12.46} \text{ cm}^2$$

d: Altura total da seção transversal.

$$d : \underline{201.00} \text{ mm}$$

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.485} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N984, para a combinação de ações

1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

$N_{c,sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{c,Sd} : \underline{6.020} \text{ t}$$

$M_{x,sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{x,Sd} : \underline{5.311} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$M_{y,sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{y,Sd} : \underline{0.000} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$0.094 < 0.200$$

$$h : \underline{0.485}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3).

$$N_{c,Rd} : \underline{63.837} \text{ t}$$

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).

$$M_{x,Rd} : \underline{12.123} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M_{y,Rd} : \underline{4.012} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

6.5.3 Verificação E.L.U. viga principal

A Figura 43 apresenta o percentual de utilização da viga principal.

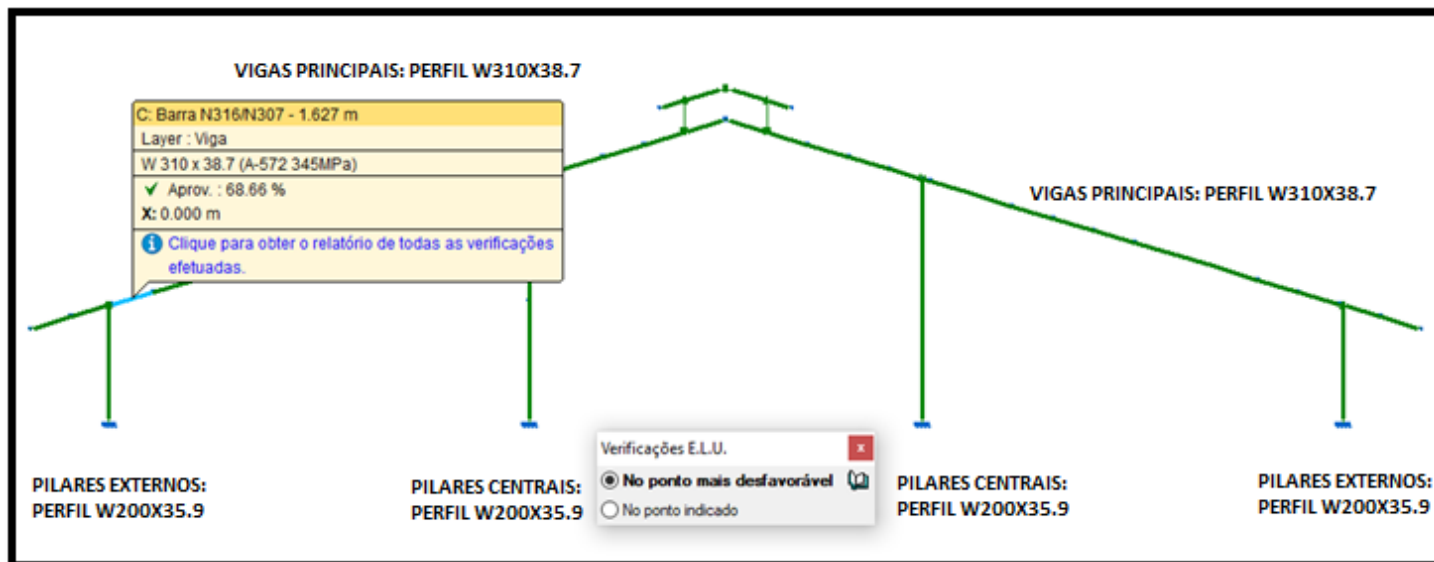
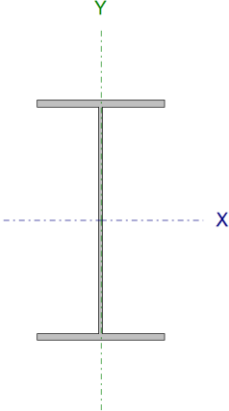


Figura 43 – Percentual de utilização da viga principal

Verificação do software Cype 3D:

Barra N316/N307

Perfil: W 310 x 38.7							
Material: Aço (A-572 345MPa)							
	Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _x ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N316	N307	1.627	49.70	8581.00	727.00	13.20
	Notas:						
	⁽¹⁾ Inércia em relação ao eixo indicado						
	⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme						
	Flambagem		Flambagem lateral				
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.			
b	1.00	1.00	3.00	3.00			
L _K	1.627	1.627	4.880	4.880			
C _b	-		1.000				
Notação:							
<i>b</i> : Coeficiente de flambagem							
<i>L_K</i> : Comprimento de flambagem (m)							
<i>C_b</i> : Fator de modificação para o momento crítico							

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Est
	l	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	s t f	
N316/N307	l ≤ 200.0 Passa	x: 1.627 m h = 1.1	x: 0 m h = 3.4	x: 0 m h = 66.9	x: 0 m h = 0.3	h < 0.1	x: 0 m h = 9.3	x: 0 m h = 68.7	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	x: 0 m h = 13.3	PA h =

Notação:

l: Limitação do índice de esbeltez*N_t*: Resistência à tração*N_c*: Resistência à compressão*M_x*: Resistência à flexão eixo X*M_y*: Resistência à flexão eixo Y*V_x*: Resistência ao esforço cortante X*V_y*: Resistência ao esforço cortante Y*NM_xM_y*: Resistência ao esforço axial e flexão combinados*T*: Resistência à torção*NMVT*: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante*s t f*: Resistência a interações de esforços e momento de torção*x*: Distância à origem da barra*h*: Coeficiente de aproveitamento (%)

N.P.: Não procede

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)										Est
	l	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	
<p><i>Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.P.):</i></p> <p><i>(1) A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.</i></p> <p><i>(2) Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto verificação não é necessária.</i></p>											

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$$l: \underline{42.6} \quad \checkmark$$

Onde:

l: Índice de esbeltez.

$$l_x: \underline{12.4}$$

$$l_y: \underline{42.6}$$

Sendo:

K_x·L_x: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

$$\mathbf{K_x \cdot L_x}: \underline{1.627} \text{ m}$$

K_y·L_y: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$\mathbf{K_y \cdot L_y}: \underline{1.627} \text{ m}$$

r_x,r_y: Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$\mathbf{r_x}: \underline{13.14} \text{ cm}$$

$$\mathbf{r_y}: \underline{3.82} \text{ cm}$$

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$h: \underline{0.011} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N307, para a combinação de ações PP+Telha+PlacasFotovoltaicas+1.4·VENTO0°:2.

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável. $N_{t,Sd} : \underline{1.708} \text{ t}$

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{t,Rd} : \underline{158.896} \text{ t}$$

Onde:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{49.70} \text{ cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.034} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N316, para a combinação de ações

1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{c,Sd} : \underline{2.977} \text{ t}$$

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{c,Rd} : \underline{86.944} \text{ t}$$

Onde:

c : Fator de redução total associado à resistência à compressão.

$$c : \underline{0.593}$$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{0.923}$$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{49.70} \text{ cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

Fator de redução c: (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$$c : \underline{0.593}$$

Onde:

l_0 : Índice de esbeltez reduzido.

$$l_0 : \underline{1.117}$$

Sendo:

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{0.923}$$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{49.70} \text{ cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

N_e : Força axial de flambagem elástica.

$$N_e : \underline{129.188} \text{ t}$$

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, N_e , de uma barra com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica em relação a um ponto, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a), (b) e (c):

$$N_e : \underline{129.188} \text{ t}$$

(a) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia X da seção transversal:

$$N_{ex} : \underline{6518.959} \text{ t}$$

Onde:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

$$K_x \cdot L_x : \underline{1.627} \text{ m}$$

I_x : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

$$I_x : \underline{8581.00} \text{ cm}^4$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

(b) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y da seção transversal:

$$N_{ey} : \underline{552.300} \text{ t}$$

Onde:

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$K_y \cdot L_y : \underline{1.627} \text{ m}$$

I_y : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{727.00} \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

(c) Para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal Z:

$$N_{ez} : \underline{129.188} \text{ t}$$

Onde:

$K_z \cdot L_z$: Comprimento de flambagem por torção.

$$K_z \cdot L_z : \underline{4.880} \text{ m}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : \underline{163728.00} \text{ cm}^6$$

G: Módulo de elasticidade transversal do aço.

$$G : \underline{784913} \text{ kgf/cm}^2$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{13.20} \text{ cm}^4$$

r_0 : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.

$$r_0 : \underline{13.69} \text{ cm}$$

Onde:

r_x, r_y : Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{13.14} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{3.82} \text{ cm}$$

X_0, Y_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$X_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$Y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

As barras submetidas a força axial de compressão, nas quais os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) maiores que os valores limite dados na Tabela F.1, têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q : \underline{0.923}$$

Onde:

Q_s : Fator de redução que tem em conta a flambagem local dos elementos AL. Quando existem dois ou mais elementos AL com fatores de redução Q_s diferentes, adota-se o menor destes fatores.

$$Q_s : \frac{1.000}{\quad}$$

Mesa: Elemento do Grupo 4 da Tabela F.1.

$$8.51 \text{ } \leq \text{ } 13.48$$

$$Q_s : \frac{1.000}{\quad}$$

Sendo:

(b/t) : Relação entre largura e espessura.

$$(b/t) : \frac{8.51}{\quad}$$

Onde:

b : Largura.

$$b : \frac{82.50}{\quad} \text{ mm}$$

t : Espessura.

$$t : \frac{9.70}{\quad} \text{ mm}$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \frac{2038736}{\quad} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \frac{3516.82}{\quad} \text{ kgf/cm}^2$$

Q_a : Fator de redução que leva em conta a flambagem local dos elementos AA.

$$Q_a : \frac{0.923}{\quad}$$

Sendo:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \frac{49.70}{\quad} \text{ cm}^2$$

A_{ef} : Área efetiva da seção transversal da barra.

$$A_{ef} : \frac{45.86}{\quad} \text{ cm}^2$$

Alma: Elemento do Grupo 2 da Tabela F.1.

$$50.10 > 35.87$$

$$b_{ef} : \frac{224.32}{\quad} \text{ mm}$$

Sendo:

(b/t) : Relação entre largura e espessura.

$$(b/t) : \frac{50.10}{\quad}$$

Onde:

b : Largura.

$$b : \frac{290.60}{\quad} \text{ mm}$$

t : Espessura.

$$t : \frac{5.80}{\quad} \text{ mm}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.	E : <u>2038736</u> kgf/cm ²
f_y: Resistência ao escoamento do aço.	f_y : <u>3516.82</u> kgf/cm ²
C_a: Coeficiente para elementos que não sejam mesas ou almas de seções tubulares retangulares.	C_a : <u>0.34</u>

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.669} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N316, para a combinação de ações
1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

M_{sd} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	M_{sd} : <u>7.409</u> t·m
--	--

Já que 'l < l_r', deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G).

$$50.10 \leq 137.24$$

Onde:

$$l : \underline{50.10}$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.	h : <u>290.60</u> mm
---	-----------------------------

t_w: Espessura da alma.	t_w : <u>5.80</u> mm
--	---------------------------------------

$$l_r : \underline{137.24}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.	E : <u>2038736</u> kgf/cm ²
--	---

f_y: Resistência ao escoamento do aço.	f_y : <u>3516.82</u> kgf/cm ²
---	---

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} de vigas de alma não-esbelta deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

- (a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} : \underline{11.083} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M_{Rd} : \underline{26.549} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

$$W_x : \underline{553.61} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

- (b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$127.59 > 119.10$$

$$M_{Rd} : \underline{11.083} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$l : \underline{127.59}$$

Sendo:

$L_{b,inf}$: Distância entre pontos travados à flambagem lateral.

$$L_{b,inf} : \underline{4.880} \text{ m}$$

r_y : Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão.

$$r_y : \underline{3.82} \text{ cm}$$

$$I_r : \underline{119.10}$$

Sendo:

I_y : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{727.00} \text{ cm}^4$$

J : Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{13.20} \text{ cm}^4$$

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : \underline{163728.00} \text{ cm}^6$$

$$b_1 : \underline{0.051} \text{ cm-1}$$

$$M_r : \underline{13.629} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Sendo:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$W_x : \underline{553.61} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$s_r : \underline{1055.05} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{cr} : \underline{12.191} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Sendo:

C_b : Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme.

$$C_b : \underline{1.00}$$

$$M_{pl} : \underline{21.643} \text{ t}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$Z_x : \underline{615.40} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

(c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$8.51 \leq 9.15$$

$$M_{Rd} : \underline{19.675} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$l : \underline{8.51}$$

Sendo:

$$\mathbf{b_r} : \text{Largura da mesa comprimida.} \quad \mathbf{b_r} : \frac{165.00}{\quad} \text{ mm}$$

$$\mathbf{t_r} : \text{Espessura da mesa comprimida.} \quad \mathbf{t_r} : \frac{9.70}{\quad} \text{ mm}$$

$$\mathbf{I_p} : \frac{9.15}{\quad}$$

Sendo:

$$\mathbf{E} : \text{Módulo de elasticidade do aço.} \quad \mathbf{E} : \frac{2038736}{\quad} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\mathbf{f_y} : \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad \mathbf{f_y} : \frac{3516.82}{\quad} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\mathbf{M_{pl}} : \frac{21.643}{\quad} \text{ t}$$

Onde:

$$\mathbf{Z_x} : \text{Módulo de resistência plástico.} \quad \mathbf{Z_x} : \frac{615.40}{\quad} \text{ cm}^3$$

$$\mathbf{f_y} : \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad \mathbf{f_y} : \frac{3516.82}{\quad} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\mathbf{g_{a1}} : \text{Coeficiente de segurança do material.} \quad \mathbf{g_{a1}} : \frac{1.10}{\quad}$$

(d) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA
(ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\mathbf{50.10} \quad \mathbf{\text{£}} \quad \mathbf{90.53}$$

$$\mathbf{M_{Rd}} : \frac{19.675}{\quad} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$\mathbf{l} : \frac{50.10}{\quad}$$

Sendo:

$$\mathbf{h} : \text{Altura da alma, tomada igual à} \\ \text{distancia entre as faces internas das} \\ \text{mesas.} \quad \mathbf{h} : \frac{290.60}{\quad} \text{ mm}$$

$$\mathbf{t_w} : \text{Espessura da alma.} \quad \mathbf{t_w} : \frac{5.80}{\quad} \text{ mm}$$

$$\mathbf{I_p} : \frac{90.53}{\quad}$$

Sendo:

$$\mathbf{E} : \text{Módulo de elasticidade do aço.} \quad \mathbf{E} : \frac{2038736}{\quad} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\mathbf{f_y} : \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad \mathbf{f_y} : \frac{3516.82}{\quad} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{pl} : \underline{21.643} \text{ t}$$

Onde:

$$\begin{aligned} Z_x: \text{Módulo de resistência plástico.} & \quad Z_x : \underline{615.40} \text{ cm}^3 \\ f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço.} & \quad f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2 \\ g_{a1}: \text{Coeficiente de segurança do material.} & \quad g_{a1} : \underline{1.10} \end{aligned}$$

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.003} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N316, para a combinação de ações
1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+0.7·SCNorma+1.4·VENTO90°:2(X+).

$$M_{sa}^+ : \text{Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.} \quad M_{sa}^+ : \underline{0.001} \text{ t}\cdot\text{m}$$

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

$$M_{Rd} : \underline{0.481} \text{ t}\cdot\text{m}$$

- (a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} : \underline{4.226} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$\begin{aligned} W_y: \text{Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em} & \quad W_y : \underline{88.12} \text{ cm}^3 \\ \text{relação ao eixo de flexão.} & \\ f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço.} & \quad f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2 \\ g_{a1}: \text{Coeficiente de segurança do material.} & \quad g_{a1} : \underline{1.10} \end{aligned}$$

- (b) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$8.51 \text{ } \text{€} \quad 9.15$$

$$M_{Rd} : \underline{4.313} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$l : \underline{8.51}$$

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{165.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{9.70} \text{ mm}$$

$$l_p : \underline{9.15}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{pl} : \underline{4.744} \text{ t}$$

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

$$Z_y : \underline{134.90} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

(c) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$50.10 > 33.71$$

$$M_{Rd} : \underline{0.481} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$l : \underline{50.10}$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{290.60} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{5.80} \text{ mm}$$

$$l_r : \underline{33.71}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : $\frac{2038736}{\text{kgf/cm}^2}$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : $\frac{3516.82}{\text{kgf/cm}^2}$

M_{cr} : $\frac{0.529}{\text{t}\cdot\text{m}}$

Sendo:

$W_{ef,y}$: Módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida de largura igual a b_{ef} dada por F.3.2, com s igual a f_y .

$W_{ef,y}$: $\frac{36.42}{\text{cm}^3}$

W_y : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

W_y : $\frac{88.12}{\text{cm}^3}$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : $\frac{3516.82}{\text{kgf/cm}^2}$

M_{pl} : $\frac{4.744}{\text{t}}$

Onde:

Z_y : Módulo de resistência plástico.

Z_y : $\frac{134.90}{\text{cm}^3}$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : $\frac{3516.82}{\text{kgf/cm}^2}$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

g_{a1} : $\frac{1.10}{\text{---}}$

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$h < \frac{0.001}{\text{---}} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações

$$1.4 \cdot \text{PP} + 1.4 \cdot \text{Telha} + 1.4 \cdot \text{PlacasFotovoltaicas} + 0.7 \cdot \text{SCNorma} + 1.4 \cdot \text{VENTO90}^\circ:2(\text{X}+).$$

V_{sd} : Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

V_{sd} : $\frac{0.001}{\text{t}}$

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , é determinada pela expressão:

8.51 £ 29.01

$$V_{Rd} : \underline{61.404} \text{ t}$$

Onde:

$$I : \underline{8.51}$$

Sendo:

b_f : Largura das mesas.

$$b_f : \underline{165.00} \text{ mm}$$

t_f : Espessura das mesas.

$$t_f : \underline{9.70} \text{ mm}$$

$$I_p : \underline{29.01}$$

Sendo:

k_v : Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{1.20}$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$V_{pl} : \underline{67.544} \text{ t}$$

Sendo:

A_w : Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w : \underline{32.01} \text{ cm}^2$$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.093} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N316, para a combinação de ações
1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

V_{sd} : Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.
A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , é determinada pela expressão:

$$V_{sd} : \underline{3.201} \text{ t}$$

$$50.10 \text{ } \underline{59.22}$$

$$V_{Rd} : \underline{34.490} \text{ t}$$

Onde:

$$I : \underline{50.10}$$

Sendo:

h : Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{290.60} \text{ mm}$$

t_w : Espessura da alma.

$$t_w : \underline{5.80} \text{ mm}$$

$$I_p : \underline{59.22}$$

Sendo:

k_v : Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{5.00}$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$V_{pl} : \underline{37.939} \text{ t}$$

Sendo:

A_w : Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w : \underline{17.98} \text{ cm}^2$$

d : Altura total da seção transversal.

$$d : \underline{310.00} \text{ mm}$$

g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$g_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.687} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N316, para a combinação de ações
1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma.

$N_{c,sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{c,sd} : \underline{2.977} \text{ t}$$

$M_{x,sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{x,sd} : \underline{7.409} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$M_{y,sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{y,sd} < \underline{0.001} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$0.034 < 0.200$$

$$h : \underline{0.687}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3).

$$N_{c,Rd} : \underline{86.944} \text{ t}$$

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).

$$M_{x,Rd} : \underline{11.083} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M_{y,Rd} : \underline{0.481} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.133} \quad \checkmark$$

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se no nó N316, para a combinação de ações 1.4·PP+1.4·Telha+1.4·PlacasFotovoltaicas+1.4·SCNorma no ponto da seção transversal de coordenadas X = 0.00 mm, Y = 0.00 mm em relação ao centro de gravidade.

As tensões tangenciais t_{sd} são dadas por:

$$t_{sd} : \underline{196.61} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

$$t_{v_{x,sd}} : \underline{0.00} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

$V_{x,sd}^+$: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{x,sd}^+ : \underline{0.000} \text{ t}$$

S_y : Momento estático, em relação ao eixo Y, da parte da seção situada a um lado do ponto de verificação.

$$S_y : \underline{0.00} \text{ cm}^3$$

I_y : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{727.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.80} \text{ mm}$$

$$t_{v_{y,sd}} : \underline{196.61} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

$V_{y,sd}^-$: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{y,sd}^- : \underline{3.201} \text{ t}$$

S_x : Momento estático, em relação ao eixo X, da parte da seção situada a um lado do ponto de verificação.

$$S_x : \underline{305.70} \text{ cm}^3$$

I_x : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

$$I_x : \underline{8581.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.80} \text{ mm}$$

$$t_{tsd} : \underline{0.00} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

T_{sd}: Momento de torção solicitante de cálculo, desfavorável.

J: Constante de torção da seção transversal.

t: Espessura.

$$\mathbf{T_{sd}} : \underline{0.000} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$\mathbf{J} : \underline{13.20} \text{ cm}^4$$

$$\mathbf{t} : \underline{5.80} \text{ mm}$$

A tensão resistente de cálculo, t_{Rd} , é dada pelo menor valor entre os obtidos por a) e b):

$$\mathbf{t_{Rd}} : \underline{1483.56} \text{ kgf/cm}^2$$

(a) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de escoamento sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\mathbf{t_{Rd}} : \underline{1918.27} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

g_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\mathbf{f_y} : \underline{3516.82} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\mathbf{g_{a1}} : \underline{1.10}$$

(b) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão cisalhamento:

$$\mathbf{t_{Rd}} : \underline{1483.56} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

c: Fator de redução total associado à resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3).

$$\mathbf{c} : \underline{0.773}$$

Sendo:

$$\mathbf{l_0} : \underline{0.784}$$

$$\mathbf{t_e} : \underline{3436.79} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\mathbf{s_E} : \underline{687.36} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

k_v : Coeficiente de flambagem (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3).	k_v : <u>5.00</u>
E : Módulo de elasticidade do aço.	E : <u>2038736</u> kgf/cm ²
n : Coeficiente de Poisson.	n : <u>0.30</u>
t : Espessura.	t : <u>5.80</u> mm
h : Largura.	h : <u>300.30</u> mm
f_y : Resistência ao escoamento do aço.	f_y : <u>3516.82</u> kgf/cm ²
g_{a1} : Coeficiente de segurança do material.	g_{a1} : <u>1.10</u>

6.6 Verificação dos Estados Limites de Serviço - ELS

Para a análise dos estados limites de serviço foi adotada a combinação frequente. O caso mais desfavorável para os pilares centrais foi a combinação: 1,0(PP+Telha+PlacasFotovoltaicas) + 0,7S.C. + 0,3VENTO90°:1(X+). Essa combinação resultou em um deslocamento horizontal dos pilares de 8,24mm (Figura 44).

O limite de deslocamento estabelecido pela ABNT NBR8800:2008 para esses elementos é de $H/400$. Dessa forma, tem-se: $9300/400=23,25\text{mm} \geq 8,24\text{mm}$. ATENDE!

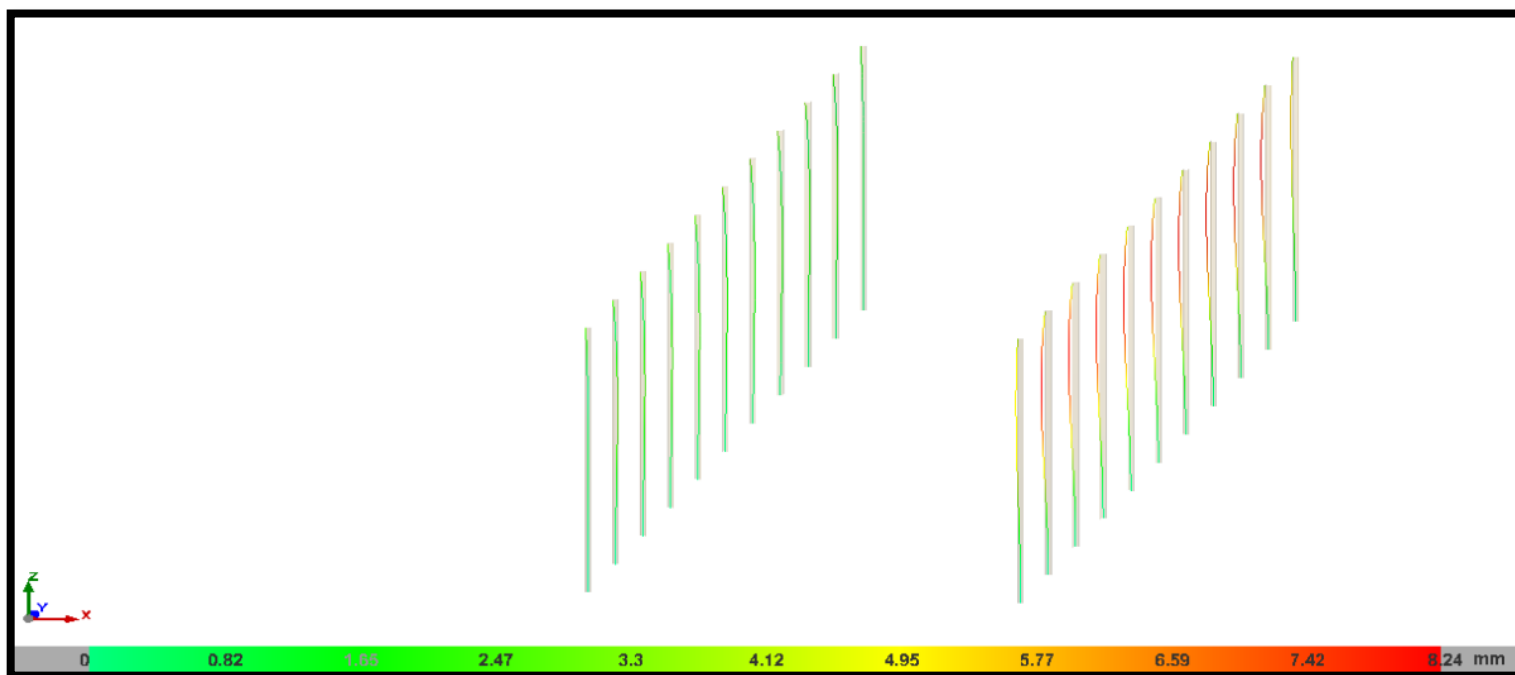


Figura 44 – Deslocamento horizontal dos pilares centrais

O caso mais desfavorável para os pilares externos foi a combinação: $1,0(\text{PP}+\text{Telha}+\text{PlacasFotovoltaicas}) + 0,7\text{S.C.} + 0,3\text{VENTO}90^\circ:1(\text{X}+)$. Essa combinação resultou em um deslocamento horizontal dos pilares de 5,21mm (Figura 45).

O limite de deslocamento estabelecido pela ABNT NBR8800:2008 é de $H/400$. Dessa forma, tem-se: $4500/400=11,25\text{mm} \geq 5,21\text{mm}$. ATENDE!

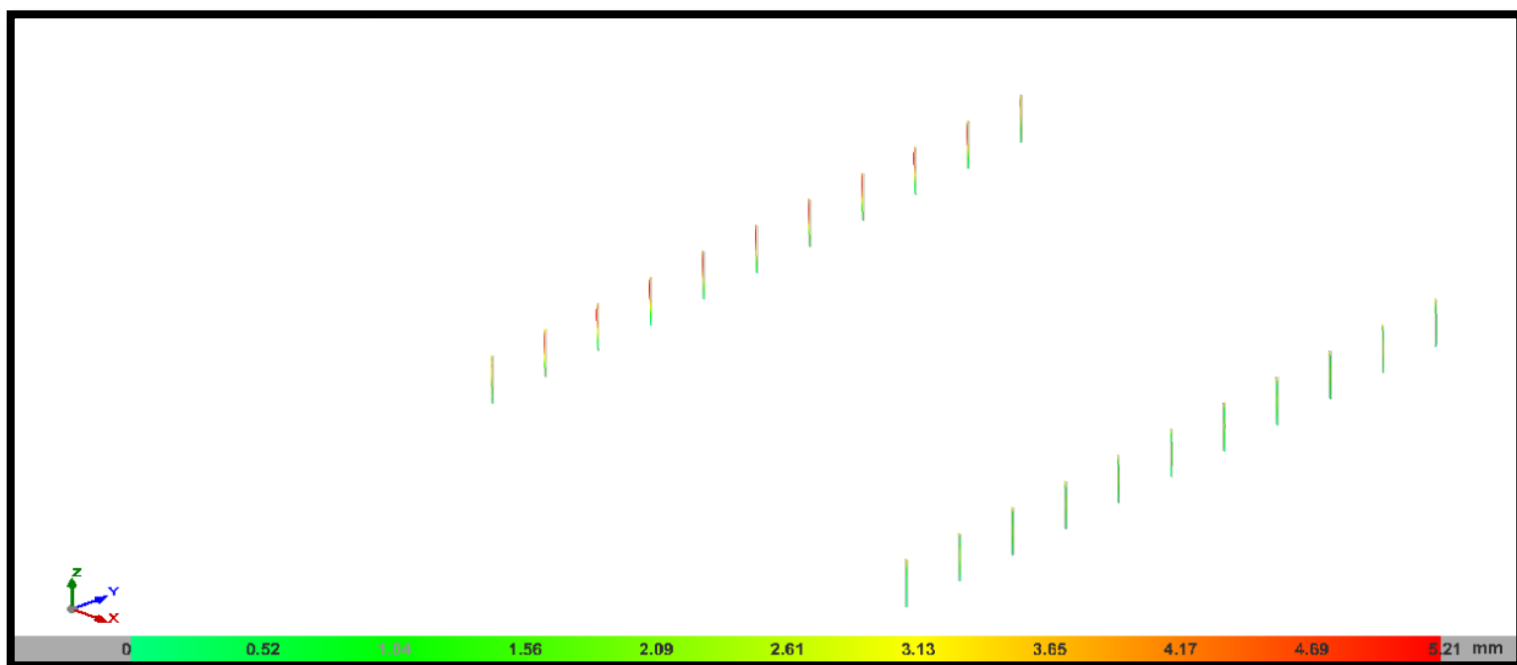


Figura 45 – Deslocamento horizontal dos pilares externos

O caso mais desfavorável para as vigas principais foi a combinação: $1,0(\text{PP}+\text{Telha}+\text{PlacasFotovoltaicas}) + 0,7\text{S.C.} + 0,3\text{VENTO}90^\circ:1(\text{X}+)$. Essa combinação resultou em um deslocamento vertical das vigas de 55,69mm (Figura 46).

O limite de deslocamento estabelecido pela ABNT NBR8800:2008 para esses elementos é de $L/250$. Dessa forma, tem-se: $16700/250=66,80\text{mm} \geq 55,69\text{mm}$. ATENDE!

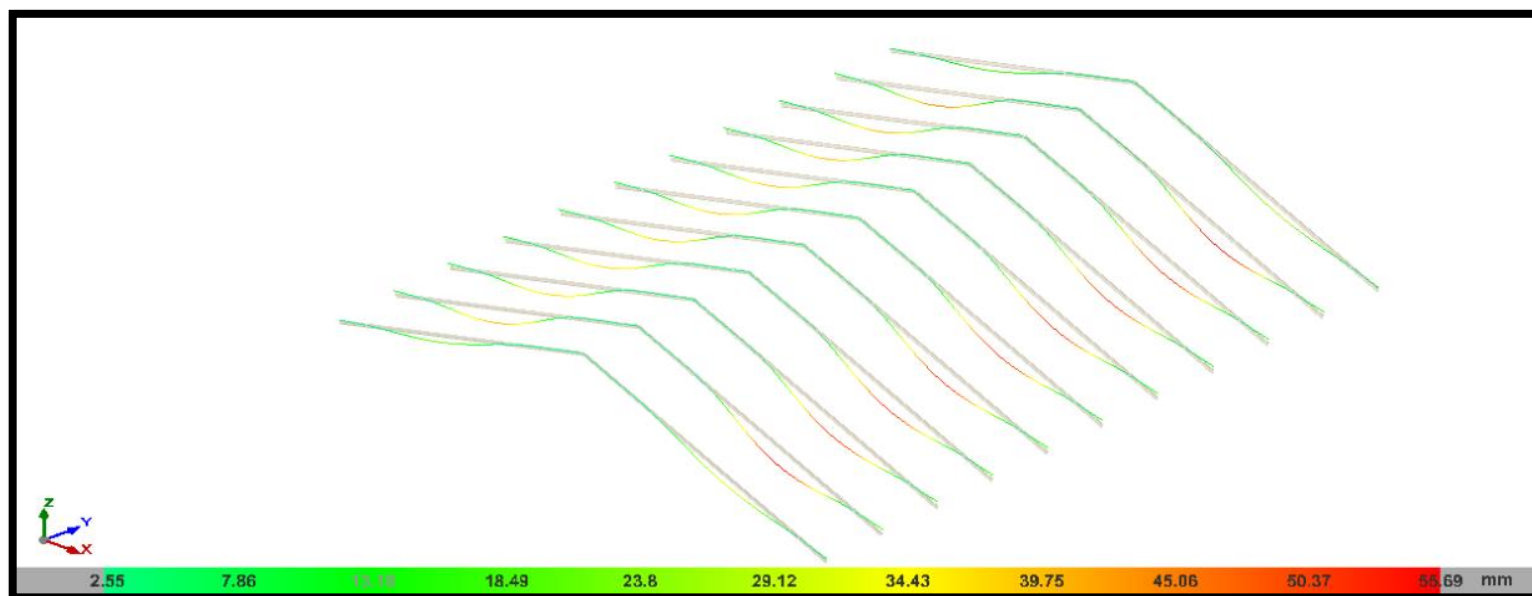


Figura 46 – Deslocamento vertical das vigas principais da cobertura

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o dimensionamento completo de uma estrutura utilizada para o trato de animais de grande porte, denominada como *Compost Barn*. Com esse estudo concluiu-se a importância de se fazer uma análise completa da estrutura visando a segurança, economia e durabilidade. Outra premissa indispensável é tomar sempre a ABNT NBR 8800:2008 como referência para o dimensionamento de estruturas de aço, garantindo assim que as estruturas tenham o desempenho esperado.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro: Abnt, 1988. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto edifícios. Rio de Janeiro: Abnt, 2008.

CALDATO, Emília Mara Rabelo. **MANUAL TÉCNICO DE CONSTRUÇÃO E MANEJO DE COMPOST BARN PARA VACAS LEITEIRAS**. 2019. 42 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Zootecnia, Universidade Federal da Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/27595/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 abr. 2020.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de Aço**: conceitos, técnicas e linguagem. São Paulo: Zigurate, 2015. 316 p.

FAKURY, Ricardo H.; SILVA, Ana Lydia R. Castro e; CALDAS, Rodrigo
B. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto. São Paulo: Pearson, 2016. 496 p.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de Aço**: dimensionamento prático de acordo com a nbr 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 357 p.