

# MEMÓRIA DE CÁLCULO ESTRUTURAS SUPORTE PARA PLACAS FOTOVOLTAICAS

**CLIENTE: FIXUM**

## 1. Características:

Espaçamento entre pilares: 2,8m

Cobertura em placas fotovoltaicas;

## 2. Sistema estrutural:

Transversal: Formado por semipórticos hiperestáticos, constituídos por perfis metálicos;

Longitudinal: Pela instalação de contraventamentos verticais e horizontais;

## 3. Especificações:

Tabela de materiais a serem utilizados			
MATERIAL	DESCRIÇÃO		
BARAS CIRCULARES	ASTM A - 36		
CHAPAS DOBRADAS	ASTM A -36		
PERFIS LAMINADOS	ASTM A - 588		
PARAFUSOS ESTRUTURAS PRINCIPAIS	ASTM A - 325		
PARAFUSOS ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS	ASTM A -307		
SOLDA	ELETRODO E 70		

TABELA 1

## 4. Normas adotadas:

- 4.1. NBR 8800 - Projeto e Execução de estruturas em aço;
- 4.2. NBR 14762 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio;
- 4.3. NBR 15575-2 – Requisitos para sistemas estruturais;
- 4.4. NBR 6323 - Produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente
- 4.5. NBR 6120 - Cargas para cálculo de estruturas de edificações;
- 4.6. NBR 6123 - Forças devido ao vento em edificações;
- 4.7. NBR 8681 - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento

5. Cargas adotadas:

5.1 Peso Próprio (PP)

Estimada em 5 kgf/m<sup>2</sup>

Para uma faixa de influência de 2,0m temos:

$$q_{PP} = 5 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \times 2,8\text{m}$$

$$q_{PP} = 14 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

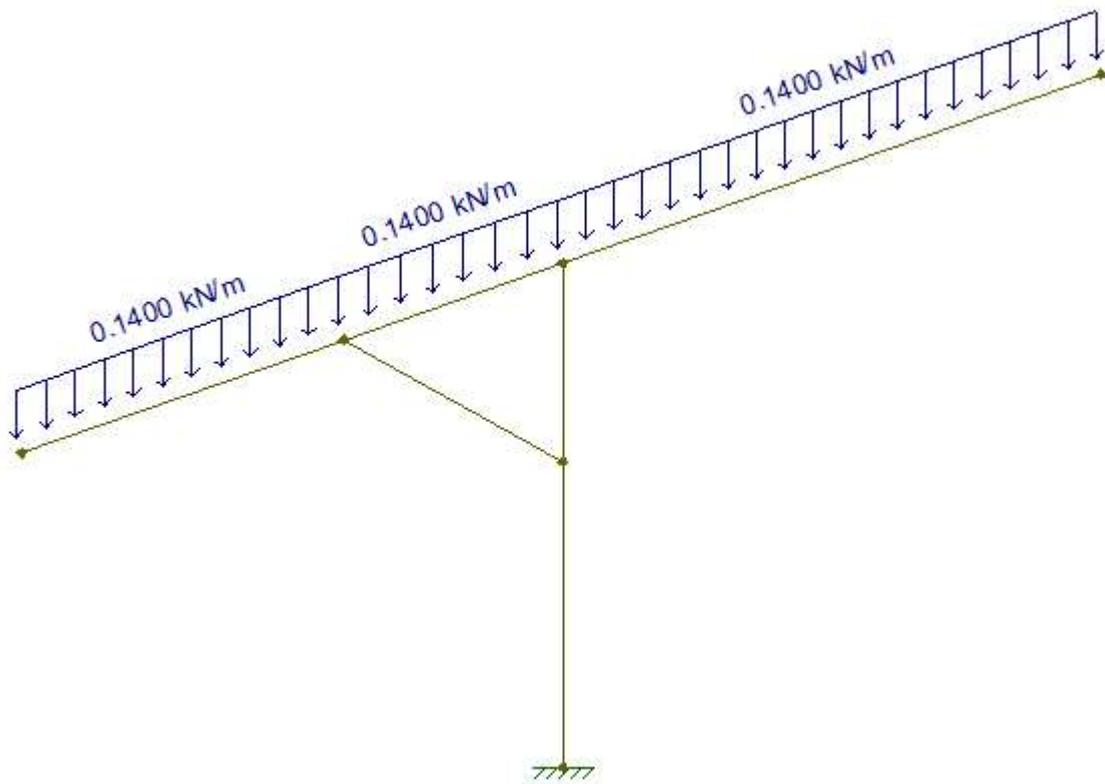


Figura 1

## 5.2 Ações permanentes (AP)

São constituídas pelo peso dos demais componentes da estrutura, tais como terças, telhas, contraventamentos, correntes rígidas e estabilizadores. Para tanto temos:

Placas Voltaicas = 20 kgf/m<sup>2</sup>;

Contraventamentos = 0,5 kgf/m<sup>2</sup>;

Estabilizadores = 0,5 kgf/m<sup>2</sup>

TOTAL = 21 kgf/m<sup>2</sup>

Para o vão de 2,8m temos:

$$q_{AP} = 21 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \times 2,8\text{m}$$

$$q_{AP} = 58,8 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

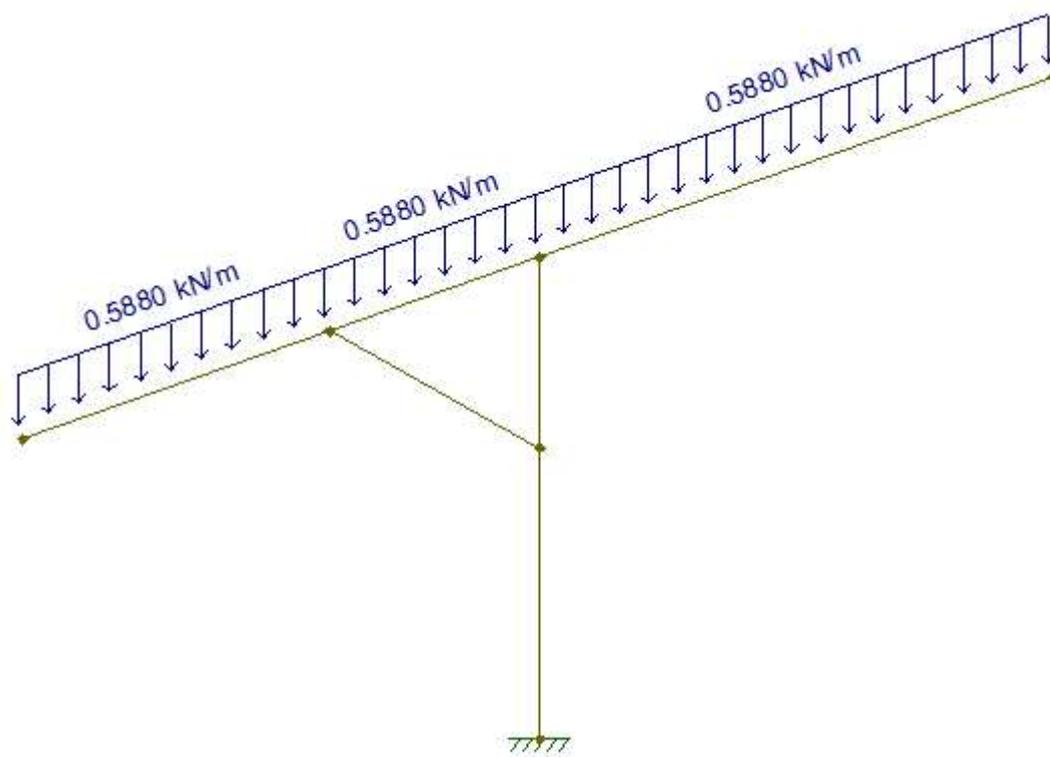


Figura 2

### 5.3 Sobrecarga de Norma (SCN)

$$SCN = 25 \text{ kgf/m}^2$$

Para o vão de 2,8m temos:

$$q_{SCN} = 25 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \times 2,8\text{m}$$

$$q_{SCN} = 70 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

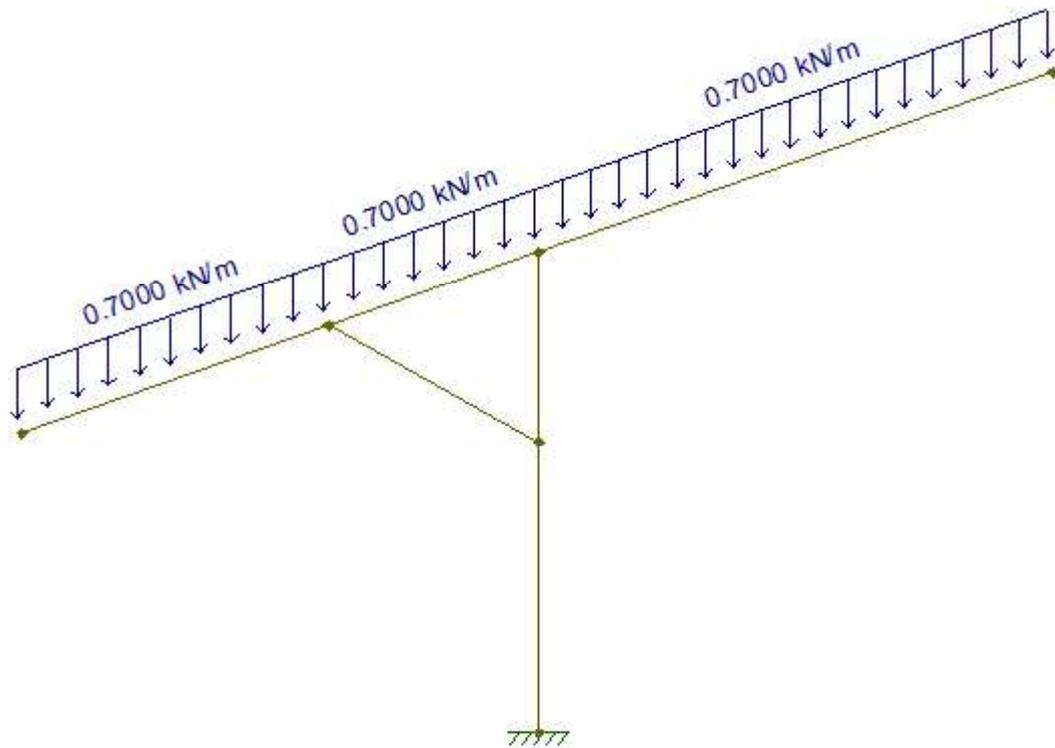


Figura 3

#### 5.4 Vento (VTO)

Para a determinação das cargas de vento, utilizamos a Velocidade básica ( $V_0$ ) de 45m/s, que atende a maior parte da região Sul / Sudeste

Os cálculos referentes ao carregamento proveniente do vento, foram executados através do software

Visualventos:

Dados Geométricos

$$b = 3,00 \text{ m}$$

$$a = 40,00 \text{ m}$$

$$b_1 = 2 * h$$

$$b_1 = 2 * 1,80$$

$$b_1 = 3,60\text{m}$$

ou

$$b_1 = b/2$$

$$b_1 = 3,00/2$$

$$b_1 = 1,50\text{m}$$

Adota-se o menor valor, portanto

$$b_1 = 1,50 \text{ m}$$

$$a_1 = b/3$$

$$a_1 = 3,00/3$$

$$a_1 = 1,00\text{m}$$

ou

$$a_1 = a/4$$

$$a_1 = 40,00/4$$

$$a_1 = 10,00\text{m}$$

Adota-se o maior valor, porém  $a_1 \leq 2 * h$

$$2 * 1,80 = 3,60 \text{ m}$$

Portanto

$$a_1 = 3,60 \text{ m}$$

$$a_2 = (a/2) - a_1$$

$$a_2 = (40,00/2) - 3,60$$

$$a_2 = 16,40 \text{ m}$$

$$h = 1,80 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,80 \text{ m}$$

$$\beta = 28,00^\circ$$

$$d = 2,00 \text{ m}$$

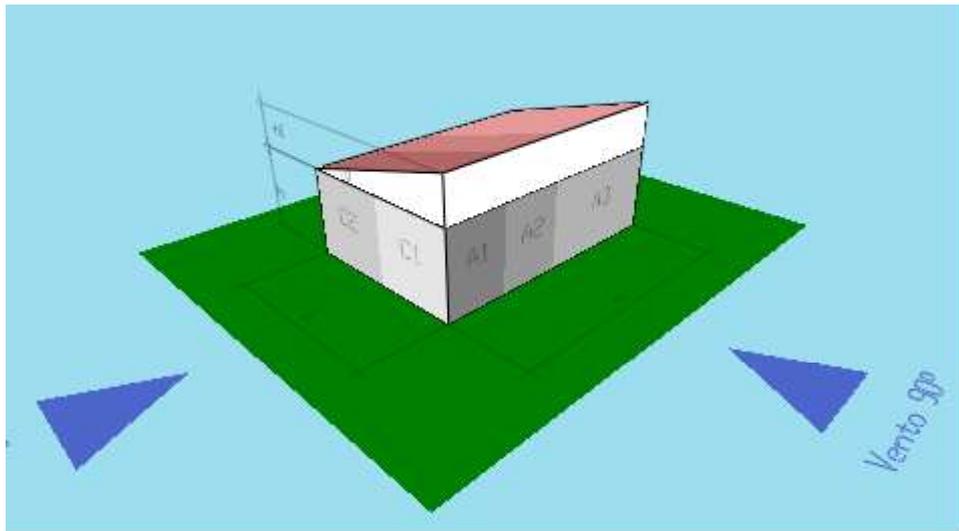


Figura 4

Velocidade básica do vento

$V_0 = 45,00 \text{ m/s}$

Fator Topográfico (S1)

Terreno plano ou fracamente acidentado

$S_1 = 1,00$

Fator de Rugosidade (S2)

Categoria III

Classe B

Parâmetros retirados da Tabela 2 da NBR6123/88 que relaciona Categoria e Classe

$b = 0,94$

$Fr = 0,98$

$p = 0,11$

$S_2 = b * Fr * (z/10)^{exp p}$

$S_2 = 0,94 * 0,98 * (2,60/10)^{exp 0,11}$

$S_2 = 0,80$

Fator Estático (S3)

Grupo 4

$S_3 = 0,88$

Coefficiente de pressão externa

Paredes

Vento  $0^\circ$

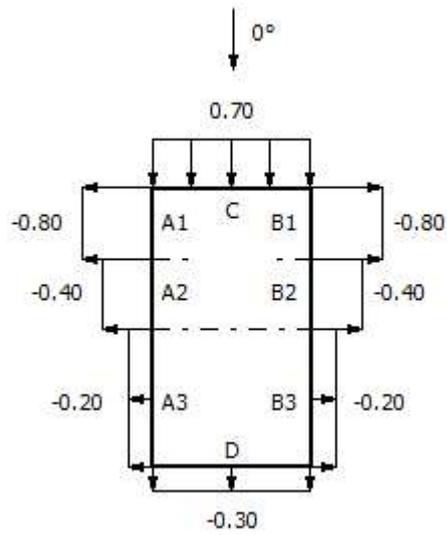


Figura 5

Vento 90°

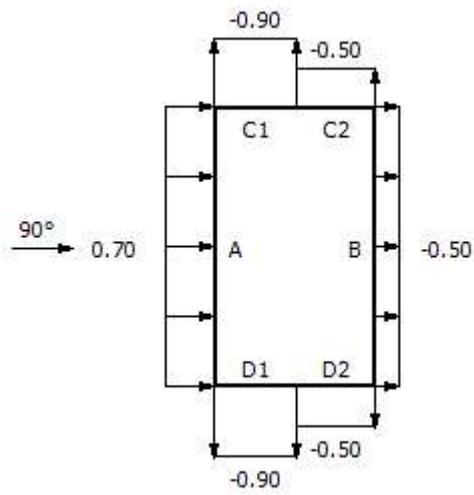


Figura 6

Telhado  
Vento 0°

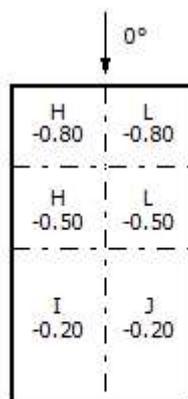


Figura 7

Vento 90°

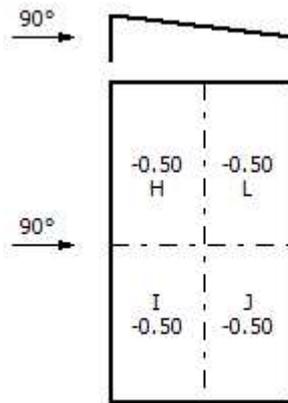


Figura 8

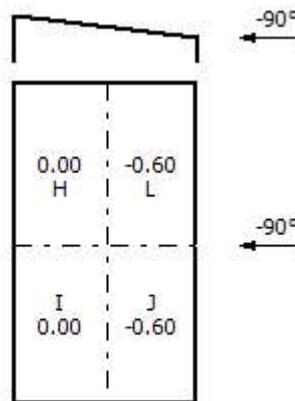


Figura 9

Cpe médio = 0,00

Coeficiente de pressão interno

Cpi 1 = -0,30

Cpi 2 = 0,00

Velocidade Característica de Vento

$$V_k = V_o * S_1 * S_2 * S_3$$

$$V_k = 45,00 * 1,00 * 0,80 * 0,88$$

$$V_k = 31,66 \text{ m/s}$$

Pressão Dinâmica

$$q = 0,613 * V_k^2$$

$$q = 0,613 * 31,66^2$$

$$q = 0,61 \text{ kN/m}^2$$

Esforços Resultantes

Vento 0° - Cpi = 0,0

$$61 \text{ kgf/m}^2 * 0,8 = 48,8 \text{ kgf/m}^2$$

Vento 90° - Cpi = 0,00

$$61 \text{ kgf/m}^2 \times 0,6 = 36,6 \text{ kgf/m}^2$$

$$\text{Vento } 90^\circ - C_{pi} = 0,00$$

$$61 \text{ kgf/m}^2 \times 0,5 = 30,5 \text{ kgf/m}^2$$

$$q_{CV} = 36,6 \text{ kgf/m}^2$$

Para o vão de 2,8m temos:

$$SCV = 102,50 \text{ kgf/m}$$

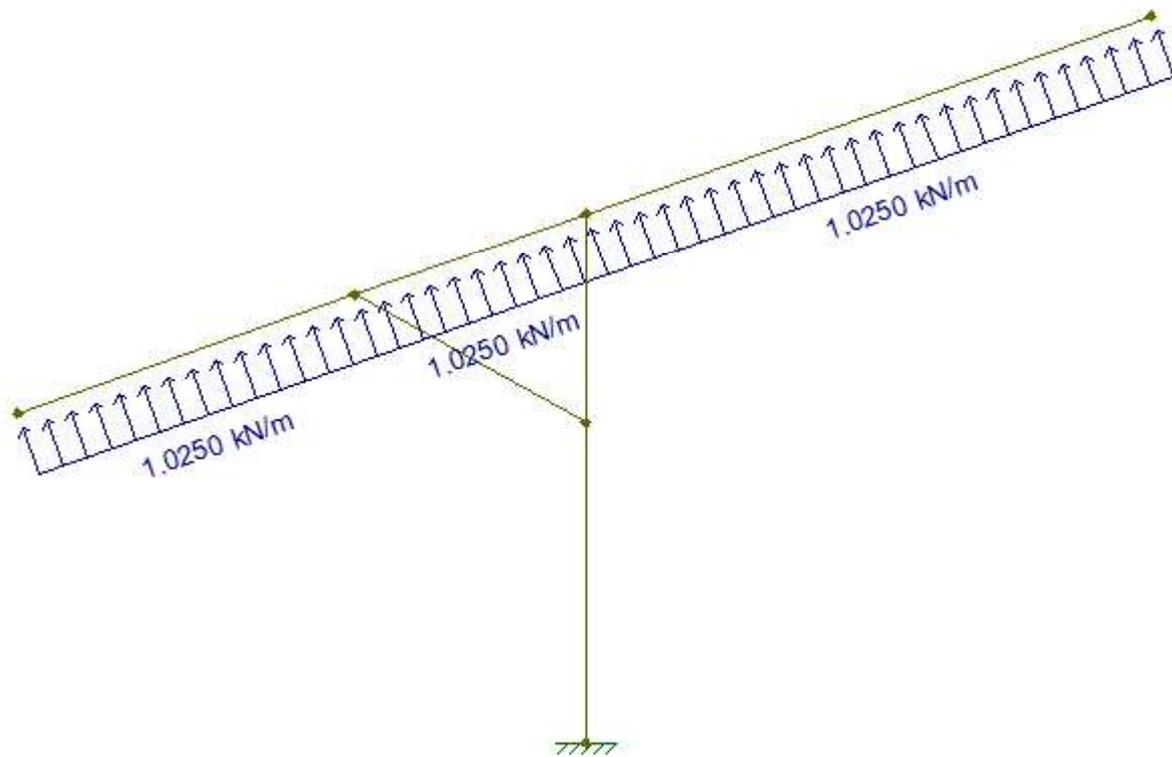


Figura 10

## 6. Combinações:

Conforme NBR 8681 item 5.1.3.1 As combinações últimas normais são dadas pela seguinte expressão:

$$Fd = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_Q \left[ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k} \right]$$

onde:

$F_{Gi,k}$  é o valor característico das ações permanentes;

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

$\psi_{0j} F_{Qj,k}$  é o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis.

## 6.1 Coeficientes de ponderação para combinações últimas

Os coeficientes de ponderações para as combinações últimas, são dadas pela Tabela 1 da NBR 8681:

Combinações	Ações permanentes ( $\gamma g$ ) <sup>1) 3)</sup>					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio De estrutura metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializ. com adições <i>in loco</i>	Peso próp. de elem. Construt. em geral e equip.	
Normais	1,25 (1,0)	1,30 (1,0)	1,35 (1,0)	1,40 (1,0)	1,50 (1,0)	1,20 (0)
Especiais ou de Construção	1,15 (1,0)	1,20 (1,0)	1,25 (1,0)	1,30 (1,0)	1,40 (1,0)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,0)	1,15 (1,0)	1,15 (1,0)	1,20 (1,0)	1,30 (1,0)	0 (0)

TABELA 2

Combinações	Ações variáveis ( $\gamma q$ ) <sup>1) 4)</sup>			
	Efeito da temperatura <sup>2)</sup>	Ação do vento	Ações truncadas <sup>5)</sup>	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50
Especiais ou de Construção	1,00	1,20	1,10	1,30
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,0

1) Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

2) O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

3) Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m<sup>2</sup>, ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

4) Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m<sup>2</sup>, ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

5) Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

TABELA 3

Portanto utilizamos as seguintes combinações para efetuarmos a análise estrutural:

Combinação 1: 1,25 x Peso Próprio + 1,30 Carga Permanente + 1,5 Sobrecarga de Norma

Combinação 2: -1,0 Peso Próprio - 1,0 Carga Permanente + 1,4 Vento a 0°;

Combinação 3: -1,0 Peso Próprio - 1,0 Carga Permanente + 1,4 Vento a 90°;

Combinação 4: -1,0 Peso Próprio - 1,0 Carga Permanente + 1,4 Vento a 270°;

## 7. Análise e dimensionamento:

A análise e dimensionamento das partes principais que compõe a estrutura, foram feitas de forma discretizada, utilizando-se para tanto a ferramenta computacional denominada ST\_mcalc.

### 7.1 Análise e dimensionamento do pórtico principal

#### 7.1.1 Numeração das Barras

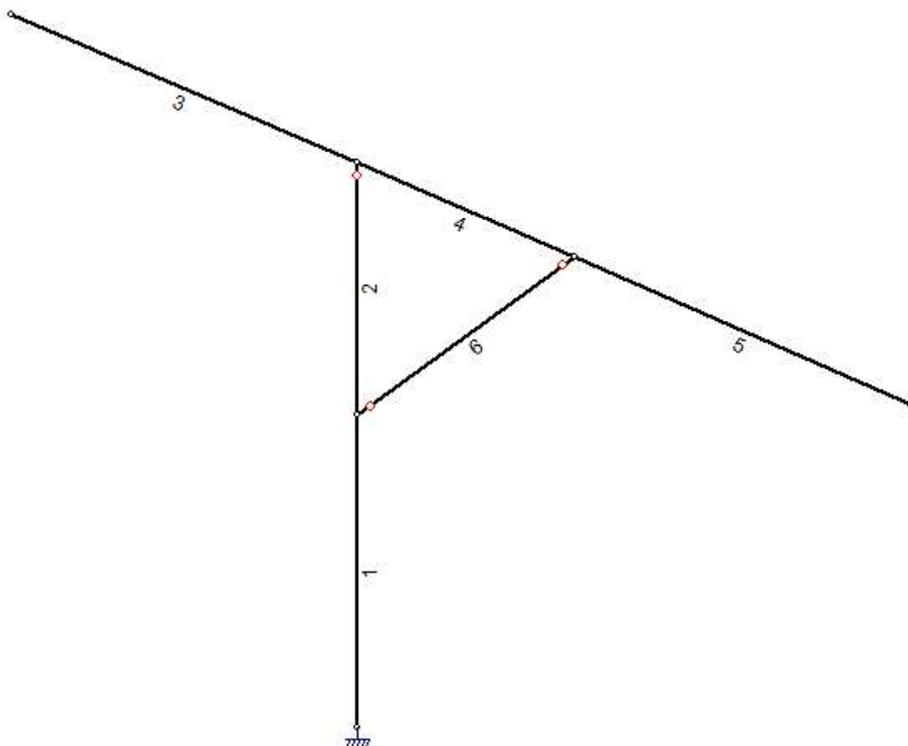


Figura 11

Pelo relatório apresentado abaixo, percebemos que as barras mais solicitadas das peças principais, são a barra 1, pertencente ao pilar e a barra 4, pertencente à viga de cobertura, com 65 e 43% de eficiência respectivamente.

Barra		Normal	Cortante Y	Cortante Z	Momento X	Momento Y	Momento Z	Eq. Int. Max.	Comp.	Dimensionamento
1	Sol.	-429.69	0	273.65	0	30713.87	0	0.65	100.02	UENR 170 x 48 x 25 x 1.5
	Res.	10363.64	1718.18	1693.11	---	50693.79	10085.41			
	Sd/Rd	0.04	0	0.16	---	0.61	0			
2	Sol.	389.25	0	231.06	0	18484.84	0	0.36	79.99	UENR 170 x 48 x 25 x 1.8
	Res.	7688.54	2002.91	2947.26	---	60256.52	12652.07			
	Sd/Rd	0.05	0	0.08	---	0.31	0			
3	Sol.	83.72	0	194.4	0	11599.28	0	0.41	119.3	UENR 100 x 39 x 16 x 2.25
	Res.	6281.47	1840.91	2792.05	---	29026.56	7922.6			
	Sd/Rd	0.01	0	0.07	---	0.4	0			
4	Sol.	-281.23	0	65.87	0	11599.28	0	0.43	74.91	UENR 100 x 39 x 16 x 2.25
	Res.	9818.18	1840.91	2792.05	---	29026.56	7470.87			
	Sd/Rd	0.03	0	0.02	---	0.4	0			
5	Sol.	-83.6	0	190.75	0	11214.81	0	0.41	117.61	UENR 100 x 39 x 16 x 2.25
	Res.	9818.18	1840.91	2792.05	---	28249.63	7458.3			
	Sd/Rd	0.01	0	0.07	---	0.4	0			
6	Sol.	286	0	0.38	0	-8.07	0	0.32	84.83	TUBO 20 x 2
	Res.	914.43	771.12	771.12	---	1478.79	1478.79			
	Sd/Rd	0.31	0	0	---	0.01	0			

TABELA 4

Portanto, concluímos que a estrutura resiste às solicitações às quais está submetida.

Para que a estrutura atingisse 100% de eficiência, **hipoteticamente**, a espessura do material poderia ser reduzida até 1,14mm para o pilar e 1,35mm para a viga de cobertura.

## 8 Análise da durabilidade

Corrosão é um termo químico bastante empregado no cotidiano para se referir ao processo de destruição total, parcial, superficial ou estrutural de determinado material causado pela ação do meio. Em estruturas metálicas, normalmente está associada à presença de água e oxigênio, podendo ser agravada por outros agentes, como salinidade, poluição, etc, ou mitigada pelo emprego de proteções, como pinturas ou galvanização. A taxa de corrosão do zinco e do aço é função das características da atmosfera.

### 8.1 Classificação do ambiente

Para o enquadramento do ambiente onde será implantada nossa estrutura, faremos o uso do Índice de Corrosividade Atmosférica de Brooks (Fig 11), e da classificação de acordo com a Norma Isso 9223 que classifica as atmosferas em seis categorias de corrosividade:

- C1: muito baixa
- C2: baixa
- C3: média
- C4: alta
- C5-I: muito alta (industrial)
- C5-M: muito alta (marinha)

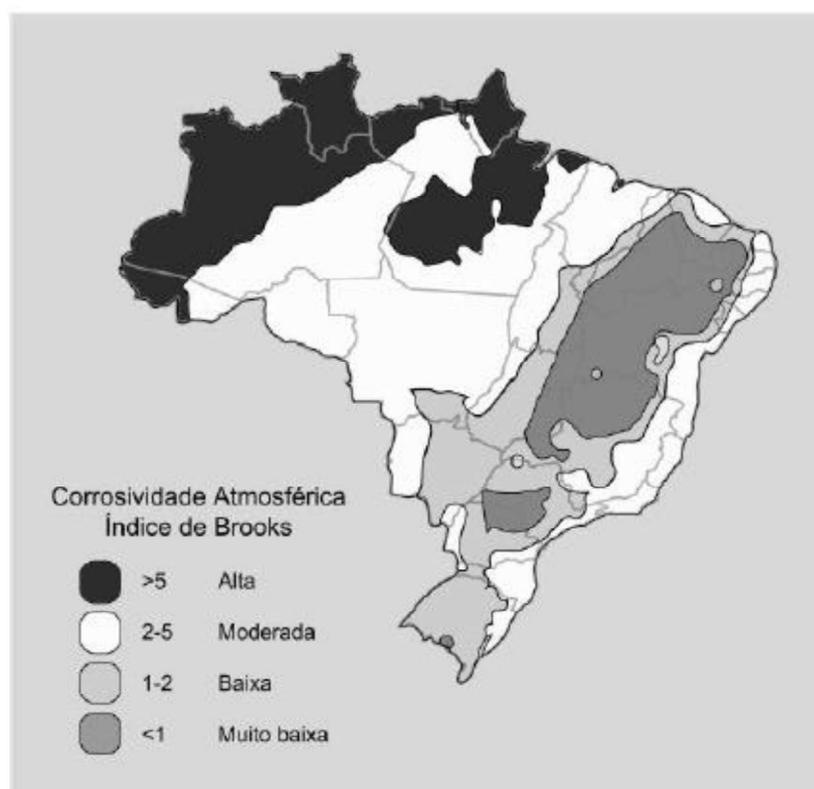


Figura 12

O que nos leva a concluir que nossa estrutura terá sua durabilidade calculada para um ambiente de corrosividade Moderada ou Média (C3).

Para a projeção da durabilidade, faremos uso da Tabela 4 (U.1 da NBR 8800), onde se apresentam as taxas de corrosão do zinco para diferentes ambientes do Brasil

Categoria de corrosividade	Perda de massa por unidade de superfície/perda de espessura (após um ano de exposição)				Exemplos de ambientes típicos (informativo)	
	Aço baixo-carbono		Zinco		Exterior	Interior
	Perda de massa g/m <sup>2</sup>	Perda de espessura μm	Perda de massa g/m <sup>2</sup>	Perda de espessura μm		
C1 Muito baixa	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis).
C2 Baixa	De 10 a 200	De 1,3 a 25	De 0,7 a 5	De 0,1 a 0,7	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais.	Edificações onde a condensação é possível (armazéns, ginásios cobertos, etc.).
C3 Média	De 200 a 400	De 25 a 50	De 5 a 15	De 0,7 a 2,1	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por dióxido de enxofre. Áreas costeiras de baixa salinidade.	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica (lavanderias, cervejarias, laticínios, etc.).
C4 Alta	De 400 a 650	De 50 a 80	De 15 a 30	De 2,1 a 4,2	Áreas industriais e costeiras com salinidade moderada.	Indústrias químicas, coberturas de piscinas, etc.
C5-I Muito alta (industrial)	De 650 a 1500	De 80 a 200	De 30 a 60	De 4,2 a 8,4	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva.	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição.
C5-M Muito alta (marinha)	De 650 a 1500	De 80 a 200	De 30 a 60	De 4,2 a 8,4	Áreas costeiras e offshore com alta salinidade.	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição.

TABELA 5

De modo geral, a perda metálica fica situada entre 0,7 a 2,1 Micras/ano, o que faz com que um revestimento típico de zinco, com 85 Micras de espessura (ABNT NBR 6323), proteja o aço por 40 anos ou muito mais.

De acordo com a empresa que realizou os serviços de galvanização, a espessura empregada foi de 77 Micras. Se adotarmos uma taxa de corrosão de acordo com a Classificação C3, tomando a média desse intervalo teremos:

$$D = \frac{eZ}{ToZ}$$

$$D = \frac{77}{1,4}$$

$$D \cong 55$$

Onde:

D: Duração em Anos

eZ: Espessura da camada de Zinco

ToZ: Taxa de oxidação de Zinco

Após a oxidação de toda a camada protetiva, caso não haja nenhuma intervenção para manutenção, a corrosão passará a atacar a estrutura metálica em si. Contudo, a mesma se manterá incólume, até que a sua área mínima de aço seja alcançada.

Para o caso do Pilar Metálico temos uma espessura total de 1500 Micras. Conforme comentado anteriormente, a espessura mínima necessária seria de 1140 Micras. Portanto, uma diferença de 360 Micras. Como a corrosão pode ocorrer simultaneamente nas duas faces, essa espessura se reduz pela metade:

$$D = \frac{eS}{ToS}$$

$$D = \frac{180}{37,5}$$

$$D \cong 4,5$$

Onde:

D: Duração em Anos

eS: Espessura da camada de Aço

ToS: Taxa de oxidação do Aço

## 9 Vida Útil de Projeto (VUP)

É Período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado a fim de atender aos requisitos de desempenho estabelecidos pela norma técnica ABNT NBR 15575, considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o cumprimento da periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção.

A VUP é uma estimativa teórica de tempo que compõe o tempo de vida útil. O tempo de VU pode ou não ser confirmado em função da eficiência e registro das manutenções, de alterações no entorno da obra, fatores climáticos, etc. (a VUP se trata de uma projeção e não deve ser confundida com tempo de vida útil, durabilidade, prazo de garantia legal e certificada).

A tabela 6 (C 5 da NBR 15575), mostra a Vida Útil de Projeto de cada parte da Edificação, que deverão cumprir esses requisitos mínimos, desde que cumpridos as exigências do Manual de Uso, Operação e Manutenção.

Sistema	VUP anos	
	Mínimo	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 30

TABELA 6

## 10 Conclusão:

Como o tratamento por galvanização à fogo realizado garante uma duração aproximada de 55 anos, e a espessura excedente de material acrescentam mais 4,5 anos de duração, para o caso específico, totalizando assim 59,5 anos, e essa duração se enquadra no intervalo preconizado pela Tabela C5 da NBR 15575, podemos concluir que este tratamento atende à **Vida Útil de Projeto** desta Norma.

Canoas, 10 de Junho de 2024