

## Análise Estrutural em Regime Elastoplástico de um Pórtico Duplo Pertencente a Cobertura de Quadras de Esportes

Evandro Medeiros Braz<sup>1</sup>, Rui Carneiro de Barros<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto | FEUP – Porto - Portugal / up202204076@up.pt

<sup>2</sup> Prof. Jubilado Eng<sup>a</sup> Estrutural, Dept<sup>o</sup> Eng<sup>a</sup> Civil, (FEUP)-CONSTRUCT Porto - Portugal / rcb@fe.up.pt

### Resumo

O uso do aço como elemento estrutural no Brasil ainda é modesto, no setor da construção civil, o material predominante ainda é o concreto, com exceção na construção de galpões industriais, quadras de esportes e coberturas de edificações, onde o emprego do aço tem uma participação expressiva. Tradicionalmente o cálculo de solicitações em estruturas é efetuado através de análise linear, isto é, admitindo-se a proporcionalidade entre as ações e seus efeitos, ou seja, linearidade no diagrama tensão versus deformação. Entretanto, alguns sistemas estruturais em aço (ou mistos aço-concreto) apresentam comportamento não linear (Pfeil, 2009). O dimensionamento não linear, ou seja, no regime plástico, faz uso da força de reserva, além do estado elástico da estrutura. A resistência reserva da estrutura, que permite membros estruturais a serem carregados sem falha, quando sua capacidade máxima de flexão é atingida (Wong, 2009). Reiterando, o aço possui resistência residual, de reserva, quando projetado no regime plástico, diferentemente do que pelos métodos clássicos de análise linear (elástico). Este artigo versará sobre uma análise estrutural em regime elastoplástico de um pórtico metálico duplo, pertencente a cobertura de duas quadras de esportes, projetadas com perfis laminados. Na figura 01, tem-se a ilustração 3D da estrutura metálica das duas quadras de esportes objeto do presente estudo.

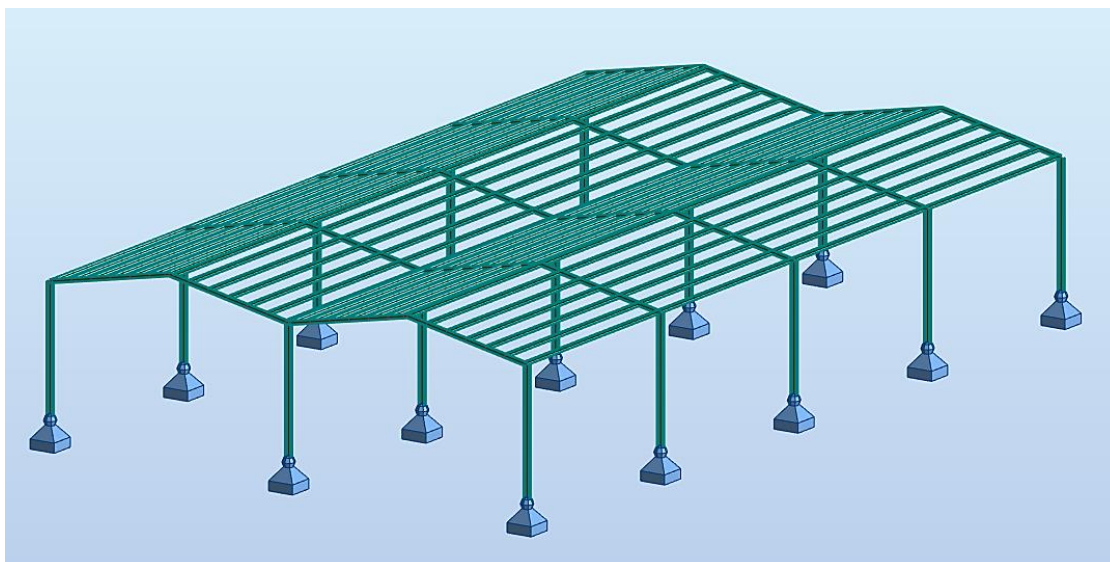


Figura 1 – Ilustração 3D da estrutura metálica.

### Palavras-chave

Cobertura; Aço; Estruturas Metálicas; Elastoplástico.

# 1. Introdução

## 1.1 Estruturas metálicas

Dentre as principais vantagens em se utilizar construções metálicas, a agilidade na construção é uma das que se destaca, gerando um benefício devido ao menor tempo para se erguer a estrutura, assim como maior facilidade no transporte dos elementos estruturais. O aço também é bem empregado devido a sua alta resistência e boas propriedades mecânicas além de baixo peso próprio, cerca de um quinto do peso correspondente à utilização do concreto, considerando as mesmas dimensões de projeto, segundo Martins (2010).

A facilidade de montagem e desmontagem e sua flexibilidade em relação à formas e projetos de construção também são grandes vantagens em relação às práticas de alvenaria, uma vez que são utilizadas para vencer grandes vãos e abrangem elevadas possibilidades de formatos garantindo qualidade e eficiência estrutural.

## 1.2 Análise Elástoplástico

A análise elástoplástica é usualmente empregada na construção de estruturas de aços, em particular as consideradas como pórticos, em um ou mais pavimentos e/ou vãos, sendo obtida maior economia e aproveitamento do material ao se utilizar este método de análise. A maioria das estruturas de aço construídas no Brasil são galpões leves de armazenamento, sendo este tipo de análise interessante para este tipo de estrutura.

Essa análise é aderente a estruturas estaticamente indeterminadas, com diversos graus de hiperstaticidade, devido a estas estruturas possuírem diversos pontos de momento máximo. Com isto, quando o maior destes valores atingir o momento de plastificação, este ponto específico plastifica, porém o resto da estrutura permanece elástico, o que controla sua deformação total.

No comportamento linear, enquanto a máxima tensão é menor do que a tensão de escoamento do aço, após este ponto torna-se não linear. No comportamento não linear, o momento ( $M_y$ ) é o início de plastificação da seção, não representa a capacidade resistente da viga, já que é possível continuar aumentando a carga após atingi-lo. Entretanto, a partir de ( $M_y$ ) o comportamento passa a ser não linear, pois a fibras mais internas da seção vão também se plastificando progressivamente até ser atingida a plastificação total da seção.

Na figura 02 e 03, observa-se uma viga simplesmente apoiada, submetida a um carregamento pontual no meio do vão, que despertam tensões que começam do zero, evoluindo até todas as fibras da seção atingirem o limite de escoamento. No início do carregamento, as tensões se distribuem de forma linear, em comportamento no regime elástico, que é mantido até o patamar de escoamento, quando as fibras mais distantes da linha neutra atingem o valor de ( $f_y$ ), e a partir deste ponto ocorre o início da plastificação que é formar uma rótula plástica ( $M_p$ ).

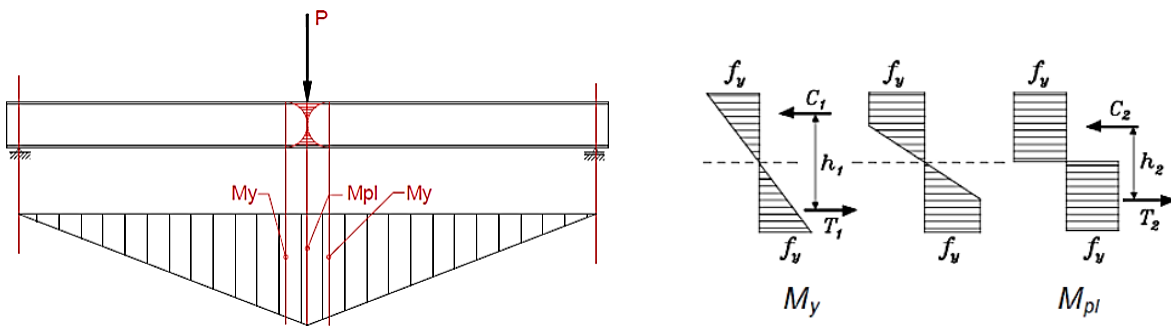


Figura 02 e 03 – Viga submetida carregamento pontual e diagrama de tensões, respectivamente.

No dimensionamento a flexão, os momentos de início de plastificação ( $M_y$ ) e os momentos de plastificação total ( $M_p$ ), podem ser definidos pelas equações 01 e 02. Nas equações 03 e 04 tem-se as propriedades geométricas, e na equação 05, o coeficiente de forma.

$$M_y = 2 \int_0^{h/2} y \sigma(y) b dy = f_y * W \quad \text{Eq. 01}$$

$$M_p = 2 \int_0^{h/2} y f_y dA = f_y * Z \quad \text{Eq. 02}$$

$$W = \frac{I}{Y_{max}} \quad \text{Eq. 03}$$

$$Z = A t * Y t + A c * Y c \quad \text{Eq. 05}$$

$$\text{Coef. forma} = \frac{M_p}{M_y} = \frac{Z}{W} \quad \text{Eq. 05}$$

Em estruturas hiperestáticas, sujeitas a carregamentos crescentes, quando se atinge, em uma seção, o momento ( $M_p$ ), formando-se ali uma rótula plástica, a estrutura não entra em colapso, porém perde um grau de hiperestaticidade. Com o aumento das cargas, o diagrama de momento se modifica, pois o momento na rótula plástica ( $M_p$ ) não aumenta mais, transferindo solicitações para outras seções. O colapso de uma estrutura “n” vezes hiperestática se verifica quando se formam “n” + 1 rótulas plásticas, transformando a estrutura em um mecanismo (Pfeil, 2009).

### 1.3 Carregamento – Ações e Combinações

As ações aplicadas na estrutura dividem-se em permanentes e variáveis. Como ação permanente tem-se o peso próprio (PP) de todos os elementos que constituem a estrutura, tais como perfil estrutural de montante, telha, terça etc. As ações variáveis são aquelas que se alteram significativamente ao longo da vida da estrutura, inclusive aquelas que resultam do uso e ocupação da edificação. Como ação variável tem-se a sobrecarga normativa (SC) e a ação do vento (V) que atinge a edificação a zero e a noventa graus. Nas figuras 04 e 05, tem-se o coeficiente de majoração das ações permanentes e os fatores de combinação e redução para as ações variáveis, respectivamente.

Combinações	Ações permanentes ( $\gamma_d$ ) <sup>a,c</sup>					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas 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 industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis ( $\gamma_d$ ) <sup>a,d</sup>					
	Efeito da temperatura <sup>b</sup>	Ação do vento	Ações truncadas <sup>e</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	1,00		

Figura 04 – Coeficiente de majoração de ações permanentes.

Ações		$\gamma_{fi}$ <sup>a</sup>		
		$\psi_0$	$\psi_1$ <sup>d</sup>	$\psi_2$ <sup>e</sup>
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>b)</sup>	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>c</sup>	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4

<sup>a</sup> Ver alínea c) de 4.7.5.3.  
<sup>b</sup> Edificações residenciais de acesso restrito.  
<sup>c</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.  
<sup>d</sup> Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar  $\psi_1$  igual a 1,0.  
<sup>e</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para  $\psi_2$  o valor zero.

Figura 05 – Fatores de combinação e redução para as ações variáveis.

Existem em algumas normas internacionais a definição das combinações utilizadas para o dimensionamento no regime plástico. Na NBR 8800:2008 não tem essa definição, ficando a cargo do projetista da estrutura a escolha das combinações - ELS e ELS.

## 2. Estudo de caso

### 2.1 Dados da Estrutura

Para a análise, considerou-se a estrutura representada por dois pórticos planos e será assumido que transversalmente a estrutura mostra-se adequadamente contraventada, portanto, não influenciando nos resultados obtidos por uma análise em duas dimensões. A edificação tem 24 m de largura por 40 m de comprimento, e altura de 7,60 m.

Adotou-se os seguintes perfis para compor a estrutura, pilar (W310x38,7) e viga (W250x22,5), do fabricante GERDAU. Tem-se abaixo na tabela 01 as dimensões e características dos perfis adotados, e na figura 06 a nomenclatura das respectivas dimensões:

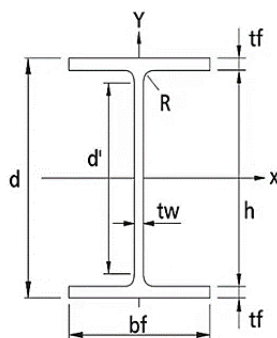


Figura 06 – Nomenclaturas das dimensões dos perfis W.

Perfis	Massa kg/m	d mm	bf mm	Espessura		h mm	d' mm	Area cm <sup>3</sup>	Eixo X - X			
				tw mm	tf mm				Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Zx cm <sup>3</sup>
W200x22,5	22,5	206,0	102,0	6,2	8,0	190,0	170,0	29,0	2029,0	197,0	8,4	225,3
W310x38,7	38,7	310,0	165,0	5,8	9,7	291,0	271,0	49,7	8581,0	553,6	13,1	615,4

Tabela 01 – Características dos perfis adotados no estudo.

## 2.2 Carregamentos

As ações de peso próprio (PP), telhas trapezoidais, terças, perfis estruturais, denominadas permanentes estão devidamente quantificadas na tabela 02, bem com a ação de sobrecarga (SC), denominadas variável, encontra-se representada na tabela 03.

Carregamento permanente (g)		
Peso próprio da estrutura - Perfil	0,39	kN/m
Peso das telhas metálicas TP40	0,50	kN/m <sup>2</sup>
Peso da terças	0,20	kN/m <sup>2</sup>
Total carregamento permanente (g) por kN/m <sup>2</sup>	0,70	kN/m <sup>2</sup>
Total carregamento permanente (g) por kN/m	4,06	kN/m

Tabela 02 – Carregamento permanente na estrutura.

Carregamento acidental (q)		
Sobrecarga normativa	0,25	kN/m <sup>2</sup>
Tota Carregamento sobrecarga (q) por kN/m	1,31	kN/m

Tabela 03 – Carregamento acidental (variável) na estrutura.

As cargas de vento foram calculadas utilizando as recomendações da NBR6123. Na figura 07, tem-se o mapa de isopletas da velocidade do vento. E abaixo observa-se os seguintes parâmetros oriundos da edificação em estudo:

- Velocidade básica do vento (V0): 42 m/s (leste do Paraná);
- S1=1,0 – Fator topográfico;
- S2=0,88 – Altura, categoria e classe da edificação;
- S3=1,0 – Fator de ocupação;
- Velocidade característica do vento (Vk):  $V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 = 39,60$  m/s
- Pressão do vento: 0,96 kN/m<sup>2</sup>
- Vão entre pórticos: 10,00 m
- Comprimento: 40,00 m
- Largura: 24,00 m
- Altura: 7,60 m

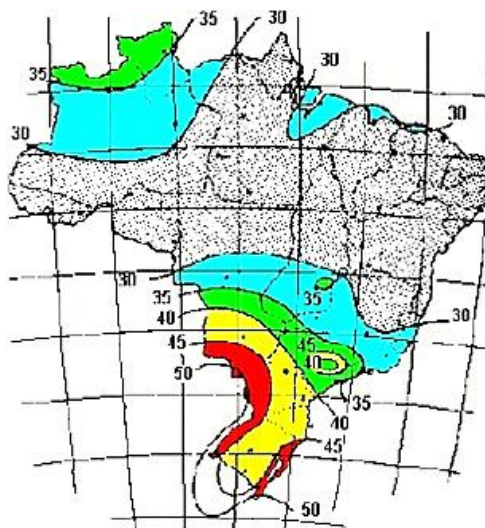


Figura 07 – Mapa de isopletas da velocidade do vento no Brasil.

## 2.3 Combinações

Com relação as ações de permanentes e variáveis, foram feitas duas combinações de cargas entre peso próprio, sobrecarga e vento. Na combinação 01 foram considerados peso próprio mais sobrecarga majorados e na Combinação 02 foram considerados vento de sucção majorado e peso próprio com redução, e optou-se em não usar sobre carga por mostrar-se favorável a análise.

Para análise da estrutura proposta, foi considerado duas condições de carregamentos a saber:

- Condição 1: Peso próprio (PP) e Sobrecarga (SC);
- Condição 2: Peso próprio (PP) e Vento zero grau (V0).

Como hipóteses de combinação do carregamento, foi estabelecido a seguinte relação:

- $1,25 \times PP + 1,4 \times SC$ ;
- $0,9 \times PP + 1,4 \times V0$ .

Na tabela 04, estão os valores referentes a 06 combinações de carga, onde as duas mais críticas para o cálculo foram as escolhidas acima. Na figura 08, tem-se a estrutura analisada com a devida numeração dos nós e elementos (barras) com intuito de identificar onde será aplicado os carregamentos descritos na tabela 04.

Combinações Normais			
Elemento 1	E2	E3	E4
<b>C1-ELU</b>	<b><math>1,25 \times PP + 1,4 \times SC</math> (kN)</b>		
E1	E2	E3	E4
-	-	6,92	6,92
<b>C2-ELU</b>	<b><math>0,9 \times PP + 1,4 \times V0</math> (kN)</b>		
E1	E2	E3	E4
6,41	6,41	- 4,53	- 4,53
<b>C3-ELU</b>	<b><math>0,9 \times PP + 1,4 \times V90</math> (kN)</b>		
E1	E2	E3	E4
4,94	4,94	- 4,47	- 1,95
<b>C4-ELS</b>	<b>PP+SC (kN)</b>		
-	-	5,37	5,37
<b>C5-ELS</b>	<b>PP+V0 (kN)</b>		
4,58	4,58	- 0,88	- 0,88
<b>C6-ELS</b>	<b>PP+V90 (kN)</b>		
3,53	3,53	- 0,84	0,96

Tabela 04 – Características dos perfis adotados no estudo.

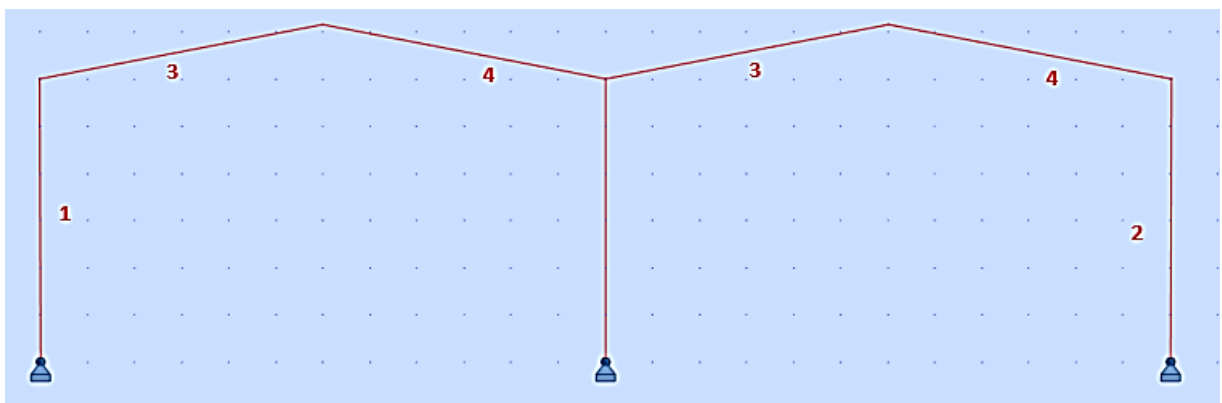


Figura 08 – Pórtico com indicação de nós e elementos (barras).



No desenvolvimento dos modelos numéricos, utilizou-se o software comercial Robot da (Autodesk). Nas figuras 09 e 10 tem-se os carregamentos resultantes utilizados na análise, nota-se que são valores unitários, uma vez que as interações, ou seja, incrementos de carga levarão a estrutura até o colapso. Na análise usou-se a não linearidade do material (aço). O incremento de cargas foi da ordem de 0,2 kN por interação, onde a razão da carga de colapso e o 0,2 kN/m, resultam no número de incrementos. Na análise incremental de carga, entra-se com uma carga unitária, ( $\lambda P$ ), com isso possibilita-se verificar o incremento de carga na estrutura, onde tem-se informações desde o início do carregamento distribuído, passando pelo regime elástico ( $M$ ), plástico ( $M_y$ ), formação de rótulas, chegando até colapso, ( $M_p$ ).

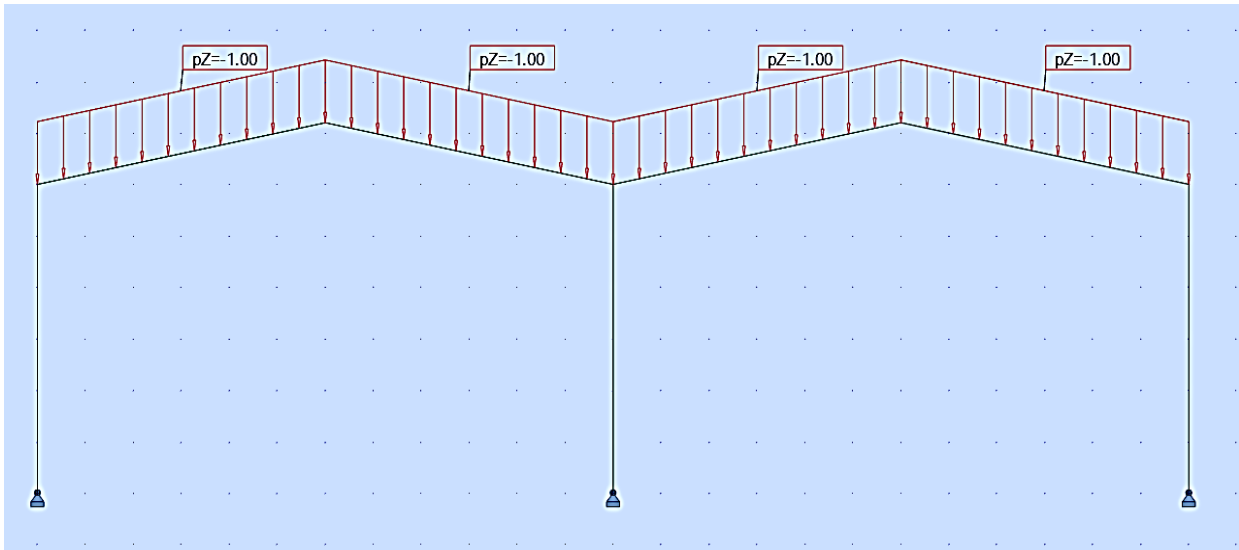


Figura 09 – Carregamento Unitário da combinação 01

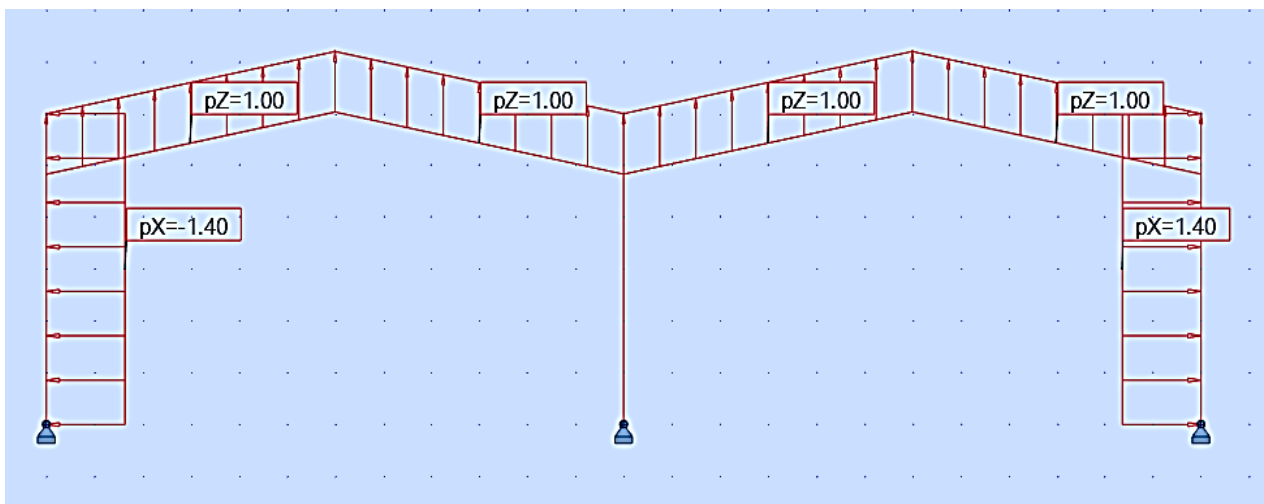


Figura 10 – Carregamento unitário da combinação 02.

### 3. Resultados Análise Elástoplástica

#### 3.1 Combinação 01

Na combinação 01, os esforços se mostraram acima do limite de escoamento do material, nota-se que a carga ELU – combinação 01 (PP\*1,25+SC\*1,4) é de 6,92 kN/m, carregamento distribuído aplicado nos elementos 3 e 4 da estrutura (vigas), e na figura 11, tem-se a carga de 5,6 kN/m, como limite do regime plástico.

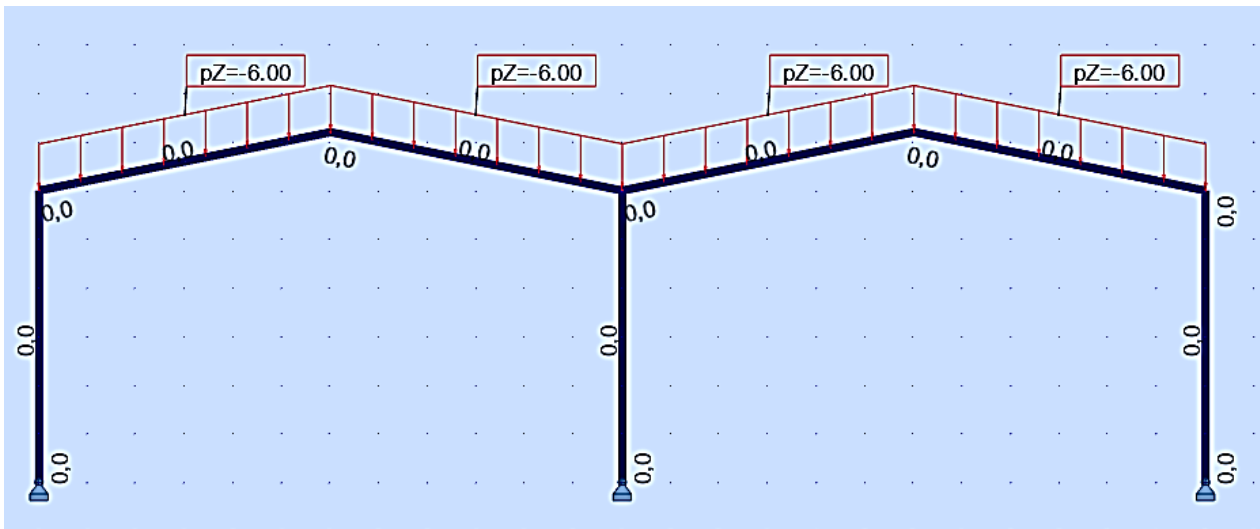


Figura 11 – Limite do regime plástico.

Na combinação 01, com a carga distribuída de 5,8 kN/m, inicia-se a formação de rótula, estando a estrutura já no regime plástico. Constata-se que a carga descrita acima (resistente) ainda é inferior a descrita no carregamento ELU – combinação 1 de 6,92 kN/m. A seção do perfil, encontro da viga com o pilar (rótula 01 e rótula 02), estão com 28% das fibras da seção em fluência (escoamento). Na figura 12, tem-se a ilustração da estrutura já no regime elástico.

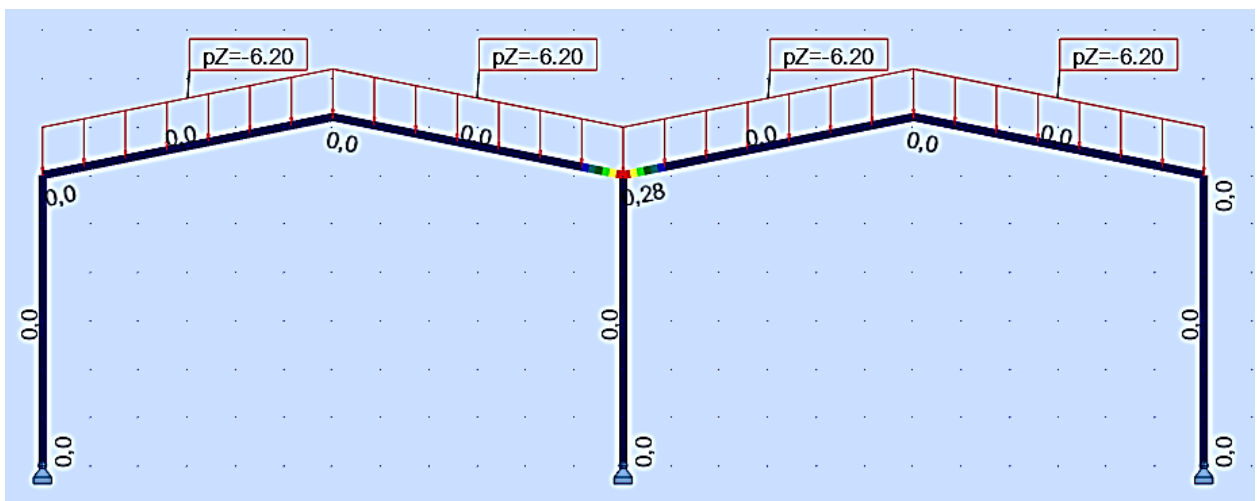


Figura 11 – Limite do regime plástico.



Na combinação 01, limitando a taxa de plasticidade em 90%, a carga distribuída atingida na simulação é de 8,8 kN/m, esta já bem superior a carga indicada na combinação 01, excedendo 27% de sobra no regime plástico. Na figura 12, tem-se a ilustração do pórtico a uma taxa plasticidade de 90%.

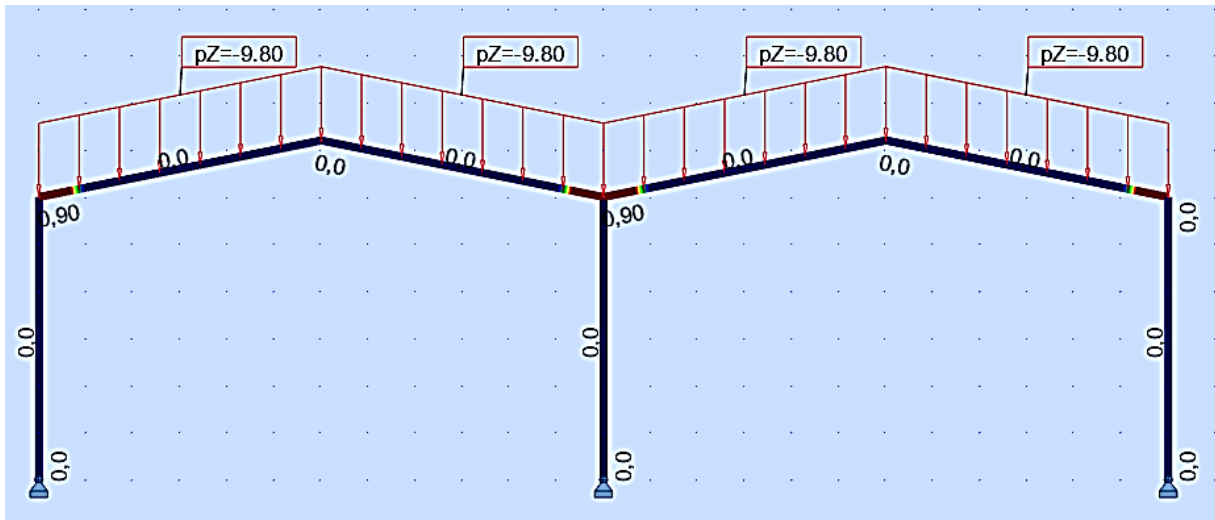


Figura 12 - Pórtico a uma taxa plasticidade de 90%.

Na carga de colapso, ou seja, com uma taxa de plasticidade de 100%, chegou-se a uma carga distribuída de 8,95 kN/m. Atendendo aos critérios de dimensionamento ELU. Na figura 13, observa-se a ilustração do pórtico em estado de colapso.

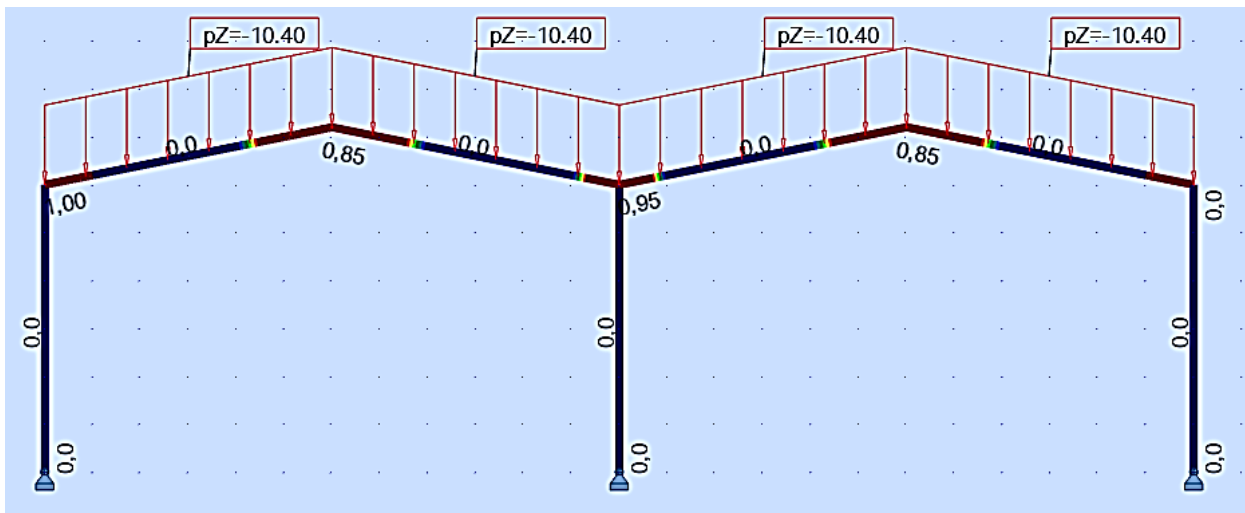


Figura 13 - Pórtico em colapso ( $M_p$ ).

### 3.2 Combinação 02

Na combinação 2, os esforços se mostraram-se abaixo do limite de escoamento do material, nota-se que a carga ELU – combinação 02 é de 6,41 kN/m nos pilares (elemento 1 e 2 ) e -4,53 kN/m de sucção nas vigas (elementos 3 e 4). Nesta combinação os esforços resistentes do regime elástico foram suficientes para atender aos critérios ELU. Na figura 14, tem-se o pórtico no regime elástico.

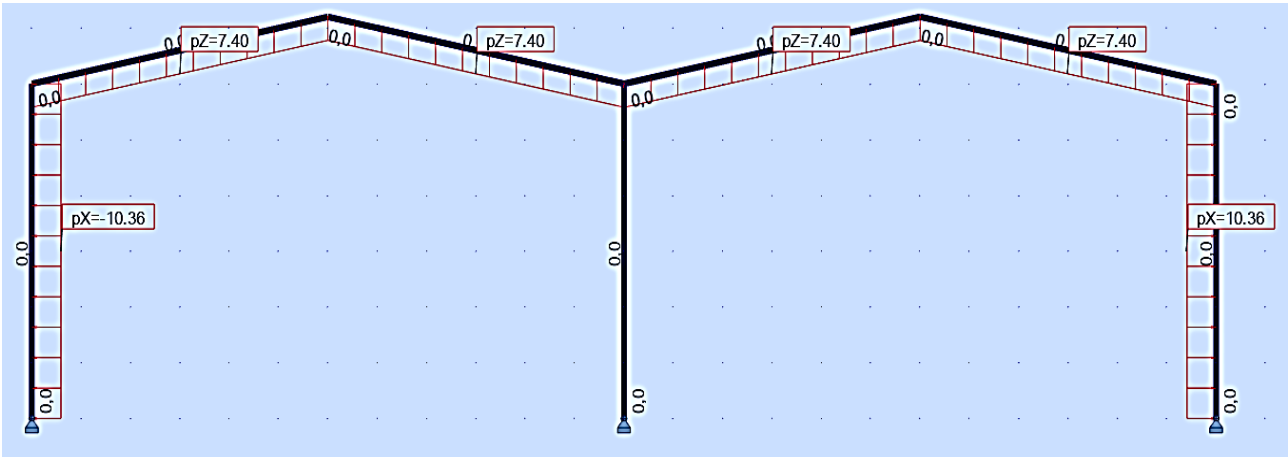


Figura 14 - Pórtico no regime elástico.

Na combinação 2, os esforços resistentes nas vigas de 7,2 kN/m, e pilar 10,8 kN/m, a estrutura esta no regime plástico com duas rótulas com 28 % das fibras em fluência (escoamento). Na figura 15, tem-se o pórtico no regime elástico, com 28% das fibras plastificada no ponto de formação da 1ª rótula.

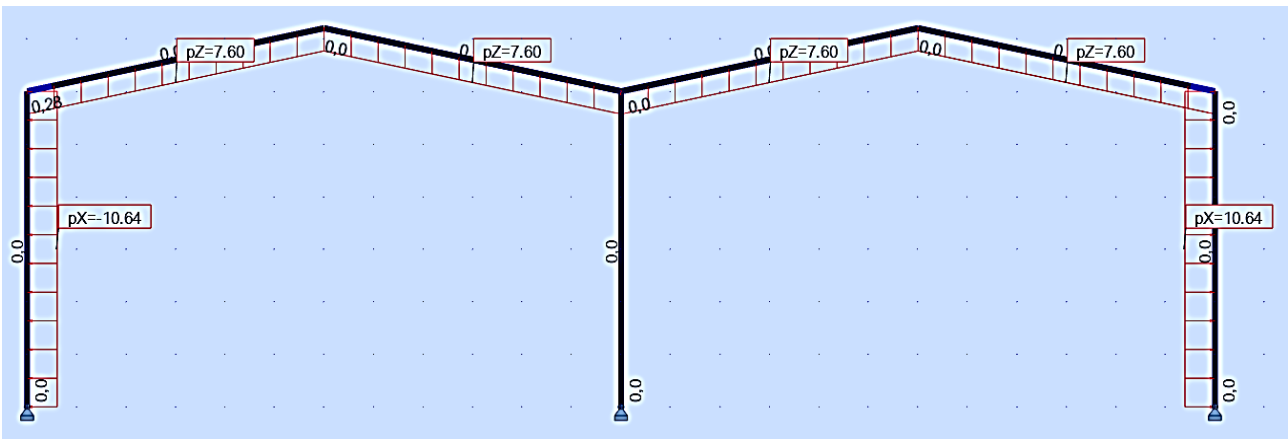


Figura 15 – Pórtico no regime elástico com plasticidade de 28%.

Na combinação 2, os esforços resistentes nas vigas de 11,40 kN/m, e pilar 15,96 kN/m, a estrutura está no regime plástico com duas rótulas com 90 % das fibras em fluência. Na figura 16, tem-se o pórtico com 90% de plastificação.

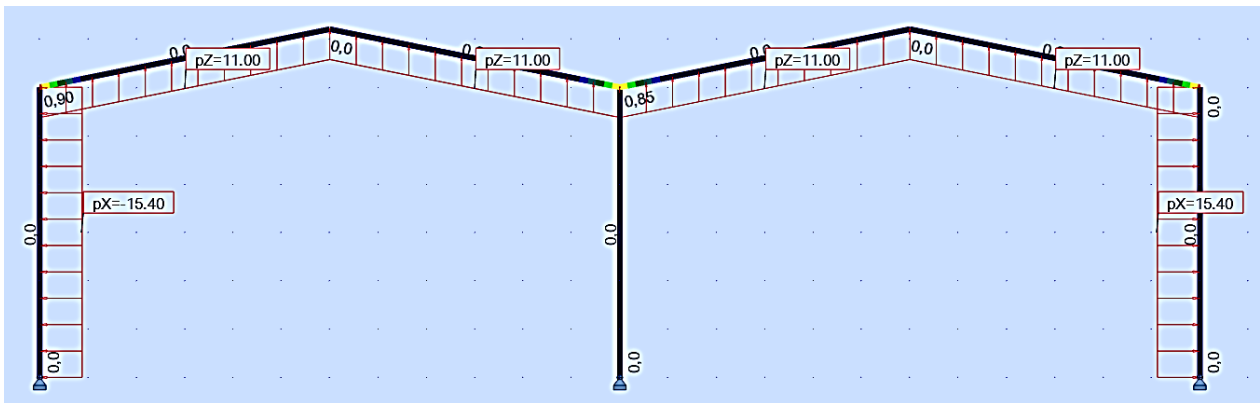


Figura 16 – Pórtico no regime elástico com plasticidade de 90%.

Na combinação 2, os esforços resistentes nas vigas de 12,47 kN/m, e pilar 12,47 kN/m, a estrutura está em colapso, taxa de plasticidade de 100%. Na figura 17, tem-se a ilustração do pórtico em colapso.

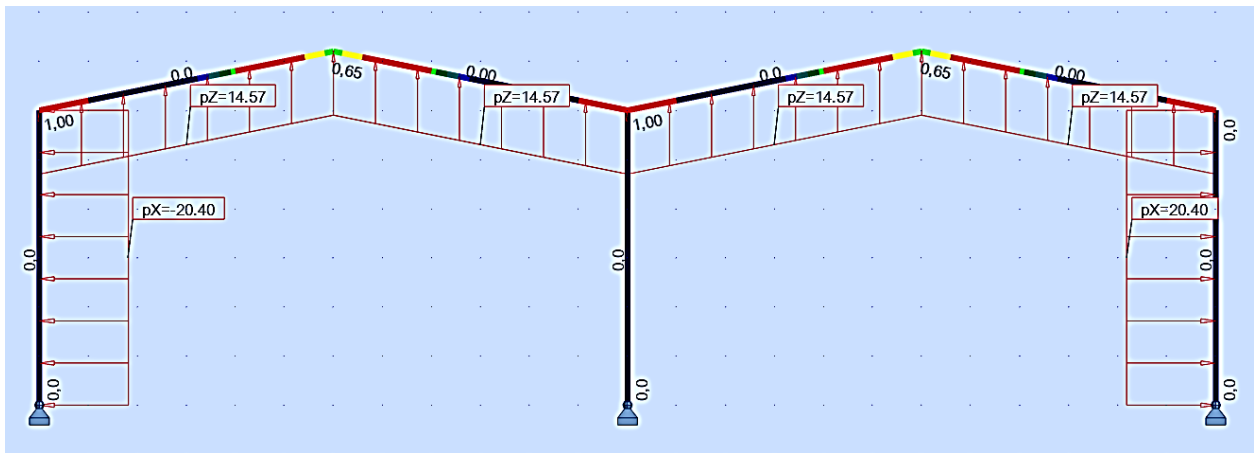


Figura 16 – Pórtico em colapso.

### 3.3 Deslocamentos máximos da estrutura

Com base na normativa nacional, tem-se que os deslocamentos permitidos para estrutura metálica em estudo,  $L/250$  para deslocamento na vertical e  $H/300$  para deslocamento no topo do pilar. A estrutura apresentou deslocamento dentro destes limites. Na tabela 05 tem-se os deslocamentos permitidos com base nas dimensões do galpão metálico.

Deslocamentos máximos - $\delta$ (mm)		
Vigas de cobertura	$L/250$	<b>48</b>
Pilar	$H/300$	<b>20</b>

Tabela 05 – Deslocamentos máximos permitidos na estrutura analisada.

#### 4. Considerações finais

Com base neste estudo conclui-se que o uso da análise plástica é bastante proveitoso para o projeto de estruturas metálicas, especialmente aquelas com elevados graus de hiperstaticidade. O uso de *softwares* como o Robot (Autodesk), usado neste estudo, elimina uma das maiores barreiras para a realização de projetos em análise plástica, que é a complexidade dos cálculos, sendo o uso destes bastantes simples, práticos e rápidos, desde que se tenha o conhecimento teórico deste tipo de análise.

As duas hipóteses de combinação apresentaram resultados distintos quanto a capacidade incremental da carga original, isto deve-se a natureza distintas das cargas. Na combinação 01, se o estudo tivesse abordado somente o dimensionamento no regime elástico, seria necessário a substituição do perfil escolhido, por outro de maior resistência, gerando custos. Na combinação 02, os esforços aplicados a estrutura mantiveram-na no regime plástico.

A análise elastoplástica é amplamente empregada no dimensionamento de estruturas metálicas, sendo obtida maior economia e aproveitamento do material ao se utilizar este método de análise, como pode ser demonstrado neste estudo. Na maioria das estruturas de aço construídas no Brasil este tipo de análise é interessante por trazer vantagens principalmente econômicas.

#### **Bibliografia:**

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas – NBR 8800, Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios, 2008;

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas – NBR 6123, Forças devido ao vento em edificações, 1987;

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas – NBR 8681, Ação e segurança, nas estruturas, 2003;

BARROS, R.C., “Análise Não-Linear Material de Estruturas”, Apostila de Introdução ao Cálculo Plástico de Estruturas conforme lecionado em pós-graduação no Deptº Eng Civil da FEUP desde 2004, FEUP-Porto, versão 2022, c. 200 p;

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O.; Edifícios de múltiplos andares em aço. São Paulo: Pini, 2004;

HORNE, M. R. AND MORRIS, L. J., (1981), Plastic Design of Low-Rise Frames-, Collins, London, England;

HORNE, M. R., (1979), Plastic Theory of Structures, 2nd edition, Pergamon Press, London, England;

MARTINS, C. H. DEC-4930 – Estruturas Metálicas. Maringá, 2010;

NEAL, B. G., (1977), Plastic Methods of Structural Analysis, 3rd edition, Chapman & Hall, London, England;

PFEIL, Walter.; PFEIL, Michele. Estrutura de Aço. Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008: 8 ed. Rio de Janeiro: Editora JLC, 2009;

PRAVIA, C. M. Z.; DREHMER, A. G.; JÚNIOR, M. E. Galpões para usos gerais. 4ª ed. Rio de Janeiro, 2010.