6
Avaliação Teórica da Resistência

Neste capitulo são apresentados os resultados teóricos da resistência à flexão, para cada protótipo de acordo com o comportamento nas fases elástica e plástica. Também é feito o cálculo da carga correspondente à capacidade última à flexão de acordo com o sistema de ensaio, ver Figura 4.35 e Figura 4.36. Para o cálculo das flechas teóricas na fase elástica, são apresentadas as formulas para os modelos. Finalmente, é realizada uma análise à flexo-tração do perfil na seção com abertura de alma.

Para comparação destes resultados com os valores experimentais, os coeficientes utilizados para verificação dos Estados Limites Últimos (ELU), de minoração da resistência dos materiais, e coeficientes majorados das ações e combinações das ações atuantes, foram todos fixados em (1,0).

6.1.
Resistência da Seção com Abertura da Viga Mista

A avaliação teórica da resistência foi feita para o modelo estudado experimentalmente. A viga mista VM-01 é composta por uma laje de concreto e um perfil ½W 360 x 32,9. Já no modelo VM-02, é utilizado a mesma laje de concreto e perfil ½W 360 x 32,9, acrescido de um perfil de reforço U 3'' x 6,11, na região central. Na Tabela 6.1 são mostradas as propriedades de cada viga.

Tabela 6.1- Propriedades dos modelos VM-01 e VM-02.

Modelo	A_{sb}	A_{su}	A_w	I_t	E_c	E_s	f_{ck}	f_{y1}	f_{y2}
	mm^2	mm^2	mm^2	cm^4	MPa	GPa	MPa	MPa	MPa
VM-01	1636,3	-	606,1	8127	30672	200	30	345	-
VM-02	1636,3	778	915,5	12152	30672	200	30	345	250

A_{sb} – Área de aço do tê inferior (região tracionada).

A_{su} – Área de aço do perfil U (região tracionada).

f_{y1} – Tensão de escoamento do perfil ½ W

f_{y2} – Tensão de escoamento do perfil U

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

6.1.1.
Modelo VM-01

Na Figura 6.1 é apresentada a geometria do protótipo VM-01 com o diagrama de tensões elásticas para o cálculo do momento de início de escoamento, e na Figura 6.2 o diagrama de tensões limites para o cálculo do momento resistente último. Na Tabela 6.2 são descritas as dimensões.

Tabela 6.2 - Dimensões do modelo VM-01

Modelo	b_c	t_c	t_o	d	t_w	h	b_f	t_f
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
VM-01	1200	30	50	252,5	5,8	96	127	8,5

a) Calculo do momento de início de escoamento da viga mista:

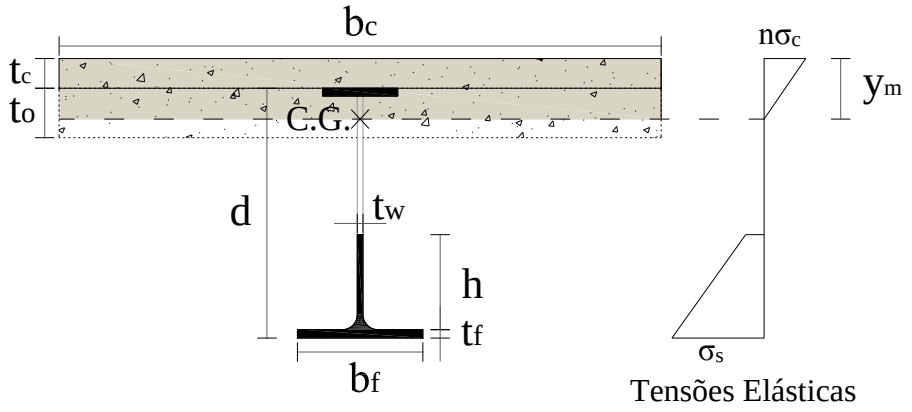

Figura 6.1 - Dimensões e diagrama de distribuição de tensões elásticas para o protótipo VM-01.

Relação modular:

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{30672} = 6,52$$

Posição do centro de gravidade da seção mista a partir da face superior da laje:

$$y_m = \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i} = 61,19mm$$

Módulo resistente elástico:

$$W_{t\,\inf} = \frac{I_t}{d + t_c - y_m} = 367222,45mm^3$$

Momento resistente de início de escoamento da viga mista:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

$$M_{re} = W_{t\inf} \cdot f_{y1} = 126,7 kN.m$$

b) Cálculo do momento resistente último:

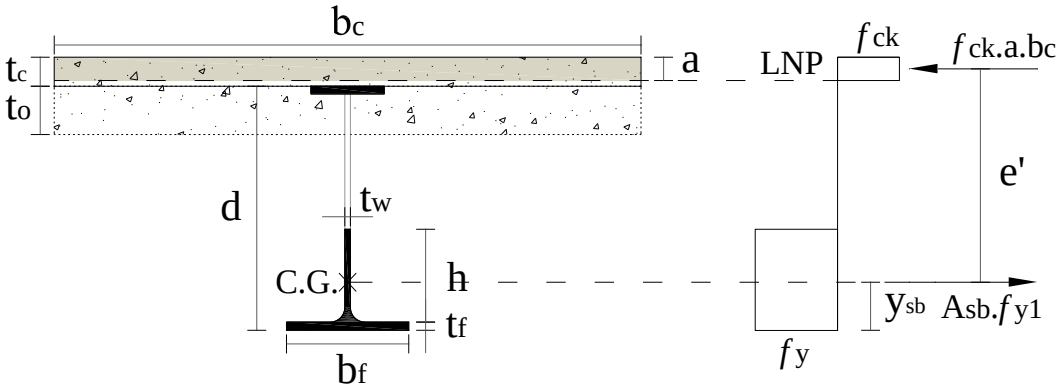

Figura 6.2 - Dimensões e diagrama de distribuição de tensões limites para o protótipo VM-01.

Posição da linha neutra na laje:

$$a = \frac{A_{sb} \cdot f_{y1}}{b_c \cdot f_{ck}} = 15,68 mm$$

Centro de gravidade da região tracionada em relação à face inferior da viga:

$$y_{sb} = \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i} = 22,03 mm$$

Braço de alavanca:

$$e' = d - y_{sb} + t_c - \frac{a}{2} = 252,63 mm$$

Momento resistente último:

$$M_{pl} = e' \cdot A_{sb} \cdot f_{y1} = 142,62 kN.m$$

c) Cálculo da força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento na seção com abertura:

$$V_{pl} = 0,6.A_w.f_{y1} = 125 kN$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

6.1.2.
Modelo VM-02

Na Figura 6.3 é apresentada a geometria do protótipo VM-02 com o diagrama de tensões elásticas para o cálculo do momento de início de escoamento, e na Figura 6.4 o diagrama de tensões limites para o cálculo do momento resistente último. Na Tabela 6.3 são descritas as dimensões.

Tabela 6.3 - Dimensões do modelo VM-02.

Modelo	b_c	t_c	t_o	d	t_w	h	b_f	t_f	A_w
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm^2
VM-02	1200	30	50	288,3	5,8	96	127	8,5	606,1
U6’’x6,11	-	-	-	76,2	4,32	-	35,81	6,93	-

a) Calculo do momento resistente de início de escoamento da viga mista:

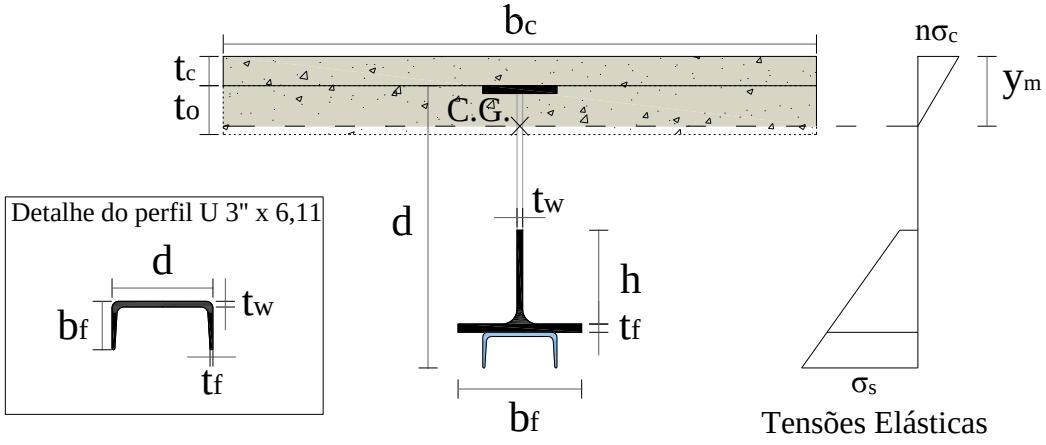

Figura 6.3 - Dimensões e diagrama de distribuição de tensões elásticas para o protótipo VM-02.

Relação modular:

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{30672} = 6,52$$

Posição do centro de gravidade da seção mista a partir da face superior da laje:

$$y_m = \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i} = 71,44mm$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

Módulo resistente elástico:

$$W_{t\inf} = \frac{I_t}{d + t_c - y_m} = 492262,82mm^3$$

Momento resistente de início de escoamento da viga mista:

$$M_{re} = W_{t\inf} . f_{y2} = 123,07kN.m$$

b) Cálculo do momento resistente último:

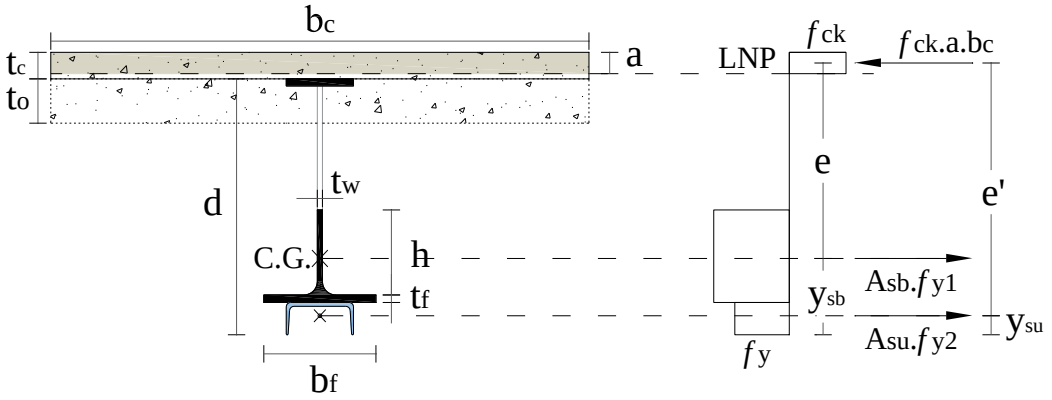

Figura 6.4 - Dimensões e diagrama de distribuição de tensões limites para o protótipo VM-02.

Posição da linha neutra na laje:

$$a = \frac{A_{sb} \cdot f_{y1} + A_{su} . f_{y2}}{b_c \cdot f_{ck}} = 21,08mm$$

Centro de gravidade da região tracionada em relação à face inferior da viga:

$$y_{sb} = \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i} = 57,83mm$$

$$y_{su} = \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i} = 24,70mm$$

Braços de alavanca:

$$e = d + t_c - y_{sb} - \frac{a}{2} = 249,94mm$$

$$e' = d + t_c - y_{su} - \frac{a}{2} = 283,07mm$$

Momento resistente último:

$$M_{pl} = e \cdot A_{sb} \cdot f_{y1} + e' \cdot A_{su} \cdot f_{y2} = 196,15kN.m$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

c) Cálculo da força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento na seção com abertura:

$$V_{pl} = 0,6.A_w.f_{y1} = 125kN$$

6.2. Carga Máxima Aplicada no Teste Experimental

Para a configuração de aplicação de carga foi feito o cálculo da força a ser aplicada baseada no momento resistente último.

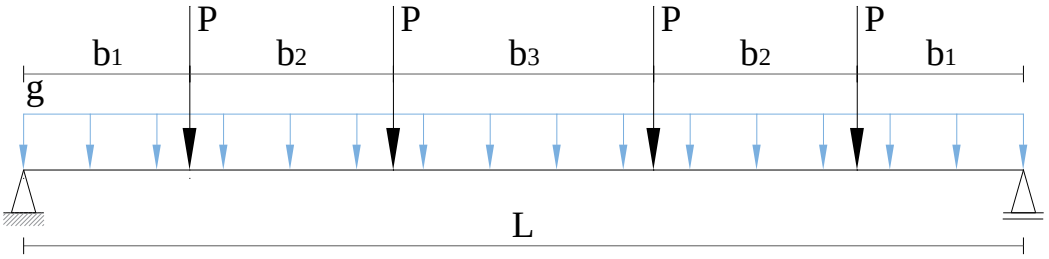

Figura 6.5 - Esquema estático dos modelos.

Tabela 6.4 - Distância entre forças, resistência dos modelos e peso próprio.

Modelo	b_1	b_2	b_3	M_{pl}	L	g	p
	mm	mm	mm	kN.m	mm	kN/m	kN
VM-01	1140	1200	1500	142,62	6180	2,55	1,23
VM-02	975	1200	1500	196,15	5850	2,61	1,23

g – peso próprio da viga mista.

p – peso próprio das vigas de transmissão de carga.

6.2.1. Modelo VM-01

Para o protótipo VM-01, a carga teórica que provoca a ruína por flexão pode ser calculada da seguinte maneira:

$$P = \left(\frac{8.M_{pl} - g.L^2}{16.b_1 + 8.b_2} \right) - p = 36,25kN$$

$$2P = 72,5kN$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

6.2.2.
Modelo VM-02

Para o protótipo VM-02, a carga teórica que provoca a ruína por flexão pode ser calculada como:

$$P = \left(\frac{8.M_{pl} - g.L^2}{16.b_1 + 8.b_2} \right) - p = 57,5kN$$

$$2P = 115kN$$

6.3.
Flecha

Por meio de uma análise elástica, pode-se obter o valor teórico dos deslocamentos verticais. Segundo o esquema estático da Figura 6.5, são calculadas as flechas devido ao peso próprio (g) utilizando a equação (6.1), e para as Forças (P) aplicadas pelo sistema de ensaio por meio da equação (6.2). Os cálculos foram feitos levando em consideração que não houve perda de rigidez da estrutura, ou seja, o aço e o concreto possui interação total na interface.

$$\delta_1 = \frac{5.g.L^4}{384.E_s.I_t} \tag{6.1}$$

$$\delta_2 = \frac{2.P.(b_1 + b_2/2).(3.L^2 - 4.(b_1 + b_2/2)^2)}{24.E_s.I_t} \tag{6.2}$$

Onde:

g é o peso próprio;

P é a força aplicada;

L é o vão da viga;

E_s é o módulo de elasticidade do aço;

I_t é o momento de inércia transformado para a seção mista;

2P é a força a ser aplicada por cada atuador;

b_1 é a distância entre o apoio e a primeira força;

b_2 é a distância entre a primeira e a segunda força.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

6.4. Resumo dos Resultados

Os resultados obtidos teoricamente estão apresentados na Tabela 6.5 para cada protótipo.

Tabela 6.5 - Resultados teóricos.

Modelo	2P	V_{pl}	M_{re}	M_{pl}	δ_1	δ_2
	kN	kN	kN.m	kN.m	mm	mm
VM-01	72,5	125	126,7	142,62	2,98	18,28
VM-02	115	125	123,07	196,15	1,64	10,02

2P – carga correspondente a ruina do protótipo por flexão;

V_{pl} – força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento;

M_{re} – momento resistente de início de escoamento da viga mista;

M_{pl} – momento resistente último;

δ1 – flecha devido ao peso próprio;

δ_2 – deslocamento calculado para uma carga (2P) de 40 kN.

6.5. Análise a Flexo-Tração

Para analisar os efeitos na região do perfil com abertura (tê inferior), submetido aos esforços combinados de momento fletor local e força normal, foi utilizado um método simplificado, adaptado do modelo apresentado por Chien e Ritchie (1984) para o cálculo de vigas mistas do tipo Stub-Girder. O modelo foi desenvolvido com o auxílio da ferramenta computacional Ftool

6.5.1. Modelo VM-01

A viga mista VM-01, com vão de 6,18 m, foi modelada biapoiada com elementos de barras. Devido à presença das aberturas de alma, a região de alma cheia foi segmentada em três partes entre aberturas e quatro partes nas extremidades. A laje de concreto é representada pela corda superior e o tê da viga metálica pela corda inferior. O modelo estrutural utilizando o método simplificado adaptado à viga mista proposta é apresentado na Figura 6.6.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

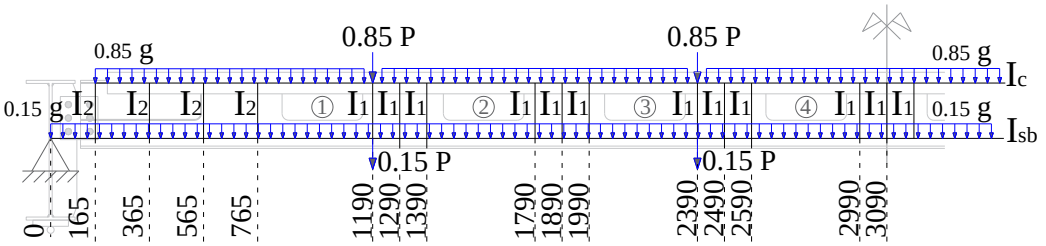

Figura 6.6 - Modelo estrutural simplificado para o protótipo VM-01 (dimensões em mm).

Neste modelo, foram utilizadas as cargas (P) previstas teoricamente no Capítulo 6, mais o peso próprio (g) da viga mista. Na Tabela 6.6 são apresentados os valores dos momentos de inércia de cada elemento (tê inferior, alma e laje de concreto) e carga imposta na estrutura.

Tabela 6.6 - Dados de entrada no modelo estrutural para a viga VM-01.

Elemento	I	Isb + Ic	P = 32	g = 2,55
	mm^4	%	kN	kN/m
Tê inferior	1436961,62	15%	4,9	0,39
Alma 1	4350000			
Alma 2	50976562,5			
Laje de concreto	7872853,88	85%	26,82	2,16

I_c – momento de inércia da laje de concreto.

I_{sb} – momento de inércia do tê inferior do perfil.

I_1 – momento de inércia da alma entre aberturas com comprimento de 300 mm.

I_2 – momento de inércia da alma de extremidade com comprimento de 750 mm.

Os diagramas de momento fletor e esforço normal, obtidos pelo programa Ftool estão apresentados na Figura 6.7.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

Diagrama de Momento Fletor

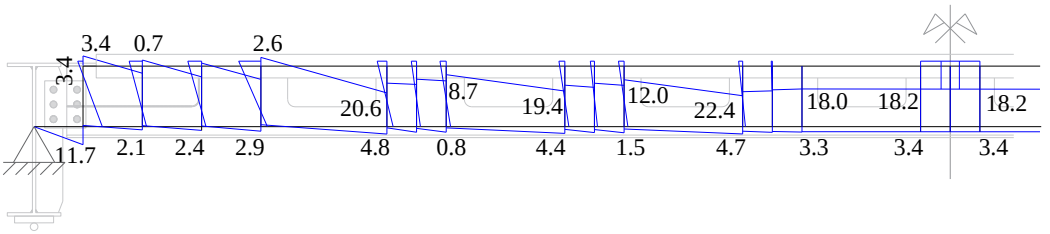

Diagrama de Força Axial

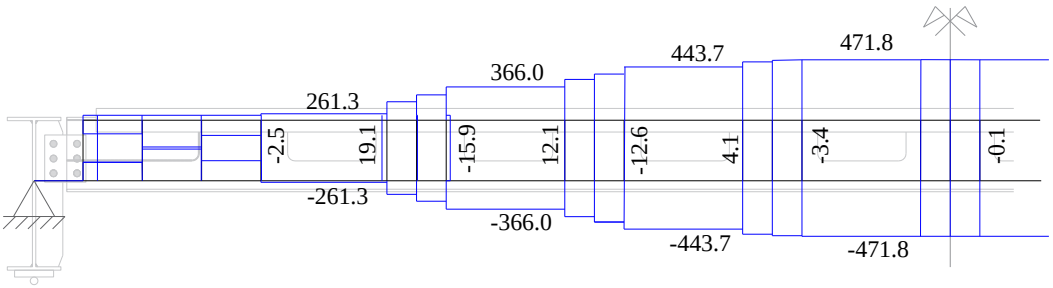

Figura 6.7 - Diagrama de momento fletor (kN.m) e força axial (kN) do modelo estrutural para o protótipo VM-01.

O cálculo do momento resistente último (Mp) e força resistente à tração (Tn) do tê inferior do perfil é feito através das equações (6.3) e (6.4), respectivamente, utilizando o esquema apresentado na Figura 6.8. Na Tabela 6.7 são apresentados os dados referentes ao tê.

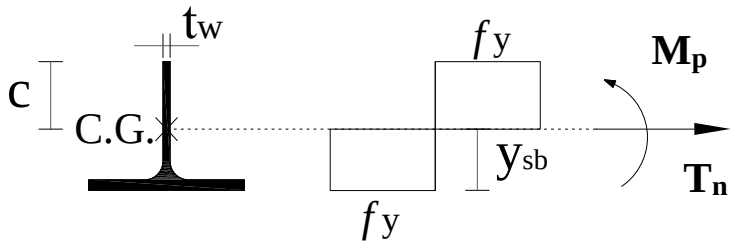

Figura 6.8 - Modelo de cálculo para o tê inferior do perfil submetido à flexo-tração.

Tabela 6.7 - Propriedades do tê inferior do perfil.

c	**t_w**	**y_{sb}**	**A_{sb}**	**f_y**
mm	mm	mm	mm^2	MPa
82,47	5,8	22,03	1636,3	345

A_{sb} – área do tê inferior

y_{sb} – centro de gravidade do tê

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

$$M_p = (c.t_w.f_y.).\frac{c}{2}.2 \tag{6.3}$$

$$T_n = A_{sb}.f_y \tag{6.4}$$

Para a abertura 4 mais próxima do centro do vão, os valores dos momentos resistente e solicitante e forças de tração são apresentados na Tabela 6.8:

Tabela 6.8 - Valores de momentos e forças de tração, resistente e solicitante, da viga mista VM-01.

Md	Mn	Td	Tn
MPa	MPa	kN	kN
3,4	13,6	471,8	564,52

Mediante a superposição dos efeitos do momento fletor e da força normal, a interação entre os dois esforços pode ser obtida pela inequação (6.5).

$$\left(\frac{M_d}{M_n}\right)+\left(\frac{T_d}{T_n}\right)\leq 1 \tag{6.5}$$

$$1,086 \rightarrow \text{Não passa!}$$

A equação de interação dos esforços axiais e momentos fletores demonstra que ocorreu plastificação completa do perfil por flexo-tração.

6.5.2. Modelo VM-02

A viga mista VM-02, com vão de 5,85 m, foi modelada biapoiada com elementos de barras. Devido à presença das aberturas de alma, a região de alma cheia foi segmentada em três partes entre aberturas e nas extremidades. A laje de concreto é representada pela corda superior e o tê da viga metálica pela corda inferior. O modelo estrutural utilizando o método simplificado adaptado à viga mista proposta é apresentado na Figura 6.9.

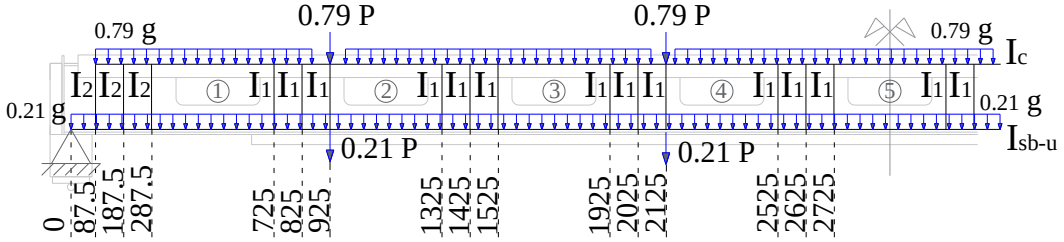

Figura 6.9 - Modelo estrutural simplificado para o protótipo VM-02 (dimensões em mm).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

O carregamento aplicado e o momento de inercia de cada elemento (tê inferior + perfil U, alma e laje de concreto) são apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Dados de entrada no modelo estrutural para a viga VM-02.

Elemento	I	Isb-u + Ic	P = 50	g = 2,61
	mm^4	%	kN	kN/m
Tê inferior + Perfil U	2097706,72	21%	10,59	0,55
Alma 1	4350000			
Alma 2	14681250			
Laje de concreto	7872853,88	79%	39,73	2,06

I_c – momento de inércia da laje de concreto.

I_{sb-u} – momento de inércia do tê inferior + momento de inercia do perfil U.

I_1 – momento de inércia da alma entre aberturas com comprimento de 300 mm.

I_2 – momento de inércia da alma de extremidade com comprimento de 450 mm.

Os diagramas de momento fletor e força Axial estão apresentados na Figura 6.10.

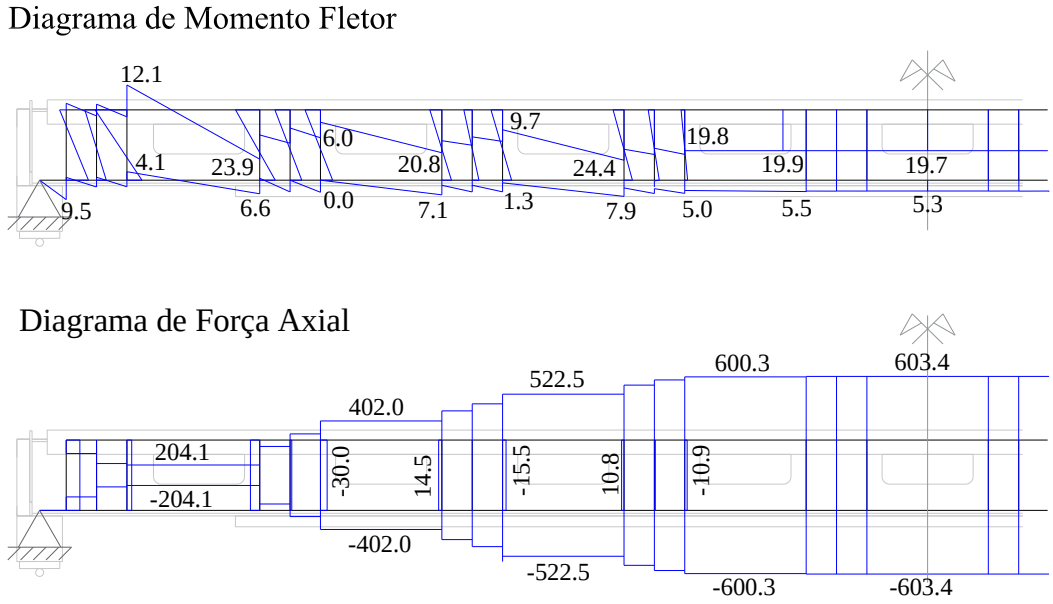

Figura 6.10 - Diagrama de momento fletor (kN.m) e força axial (kN) do modelo estrutural para o protótipo VM-02.

O cálculo do momento resistente último (Mp) e força resistente à tração (Tn) do tê inferior mais perfil U é feito através das equações (6.3) e (6.6), respectivamente, utilizando o esquema apresentado na Figura 6.11. Na Tabela 6.10 são apresentados os dados referentes ao tê e ao perfil U.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA

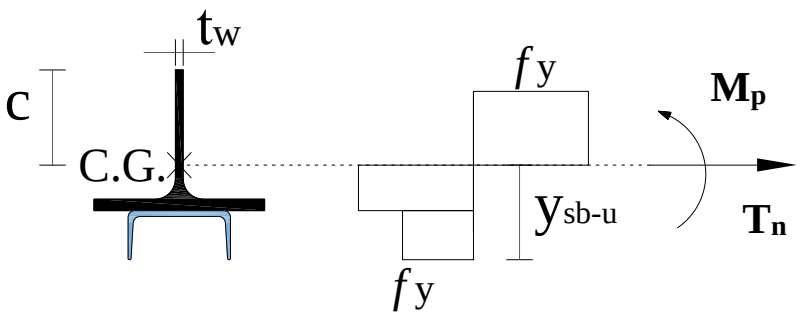

Figura 6.11 - Modelo de cálculo para o tê inferior e perfil U submetidos à flexo-tração.

$$T_n = A_{sb} \cdot f_{y1} + A_{su} \cdot f_{y2} \tag{6.6}$$

Tabela 6.10 - Propriedades do tê inferior e perfil U.

c	**t_w**	**y_{sb-u}**	**A_{sb}**	**f_{y1}**	**A_{su}**	**f_{y2}**
mm	mm	mm	mm^2	MPa	mm^2	MPa
93,15	5,8	47,15	1636,3	345	778	250

A_{sb} – área do tê inferior;

A_{su} – área do perfil U;

y_{sb-u} – centro de gravidade do tê inferior mais perfil U

Para a abertura 5 centrada a meio vão, os valores do momento fletor e força normal, resistentes e solicitantes, são apresentados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 - Valores de momentos e forças de tração, resistente e solicitante, da viga mista VM-02.

Md	**Mn**	**Td**	**Tn**
MPa	MPa	kN	kN
5,3	17,36	603,4	759

$$\left(\frac{M_d}{M_n}\right) + \left(\frac{T_d}{T_n}\right) \leq 1 \tag{6.7}$$

Aplicando a inequação (6.7) aos valores descritos na Tabela 6.11 para a viga VM-02, obtém-se 1,1 de interação à flexo-tração, demonstrando que a máxima tensão a qual o perfil está submetido, ultrapassa o limite de escoamento da seção completa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312961/CA