



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Licenciatura

**Padronização de Vigas de Betão Pré-Fabricado para
Tabuleiros de Pontes Rodoviárias**

CULPA VIRGÍLIO EMÍLIO ANTÓNIO

Supervisora:

Prof.^a Alexandra Neves, Eng.^a

Maputo, Fevereiro de 2023

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Licenciatura

**Padronização de Vigas de Betão Pré-Fabricado para
Tabuleiros de Pontes Rodoviárias**



CULPA VIRGÍLIO EMÍLIO ANTÓNIO

Supervisora:

Prof.^a Alexandra Neves, Eng.^a

Maputo, Fevereiro de 2023

*Dedico aos meus pais e irmãos, que o
culminar deste trabalho seja sinonimo de
alegria aos vossos corações.*

AGRADECIMENTOS

O percorrer desta jornada, de dias e anos, desde a chegada à faculdade até a conclusão deste trabalho de licenciatura, foi acompanhado de diversas pessoas e entidades, sem as quais tal trajecto não seria possível, a estes, este espaço é dedicado.

Palavras não podem expressar a minha gratidão aos que me acompanharam, nomeadamente:

A Deus, por dar-me forças, saúde e disposição para enfrentar os diversos obstáculos que se dispuseram ao longo da minha caminhada;

Aos meus pais, Virgílio Emílio António Culpa e Adelaide Valentim Culpa, pelo apoio incondicional, encorajamento e confiança depositada em mim, e aos meus irmãos, Alcinda Gisela Virgílio Culpa, Diana Virgílio Culpa e Enzo Virgílio Culpa, pela companhia e momentos alegres durante as inúmeras horas de estudo.

À minha supervisora Prof.^a Eng.^a Alexandra Neves pelo material fornecido, pelas oportunidades de aprender, paciência, força, atenção e pronta disposição em procurar soluções sempre que problemas foram se apresentado durante a realização do trabalho, que foi importante, sem a qual a realização deste trabalho não teria sido possível.

À Universidade Eduardo Mondlane e a Faculdade de Engenharia, a todos os docentes pelos ensinamentos, aos funcionários do departamento e da biblioteca.

Ao escritório da TÉCNICA, pelo espaço acolhedor em que pude desenvolver este estudo, e aos diversos colegas, que deram suporte e contribuíram para a sua realização, fazendo menção aos Eng.^{os} Mauro Carimo, Ribeiro Júlio e Hans Dete, o Sr. Alvaro Assane e Arnaldo Comé.

À ANE, nas pessoas dos Eng.^{os} Virgílio Lichucha e Evaristo Mussupai, que se mostraram abertos e facilitaram o fornecimento de dados.

Aos meus colegas da faculdade e a minha turma, em especial a Cleide Santos, Frâncio Mate, Gerson Ribeiro, Christian Macie, Eric Gwambe, Stélio João, Issufo Zeinal, Francisco Quisele e Anita Paixão, com quem mais trabalhei e passei muitos dos bons momentos na Faculdade, cuja presença foi muito importante para chegar até aqui e se tornaram pessoas que irei levar para a vida.

À minha família, amigos e a todos que contribuíram directa ou indirectamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

A pré-fabricação nos tabuleiros de pontes, amplamente aplicada nas vigas, tem-se apresentado como uma solução conveniente por ajudar, principalmente, na aceleração da construção de pontes, maior qualidade dos elementos, assim como na redução do congestionamento na obra. Uma vez que para cada projecto pode haver uma nova secção transversal para as vigas, isso pode implicar no investimento em novas cofragens e no reaprendizado para a produção, tornando o processo menos competitivo e moroso. Para responder a essa questão, surge a padronização, que consiste na simplificação da produção, recorrendo a secções transversais pré-concebidas. Deste modo, no presente trabalho, padronizaram-se vigas de betão pré-fabricadas pré-esforçadas para tabuleiros de pontes rodoviárias, onde as lajes são betonadas *in situ*, e é feito o seu dimensionamento para os vãos de 10 a 30 metros, tendo em consideração as acções da Comissão de Transporte e Comunicações da África Austral (SATCC), aplicáveis na região da Comunidade para o Desenvolvimento da África Austral (SADC), em conjugação com os efeitos climáticos extremos, de acordo com as recomendações existentes em Moçambique. No dimensionamento das vigas, fez-se o uso do *software* de cálculo *CSiBridge*, onde se obtiveram os esforços internos para as acções aplicadas, o que permitiu posteriormente efectuarem-se as devidas verificações. Durante a análise foram estudados os efeitos diferidos sobre o tabuleiro, nomeadamente a fluência e a retracção, e as consequências decorrentes do comportamento diferencial entre as vigas e laje devido a estes efeitos. Do seu dimensionamento resultaram quatro secções, uma rectangular para os vãos de 10 a 15 metros e três em “I” para os vãos de 16 a 30 metros, onde as suas dimensões foram determinadas de modo a otimizar o uso das cofragens e a facilitar a sua montagem no destino. Com as secções padronizadas, contribui-se para uma construção mais acelerada, menos custos de produção e um maior incentivo para a pré-fabricação de vigas de pontes.

Palavras-chave: Pontes, pré-fabricação, pré-esforço, SATCC, vigas em “I”, vigas rectangulares

ABSTRACT

Precasting in bridge decks, widely applied in the girders, has been presented as a convenient solution for helping, mainly, in accelerated bridge construction, higher quality of the elements, as well as the reduction of work traffic. Since for each project, there may be a new girder cross-section, this may imply in the investment in new formworks and relearning for production, making the process less competitive and time-consuming. In order to answer this question, standardization arises, which consists in the simplification of production, recurring on pre-conceived girder sections. Thus, in the present work, precast prestressed girders for road bridge decks were standardized, where the deck slabs are cast in place, and their design was carried out for spans of 10 to 30 meters, taking into consideration the loads from the Southern Africa Transport and Communications Commission (SATCC), applicable to the Southern African Development Community (SADC) region, in conjunction with extreme weather effects, according to recommendations existing in Mozambique. The design was made with CSiBridge design software, where girders' internal forces were obtained for the applied loads, allowing subsequent verifications to be carried out. During the analysis, long-term effects on the deck slab were studied, namely creep and shrinkage, and the consequences due to the differential behaviour between the girders and the slab, due to these effects. Its design resulted in four sections, a rectangular girder section for spans from 10 up to 15 meters and three "I" girder sections for spans ranging from 16 to 30 meters, where their dimensions were determined so as to optimize formwork use and make their assembly easy at the destination. With the standardized sections, it contributes to a more accelerated construction, lower production costs and a greater incentive for the precast of bridge girders.

Keywords: Bridges, precasting, prestress, SATCC, I-girder, rectangular girders

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivos	1
1.2. Metodologia.....	2
1.3. Organização do trabalho	3
2. PRÉ-FABRICAÇÃO E A PADRONIZAÇÃO EM PROJECTOS DE PONTES.....	4
2.1. Breve historial	4
2.2. Pré-fabricação na construção de pontes.....	4
2.2.1. Produção, transporte e colocação.....	5
2.2.2. Vantagens	7
2.2.3. Desvantagens	7
2.3. Padronização na pré-fabricação	8
2.3.1. <i>Design</i> para manufactura e montagem (DpMM)	8
2.4. Secções transversais das vigas pré-fabricadas usadas nos tabuleiros.....	9
2.4.1. Secção transversal em “I”	11
2.4.2. Secção transversal rectangular.....	11
2.4.3. Secção transversal em T	11
2.4.4. Secção transversal em U (Viga em caixão, <i>box/hollow beam</i>)	12
2.4.5. Aduelas pré-fabricadas	12
2.5. Continuidade estrutural do tabuleiro com vigas pré-fabricadas.....	12
2.5.1. Tramos isostáticos (simplesmente apoiados)	13
2.5.2. Tramos simplesmente apoiados com lajes de continuidade (continuidade aparente ao nível da laje ou continuidade parcial)	13
2.5.3. Continuidade total entre os tramos do tabuleiro (continuidade mecânica)	15
2.5.4. Pontes integrais	17
2.6. Procedimentos para a betonagem da laje de tabuleiro	17
2.6.1. Solução com cimbrês.....	18
2.6.2. Solução com pré-lajes.....	18
2.7. Situação geral em Moçambique.....	20
3. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS PRÉ-FABRICADAS	22
3.1. Condicionantes para a determinação da secção transversal das vigas.....	22
3.2. Secção transversal das vigas e os espaçamentos.....	22

3.2.1.	Banzo inferior	23
3.2.2.	Alma	23
3.2.3.	Banzo superior	24
3.2.4.	Altura da secção	24
3.2.5.	Espaçamento e disposição das vigas	24
3.2.6.	Carlingas ou diafragmas	25
3.3.	Disposições relativas entre as vigas e a laje de tabuleiro	26
3.3.1.	Declive longitudinal	26
3.3.2.	Declive transversal	27
3.3.3.	Curvas horizontais	27
3.3.4.	Curvas verticais.....	28
3.3.5.	Viés	28
3.3.6.	Largura variável	29
3.4.	Elementos complementares ao tabuleiro	30
3.4.1.	Aparelhos de apoio	30
3.4.2.	Outros elementos complementares	30
4.	EFEITOS DIFERIDOS.....	31
4.1.	Fluência.....	32
4.2.	Retracção.....	34
4.3.	Efeito da fluência e da retracção diferencial entre a laje BIS e as vigas pré-fabricadas	36
4.3.1.	Efeito da fluência na secção composta.....	37
4.3.2.	Efeito da retracção na secção composta	38
5.	DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS PRÉ-FABRICADAS PARA PONTES RODOVIÁRIAS	40
5.1.	Descrição geral	40
5.2.	Apresentação da estrutura	40
5.2.1.	Principais características do tabuleiro tipo	40
5.2.2.	Características geométricas.....	41
5.2.3.	Materiais dos elementos do tabuleiro.....	42
5.3.	Acções	44
5.3.1.	Acções permanentes	44
5.3.2.	Acções de tráfego	44
5.3.3.	Sobrecarga de passeio e guarda-corpos	46

5.3.4.	Vento.....	46
5.3.5.	Sismo	47
5.3.6.	Efeitos térmicos.....	48
5.3.7.	Acções de longo prazo (fluência e retracção)	49
5.4.	Combinação de acções.....	49
5.5.	Verificação para os estados limites de utilização	49
5.5.1.	Limitação de tensões e controlo da fendilhação	50
5.5.2.	Deformações.....	53
5.6.	Estados limites últimos.....	54
5.6.1.	Flexão	54
5.6.2.	Esforço transversal	55
5.6.3.	Esforço longitudinal na ligação do banzo com a alma	57
5.6.4.	Esforço longitudinal na junta de betonagem	58
5.7.	Resultados	58
6.	CONCLUSÕES.....	60
7.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	62
	BIBLIOGRAFIA.....	63
–	Referências bibliográficas.....	63
–	Outra bibliografia consultada	66

ANEXOS

ANEXO 1: Disposição das extremidades das vigas pré-fabricadas relativamente aos aparelhos de apoio

ANEXO 2: Combinação de acções

ANEXO 3: Esforços internos devidos a fluência e retracção diferenciais

ANEXO 4: Acção do vento

ANEXO 5: Acção sísmica

ANEXO 6: Variação diferencial de temperatura

ANEXO 7: Pré-esforço

ANEXO 8: Perdas de pré-esforço

ANEXO 9: Momentos flectores para os estados limites últimos

ANEXO 10: Esforço transversal, esforços nas ligações entre os banzos e as almas, e esforços nas juntas de betonagem

ANEXO 11: Deformações

ANEXO 12: Reacções de apoio

ANEXO 13: Peças desenhadas

LISTA DE SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS, ABREVIACÕES E SIGLAS

Embora o significado de cada um dos símbolos, abreviações e siglas seja indicado no texto, à medida que são referidos pela primeira vez, ir-se-á apresentar a seguir a sua listagem por ordem alfabética.

Símbolos

Símbolo	Definição
Alfabeto latino	
A	Aceleração sísmica horizontal
a_0	Largura correspondente a A_{c0} na direcção considerada
A_1	Área sólida horizontal, consoante o caso (só estrutura ou e sobrecarga)
a_1	Largura correspondente a A_{c1} na direcção em consideração
A_3	Área em planta
A_c	Área da secção transversal de betão
A_{c0}	Área carregada
A_{c1}	Maior área de distribuição de cálculo homotética de A_{c0}
A_i	Área da junta
A_L	Área da secção transversal da laje
A_{ps}	Área da armadura de pré-esforço
A_s	Área das armaduras
A_{sc}	Área da secção composta
A_{sl}	Área da armadura de tracção prolongada
A_{sw}	Área da secção transversal das armaduras de esforço transverso
A_t	Área do tabuleiro
A_v	Área de secção transversal da viga
b_{bi}	Largura total dos banzos inferiores das vigas
b_{eff}	Largura efectiva da laje
b_i	Largura da junta
b_{Lt}	Largura efectiva da laje transformada
b_w	Menor largura da secção transversal na área comprimida
C	Compressão instalada no betão
c	Coefficiente que depende da rugosidade da junta
C_d	Coefficiente de arrastamento
CL	Coefficiente de levantamento derivado do CPDPRA

$C_{máx,fi}$	Tensão de compressão máxima na fibra inferior
$C_{máx,fs}$	Tensão de compressão máxima na fibra superior
$C_{Rd,c}$	Coeficiente para o cálculo do esforço transverso
d	Altura útil da secção
$D_{esc,fi}$	Descompressão na fibra inferior
$D_{esc,fs}$	Descompressão na fibra superior
$E_{c,28}$	Módulo de elasticidade secante do betão aos 28 dias de idade
E_c^L	Módulo de elasticidade da laje betonada <i>in situ</i>
E_c^V	Módulo de elasticidade da viga pré-fabricada
E_p	Módulo de elasticidade das armaduras pré-esforçadas
E_s	Módulo de elasticidade do aço
e	Excentricidade
e_p	Excentricidade das armaduras de pré-esforço
F_{cc}	Força devida a fluência do betão
f_{cd}	Tensão de cálculo de rotura a compressão do betão
f_{ck}	Tensão característica de rotura a compressão do betão
F_{cs}	Força devida a retracção do betão
f_{ctd}	Tensão de cálculo de rotura a tracção do betão
F_{eq}	Força sísmica
F_L	Força longitudinal de arranque ou frenagem
f_{ps}	Tensão nas armaduras de pré-esforço
F_{Sd}	Força de cálculo devida às ancoragens
f_{syd}	Tensão resistente do aço de cálculo
$F_{t1,Sd}$	Força a absorver pelas armaduras de ancoragem
F_{tr}	Força devida a variação de temperatura
f_{ywd}	Valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso
g_{ad}	Outros pesos próprios
h_e	Espessura específica
h_f	Espessura do banzo na ligação entre o banzo e a alma
h_t	Altura total do tabuleiro
h_x	Altura acima do nível da base da porção m_x da estrutura considerada
I	Factor de importância da estrutura
I_{sc}	Momento de inércia da secção composta
j	Coeficiente igual a $(n - 1)/2n$ em que n é o número de armaduras idênticas sucessivamente tracionadas. Como aproximação, pode

	adoptar-se para j o valor $\frac{1}{2}1$ para as variações devidas às acções permanentes aplicadas após o pré-esforço
j_m	Número de dias em que o endurecimento tomou lugar a T°C
K	Coeficiente de proporcionalidade
k	Coeficiente para o cálculo do esforço transversal
k	Desvio angular parasita para as armaduras interiores (por unidade de comprimento)
k_o	Parâmetro para a determinação da frequência própria fundamental, que depende do sistema estático
k_c	Factor dependente da composição do betão
k_d	Coeficiente que depende da densidade do ar e conseqüentemente da altitude acima do nível do mar
k_e	Factor dependente da espessura efectiva do membro
k_j	Factor dependente do desenvolvimento da deformação como função do tempo
k_L	Factor dependente das condições ambientais
k_m	Factor dependente do grau de endurecimento (maturidade) do betão no período do carregamento
L	Vão da ponte
l	Largura do tabuleiro
L_s	Vão do membro equivalente
m	Coeficiente de homogeneização
M_{cc}	Momento flector devido à fluência diferencial entre os elementos
M_{cs}	Momento flector gerado pela retracção diferencial
M_{ext}	Momento flector externo
$M_{g,v}$	Momento flector devido ao peso próprio da viga
$M_{g,v+L}$	Momento flector devido ao peso próprio da viga e da laje
m_i	Massa do peso próprio da parte da estrutura a ser considerada
M_Q	Momento devido a sobrecarga e aos pesos próprios não estruturais
M_u	Momento flector para o estado limite último
n_c	Índice modular
N_{cs}	Esforço normal de retracção
N_{Ed}	Esforço normal devido ao pré-esforço
N_{ext}	Esforço normal externo
P_0	Pré-esforço inicial
P_∞	Pré-esforço no tempo infinito
p	Perda de tensão por atrito por metro
q	Pressão dinâmica do vento

Q_a	Sobrecarga NA
Q_b	Sobrecarga NB
Q_p	Carga de passeio
R_H	Reacção de apoio horizontal transversal
R_L	Reacção de apoio horizontal longitudinal
R_V	Reacção de apoio vertical
S	Factor de resposta sísmica
s	Espaçamento das armaduras em consideração
T	Período fundamental da vibração da estrutura
T	Temperatura
t	Tempo
t	Tempo depois da aplicação do pré-esforço, em horas
T_s	Tracção ao nível das armaduras
u	Perímetro em contacto com a atmosfera
ν	Coefficiente de redução de resistência
ν_1	Coefficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal
ν_c	Máxima velocidade da rajada do vento
V_{Ed}	Esforço transversal
ν_{Ed}	Esforço longitudinal na ligação entre o banzo e a alma
ν_{Edi}	Valor de cálculo da tensão tangencial na junta
V_{sd}	Esforço transversal de cálculo
V_{Rd}	Esforço transversal resistente total
ν_{Rdi}	Valor de cálculo da tensão tangencial resistente na junta
$V_{Rd,c}$	Esforço transversal resistido pelo betão
$V_{Rd,max}$	Esforço transversal resistente máximo
$V_{Rd,s}$	Esforço transversal resistido pelas armaduras
$w_{i,v}$	Módulo de flexão da viga
W_{LL}	Força do vento longitudinal aplicada na sobrecarga de tráfego
W_{LS}	Força do vento longitudinal aplicada no tabuleiro
$w_{s,sc}$	Módulo de flexão da secção compósita
W_{tL}	Força do vento transversal ao tabuleiro aplicada na estrutura e sobrecarga
W_{tS}	Força do vento transversal ao tabuleiro aplicada na estrutura
W_v	Força do vento vertical ao tabuleiro
x	Posição do eixo neutro relativamente à fibra superior

x	Distância ao longo da armadura a partir do ponto em que a força de pré-esforço é igual a $P_{máx}$ (força na extremidade activa durante a aplicação do pré-esforço)
z	Binário das forças de compressão e tracção na secção considerada

Alfabeto grego

α	Parâmetro do bloco considerado
α	Ângulo que a armadura que atravessa a junta faz com a superfície da junta
α_{cw}	Coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido
β	Parâmetro do bloco considerado
β	Relação entre o esforço longitudinal na secção de betão novo e o esforço longitudinal total na zona de compressão ou na zona de tracção, ambos calculados na secção considerada
ΔF_d	Variação do esforço normal no banzo ao longo do comprimento Δx
$\Delta \theta_{cc}$	Variação de rotação devida a fluência
$\Delta \theta_{elástica}$	Rotação instantânea
ΔL	Comprimento de reentrada das cunhas
ΔP_{da}	Perda de pré-esforço devida a reentrada das cunhas
ΔP_{el}	Perda de pré-esforço devida a deformação instantânea
ΔP_{μ}	Perda de pré-esforço devida ao atrito
$\Delta \sigma_c$	Variação de tensão no centro de gravidade das armaduras no instante t
$\Delta \sigma_d$	Perdas de pré-esforço diferidas
$\Delta \sigma_i$	Perdas de pré-esforço instantâneas
$\Delta \sigma_{i,at}$	Perda de pré-esforço devida ao atrito
$\Delta \sigma_{i,da}$	Perda de pré-esforço devida a reentrada das cunhas
$\Delta \sigma_{i,el}$	Perda de pré-esforço devida a deformação inicial do betão
$\Delta \sigma_{i,rcp}$	Perda de pré-esforço devida a relaxação inicial das armaduras
$\Delta \sigma_{d,rlp}$	Perdas de pré-esforço devida a relaxação de longo prazo das armaduras
$\Delta \sigma_{pr}$	Valor absoluto das perdas de pré-esforço devidas à relaxação
Δx	Comprimento considerado (geralmente metade do vão para vãos simplesmente apoiados)
$\Delta \chi_{cc}$	Curvatura da secção devida a fluência
$\Delta \chi_{cs}$	Curvatura da secção devida a retracção
θ	Ângulo das escoras inclinadas na alma

θ	Soma dos desvios angulares ao longo de um comprimento x
δ_m	Grau de endurecimento na altura do carregamento
ε_{cc}	Extensão do betão devida à fluência
ε_{ccf}	Extensão do betão devida à fluência reduzida devida ao efeito das armaduras
ε_{ce}	Deformação elástica do betão devida ao pré-esforço ao nível das armaduras tracionadas
ε_{cF}	Extensão do betão devida a forças horizontais de aceleração ou frenagem
ε_{cs}	Extensão do betão devida à retracção
$\varepsilon_{cs,L}$	Extensão do betão devida à retracção na laje
$\varepsilon_{cs,V}$	Extensão do betão devida à retracção na viga
$\varepsilon_{cs,dif}$	Extensão do betão devida à retracção diferencial
ε_{cT}	Extensão do betão devida a variação uniforme de temperatura
ε_t	Extensão total
ε_{ps}	Extensão final ao nível das armaduras de pré-esforço
ε_s	Extensão nas armaduras devida ao momento flector
ε_{se}	Extensão elástica ao nível das armaduras devida ao pré-esforço efectivo
μ	Coeficiente que depende da rugosidade da junta
μ	Coeficiente de atrito entre a armadura de pré-esforço e a sua bainha
μ	Razão entre o pré-esforço inicial e a resistência da armadura
ξ	Factor numérico que reflecte a configuração estrutural e as propriedades mecânicas do material, incluindo o amortecimento, ductilidade e/ou a capacidade energia-absortiva da estrutura
ρ	Índice geométrico de armadura longitudinal
ρ_{1000}	Valor da perda devida à relaxação (em %), às 1000 horas depois da aplicação de pré-esforço e a uma temperatura média de 20°C.
σ_{cp}	Tensão de compressão devida ao pré-esforço
σ_{pi}	Tensão de pré-esforço inicial
φ_3	Coeficiente de correcção para tensões e deformações devido à retracção em estruturas armadas
φ_5	Coeficiente de correcção para tensões devido à fluência em estruturas armadas
φ_c	Coeficiente de fluência do betão
χ	Curvatura da secção
ω	Comprimento até onde se faz sentir as perdas por reentrada das cunhas

Abreviações, acrónimos e siglas

Sigla	Definição
ANE	Administração Nacional de Estradas
ASSHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BIS	Betonado/a <i>in situ</i> ou Betonagem <i>in situ</i>
CEN	Comité Européen de Normalisation
CPDRBC (CPDPRA)	<i>Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts</i> (Código de Prática para o Dimensionamento de Pontes Rodoviárias e Aquedutos)
DfMA (DpMM)	<i>Design for Manufacture and Assembly</i> (<i>Design</i> para Manufactura e Montagem)
DSI	<i>Dywidag Systems International</i>
EC2	Eurocódigo 2
<i>Et al.</i>	<i>et alia</i> (e outros)
ELS	Estados Limites de Utilização ou de Serviço
ELU	Estados Limites Últimos
FIB	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
PCI	<i>Precast/Prestressed Concrete Institute</i>
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado
SADC	<i>Southern African Development Community</i> (Comunidade para o Desenvolvimento da África Austral).
SANS	<i>South African National Standard</i>
SATCC	<i>Southern Africa Transport and Communications Commissions</i> (Comissão de Transporte e Comunicações da África Austral)
SETRA	<i>Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Elementos de betão pré-fabricado para pontes. a) Viga de bordadura b) Estacas de fundação c) Vigas de tabuleiro.....	5
Figura 2.2: Transporte e posicionamento de vigas pré-fabricadas.	6
Figura 2.3: Diferentes mecanismos para o levantamento dos elementos.	6
Figura 2.4: Fluxograma para a aplicação do método do DpMM.	9
Figura 2.5: Secções transversais das vigas mais usadas na pré-fabricação de pontes.	10
Figura 2.6: Faixa de vãos correntes para as secções transversais mais usadas na pré-fabricação de pontes.	10
Figura 2.7: Zona do apoio de tabuleiro com tramos isostáticos.....	13
Figura 2.8: Continuidades parciais de tabuleiros com vigas pré-fabricadas. a) Reforço da laje por armadura ordinária b) Recurso a varões pré-esforçados em betão pré-fabricado c) Recurso a laje pós-tensionada.	14
Figura 2.9: Continuidade aparente do tabuleiro ao nível da laje.....	15
Figura 2.10: Diferentes possibilidades para o estabelecimento da continuidade total. a) Continuidade com recurso a armaduras ordinárias. b) Continuidade com recurso a pré-esforço. c) Continuidade executada fora dos apoios.....	16
Figura 2.11: Tipos de pré-lajes. a) Pré-lajes de betão armado. b) Pré-lajes participantes.	19
Figura 2.12: Métodos construtivos para consolas. a) Consola pré-fabricada. b) Suporte para consolas.	19
Figura 2.13: Relação entre os materiais e métodos usados na execução dos tabuleiros das pontes em Moçambique.....	20
Figura 2.14: Variação dos vãos entre as pontes observadas.....	21
Figura 3.1: Secção transversal do tabuleiro, com a representação das secções transversais das vigas em uso e das respectivas componentes.	22
Figura 3.2: Disposições do aparelho de apoio para aplicação do declive longitudinal na viga. a) Adopção de uma superfície horizontal na viga b) Uso de argamassa BIS para a disposição da inclinação.....	26
Figura 3.3: Diferentes formas para o estabelecimento da inclinação transversal da via. a) Inclinação variável do apoio, com a sua superfície paralela à via b) Superfície do apoio horizontal e vigas apoiadas em alturas variáveis.	27
Figura 3.4: Disposição assumida pelas vigas para um traçado da via curvo.	28

Figura 3.5: Disposições adoptadas para os aparelhos de apoio no suporte de pontes enviesadas.	29
Figura 3.6: Aparelhos de apoio. a) Elastoméricos b) Em betão c) Metálicos.	30
Figura 4.1: Efeito de retracção e fluência.	31
Figura 4.2: Coeficientes parciais k_L , k_m , k_c , k_e e k_j para a determinação do coeficiente de fluência.	33
Figura 4.3: Coeficientes k_L e k_e para a determinação da retracção.	34
Figura 4.4: Coeficiente de relaxação η	35
Figura 4.5: Representação esquemática do cálculo da fluência diferencial.	38
Figura 4.6: Procedimento para análise do fenómeno de retracção diferenciada no sistema composto.	39
Figura 5.1: Tabuleiro tipo usado no estudo (vigas omissas).	41
Figura 5.2: Modelação estrutural dos tabuleiros. a) Vigas rectangulares, b) Vigas em "I".	42
Figura 5.3: Características geométricas do veículo NB.	45
Figura 5.4: Fases consideradas para as vigas, seus carregamentos e respectivos diagramas de tensões.	50
Figura 5.5: Extensão e tensões assumidas para vigas submetidas a momentos flectores.	54
Figura 5.6: Secções transversais das vigas padronizadas.	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1: Forma e espaçamento das vigas pré-fabricadas para os vãos em consideração.	42
Tabela 5.2: Características do betão para os elementos resistentes do tabuleiro.	43
Tabela 5.3: Características das armaduras aplicadas no tabuleiro.	43
Tabela 5.4: Características dos outros materiais do tabuleiro.	43
Tabela 5.5: Características gerais das vigas padronizadas.	59

1. INTRODUÇÃO

A construção de pontes em betão armado com betonagem *in situ* é a principal forma de construção desde o início do uso deste material. Devido às necessidades crescentes de se obter obras prontas rapidamente, e com qualidade garantida, sentiu-se a necessidade de se dispor de meios que permitam a aceleração da construção, tal é o caso da pré-fabricação.

Nos tabuleiros, onde a pré-fabricação é maioritariamente aplicada nos projectos de pontes, este processo permite reduzir consideravelmente o tempo de execução das obras. Por conta da facilidade de transporte e de aplicação, as vigas são os elementos preferencialmente utilizados na pré-fabricação e, em razão das mesmas facilidades, a sua aplicação corrente encontra-se entre os vãos de 10 a 30 metros.

Embora a pré-fabricação reduza substancialmente o tempo de execução dos tabuleiros em consideração, o facto de a cada novo projecto ter de se iniciar um novo ciclo de produção, com novas cofragens, torna o processo dispendioso, moroso e pouco interessante em termos económicos, o que pode ser eliminado pela padronização das secções, que além de reduzir o tempo associado à concepção, acelera a produção devido à sistematização e torna o método mais competitivo, pelo que, no presente estudo, ir-se-á abordar tal assunto por forma a contribuir para maior redução do tempo de execução de projectos de pontes.

1.1. Objectivos

O presente trabalho tem como **objectivo fundamental** padronizar secções transversais de vigas em betão pré-fabricado para pontes rodoviárias com tabuleiros em laje vigada, possuindo vãos num intervalo entre 10 m e 30 m, e contribuir para a aceleração da construção de pontes de forma sustentável e económica.

Com vista a alcançar o objectivo principal, definiram-se os seguintes **objectivos específicos**:

- Efectuar uma síntese sobre a pré-fabricação e a padronização em projectos de pontes e as suas aplicações em vigas de tabuleiros, apresentando os elementos fundamentais para o seu funcionamento estrutural, assim como o estado da arte em Moçambique;

- Caracterizar as vigas em estudo, disposições relativas com o tabuleiro e os elementos complementares ao seu funcionamento;
- Verificar a consequência dos efeitos diferidos diferenciais sobre a estrutura, decorrentes das idades diferentes das vigas pré-fabricadas e da laje de tabuleiro;
- Estudar as normas da SADC e as suas aplicações em obras de pontes;
- Determinar o tabuleiro tipo a ser usado no trabalho, a forma e número de vigas para os vãos em estudo e dimensioná-las considerando acções segundo o Código de Prática para o Dimensionamento de Pontes Rodoviárias e Aquedutos da SATCC 1998, e as disposições construtivas para as vigas pré-fabricadas.

1.2. Metodologia

Com vista a uma melhor realização do presente trabalho, definiu-se a seguinte metodologia:

- Levantamento e análise da regulamentação e meios relativos tanto à pré-fabricação para construção de pontes com tabuleiros em laje vigada, assim como da continuidade entre esses elementos;
- Levantamento dos dados na Administração Nacional de Estradas (ANE) sobre as pontes existentes no país, seus materiais, forma de construção, assim como os seus vãos;
- Consulta de catálogos de fabricantes, para escolha das melhores soluções quanto às secções transversais para as vigas, bem como dos meios construtivos disponíveis para a execução das armaduras pré-esforçadas;
- Recolha de dados sobre as condicionantes locais para as acções devidas às causas naturais, bem como sobre parâmetros para o estudo dos efeitos diferidos.
- Dimensionamento para os estados limites últimos (ELU) e de utilização ou serviço (ELS) com acções aplicadas de acordo com o código de prática da SATCC, e o Eurocódigo 2 para verificações, recorrendo ao *software* de cálculo “*CSiBridge*”;
- Análise crítica dos resultados obtidos efectuando uma comparação sobre os mesmos e determinação da melhor secção para cada intervalo de vãos;

1.3. Organização do trabalho

Para a melhor compreensão do trabalho, este encontra-se organizado em capítulos, onde no **primeiro capítulo** fez-se a introdução, apresentando-se os objectivos e a metodologia usada.

No **segundo capítulo** apresenta-se o estado da arte relativo à pré-fabricação e a padronização em tabuleiros de pontes, apresenta-se primeiramente a evolução histórica das pontes, a seguir faz-se uma abordagem sobre a pré-fabricação e a padronização. Mais adiante são apresentadas as secções transversais mais usadas para vigas pré-fabricadas de pontes, seguido por uma apresentação das possibilidades para a continuidade do tabuleiro, com a posterior apresentação dos métodos para a betonagem da laje de tabuleiro. Conclui-se o capítulo apresentando a situação geral das obras de pontes em Moçambique, dando ênfase às que incluem componentes pré-fabricados.

No **terceiro capítulo** apresentam-se as particularidades das vigas em estudo no presente trabalho, as rectangulares e em “I” de betão pré-fabricado, abordando as características geométricas das suas secções transversal e longitudinal, apresentando-se posteriormente as disposições que as vigas podem obter consoante o traçado da via, inclinações, curvaturas e viés. Por fim apresentam-se os elementos complementares.

No **quarto capítulo** realiza-se um estudo sobre os efeitos diferidos, em particular das estruturas compósitas, como é o caso do presente trabalho, apresentando os métodos de cálculo tanto da fluência como da retracção, segundo o regulamento aplicado no estudo, analisando os efeitos diferidos diferenciais resultantes das características e comportamentos diferentes das vigas pré-fabricadas e da laje betonada *in situ*.

No **quinto capítulo** apresentam-se as características da estrutura analisada e dos parâmetros usados para o dimensionamento, descrevendo o tabuleiro tipo do estudo, os seus materiais, as acções e os regulamentos aplicados no presente trabalho, as condicionantes consideradas e o procedimento usado para o dimensionamento dos elementos em causa. Por fim, apresentam-se as secções transversais e as principais características das vigas obtidas do dimensionamento.

O **sexto e o sétimo capítulo** tratam respectivamente das principais conclusões resultantes das observações do trabalho realizado e apresentam sugestões para futuros desenvolvimentos para continuidade da pesquisa.

2. PRÉ-FABRICAÇÃO E A PADRONIZAÇÃO EM PROJECTOS DE PONTES

2.1. Breve historial

Desde os tempos remotos o homem sentiu a necessidade de transpor vales e diversos outros obstáculos naturais, essa necessidade foi sendo satisfeita por pedras, madeira e cordas vegetais, formando as obras de arte denominadas pontes, desafiando a gravidade e fascinando o ser humano, simbolizando a ciência, a boa arquitectura, as habilidades de engenharia e a ligação entre as pessoas (Jensen 2001 e Tomim 2019).

Os materiais usados nas pontes antigas permaneceram os mesmos ao longo do tempo, até que em meados do século XIX, com o surgimento do cimento *portland* e o desenvolvimento da metalurgia, expandiram-se as possibilidades para a realização deste tipo de obras, com o uso de materiais como o aço e o betão, que quando associados, dão origem ao betão armado ou compósitos, permitindo maiores vãos e esbelteza, facto potencializado com a introdução do pré-esforço (Jensen 2001).

Durante o século XX, o meio predominante para construção de pontes em betão foi a betonagem *in situ* (BIS), após o fim da Segunda Guerra Mundial, devido à necessidade da rápida reconstrução, assim como de fazer face ao grande aumento de tráfego que requereu soluções rápidas e económicas, deu-se início, em diversos países, ao uso de pontes com componentes pré-fabricados pré-esforçados, que foi evoluindo com o desenvolvimento de meios potentes de elevação, como guindastes e guinchos de levantamento (FIB 2004 e Calavera Ruiz e Hernández 2002 citados por Sousa 2004).

Com a demanda pela racionalização de recursos e a aceleração da construção, ainda no século XX deu-se início à padronização de elementos pré-fabricados de pontes, dinamizando o sector e incentivando o investimento em instalações para esse fim.

2.2. Pré-fabricação na construção de pontes

De acordo com Elliott 2017, um elemento de betão pré-fabricado é aquele que foi preparado, betonado e curado em um local diferente do seu destino final. A distância entre o local de betonagem e o destino pode ser de alguns metros, quando são usados métodos de pré-fabricação *in situ* para evitar transportes dispendiosos, ou até mesmo de milhares de quilómetros, no caso de produtos de elevada qualidade, preparados em locais em que os custos de produção e transporte são baixos. Assim sendo, um elemento

de betão pré-fabricado é de tamanho finito e deve, conseqüentemente, ser ligado a outros elementos com o fim de formar uma estrutura completa.

Na construção de pontes, a pré-fabricação pode ser aplicada em diversos elementos, desde a infraestrutura à superestrutura. O recurso a esse método pode ser tanto por conveniência no valor resistente adicionado (estacas de fundação), por motivos estéticos (vigas de bordadura), para a simplificação da construção (as pré-lajes), assim como para a aceleração da construção (vigas de tabuleiro) (ver Figura 2.1).



Figura 2.1: Elementos de betão pré-fabricado para pontes. a) Viga de bordadura b) Estacas de fundação c) Vigas de tabuleiro. Fonte: aclweb, concredol e notícias in foco.

2.2.1. Produção, transporte e colocação

A produção de vigas pré-fabricadas é realizada em instalações, sob um sistema funcional de controlo de qualidade, essas instalações podem ser numa determinada empresa ou num estaleiro de pré-fabricação junto ao local da obra onde serão aplicadas. A escolha entre cada uma das opções irá depender de factores como a distância a percorrer, o comprimento das peças, o número de peças a transportar, o tipo de equipamento elevatório disponível na empresa de pré-fabricação e as características do local da obra. (FIB 2004 e Freitas 2017).

O transporte pode ser realizado por comboios, navios ou veículos especiais, sendo, no último caso, realizado de noite, para limitar os distúrbios no tráfego (FIB 2004).

A colocação das vigas pré-fabricadas no seu destino final pode ser realizada por diversos equipamentos como, guindastes móveis, berços de lançamento ou por guinchos de elevação (Figura 2.2) (FIB 2021). Ao desenvolverem-se peças pré-fabricadas, deve-se procurar fazer com que as mesmas exijam o mínimo de movimentos entre a produção e a entrega, visto que, cada vez que se faz a movimentação, os equipamentos ficam ocupados, despende-se tempo e as peças correm risco de sofrer danos (Richardson 1973).



Figura 2.2: Transporte e posicionamento de vigas pré-fabricadas. Fonte: MnDOT e BFTInternational.

Existem diversos mecanismos para o encaixe dos elementos pré-fabricados nos equipamentos elevatórios, entre eles encontram-se, pinos embutidos roscados para posterior conexão a um olhal de elevação, pinos fixados horizontalmente, laços fixados aos elementos, levantamento por vácuo, entre muitos outros sistemas (ver Figura 2.3).

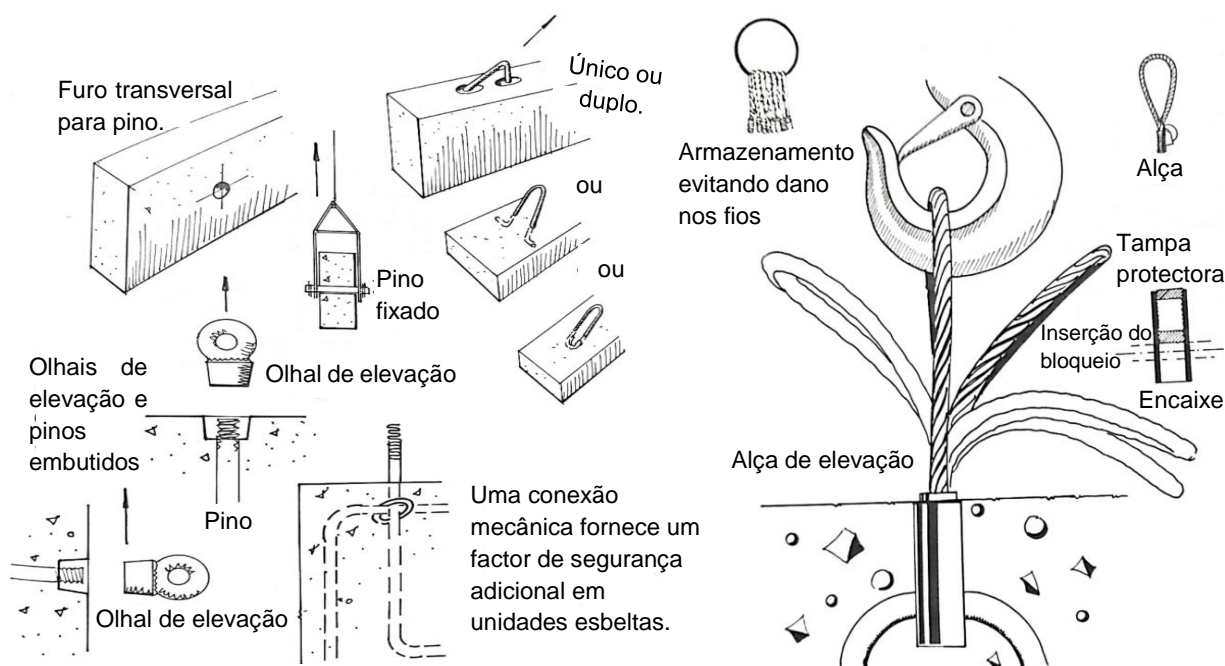


Figura 2.3: Diferentes mecanismos para o levantamento dos elementos. Fonte: Adaptado de Richardson 1973.

Dado que os equipamentos de transporte e montagem possuem limitação em termos de peso e tamanho das peças que podem movimentar, tal deve ser considerado na fase de dimensionamento das mesmas peças. Além das condicionantes relacionadas ao peso, devem-se tomar em consideração questões para o controlo de danos, como a idade do betão na época do carregamento e o arranjo usado para o mesmo carregamento, tomando sempre em consideração o centro de gravidade da peça (Richardson 1973).

2.2.2. Vantagens

A pré-fabricação vem sendo uma escolha recorrente nos últimos anos para a construção de pontes de pequeno a médio vão, em virtude dos diversos benefícios que incluem (SETRA 1996, Hill e Shirole 1982, Viana 2012 e Ralls *et al.* 2002):

- Evitar o recurso aos cimbres apoiados ao solo e eliminação quase por completo do uso de cofragens, reduzindo o efeito sobre o tráfego de veículos, assim como os impactos ambientais;
- Reduzir o risco de acidentes devido ao menor congestionamento na obra;
- Economia devida à redução de mão-de-obra na construção, uso de moldes otimizados e soluções padrão com grande repetição;
- Redução do tempo de construção, uma vez que a colocação de cofragens, betonagem e a cura das vigas são eliminadas do caminho crítico;
- Melhor controlo de qualidade devido às condições de fábrica;
- Atenuação ou eliminação de problemas relacionados à retracção.

2.2.3. Desvantagens

Embora diversas vantagens sejam inerentes à pré-fabricação na construção de pontes, principalmente quando se deseja uma construção acelerada, este método possui também entraves, que podem ser resumidos em (SETRA 1996 e Hill e Shirole 1982):

- Maior sensibilidade aos choques transversais e aos efeitos sísmicos;
- Soluções muitas vezes não agradáveis esteticamente;
- Inconveniente relacionado às juntas de dilatação associadas aos tabuleiros isostáticos, que incrementam os custos de manutenção, causam desconforto rodoviário e reduzem a vida da obra devido às intrusões salinas que podem ocorrer nesses pontos críticos;
- Necessitam de equipamentos para movimentar materiais pesados no local;
- A fábrica de pré-fabricação deve estar próxima do local a betonar para que a solução seja interessante em termos de custos;
- Dificuldades relativamente ao controlo de alinhamento vertical e horizontal;
- Veículos usados para o transporte das peças pré-fabricadas sujeitos a possíveis restrições de carga ao longo do caminho.

2.3. Padronização na pré-fabricação

Como mencionado no subcapítulo 2.1, a introdução da padronização trouxe consigo avanços na aceleração da construção de pontes, assim como na economia da sua produção. Com o encarecimento da mão-de-obra e materiais e ainda com a crescente demanda pela rápida entrega dos trabalhos com qualidade melhorada, durabilidade e preços acessíveis, a padronização assume grande relevância na actualidade (Ong e Choong 2014).

Segundo Hill e Shirole 1982, a padronização pode ser definida como o processo de trazer componentes, passos e operações similares repetitivamente usados em conformidade com componentes, métodos, procedimentos ou técnicas substancialmente uniformes e bem estabelecidos. Esse procedimento é vantajoso quando os elementos envolvidos são similares em detalhes e dimensões, e se apresentam em um número elevado.

A padronização torna o projecto mais económico, em virtude da redução do número de moldes a serem usados para a fabricação do mesmo material, optimização do uso de equipamentos, materiais e mão-de-obra, tal como da redução dos custos e tempo global da construção (Ong e Chong 2014 e Hill e Shirole 1982).

De acordo com Kim *et al.* 2016, para satisfazer os requisitos para a padronização em pontes, conceitos muito importantes como o *design* para a manufatura e montagem (DpFM) devem ser considerados.

2.3.1. *Design* para manufatura e montagem (DpMM)

Design para manufatura e montagem (DpMM), do termo original *design for manufacture and assembly (DfMA)*, é uma filosofia resultante da associação de dois princípios, *design* para fabrico, que analisa a concepção do produto procurando otimizar a produção, de tal forma que seja económico e de fácil execução e *design* para montagem, para a maior simplicidade na associação entre os elementos e redução de tempo de junção. De forma geral, esse processo visa a concepção de um produto que seja simples e economicamente executado (Ahn 2017 e Stone 2003).

O princípio em estudo é aplicado ainda na fase de desenvolvimento do produto, de acordo com a Figura 2.4, e é de tal modo que (Kim *et al.* 2016):

- Haja redução do custo de produção e montagem dos componentes pré-fabricados, reduzindo ao máximo, onde possível, o número de partes únicas;
- Menor tempo de montagem e maior confiabilidade, por redução da variabilidade nos componentes e processos de composição associados;
- Menor tempo total para escolhas durante a aquisição desses elementos.

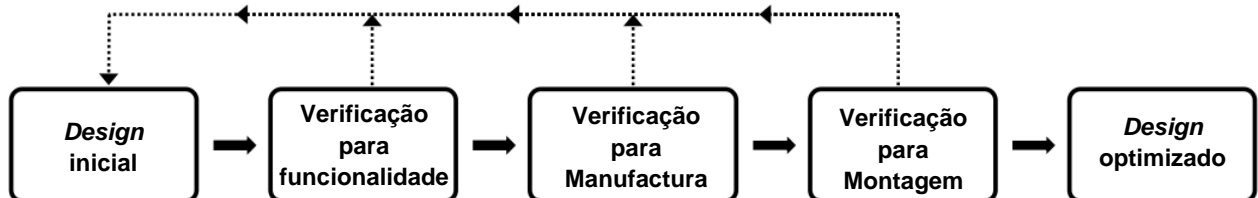


Figura 2.4: Fluxograma para a aplicação do método do DpMM. Fonte: Adaptado de Kim *et al.* 2016.

De acordo com Kim *et al.* 2016, os critérios para a aplicação da DpMM são:

- Simplificação do *design*;
- Redução do número de partes especiais;
- Padronização dos materiais e elementos comumente usados;
- Facilidade de orientação, manuseamento e junção das partes.

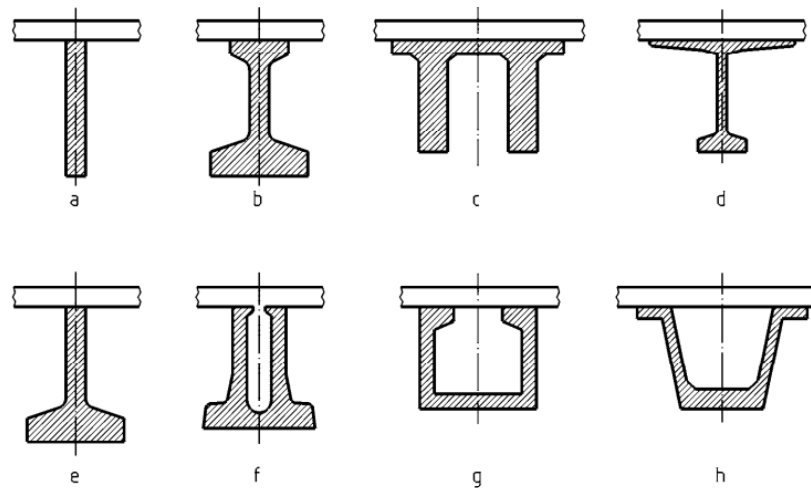
Assim sendo, com o uso deste princípio, torna-se mais prática a aplicação da padronização na pré-fabricação de vigas para pontes.

2.4. Secções transversais das vigas pré-fabricadas usadas nos tabuleiros

Para a construção de pontes, existem diversas possibilidades para a forma que a secção transversal das vigas pode assumir, sendo as secções escolhidas em função do fim a que estarão sujeitas, do vão que deverão vencer, da esbelteza e dos efeitos estéticos desejados.

Entre as secções mais utilizadas para tabuleiros de pontes, encontram-se (NP EN 15050 2008):

- Vigas rectangulares (Figura 2.5 a);
- Vigas em I (Figura 2.5 b);
- Vigas em duplo T (Figura 2.5 c);
- Vigas em T com ou sem o banzo inferior (Figura 2.5 d);
- Vigas em T invertido (Figura 2.5 e,f);
- Vigas em U e vigas em V (Figura 2.5 g,h).



Legenda:



-  betonagem *in situ*
-  viga prefabricada

Figura 2.5: Secções transversais das vigas mais usadas na pré-fabricação de pontes. Fonte: NP EN 15050 2008.

De acordo com os diversos critérios apresentados, o uso de cada uma das secções torna-se interessante dependendo da situação que o projecto apresenta, na Figura 2.6 é relacionada cada secção com os vão preferenciais.

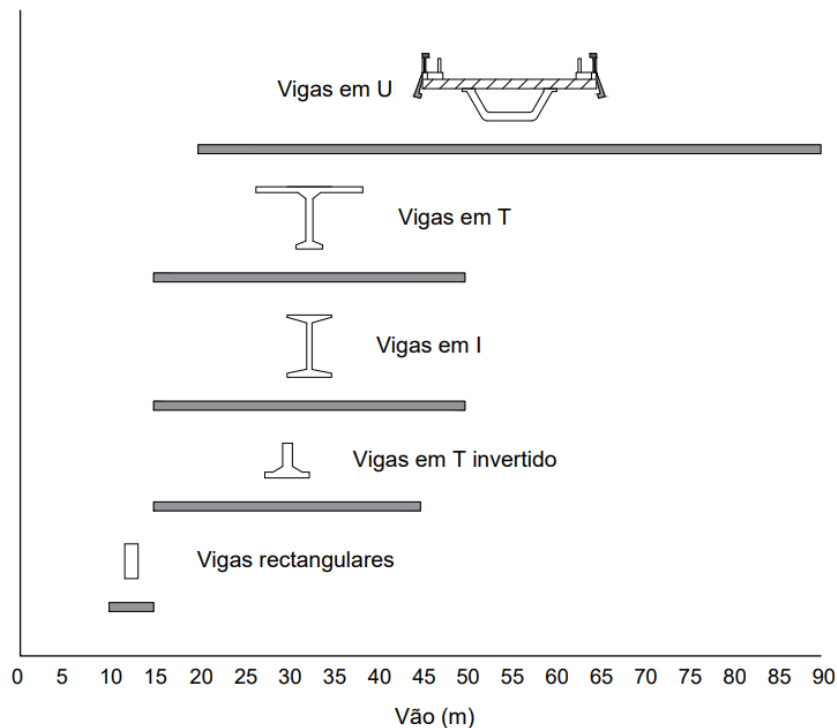


Figura 2.6: Faixa de vãos correntes para as secções transversais mais usadas na pré-fabricação de pontes. Fonte: Adaptado de FIB 2004 e Ong e Choong 2014.

2.4.1. Secção transversal em “I”

É uma das secções transversais mais usadas na pré-fabricação de vigas para tabuleiros de pontes, sendo a mais simples, leve e económica em todos os países onde a pré-fabricação está altamente desenvolvida (Sousa 2004). É usada para os vãos de pontes correntes, entre os 15 e 30 metros, mas chegando em alguns casos até os 50 metros, quando é necessário pontes mais longas e existem meios disponíveis para o seu transporte e levantamento. Elas permitem uma vasta gama de soluções, podendo ser colocadas em grande número umas adjacentes às outras, levando a uma solução mais leve e dispensando o uso de cofragens, ou espaçadas a um valor dependente da relação entre o vão e a carga, levando a uma solução menos sensível a deformações iniciais desiguais.

Embora esta solução seja muito popular e possua inúmeras vantagens, possui também fragilidades quanto à durabilidade e aos efeitos diferidos (como a fluência e retracção), visto que apresenta uma relação desfavorável entre a área e o perímetro exposto às condições ambientais (Cunha 2010).

2.4.2. Secção transversal rectangular

A secção transversal rectangular é mais usada para pequenos vãos, devido à sua economia e vantagens relacionadas a execução e cofragens simplificadas, podendo ser colocadas espaçadas em um intervalo entre 0,6 m a 4 m, sendo que um maior espaçamento leva a uma solução mais económica (FIB 2000).

Essa solução deixa de ser interessante para vãos maiores que 15 m, uma vez que acabam por ter um peso próprio muito elevado, encarecendo o custo de transporte.

2.4.3. Secção transversal em T

Essa secção, também com muita aceitação, possui o banzo superior muito maior relativamente ao inferior, podendo, em alguns casos, o banzo inferior ser suprimido. Possui a vantagem de não necessitar de cofragens ou pré-lajes, visto que os banzos superiores são posicionados adjacentes uns aos outros, e a laje de tabuleiro é betonada sobre os banzos. Em certos casos, o perfil pode também ser utilizado na forma invertida, com o banzo inferior é maior relativamente ao superior por motivos estéticos, quando se deseja que a parte inferior do tabuleiro tenha aparência plana.

Esta solução acaba por ser menos leve relativamente às vigas em “I”, por ter maior banzo, acabando por estar sujeita a condicionantes relativamente ao peso no transporte e colocação no seu destino.

2.4.4. Secção transversal em U (Viga em caixão, *box/hollow beam*)

A solução em causa é uma tentativa de aplicar a pré-fabricação em vigas em caixão, sendo que tanto as almas como o banzo inferior, o “U”, são pré-fabricados e, posteriormente, a laje de tabuleiro é betonada sobre a viga com recurso às pré-lajes.

Cunha 2010 considera esta solução vantajosa devido ao menor número de vigas apresentadas no tabuleiro e à sua esbelteza, levando a uma solução com menor altura relativamente às outras já apresentadas e a tabuleiros mais agradáveis esteticamente e duráveis.

2.4.5. Aduelas pré-fabricadas

Constituem secções de tabuleiro completas, formando vigas em caixão, construídas por avanços sucessivos e unidas por pós-tensão, muitas vezes usadas para grandes vãos, quando a estrutura possui complexidade geométrica e quando se deseja usar métodos construtivos com grandes rendimentos e curto tempo de construção, eliminando por completo o uso de cimbres. Requerem grande cuidado relativamente ao controlo geométrico de cada elemento, uma vez que são ligadas umas às outras (Tarrataca 2009).

2.5. Continuidade estrutural do tabuleiro com vigas pré-fabricadas

Em vigas pré-fabricadas existem diferentes possibilidades quanto à continuidade do tabuleiro. A solução de tramos isostáticos, em que não se estabelece continuidade, surgiu com o início da pré-fabricação em pontes, que de acordo com Sousa 2004, foi posteriormente alvo de muitas críticas relacionadas à durabilidade, economia e ao conforto rodoviário. Para superar as desvantagens observadas, desenvolveram-se opções estabelecendo continuidade.

SETRA 1996 considera que quando se deseja que haja continuidade no tabuleiro, existem duas soluções que podem ser classificadas segundo o seu funcionamento:

- Soluções que estabelecem a continuidade mecânica da estrutura portante;
- Soluções que estabelecem uma continuidade aparente ao nível da laje.

2.5.1. Tramos isostáticos (simplesmente apoiados)

A construção de tabuleiros recorrendo à pré-fabricação com tramos isostáticos foi considerada a solução mais lógica quando se começou a usar esse método, tendo juntas de dilatação e aparelhos de apoio nas extremidades de cada tramo (FIB 2004). Essa solução é materializada conforme a Figura 2.7.

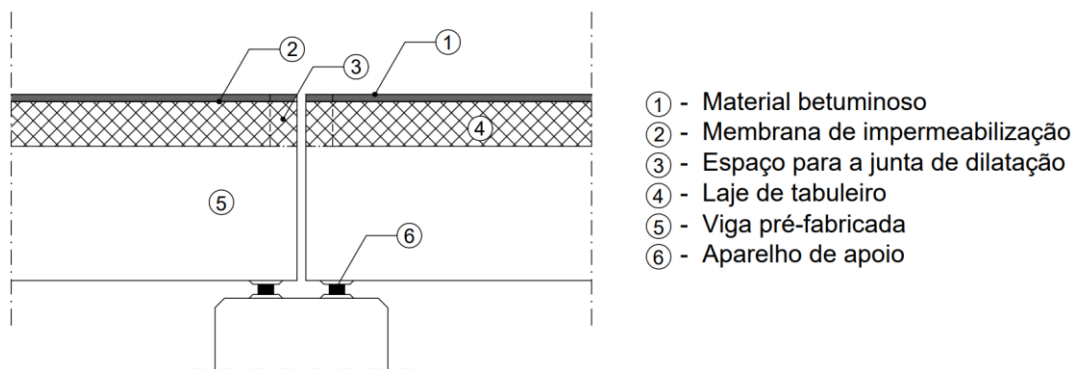


Figura 2.7: Zona do apoio de tabuleiro com tramos isostáticos. Fonte: Adaptado de Sousa 2004.

Os tramos isostáticos possuem vantagens como a rapidez e facilidade de execução, simplicidade de cálculo e melhor comportamento face a efeitos como assentamentos de apoio, retracções e efeitos térmicos. Entretanto, segundo Menn 1986, FIB 2004 e SETRA 1996, esse sistema não possui nem aparência, nem durabilidade e muito menos conforto de tráfego adequados, devido a aspectos relacionados às juntas de expansão e aos aparelhos de apoio que acabam por tornar a ponte sujeita a custos de manutenção importantes.

Embora um bom detalhamento da região dos apoios possa desacelerar a deterioração tanto das juntas como dos suportes, que algumas vezes são inacessíveis à inspeção e manutenção, a melhor solução é a eliminação de juntas (FIB 2004).

2.5.2. Tramos simplesmente apoiados com lajes de continuidade (continuidade aparente ao nível da laje ou continuidade parcial)

Neste método as vigas pré-fabricadas continuam independentes, mas é estabelecida a continuidade da laje de tabuleiro, melhorando imenso a circulação rodoviária. Não sendo a ligação entre as lajes de tabuleiro suficiente para que o comportamento da viga

seja influenciado, os tramos continuam a ser calculados como simplesmente apoiados, mantendo a simplicidade de cálculo (FIB 2004, FIB 2000 e SETRA 1996).

Existem diversos métodos para o estabelecimento da continuidade parcial do tabuleiro, entre eles encontram-se (Jayananda 1989):

- Reforço ordinário na laje betonada sobre a separação entre as vigas nos vãos adjacentes, Figura 2.8 a);
- Betão pré-fabricado sobre os apoios, com varões pré-esforçados para evitar formação de fissuras, Figura 2.8 b);
- Pós-tensionamento da laje sobre os vãos adjacentes, Figura 2.8 c).

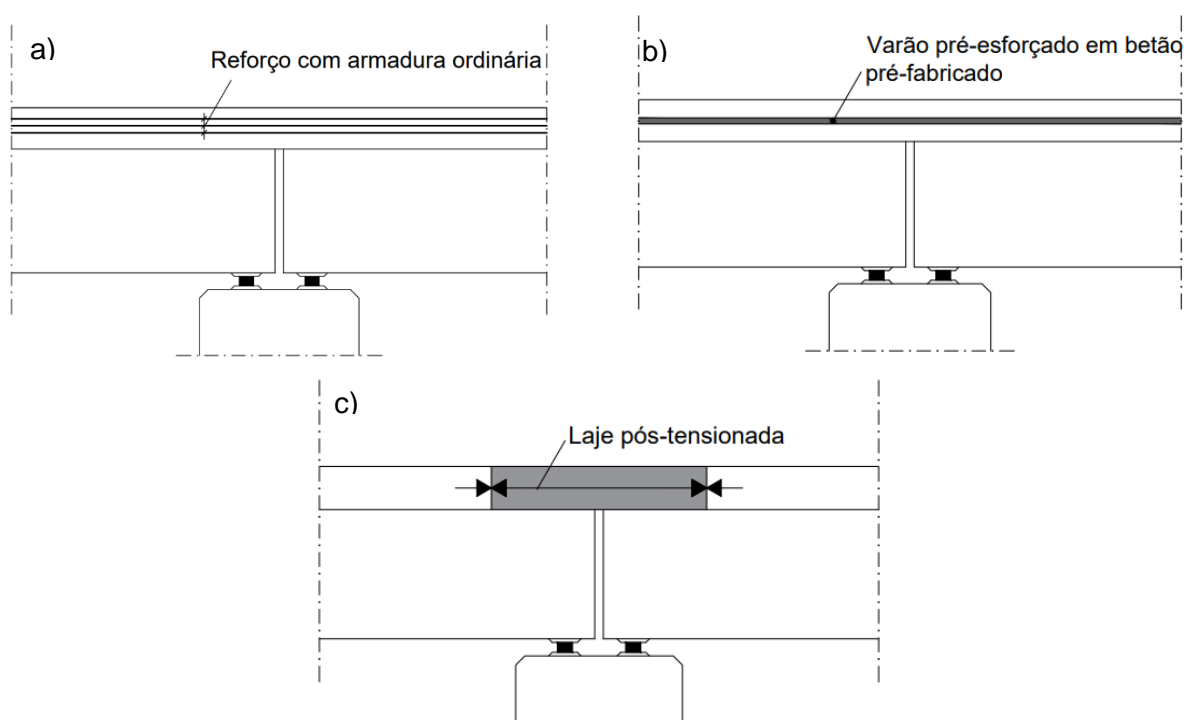


Figura 2.8: Continuidades parciais de tabuleiros com vigas pré-fabricadas. a) Reforço da laje por armadura ordinária b) Recurso a varões pré-esforçados em betão pré-fabricado c) Recurso a laje pós-tensionada. Fonte: Adaptado de Jayananda 1989.

Dentre os métodos apresentados, ir-se-á abordar o do reforço da laje com armaduras ordinárias, por ser o mais usado. Nesse método, a laje de continuidade, com um comprimento de 1,5 m sobre o apoio, deve possuir um impermeabilizante na sua base, por vezes constituído de uma camada de poliestireno colocada entre os diafragmas das vigas, como pode ser observado na Figura 2.9. Deve ser suficientemente flexível para acomodar as rotações nas extremidades e deve possuir capacidade adequada para resistir aos efeitos de punção resultantes da acção local das rodas das viaturas (FIB 2000). Como resultado, a laje deverá ser reforçada com um grande número de varões com pequeno diâmetro e bem distribuídos, geralmente de 10 a 15 cm²/m, para

reduzir os efeitos relacionados a fissuração e, aconselha-se a fornecer protecção anticorrosiva a esses reforços, uma vez que a fendilhação é inevitável (FIB 2000, FIB 2004 e SETRA 1996).

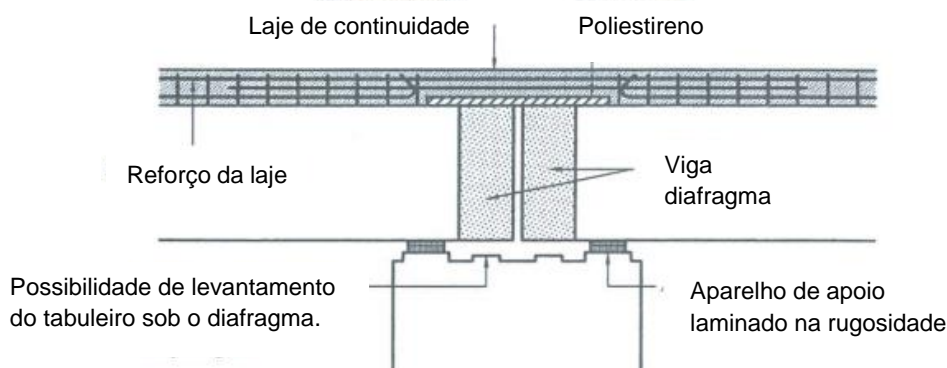


Figura 2.9: Continuidade aparente do tabuleiro ao nível da laje. Fonte: Adaptado de FIB 2004.

Embora tal método resolva a questão do conforto, ainda persiste o problema relativo à estética e à durabilidade, dado que, conforme Menn 1986 e Cunha 2010, a membrana de impermeabilização sobre a laje flexível pode ser facilmente danificada e não pode ser confiada para proteger a laje, além disso, o sistema não possui bom comportamento aos efeitos sísmicos, pois a laje de continuidade irá funcionar como um tirante relativamente a esses esforços.

2.5.3. Continuidade total entre os tramos do tabuleiro (continuidade mecânica)

Essa solução surgiu como meio de sanar os maiores problemas concernentes à continuidade de tabuleiros com vários vãos, nomeadamente a redução do número de juntas de dilatação e aparelhos de apoio, que quando associados constituem um enorme custo de manutenção, o que veio também a melhorar a questão da estética, por reduzir o tamanho dos apoios e tornar as secções mais esbeltas (SETRA 1996, Sousa 2004 e Menn 1986).

Essa continuidade é conseguida betonando uma viga transversal entre as vigas pré-fabricadas (carlinga ou diafragma) e posicionando armaduras para resistir aos momentos negativos ou mesmo positivos que ir-se-ão gerar no local. Tais armaduras podem ser ordinárias ou pré-esforçadas, Figura 2.10 a) e b) respectivamente, ou em certos casos a continuidade é obtida fora do apoio, conforme a Figura 2.10 c). Consegue-se dessa forma uma estrutura com maior ductilidade e frequência própria, propiciando, conseqüentemente, uma maior resistência aos fenómenos sísmicos e, reduzindo os

momentos flectores positivos, consoante a ordem em que foi feita a betonagem da laje e da carlinga (Sousa 2004 e Cunha 2010).

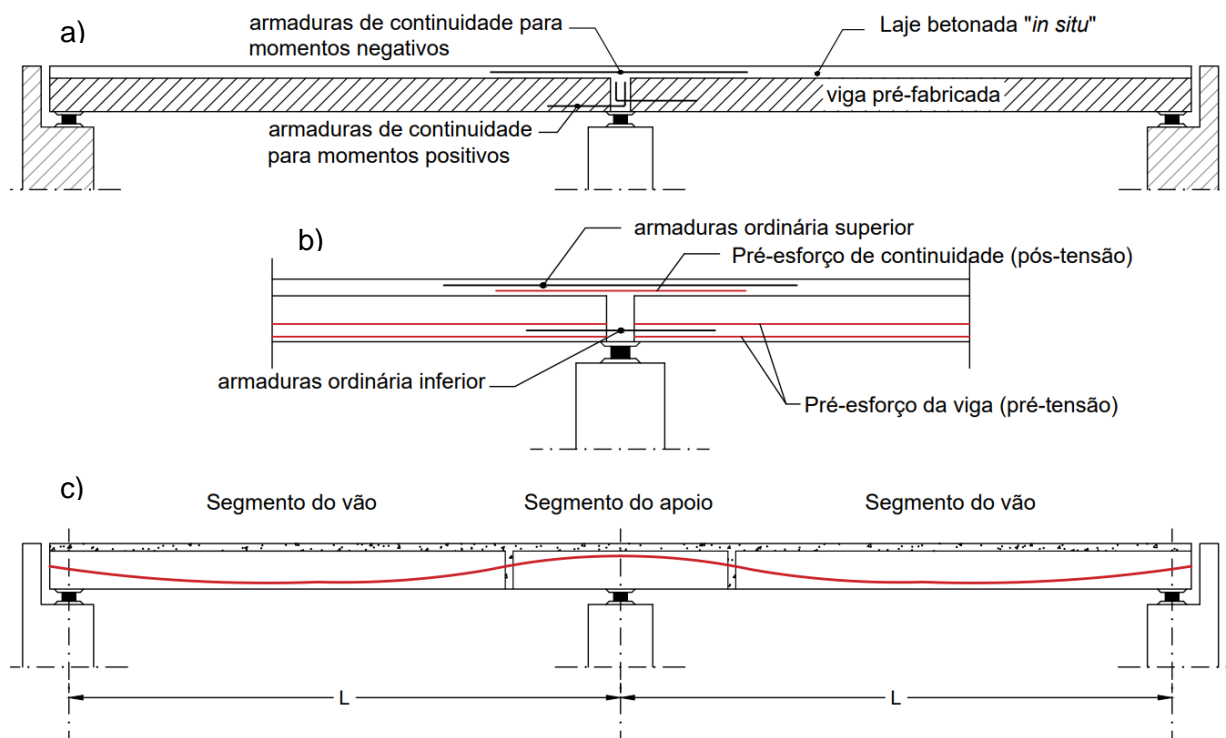


Figura 2.10: Diferentes possibilidades para o estabelecimento da continuidade total. a) Continuidade com recurso a armaduras ordinárias. b) Continuidade com recurso a pré-esforço. c) Continuidade executada fora dos apoios. Fonte: Adaptado de Sousa 2004 e FIB 2021.

Embora este procedimento solucione os problemas dos métodos anteriormente apresentados, apresenta também certas desvantagens (SETRA 1996, Cunha 2010 e FIB 2020):

- Custo e tempo de construção acrescidos;
- Necessidade de suportes bipartidos temporários e de transferência de suporte por macaco;
- Complexidade tanto na construção, assim como na análise relativa à redistribuição de esforços de serviço e os devidos à fluência e retracção diferencial entre viga e laje, gradientes térmicos e assentamentos diferenciais dos apoios;
- Incerteza na redistribuição de momentos nos apoios uma vez fissuradas as fibras inferiores do diafragma.

Conforme FIB 2021, geralmente a longitude do tabuleiro considerada sem juntas de expansão é de 230 a 350 m, correspondentes de 6 a 10 vãos, embora maiores longitudes já tenham sido conseguidas e, em certos países, tal limite possa assumir valores menores. Tal limitação é geralmente imposta para evitar o uso de juntas do tipo placas

metálicas com roletes, cujos custos tanto de aquisição, como de manutenção seriam proibitivos.

2.5.4. Pontes integrais

As pontes integrais são aquelas que não fazem o uso de juntas de dilatação tanto entre os vãos intermediários, assim como entre os vãos e os encontros. Surgiram por forma a resolver os problemas das soluções anteriores, ao reduzir os custos relativos à manutenção e melhorar o conforto rodoviário. Tal feito é conseguido pela ligação monolítica entre o tabuleiro e os encontros (Correia 2015 e FIB 2004).

Apesar das vantagens associadas a este procedimento, como o conforto, a durabilidade, a resistência estrutural e melhor comportamento aos efeitos sísmicos, existem limitações, complexidades e incertezas relacionadas a interação solo estrutura, que limitam tanto o comprimento da ponte, o viés, assim como a curvatura das pontes, por forma a controlar os efeitos adversos. Pelas desvantagens apresentadas, existem recomendações para o uso preferencial dessas pontes, limitando sempre que possível a extensão do tabuleiro a 60 m e o ângulo de viés ao máximo de 30 graus (Correia 2015).

2.6. Procedimentos para a betonagem da laje de tabuleiro

A execução da laje de tabuleiro é dos processos fundamentais para o funcionamento final da ponte e possui uma variada possibilidade de acontecimentos. Na execução do tabuleiro, procura-se sempre uma boa interação entre a laje e a viga, que acabam muitas vezes formando compósitos.

A laje de tabuleiro pode ser BIS, assim como também pode ser pré-fabricada.

Para o caso em que são pré-fabricadas, podem ser executadas do seguinte modo:

- Banzo superior da viga em I ou T adjacentes unidos por uma argamassa de ligação de alto desempenho;
- Lajes de tabuleiro pré-fabricadas posicionadas sobre as vigas, também unidas por argamassa de enchimento de alto desempenho.

Se a laje for BIS, pode ser executada recorrendo a:

- Cimbres apoiados nas vigas;
- Cofragens perdidas, as pré-lajes.

A espessura das lajes é condicionada pelo espaçamento entre as vigas e pela capacidade de distribuir os esforços entre as mesmas vigas (FIB 2000).

2.6.1. Solução com cimbres

Nesse processo é feito o uso de estruturas metálicas, geralmente tubulares, montadas e fixadas aos banzos das vigas para suporte das cofragens, de seguida a betonagem é feita segundo métodos tradicionais (Viana 2012 e Cunha 2010). Esse processo possui inconvenientes, por gerar esforços adicionais na viga, como no caso da betonagem das consolas em que os cimbres são fixos na alma e no banzo inferior, gerando flexão relativamente ao eixo vertical e fazendo com que as vigas necessitem do uso de argamassas para a reparação dos orifícios gerados pelos suportes, o que pode fragilizar as peças (Cunha 2010).

2.6.2. Solução com pré-lajes

Visando solucionar os problemas relacionados ao uso de cimbres e do manuseamento das lajes pré-fabricadas, que possuem determinado peso, desenvolveu-se as pré-lajes, que constituem cofragens perdidas usadas para a betonagem da laje, tornando o processo simples, rápido e mais seguro.

Nesta solução, recorre-se ao uso de painéis que podem ser de (Yardim 2013, SETRA 1996 e NP EN 15050 2008):

- Fibrocimento ou mesmo de ferrocimento, sendo mais finas, mas limitadas a um vão de 90 cm, levam a uma laje menos espessa;
- Betão armado, para vãos maiores relativamente ao material anterior, levam a uma espessura maior e, porque não participam para a resistência da laje, nem toda a espessura da laje irá contribuir para a sua altura útil, Figura 2.11 a);
- Pré-lajes participantes, recurso que tira vantagem da pré-laje que fica perdida no produto final após a betonagem, tornando-a parte resistente da laje após o endurecimento do betão, resistindo à flexão transversal. As armaduras dessas lajes podem ser ordinárias ou pré-esforçadas, sendo necessário o uso de armaduras de ligação da laje BIS e da pré-laje, Figura 2.11 b).

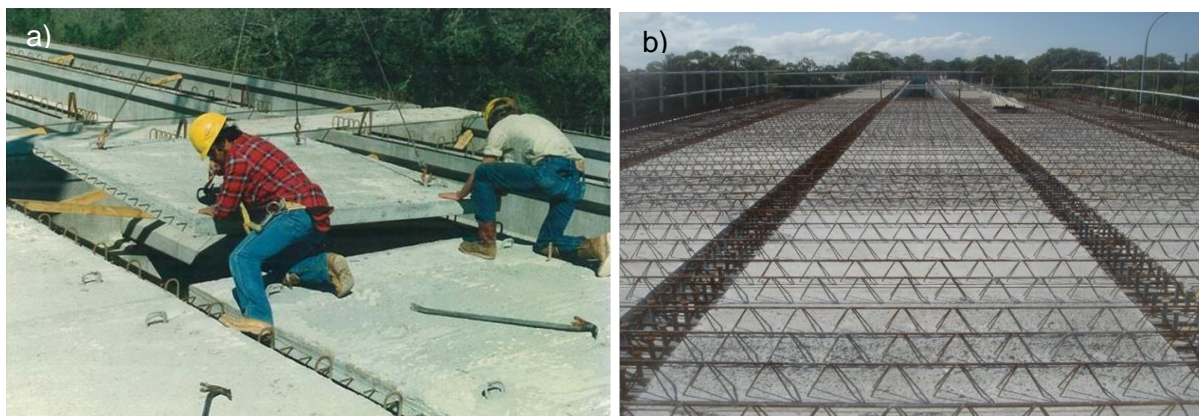


Figura 2.11: Tipos de pré-lajes. a) Pré-lajes de betão armado. b) Pré-lajes participantes. Fonte: ABC-UTC 2018 e Humes.

O NP EN 15050 2008 limita a espessura dos elementos em causa a 60 mm, mas tal limite pode ser superior em alguns países. A superfície superior das pré-lajes deve ser irregular para melhor aderência e, para evitar o uso de apoios provisórios, dever-se-á garantir que o comprimento efectivo do apoio da pré-laje sobre a viga não seja inferior a 40 mm e que a profundidade do mesmo apoio tenha cerca de 2 cm, para que este elemento fique engatado (SETRA 1996).

Nos casos em que parte da laje está em consola, para a sua execução, recorre-se às consolas pré-fabricadas, que consistem na colocação sobre as vigas dos extremos, de um elemento pré-fabricado que constitui a parte do tabuleiro em consola, possuindo esse elemento um comprimento extra para servir de suporte à consola previamente à betonagem do tabuleiro (Figura 2.12 a). A consola também pode ser executada recorrendo ao suporte para consolas (Figura 2.12 b), que consiste em elementos metálicos encastrados no banzo superior e apoiados ao inferior, servindo para suportar as cofragens da consola que é BIS (Clifton e Bayrak 2008).

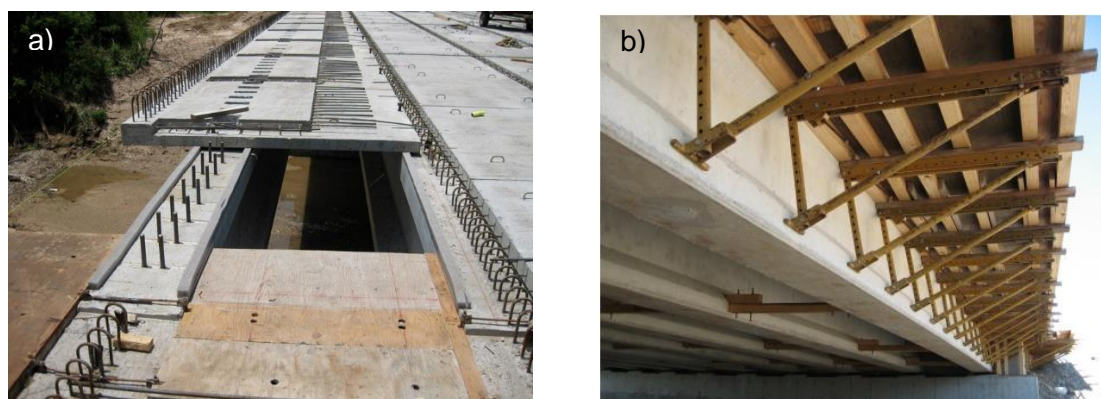


Figura 2.12: Métodos construtivos para consolas. a) Consola pré-fabricada. b) Suporte para consolas. Fonte: Precast overhang 2009 e Clifton e Bayrak 2008.

2.7. Situação geral em Moçambique

No período de estudo, Moçambique encontra-se pouco desenvolvido em relação a soluções de pré-fabricação em betão, sendo geralmente, a pré-fabricação produzida para pequenas peças, como vigotas pré-esforçadas para lajes de pequeno vão. Para o caso de vigas mais resistentes, capazes de suportar acções de tráfego, o país encontra-se relativamente atrasado, uma vez que não tem esse tipo de indústria desenvolvida.

Segundo a Administração Nacional de Estradas (ANE), o país conta com cerca de 2000 pontes, entre elas rodoviárias, ferroviárias e pedonais. Para obter uma visão holística, utilizando racionalmente o tempo, colheu-se uma amostra aleatória de 100 pontes existentes no país, distribuídas pelas estradas primárias, sendo 10 de cada uma das províncias (sem fazer a distinção entre Maputo Província e Maputo Cidade).

As informações recolhidas para cada uma das pontes foram: o número de vãos, o comprimento total, largura da via e do passeio, assim como as características do tabuleiro, dando maior enfoque nos seus materiais. Essas informações foram colhidas na ANE.

Dos dados observados, 94% das pontes são em betão armado, 5% metálicas e 1% mista (composto de betão e aço). Das pontes em betão armado, 16% são em betão pré-fabricado, onde dessas, 6,25% são em laje aligeirada, 43,75% são pontões com tabuleiro em laje (*slab culvert*) e 50% vigadas, essa informação encontra-se representada na Figura 2.13.

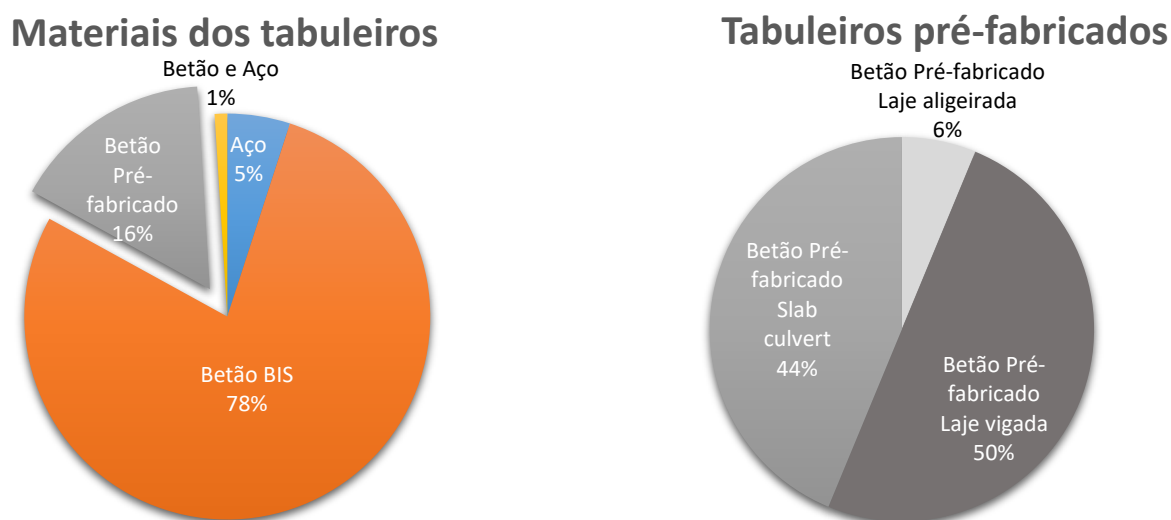


Figura 2.13: Relação entre os materiais e métodos usados na execução dos tabuleiros das pontes em Moçambique.

Conforme pode-se observar na Figura 2.13, a percentagem dos tabuleiros em betão pré-fabricado é baixa, no entanto, recentemente nota-se um maior recurso a esse método, o que indica a maior difusão do seu uso e possibilidade de acesso nos últimos anos. Entre os tabuleiros pré-fabricados, os com laje vigada apresentam-se em maior número.

Exceptuando-se os *slab culverts*, as pontes com estruturas de tabuleiro pré-fabricadas encontram-se geralmente num intervalo de vãos entre 9 m e 35 m, vãos em que há relativamente menor inconveniente no transporte desses elementos.

Em geral, os vãos das pontes observadas variam entre os 3 m e os 55 m, sendo que os vãos mais frequentes encontram-se entre os 9 m e 22 m, tal como se apresenta na Figura 2.14.

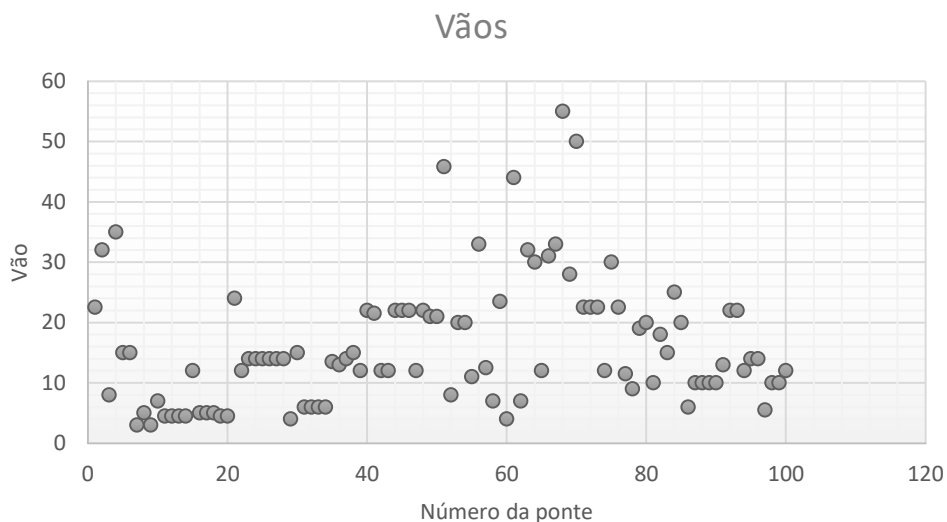


Figura 2.14: Variação dos vãos entre as pontes observadas.

Tomando os dados observados em consideração, sente-se a necessidade de dar maior enfoque às pontes com tabuleiro em laje vigada para o intervalo de vãos entre 10 e 30 metros no desenvolvimento do presente estudo.

3. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS PRÉ-FABRICADAS

3.1. Condicionantes para a determinação da secção transversal das vigas

Para a determinação da secção transversal das vigas, muitas vezes depara-se com determinados pressupostos ou limitações que influenciam na decisão final sobre a secção da viga a adoptar, as condicionantes. Segundo FIB 2021 e Menn 1986, as condicionantes para a determinação da secção das vigas podem ser:

- Construtivas (fabricação, sistema de pré-esforço e betonagem do tabuleiro);
- Estéticas;
- Económicas;
- Técnicas (sistemas de levantamento e manuseamento disponíveis);
- Regulamentares (limitações de carga e comprimento para o transporte).

3.2. Secção transversal das vigas e os espaçamentos

Como apresentado no subcapítulo 2.4, a secção transversal das vigas pré-fabricadas pode assumir diversas formas, dependendo do vão em consideração e dos condicionantes. O presente trabalho tem como vãos de estudo 10 a 30 metros e, para esse intervalo, considerar-se-á duas secções, rectangular e em I (Figura 3.1), sendo a rectangular considerada para o intervalo de 10 a 15 metros e a em I para o de 15 a 30 metros, que conforme FIB 2000, são consideradas as mais económicas para tais vãos.

Para o caso das vigas em "I", deve-se tomar especial atenção aos diversos elementos componentes das vigas, entre eles os banzos inferior e superior, assim como a alma, sendo que todos os elementos devem satisfazer as condicionantes pré-estabelecidas e estarem combinados de forma harmoniosa.

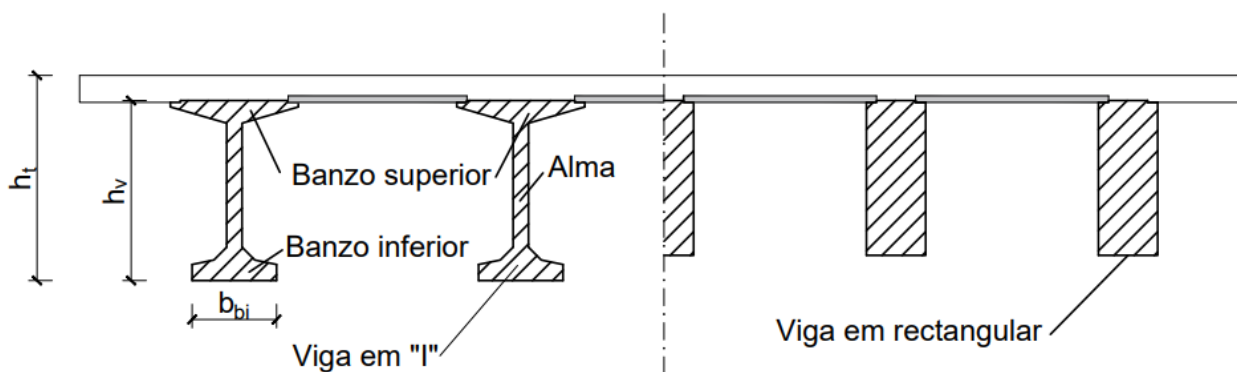


Figura 3.1: Secção transversal do tabuleiro, com a representação das secções transversais das vigas em uso e das respectivas componentes.

3.2.1. Banzo inferior

O banzo inferior da viga, no presente caso em que os tramos são simplesmente apoiados, tem a função de acomodar as armaduras necessárias para conferir resistência à tracção nas fibras inferiores, resultantes do momento flector. Conforme Menn 1986, esse elemento deve ser compacto para facilitar a consolidação do betão no molde fechado e, por forma a garantir isso, SETRA 1996 considera que a transição entre o banzo inferior e alma deve ser com um declive íngreme, com tangente entre 1 e 1,5, aconselhando aproximar-se do maior valor. SETRA 1996 recomenda ainda a seguinte fórmula empírica como primeira aproximação para obter a largura do banzo inferior:

$$b_{bi} = \frac{lL^2}{h_t^2 K} \text{ com } 1100 \leq K \leq 1300 \quad (3.1)$$

Onde:

b_{bi}	Largura total dos banzos inferiores das vigas
l	Largura do tabuleiro
L	Vão da ponte
h_t	Altura total do tabuleiro

A altura do banzo inferior varia normalmente entre 10 cm e 20 cm, sendo esse valor variável consoante a disposição das armaduras consideradas.

3.2.2. Alma

A alma possui um papel preponderante na resistência aos esforços solicitantes nas vigas, contribuindo principalmente para a sua altura útil. Por forma a reduzir o peso das vigas e torná-las mais cómodas para o manuseamento, a tendência é reduzir a largura da alma ao mínimo possível.

SETRA 1996 recomenda que a espessura mínima adoptada para as almas seja de 20 cm, por razões construtivas, uma vez que para espessuras menores, a compactação do betão pode tornar-se uma tarefa impraticável, mas, ainda assim, certos autores consideram menores espessuras económico e praticável, tal é o caso de Rabbat e Henry 1982 que consideram que a espessura da alma possa ser reduzida até os 13 cm.

Nos casos em que é feito o uso de armaduras de pós-tensão, a espessura da alma será condicionada pelo diâmetro dos cabos de pré-esforço, visto que além de acomodar os cabos, deverá também satisfazer os requisitos para os recobrimentos mínimos.

3.2.3. Banzo superior

O banzo superior da viga, elemento que liga a viga à laje de tabuleiro, contribui para a resistência à flexão, tanto durante o levantamento, na fase da betonagem da laje, assim como em serviço, dado que esforço de compressão é instalado nessa região.

Além das funções resistentes, é usado também para alterar o centro de gravidade da viga, garantir a estabilidade lateral e o suporte para as pré-lajes durante a betonagem da laje de tabuleiro, bem como para propiciar o comportamento compósito do conjunto.

FIB 2021 recomenda, para garantir a estabilidade durante o manuseamento, que o comprimento da viga não exceda 50 vezes a largura do maior dos banzos.

3.2.4. Altura da secção

A altura da secção é dependente da esbelteza desejada e dos esforços que actuam na viga. A esbelteza usual considerada é de 1/17 do vão, porém, nos casos em que se deseja uma secção mais esbelta, tal valor pode ir até 1/20, tendo nesse caso, banzos inferiores mais alargados para acomodar as armaduras de pré-esforço. Em todo o caso, a solução que leva a vigas mais económicas é com uma esbelteza de 1/15, contudo, a componente estética fica prejudicada por essa escolha (SETRA 1996 e Cunha 2010).

3.2.5. Espaçamento e disposição das vigas

O espaçamento e disposição determinados para as vigas são questões que muito influenciam nas características dos tabuleiros das pontes, entre essas encontram-se:

- A estética;
- A secção e o peso das vigas;
- A espessura da laje;
- A escolha da cofragem da laje;
- O Número de vigas.

O espaçamento (distância entre os centros das vigas) geralmente varia entre 0,6 e 4 metros, podendo a fronteira superior ser limitada para valores menores em alguns países e, segundo a FIB 2021, não é recomendável que o número de vigas seja inferior a 4, para permitir, se necessário, a substituição do tabuleiro em uma metade da ponte de cada vez.

Para um determinado espaçamento, o arranjo é maioritariamente influenciado por questões estéticas e construtivas. Pode-se optar por posicionar as vigas exteriores nas bordas do tabuleiro, de modo a evitar complexidades no posicionamento de cofragens para as consolas, como se pode também optar por posicioná-las mais para o interior, aumentando as consolas para um melhoramento estético.

Em ambas possibilidades para o arranjo, FIB 2021 recomenda:

- Para o primeiro caso, a consola não pode ter um comprimento (distância entre o centro da viga externa e a borda do tabuleiro) menor que a metade da largura do maior banzo, para evitar que o banzo superior seja reduzido ou que, durante uma chuva, a água caia para o banzo inferior.
- Para o segundo caso, é recomendado limitar a consola a metade do espaçamento entre vigas, sendo que uma consola com 40% desse espaçamento, pode fazer com que as vigas exteriores estejam sujeitas a esforços da mesma magnitude que as interiores.

3.2.6. Carlingas ou diafragmas

Em pontes com tabuleiro em laje vigada, é comum fazer-se o uso de vigas transversais ao longo das vigas longitudinais, denominadas carlingas ou diafragmas, pois ajudam a distribuir os esforços entre as vigas longitudinais, contribuem para a rigidez à torção do tabuleiro, assim como também facilitam o seu levantamento com recurso a macacos hidráulicos, quando necessário (FIB 2000 e SETRA 1996).

Quando se recorre às vigas pré-fabricadas, é comum colocar-se as carlingas somente nos apoios, já que a sua colocação ao longo do vão torna a construção complexa e demorada. Assim sendo, a laje de tabuleiro terá maior contribuição na distribuição dos esforços entre as vigas (FIB 2000, SETRA 2000 e Oesterle e Elremaily 2009).

Conforme FIB 2021, nos casos em que as pontes são construídas em locais de fraca actividade sísmica, é comum dispensar-se o uso dos diafragmas, sendo a distribuição de esforços entre as vigas estabelecida somente pela laje de tabuleiro, obtendo-se uma de construção mais simples e rápida.

3.3. Disposições relativas entre as vigas e a laje de tabuleiro

A prática actual, contrariamente ao que acontecia antigamente, é da adaptação da ponte ao traçado da via, sendo assim, a ponte pode adoptar diversas disposições decorrentes do traçado da via, obrigando à tomada de certas precauções aquando do dimensionamento e construção. Em tais disposições incluem-se:

- Declives longitudinais e transversais;
- Curvaturas verticais e horizontais;
- Viés;
- Variação de largura.

3.3.1. Declive longitudinal

Por motivos de drenagem, muitas vezes é estabelecido um declive longitudinal que pode assumir diferentes valores consoante o traçado da estrada, portanto, é importante que o tabuleiro se adapte à situação. Segundo SETRA 1996, geralmente, essa inclinação é garantida na região dos aparelhos de apoio, fornecendo uma superfície horizontal para a viga na região do apoio (Figura 3.2 a), ou adaptando a argamassa de assentamento do aparelho de apoio à inclinação (Figura 3.2 b), sendo a segunda opção maioritariamente usada, por seguir os critérios de DpMM mencionados em 2.3.1.

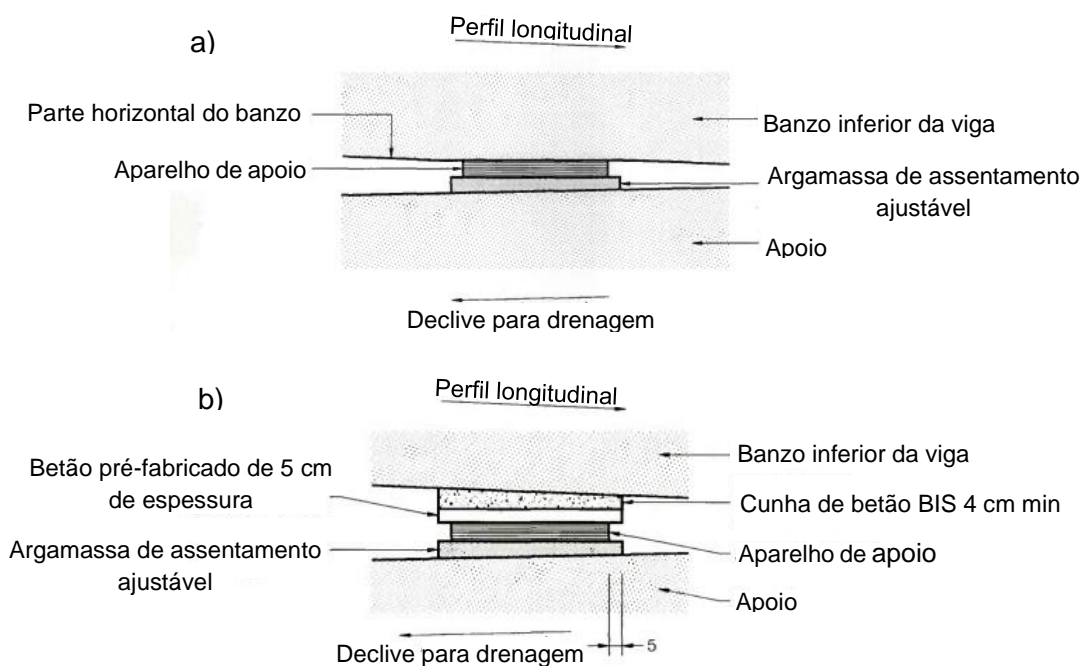


Figura 3.2: Disposições do aparelho de apoio para aplicação do declive longitudinal na viga. a) Adopção de uma superfície horizontal na viga b) Uso de argamassa BIS para a disposição da inclinação. Fonte: Adaptado de SETRA 1996.

3.3.2. Declive transversal

Também por motivos de drenagem, ou devido à sobrelevação para acompanhar as possíveis curvas em planta estabelecidas no traçado da via, estabelece-se o declive transversal, tal declive assume, na maioria das vezes, valores entre 2 a 2,5% para cada lado do eixo do tabuleiro, entretanto, pode também assumir valores maiores consoante o raio de curvatura, para os casos de pontes curvas, que, segundo FIB 2021, podem chegar até aos 6% para todo o tabuleiro nos casos de curvas com raio de 350 metros.

Consoante FIB 2004, esses declives podem ser estabelecidos de duas maneiras:

- Superfície do apoio paralela à inclinação do tabuleiro, com bases idênticas (Figura 3.3 a);
- Superfície do suporte horizontal e a base dos aparelhos de apoio com alturas variáveis (Figura 3.6 b).

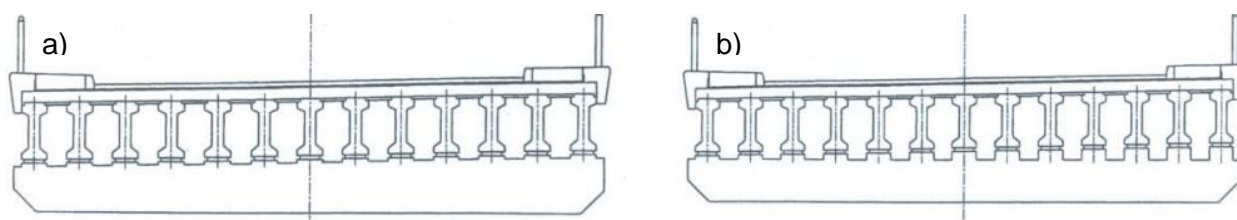


Figura 3.3: Diferentes formas para o estabelecimento da inclinação transversal da via. a) Inclinação variável do apoio, com a sua superfície paralela à via b) Superfície do apoio horizontal e vigas apoiadas em alturas variáveis. Fonte: FIB 2004.

3.3.3. Curvas horizontais

De forma a satisfazer o traçado em planta, que pode comportar curvas horizontais, deve-se proceder de tal forma que as vigas observem esse aspecto. O tratamento dado às vigas varia consoante a curvatura do tabuleiro, assim sendo, FIB 2021 considera geralmente aceite recorrer a vigas rectas entre os apoios de modo a concordar com a curvatura do tabuleiro, mas apenas se esta for menor ou igual a 3 graus. A curvatura é conseguida variando a largura da consola da viga ao longo do vão.

Existem duas possibilidades para que as vigas sejam dispostas nos apoios:

- Considerando vigas de comprimentos diferentes, ficando as vigas com um alinhamento paralelo entre elas e um alinhamento coincidente nos apoios (Figura 3.4 a);
- Considerando vigas com os mesmos comprimentos, adquirindo assim um alinhamento radial entre as vigas e divergente no apoio (Figura 3.4 b).

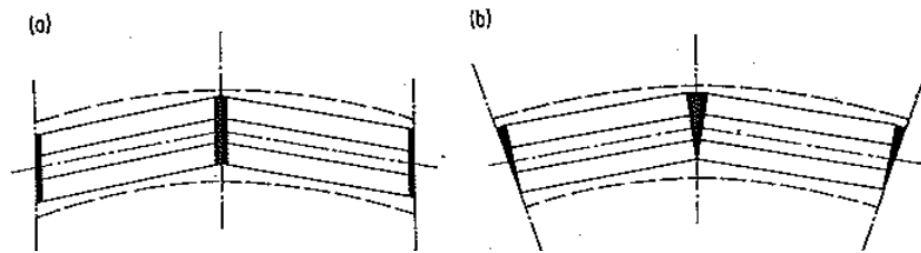


Figura 3.4: Disposição assumida pelas vigas para um traçado da via curvo. Fonte: Menn 1986.

Conforme FIB 2021, quando a curvatura assume ângulos superiores a 3 graus, actualmente opta-se por soluções inovadoras que surgiram por forma a fazer face ao uso de vigas metálicas, que eram a solução predominante nos casos de curvas com pequeno raio, sendo o raio dado pelo comprimento da curva dividido pelo seu grau em radianos. Essas soluções podem ser dadas por (FIB 2021):

- Curvas cordadas, que correspondem a vários segmentos rectos de 6 a 12 m, de tal forma que se obtenha um aspecto curvo. Esses segmentos rectos que formam a curva são raramente percebidos pelo público, ou mesmo pelos olhos de um engenheiro treinado. Tais vigas após a betonagem, são pós-tensionadas;
- Vigas curvas pré-tensionadas, outro método usado actualmente para obter tabuleiros com grande grau de curvatura, obtidas recorrendo a um traçado de pré-esforço curvo em planta, assim como o molde, obtendo assim, uma viga curva.

3.3.4. Curvas verticais

As curvas verticais são obtidas usando moldes curvos e fazendo passar cordões de pré-esforço curvos em perfil pela viga. Essas curvas são projectadas para satisfazer os requisitos de drenagem, estéticos, ou os estados limites relacionados ao esforço transversal.

3.3.5. Viés

O viés também é uma forma da ponte seguir o traçado da estrada, acontece quando o eixo maior da infraestrutura não é perpendicular ao eixo maior da superestrutura, consoante essa diferença varie, o comportamento da superestrutura também varia. O ângulo de viés pode ser definido como o ângulo formado entre o eixo maior da infraestrutura e o da superestrutura, ou como o ângulo formado entre o eixo maior da infraestrutura e o perpendicular ao eixo maior da superestrutura. A segunda definição é a que será usada no presente trabalho.

Segundo FIB 2004 e FIB 2021, para vieses baixos, menores que 30 graus, o tabuleiro e as vigas podem ser concebidos quase da mesma forma que para pontes rectas, sem a necessidade de considerações especiais durante a fase preliminar.

Para o estabelecimento de viés, devem-se tomar precauções nas vigas, na região dos apoios, onde, dependendo de se as vigas terminam com uma extremidade recta ou chanfrada, podem-se dispor os aparelhos de apoio da seguinte maneira (PCI 2014):

- Aparelhos de apoio paralelogramos, Figura 3.5 a);
- Aparelhos de apoio rectangulares, seguindo o alinhamento do eixo maior da infraestrutura, Figura 3.5 b);
- Aparelhos de apoio rectangulares, seguindo o alinhamento da viga, solução mais usada, Figura 3.5 c).

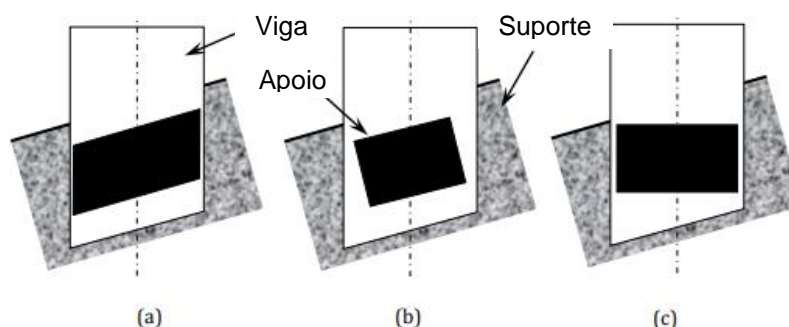


Figura 3.5: Disposições adoptadas para os aparelhos de apoio no suporte de pontes enviesadas. Fonte: Adaptado de PCI 2014.

3.3.6. Largura variável

Em alguns casos a ponte acomoda uma via cuja largura varia gradualmente ao longo do seu comprimento, essa variação gera efeitos estruturais que podem impactar no dimensionamento das vigas, assim como das lajes de tabuleiro. Consoante SETRA 1996, quando o alargamento é moderado tanto em largura como em comprimento, a adaptação pode ser realizada simplesmente na laje, fazendo-se os reforços necessários e mantendo as vigas com o mesmo espaçamento. Nos casos em que o alargamento assume um valor considerável, torna-se necessário variar o espaçamento das vigas, dispondo-as em forma de leque, de modo a distribuir o alargamento por toda a laje.

As disposições apresentadas para o espaçamento das vigas só servem para o caso em que as mesmas sofram uma variação de espaçamento menor que um metro, caso contrário, deve-se estudar sobre a possibilidade do aumento do número de vigas, levando a uma análise mais complexa (SETRA 1996).

3.4. Elementos complementares ao tabuleiro

3.4.1. Aparelhos de apoio

Os aparelhos de apoio, constituindo um dos elementos mais importantes das pontes, possuem a função de transmissão de cargas da superestrutura para a infraestrutura, permitindo ou não a translação e a rotação, garantindo que a estrutura tenha o comportamento estrutural concebido no dimensionamento (PCI 2014). Esses aparelhos podem ser formados por diversos materiais, os tipos de aparelhos de apoio mais usados nas últimas décadas são: elastoméricos (Figura 3.6 a), *pot bearings* elastoméricos, metálicos (Figura 3.6 c) e articulação em betão (Figura 3.6 b), sendo os elastoméricos preferenciais.

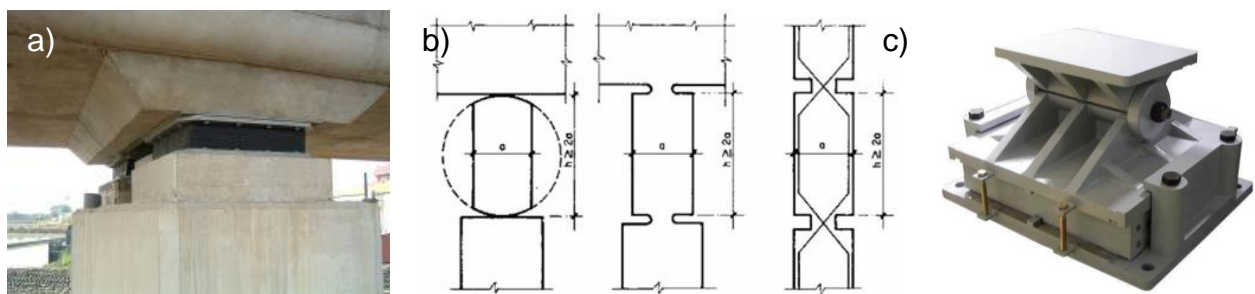


Figura 3.6: Aparelhos de apoio. a) Elastoméricos b) Em betão c) Metálicos. Fonte: diprotec, Machado e Sartorti 2010 e indiamart.

Sendo uma região importante tanto para o comportamento estrutural da ponte, como para a durabilidade da mesma, é importante obedecer a certas relações para o posicionamento das vigas relativamente aos aparelhos de apoio e à infraestrutura, tais relações podem ser observadas no ANEXO 1.

3.4.2. Outros elementos complementares

Além dos aparelhos de apoio, o tabuleiro conta com outros elementos complementares fundamentais para o funcionamento estrutural, assim como para a segurança dos seus utentes, entre eles encontram-se:

- As juntas de dilatação, que permitem que a estrutura tenha melhor comportamento relativamente aos efeitos térmicos;
- Guarda-corpos, para a segurança dos peões;
- Guarda-rodas, para a segurança rodoviária.

4. EFEITOS DIFERIDOS

Em uma secção composta, formada pela acção compósita de uma laje BIS e vigas pré-fabricadas, os efeitos diferidos de um influenciam no outro, dado que os betões são de idades diferentes, podem ser de classes distintas e, conseqüentemente, de módulos de elasticidades desiguais. Assim sendo, é importante o estudo dos efeitos diferidos e das suas conseqüências sobre o dimensionamento das vigas em estudo.

As estruturas de betão podem estar sujeitas a variações de volume em função do tempo, constituindo fenómenos designados por efeitos diferidos, causados pelas condições do ambiente e/ou por forças aplicadas sobre o elemento. Entre os efeitos diferidos encontram-se:

- Fluência;
- Retracção.

Após um elemento de betão ser compactado, ter terminado a presa e entrado em equilíbrio com o ambiente, está sujeito à variação de volume que pode ocorrer com ou sem a troca de humidade com o meio, a uma temperatura constante e sem sujeição a uma carga externa, efeito de retracção (FIB 1999 e Coutinho e Gonçalves 1994).

De acordo com Coutinho e Gonçalves 1994, quando o mesmo elemento é sujeito a uma tensão constante, o elemento sofre inicialmente uma deformação instantânea, deformação elástica, adicionada à deformação devida à retracção de secagem. Com o decorrer do tempo essa deformação vai aumentando lentamente devido ao rearranjo da estrutura interna do betão, dando origem à fluência, sendo esta, em parte, não recuperável, como pode ser observado na Figura 4.1.

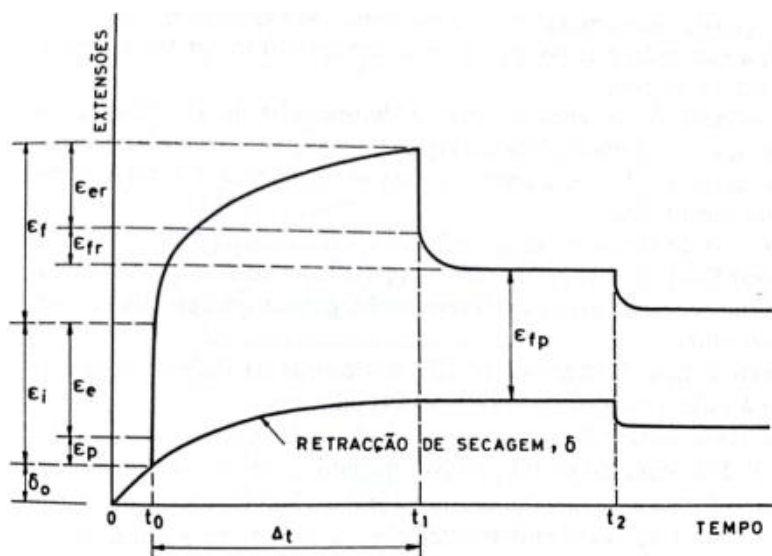


Figura 4.1: Efeito de retracção e fluência. Fonte: Coutinho e Gonçalves 1994.

Existem diversos modelos para o estudo dos efeitos diferidos, no presente trabalho serão avaliados segundo o Código de Prática para o Dimensionamento de Pontes Rodoviárias e Aquedutos (*Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts*) (CPDPRA), da SATCC 1998, código que rege o dimensionamento de pontes na região da África Austral, cuja região em estudo, Moçambique, faz parte.

4.1. Fluência

O CPDPRA considera que a avaliação da magnitude da deformação dependente do tempo sobre as condições de serviço podem ser determinadas pela teoria da fluência linear, assim sendo, para uma carga constante f_c , a deformação final de fluência pode ser dada por:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{f_c}{E_{c,28}} \varphi \quad (4.1)$$

Onde:

- ε_{cc} Extensão do betão devida à fluência;
- $E_{c,28}$ Módulo de elasticidade secante do betão na idade de 28 dias, que é um indicador de qualidade do betão;
- φ Coeficiente que cobre as condições particulares de trabalho, denominado por coeficiente de fluência em referências como Coutinho e Gonçalves 1994, FIB 1999 e o Eurocódigo 2 (EC2, CEN 2004).

O coeficiente de fluência é igual ao produto de 5 coeficientes parciais:

$$\varphi = k_L k_m k_c k_e k_j \quad (4.2)$$

Onde:

- k_L Depende das condições ambientais;
- k_m Depende do grau de endurecimento (maturidade) do betão no período do carregamento;
- k_c Depende da composição do betão;
- k_e Depende da espessura efectiva do elemento;
- k_j Depende do desenvolvimento da deformação em função do tempo.

Diferente dos diversos modelos para a análise da fluência, como do REBAP, do EC2 e ainda como apresentado em FIB 1999, no modelo em uso, o módulo de elasticidade

não sofre variação com o tempo, ou seja, não é afectado pela fluência, assim sendo, o mesmo será usado para o estudo em diferentes idades de carregamento.

Os coeficientes parciais para a determinação do coeficiente de fluência podem ser obtidos dos gráficos apresentados na Figura 4.2:

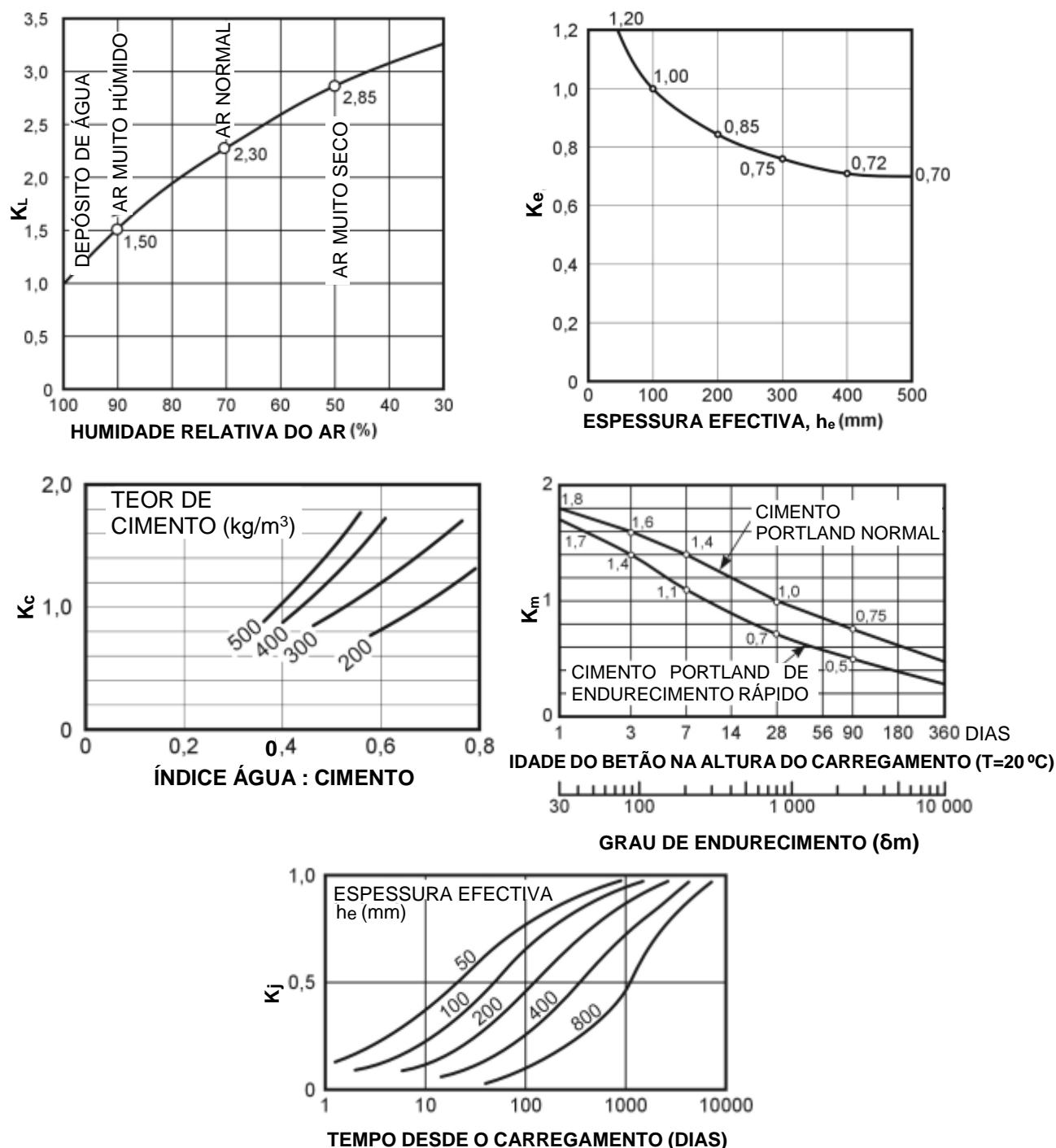


Figura 4.2: Coeficientes parciais k_L , k_m , k_c , k_e e k_j para a determinação do coeficiente de fluência. Fonte: Adaptado do CPDPRA.

O valor do coeficiente k_m obtido da Figura 4.2 pressupõe o uso de cimento Portland, endurecido em condições normais, com uma temperatura média de 20°C e protecção contra a perda excessiva de humidade.

Se o betão endurecer a uma temperatura diferente de 20°C, a idade na altura do carregamento é substituída pelo correspondente grau de endurecimento:

$$\delta_m = \sum j_m (T + 10^\circ\text{C}) \quad (4.3)$$

Onde:

δ_m Grau de endurecimento na altura do carregamento;

j_m Número de dias em que o endurecimento tomou lugar a T °C.

A espessura específica h_e é dada pela relação entre a área A e o semiperímetro $u/2$ em contacto com a atmosfera.

$$h_e = \frac{A}{u/2} \quad (4.4)$$

Assim sendo, quanto menor a espessura específica, ou seja, maior perímetro exposto para uma determinada área, mais graves são os efeitos do ambiente e os efeitos diferidos sobre este.

4.2. Retracção

O CPDPRA considera a retracção a qualquer instante como produto de quatro coeficientes parciais:

$$\varepsilon_{cs} = k_L k_c k_e k_j \quad (4.5)$$

Os coeficientes parciais têm os mesmos significados que para a fluência, e dentre eles, os coeficientes k_c e k_j empregados na retracção são os mesmos que para fluência.

Os restantes coeficientes podem ser obtidos da Figura 4.3.

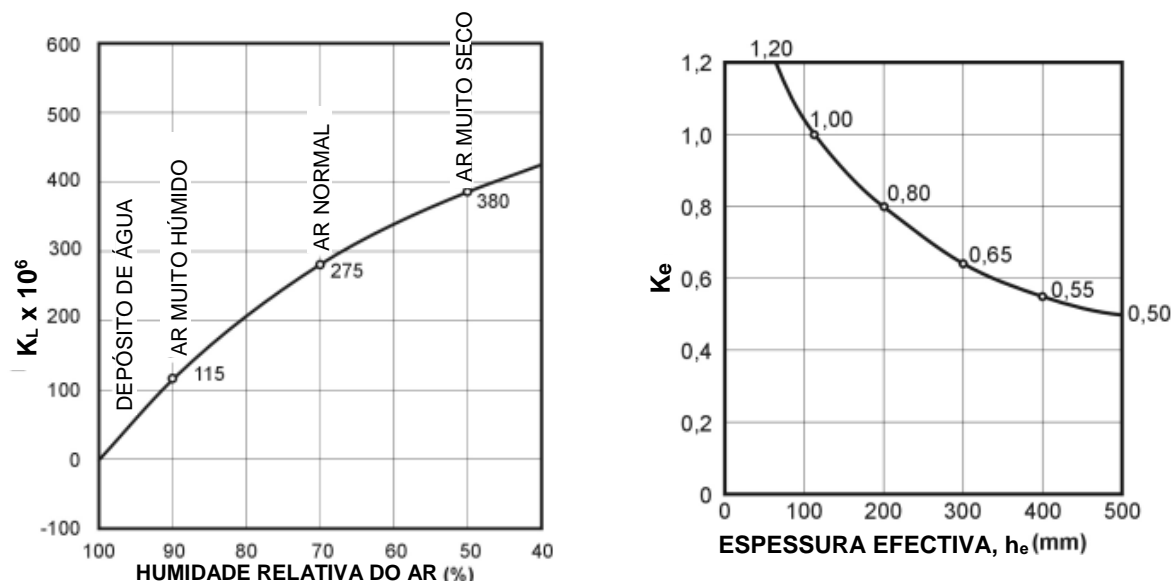


Figura 4.3: Coeficientes k_L e k_e para a determinação da retracção. Fonte: Adaptado do CPDPRA.

Visto que as secções das vigas serão reforçadas, tanto pelas armaduras ordinárias, como pelas armaduras pré-esforçadas, os efeitos da retracção serão afectados. Consoante o CPDPRA e Coutinho e Gonçalves 1994, as armaduras ordinárias atenuam a retracção, tomando parte da tensão resultante dessa atenuação, e o pré-esforço a agrava, segundo o CPDPRA, embora Coutinho e Gonçalves 2004 não considerem que as acções exteriores tenham influência sobre a retracção.

De modo a tomar em consideração o efeito das armaduras sobre a retracção, usa-se o coeficiente de relaxação, conforme a Eq.(4.6):

$$\eta = \int_{j_i}^{j_\infty} \frac{df_{cj}}{dj} \frac{a}{\Delta f_{c_\infty}} \frac{k_{mj}}{k_{mi}} dj \quad (4.6)$$

Onde:

- j_∞ : Idade no fim de vida da estrutura;
- j_i : Idade no primeiro carregamento;
- f_{cj} : Tensão do betão no momento de aplicação (j) de um incremento de tensão;
- j : Idade na aplicação do incremento de tensão;
- Δf_{c_∞} : Variação de tensão no betão devida à fluência no tempo t_∞ ;
- k_{mi} : Coeficiente k_m para a idade do betão no primeiro carregamento.

De forma simplificada, o coeficiente de relaxação pode ser obtido pela Figura 4.4:

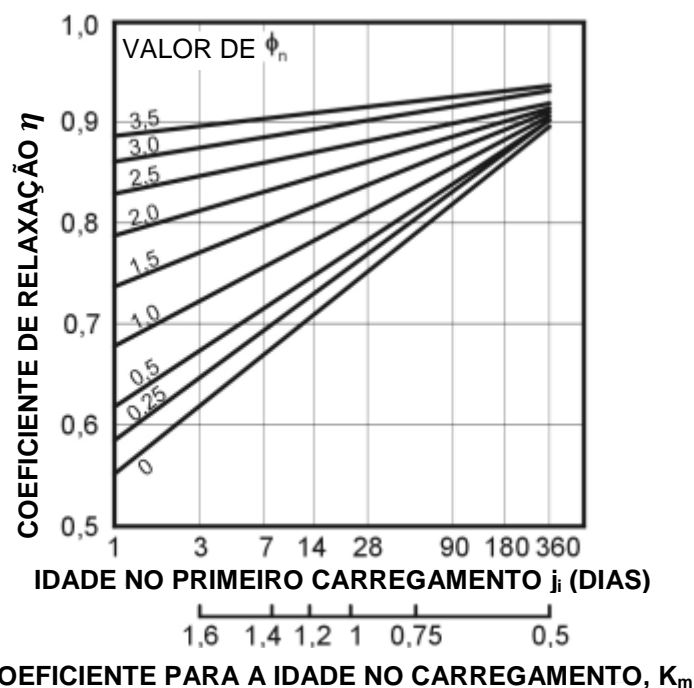


Figura 4.4: Coeficiente de relaxação η . Fonte: Adaptado de CPDPRA.

Onde $\varphi_n = \varphi/k_m$

Para as vigas em consideração, que serão simplesmente armadas, ou seja, armadas para resistir a tracção nas fibras inferiores devida aos momentos flectores, no cálculo das tensões axiais ou deformações devidas à retracção, deve-se aplicar o coeficiente:

$$\varphi_3 = \frac{1}{1 + \rho\alpha_e(1 + a_s^2/i^2)(1 + \eta\varphi)} \quad (4.7)$$

Onde:

- a_s Distância do centro de gravidade do aço ao da secção líquida do betão;
- α_e Índice modular, dado por E_s/E_c^v ;
- i Raio de giração da secção líquida do betão;
- ρ Índice geométrico de armadura longitudinal.

A variação de tensão devida à fluência para um elemento de betão armado sujeito ao momento flector é aquela induzida pelo momento flector na altura da sua aplicação, multiplicada pelo coeficiente φ_5 . Para vigas simplesmente armadas:

$$\varphi_5 = \frac{\rho\alpha_e}{1 + \rho\alpha_e} + \frac{1 + \rho\alpha_e(1 + \eta\varphi)}{1 + \rho\alpha_e(1 + a_s^2/i^2)(1 + \eta\varphi)(1 + \rho\alpha_e)} \quad (4.8)$$

4.3. Efeito da fluência e da retracção diferencial entre a laje BIS e as vigas pré-fabricadas

Conforme mencionado no início do capítulo, em secções compostas por elementos de idades diferentes, os efeitos diferidos de um elemento influenciam no outro. Uma vez que, esses efeitos diferidos apresentam relações diferenciais e os tabuleiros em estudo são isostáticos, o sistema compósito será deformado axialmente e sofrerá rotações nas suas extremidades de modo a atingir o equilíbrio.

O estudo da secção composta será feita com base em FIB 2020 e Sousa 2004 e, para a sua análise, FIB 2020 considera que os seguintes pressupostos devem ser considerados:

- É considerado que a secção possui propriedades pseudoelásticas, assim sendo, permite-se a superposição de efeitos;
- Em cada secção da viga, a deformação livre da laje em relação à viga é permitida;
- O módulo de elasticidade não sofre alteração temporalmente e o seu valor é correspondente ao do betão aos 28 dias;
- A análise será feita considerando as propriedades de uma secção composta, pois a laje e as vigas pré-fabricadas possuem propriedades diferentes.

4.3.1. Efeito da fluência na secção composta

Para o estudo da fluência considerou-se o peso próprio da viga, o pré-esforço, o peso próprio da laje de tabuleiro e os restantes pesos próprios, sequencialmente.

No sistema, antes da betonagem da laje, as vigas já apresentam uma fluência decorrida no intervalo de tempo entre a fabricação e a colocação, devida ao peso próprio das vigas e da acção do pré-esforço, essa fluência inicial é calculada de acordo com a Eq. (4.1). Essas acções produzem esforços axiais N_{ext} e momentos flectores M_{ext} em cada secção das vigas, posto isto, as extensões e as curvaturas resultantes dessas acções são dadas por:

$$\varepsilon_{cc}(t_0) = \frac{N_{ext}}{A_V \cdot E_c^V} \quad (4.9)$$

$$\chi_{cc}(t_0) = \frac{M_{ext}}{I_V \cdot E_c^V} \quad (4.10)$$

Betonada a laje, as vigas ficam também sobre influência do peso próprio da laje e os esforços a que estão sujeitas aumentam, desse modo, a extensão e curvatura devidas à fluência são dadas por:

$$\varepsilon_{cc}(t_1) = \frac{N_{ext}}{A_V \cdot E_c^V} [1 + \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.11)$$

$$\chi_{cc}(t_1) = \frac{M_{ext}}{I_V \cdot E_c^V} [1 + \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.12)$$

Para o tempo infinito, as deformações devidas à fluência são determinadas primeiramente libertando a estrutura do efeito da laje, ou seja, permitindo que as vigas deformem independentemente da laje, resultando em:

$$\Delta\varepsilon_{cc}(t, t_1) = \frac{N_{ext}}{A_V \cdot E_c^V} [\varphi_c(t, t_0) - \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.13)$$

$$\Delta\chi_{cc}(t_1) = \frac{M_{ext}}{I_V \cdot E_c^V} [\varphi_c(t, t_0) - \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.14)$$

Para compensar essas deformações, aplica-se forças normais e momentos flectores nas vigas, conforme as expressões:

$$N_{int} = N_{ext} [\varphi_c(t_n, t_0) - \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.15)$$

$$M_{int} = M_{ext} [\varphi_c(t_n, t_0) - \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.16)$$

De seguida deve-se aplicar o oposto dos valores obtidos no centro de gravidade da secção composta, obtendo-se as deformações devidas à fluência diferencial:

$$N_{V+L} = N_{int} \quad (4.17)$$

$$M_{V+L} = -M_{int} - N_{int} \cdot e \quad (4.18)$$

$$\Delta\varepsilon_{V+L}(t, t_1) = -\frac{N_{V+L}}{A_{sc}E_c^V} = -\frac{N_{ext}}{A_{sc}E_c^V} [\varphi_c(t, t_0) - \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.19)$$

$$\Delta\chi_{V+L}(t, t_1) = -\frac{M_{V+L}}{I_{sc}E_c^V} = -\frac{(M_{ext} + N_{ext} \cdot e)}{A_{sc}E_c^V} [\varphi_c(t, t_0) - \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.20)$$

A rotação devida à fluência nas extremidades das vigas é dada por:

$$\Delta\theta_{cc} = \Delta\theta_{elástica} [\varphi_c(t_n, t_0) - \varphi_c(t_1, t_0)] \quad (4.21)$$

As relações diferenciais da fluência encontram-se resumidas na Figura 4.5.

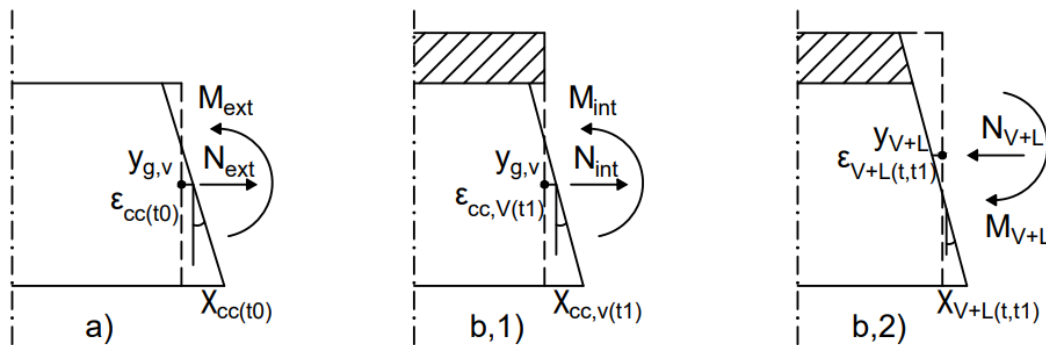


Figura 4.5: Representação esquemática do cálculo da fluência diferencial.

4.3.2. Efeito da retracção na secção composta

Para o estudo dos efeitos da retracção diferencial no sistema composto, procede-se de acordo com os passos seguintes, e o seu efeito encontra-se representado na Figura 4.6:

- A deformação livre de retracção da laje relativamente à viga é permitida;
- Após a deformação permitida de uma, relativamente à outra, aplica-se uma carga axial à laje para reestabelecer a compatibilidade entre as vigas e a laje, Eq. (4.22);
- A mesma carga é aplicada, mas com sentido contrário no sistema composto para restaurar o equilíbrio, produzindo uma curvatura em cada secção da viga, Eq. (4.22);
- A partir da curvatura, constante na viga porque a retracção é igual em todas as secções da mesma, pode-se obter a rotação nas extremidades do sistema.

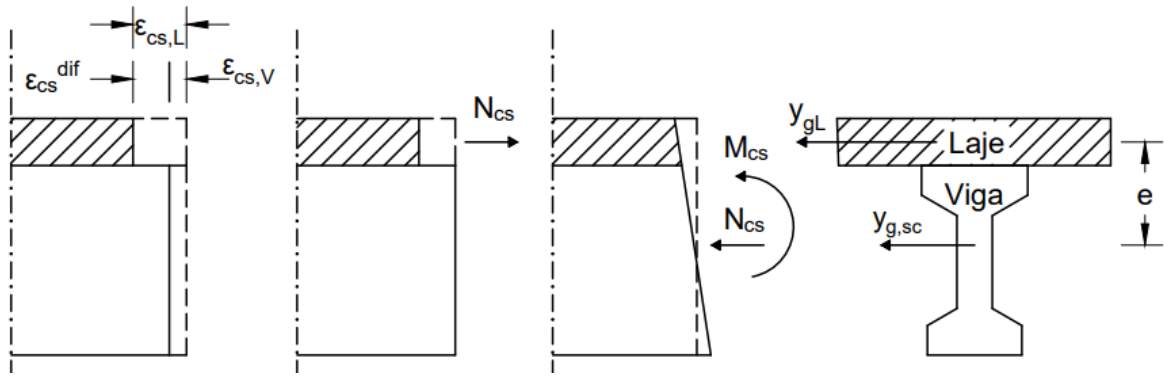


Figura 4.6: Procedimento para análise do fenómeno de retracção diferenciada no sistema composto.
Fonte: Adaptado de Sousa 2004.

$$N_{cs} = \varepsilon_{cs} A_L E_c^L \quad (4.22)$$

$$M_{cs} = N_{cs} \cdot e \quad (4.23)$$

$$\chi_{cs} = \frac{M_{cs}}{E_c^V I_{sc}} = - \frac{\varepsilon_{cs} \cdot A_L \cdot e}{m \cdot I_{sc}} \quad (4.24)$$

Onde:

- N_{cs} Esforço normal de retracção;
- ε_{cs} Extensão de retracção diferencial entre a laje e a viga;
- M_{cs} Momento flector gerado pela retracção;
- e Excentricidade entre o centro da laje e o centro da secção composta;
- χ_{cs} Curvatura da secção composta;
- I_{sc} Momento de inércia da secção composta;
- m Coeficiente de homogeneização, dado por E_c^V / E_c^L .

Visto que as condições do ambiente, assim como a idade do betão da viga pré-fabricada na altura da colocação não são constantes, podendo variar consoante a situação, os efeitos tanto da fluência, como da retracção, serão estimados para uma situação representativa na região de aplicação, conforme se apresenta nas acções de longo prazo no capítulo seguinte.

5. DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS PRÉ-FABRICADAS PARA PONTES RODOVIÁRIAS

5.1. Descrição geral

No presente capítulo far-se-á o dimensionamento das vigas pré-fabricadas para pontes de um único vão simplesmente apoiado, para um tabuleiro tipo e num intervalo de vãos de 10 a 30 metros, concretamente para 10, 15, 18, 22, 26 e 30 metros. A ponte será dimensionada para as condições climáticas e de acções adaptadas para a região de estudo, Moçambique, considerando um período de vida útil de 100 anos.

Efectuou-se uma análise linear elástica, recorrendo ao *software* de cálculo “*CSiBridge*”, que faz o uso do método de elementos finitos. Procedeu-se ao dimensionamento para a situação das vigas antes da betonagem da laje de tabuleiro, assim como após a sua betonagem, contribuindo a laje para o banzo superior da viga.

As acções aplicadas na estrutura foram consideradas de acordo com o CPDPRA da SATCC 1998, é aplicável na região da África Austral, e a verificação dos estados limites foi realizada segundo o EC2, por ser mais recente e abrangente que a regulamentação em vigor no país. Fez-se também o uso do NP EN 15050 2008 (Produtos prefabricados de betão-elementos de pontes) para as disposições relativas à pré-fabricação.

5.2. Apresentação da estrutura

A estrutura em consideração corresponde a tabuleiros de pontes rodoviárias cujos elementos em estudo são as suas vigas, unidades que suportam as cargas do mesmo. O tabuleiro tipo, é constituído por laje BIS suportada por vigas pré-fabricadas, onde a laje é executada com recurso a cofragens perdidas, as pré-lajes.

5.2.1. Principais características do tabuleiro tipo

No presente trabalho será analisado um tabuleiro tipo, que cobre grande parte dos casos que se apresentam na região de estudo. A largura do tabuleiro é condicionada particularmente pela largura da via que está contida e pela do passeio desejado.

De modo a tornar a situação abrangente, ir-se-á considerar que a ponte tem como destino albergar uma estrada primária, assim sendo, deverá satisfazer os requisitos para esse tipo de estradas. Atendendo à situação do país, em que há um tráfego considerável

de peões, deve-se garantir passeios com uma largura suficiente para a circulação confortável dos mesmos.

A laje de tabuleiro irá acomodar uma via com duas faixas de rodagem de 3,5 m de largura cada, contendo bermas de 1 m para cada lado, revestidas por betão betuminoso de 5 cm de espessura e inclinação transversal de 2,5%, sendo esses os requisitos mínimos desejáveis para uma estrada primária. Os passeios considerados serão em betão simples com 1 m de largura e 18 cm de altura, podendo conter, no seu interior, tubagens de serviço. Desse modo, o tabuleiro irá possuir uma largura de 11 metros.

Os passeios são limitados por guarda-corpos metálicos de um metro de altura, sobre as vigas de bordadura nas extremidades da laje em consola. O tabuleiro tipo encontra-se apresentado na Figura 5.1, onde as vigas foram omissas por simplicidade.

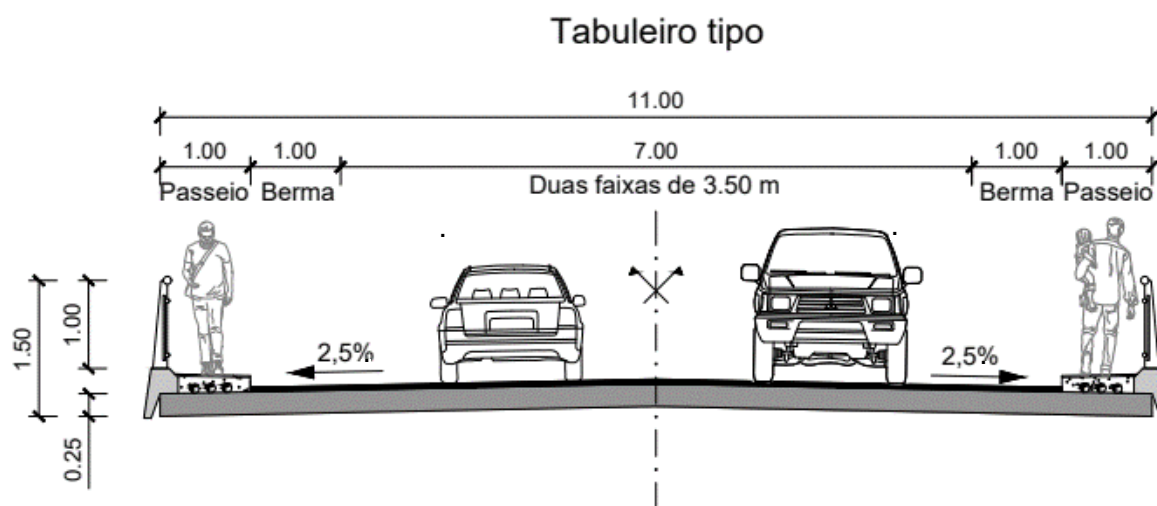


Figura 5.1: Tabuleiro tipo usado no estudo (vigas omissas).

5.2.2. Características geométricas

As características geométricas determinadas nesta secção, são baseadas nas disposições apresentadas no capítulo 3. Dessa forma, para o presente estudo, serão consideradas quatro secções transversais para as vigas pré-fabricadas, uma rectangular (denominada RPF) e as outras em "I" (denominadas IPF), onde a forma das secções será dependente dos vãos. O espaçamento entre as vigas, tomado como a distância horizontal entre eixos verticais que passam pelo centro das vigas, será constante e dependente da sua secção transversal, e a laje irá possuir uma espessura de 25 cm.

A secção transversal dos tabuleiros com vigas RPF irá contar com nove vigas, e a dos com vigas IPF irá contar com seis. As características previamente mencionadas

foram resumidas na Tabela 5.1 e os tabuleiros modelados encontram-se apresentados na Figura 5.2.

Tabela 5.1: Forma e espaçamento das vigas pré-fabricadas para os vãos em consideração.

Vigas		
Vãos (m)	10–15	16–30
Secção	Rectangular	“I”
Número de vigas no tabuleiro	9	6
Espaçamento das vigas (m)	1,25	1,90
Consola (m)	0,50	0,75

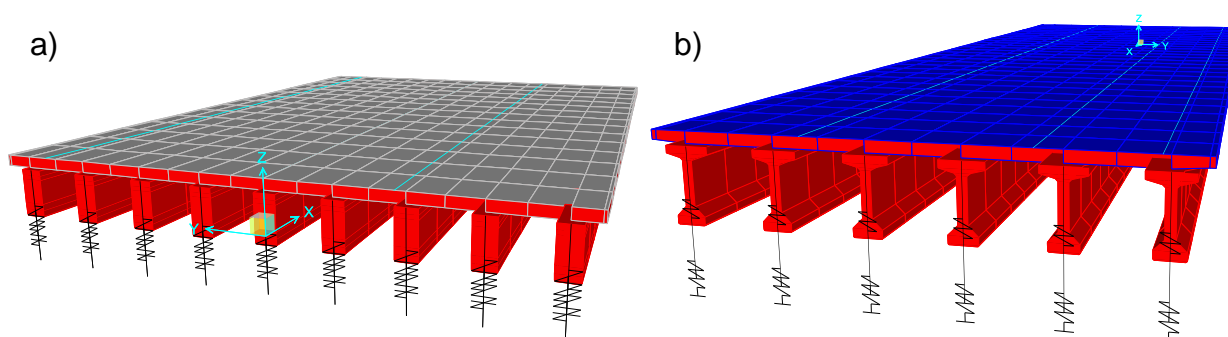


Figura 5.2: Modelação estrutural dos tabuleiros. a) Vigas rectangulares, b) Vigas em “I”. Fonte: CSiBridge.

Ir-se-á dispensar o uso de carlingas para maior facilidade e celeridade de construção, assim, a distribuição de esforços entre as vigas será realizada pela laje.

5.2.3. Materiais dos elementos do tabuleiro

O material determinado tanto para as vigas, como para as lajes, são diferentes. Considerou-se material mais resistente para as vigas, uma vez que estas suportam o tabuleiro e as condições de controlo no processo de pré-fabricação permitem alcançar tais resistências com maior facilidade. Na Tabela 5.2 encontram-se apresentadas as propriedades do betão e algumas características assumidas para o estudo.

Os elementos estruturais são constituídos por armaduras ordinárias e pré-esforçadas, uma vez que os esforços instalados nas vigas devidos às acções consideradas assumem valores elevados. Para as armaduras ordinárias fez-se o uso do aço A400NR e, para as pré-esforçadas, cordões com diâmetro de 15,7 mm da *Dywidag Systems International* (DSI 2017), formados pela associação de 7 fios, segundo o

Eurocódigo prEN 10138/BS 5896. As particularidades das armaduras encontram-se resumidas na Tabela 5.3.

Tabela 5.2: Características do betão para os elementos resistentes do tabuleiro.

Betão		
	Vigas	Lajes
Classe de resistência (EC2)	C35/45	C25/30
f_{ck} [MPa]	35	25
f_{ctm} [MPa]	3,2	2,6
E_{cm} [GPa]	34	31
Tipo de cimento	Endurecimento rápido e alta resistência	
Dosagem do cimento	400 kg/m ³	
Relação água-cimento	0,45	
Classe de exposição	XC4, XD1 e XS1	
Peso específico [kN/m ³]	25,48	
α_{cT} [1/°C]	12x10 ⁻⁶	

Tabela 5.3: Características das armaduras aplicadas no tabuleiro.

Armaduras		
	Ordinárias	Pré-esforçadas
Designação do aço	A400 NR	EN 10138-3-Y1770S7-15,7-A
Diâmetro nominal [mm]	Variado	15,7
E_{cm} [GPa]	195	195
Relaxação [%]	-	2,5 (baixa relaxação)

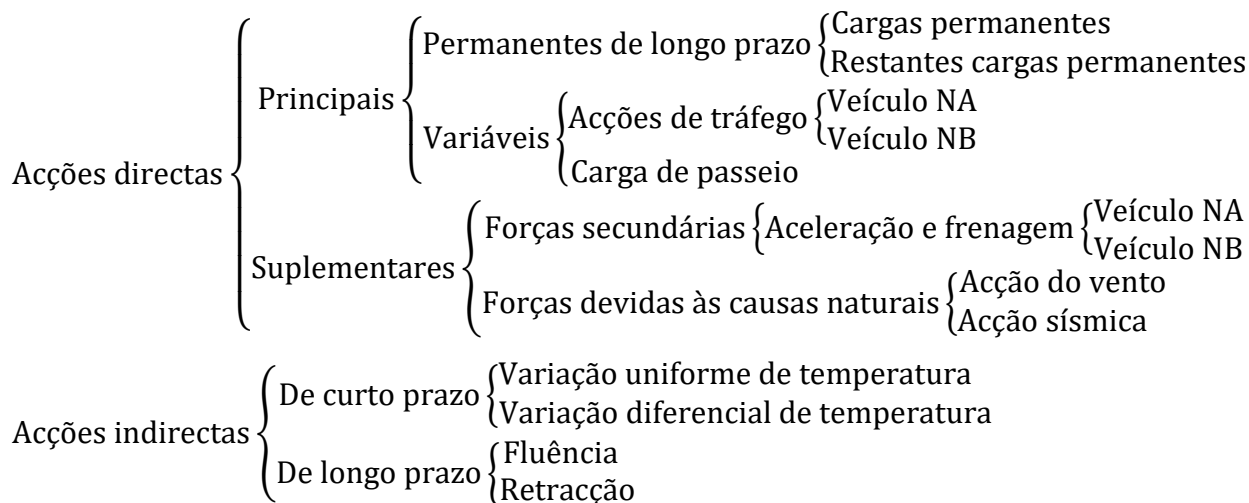
Além do betão e do aço, o tabuleiro conta com outros materiais sem função principal estrutural, mas que geram acções sobre o mesmo, para esses, o peso específico considerado foi conforme a Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Características dos outros materiais do tabuleiro.

Outros materiais	
Material	Peso específico [kN/m ³]
Betão simples	23,52
Betão asfáltico	20,00
Aço	78,50

5.3. Acções

Para os tabuleiros dimensionados, as acções consideradas foram conforme o CPDPRA, esse regulamento considera as seguintes acções a serem usadas:



5.3.1. Acções permanentes

As acções permanentes consideradas são devidas ao peso próprio da estrutura, do pavimento, passeios, guardas e vigas de bordadura, cujos valores são em função do peso específico apresentados em 5.2.3.

5.3.2. Acções de tráfego

Sendo a ponte rodoviária, estará sujeita a acções de tráfego, que podem ser de três tipos:

- Carregamento normal (NA);
- Carregamento anormal (NB, tipo NB36);
- Super carregamento (NC, tipo NC-30 x 5 x 40).

O carregamento NC representa combinações de reboques ou veículos autoimpulsionados de várias rodas, destinados a transportar cargas indivisíveis muito pesadas, caso pouco comum na região de estudo, assim sendo, porque o regulamento em uso permite que esse carregamento possa ser omitido em certas rotas, no presente estudo não será considerado.

1. Carregamento NA

Para a aplicação do carregamento NA, deve-se introduzir o conceito de faixas fictícias, que são faixas imaginárias para aplicação das cargas de dimensionamento e

essas faixas não são as mesmas que as da rodovia. Assim sendo, dividiu-se a faixa de rodagem em três faixas fictícias, cada uma com três metros de largura, onde foram aplicadas as cargas NA.

O carregamento NA deve ser aplicado para o mais severo dos casos 1 e 2 combinados ou apenas o caso 3.

Caso 1:

O caso 1 é representado por duas cargas lineares iguais, distanciadas de 1,9 m, aplicadas em cada faixa fictícia conforme seja mais desfavorável, cuja carga combinada por metro linear de faixa fictícia carregada equivale a 36 kN.

Caso 2:

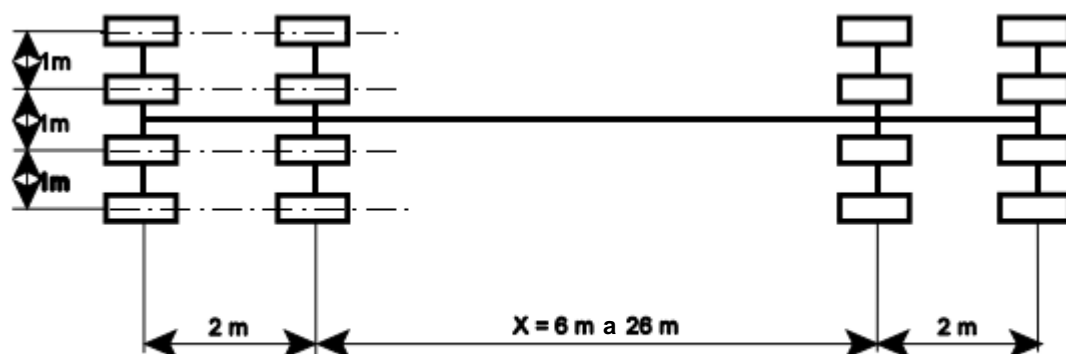
Uma carga axial nominal de $\frac{144}{\sqrt{n}}$ kN por faixa fictícia é aplicada, onde n é a sequência numérica do carregamento. Essa carga é aplicada também com um eixo espaçado de 1,9 m, em combinação e na mesma posição que o carregamento do caso 1.

Caso 3:

Duas rodas nominais de 100 kN espaçadas a não menos de 1 m foram posicionadas ao longo da estrada, em todas as direcções, tendo uma área de contacto circular de 0,1 m² cada. O caso 3 é aplicado separadamente dos outros dois casos.

2. Carregamento NB36

Esse carregamento representa um único veículo anormalmente pesado, constituído por quatro eixos, cada um com 4 rodas, conforme se encontra representado na Figura 5.3, onde cada eixo aplica uma carga de 360 kN, tendo cada roda uma área de contacto circular de 340 mm de diâmetro.



Dimensões discretas de 6, 11, 21, 26 podem ser usadas para X

Figura 5.3: Características geométricas do veículo NB. Fonte: Adaptado do CPDPRA.

Esse veículo foi colocado em todas as posições na faixa de rodagem, afastado no mínimo de 0,6 m das bordas dos passeios.

As sobrecargas rodoviárias são acompanhadas, consoante a combinação, de uma acção suplementar, caracterizada por forças longitudinais para tomar em consideração os efeitos de aceleração e frenagem.

Para o veículo tipo NA, essa carga corresponde a uma força nominal de 3 kN/m de comprimento carregado, adicionado de 100 kN, aplicadas numa área com a largura de uma faixa fictícia, multiplicada pelo comprimento do carregamento, sujeitas a um valor máximo de 400 kN.

Para o veículo tipo NB, uma força nominal de 20% da força total NB é aplicada, igualmente distribuída entre oito rodas de dois eixos do veículo distanciados de 2 m.

5.3.3. Sobrecarga de passeio e guarda-corpos

Para os passeios aplicou-se uma carga uniformemente distribuída da seguinte forma:

- 5,0 kN/m² para vãos até 25 m;
- $25/\sqrt{L}$ kN/m², mas não menos que 1,5 kN/m² para vãos entre 25 e 30 m.

Além das acções verticais sobre os passeios, aplicaram-se também cargas sobre os guarda-corpos, de 1,5 kN por metro linear nas direcções vertical e horizontal.

5.3.4. Vento

A acção do vento foi calculada considerando o método B do CPDPRA, para a determinação do equivalente estático das forças do vento, uma vez que a região em estudo é assolada por ventos fortes, mas os efeitos dinâmicos sobre a estrutura são negligenciáveis.

Esse vento é constituído por 3 componentes, por forma a tomar em consideração as diferentes direcções em que tal actua, dessa forma tiveram-se as direcções:

- Transversal ao tabuleiro;
- Longitudinal ao tabuleiro;
- Vertical ao tabuleiro.

As acções horizontais, incluindo as sobre os veículos, foram aplicadas na estrutura linearmente no centro geométrico do carregamento e as cargas verticais foram aplicadas uniformemente em toda a área do tabuleiro.

A pressão dinâmica do vento, necessária para a determinação das forças estáticas correspondentes, foi determinada pela seguinte expressão:

$$q = k_d v_c^2 \quad (5.1)$$

Onde:

- q Pressão dinâmica do vento;
 k_d Coeficiente que depende da densidade do ar e conseqüentemente da altitude acima do nível do mar, cujos valores encontram-se no CPDPRA;
 v_c Máxima velocidade da rajada do vento.

Para o presente caso, o k_d toma o valor de 0,00056, considerando a altitude média do país de 500 m, e v_c foi tomado como 57 m/s para o vento actuando na estrutura, valor extremo para a Zona I de acordo com o mapa de zoneamento de ciclones do país, que por apresentar maior valor, considerou-se abrangente para toda a região. Desta forma, obteve-se uma pressão dinâmica do vento de 1,82 kPa. Para o vento que actua sobre o tráfego de veículos, v_c é tomado como 35 m/s, valor limite especificado no CPDPRA para tal caso, obtendo-se para tal situação, uma pressão dinâmica de 0,69 kPa.

Conhecida a pressão dinâmica, e considerando as características geométricas do tabuleiro, determinaram-se as acções estáticas do vento para o tabuleiro com e sem sobrecarga, esses valores são apresentados no ANEXO 4.

5.3.5. Sismo

O sismo foi calculado pelo método B do CPDPRA, o método do equivalente estático aproximado, considerando a estrutura na zona I do mapa de zoneamento sísmico do país, correspondendo a um nível esperado de intensidade sísmica VIII na escala de Mercalli modificada e uma aceleração sísmica horizontal de 0,244g, considerando-se essa intensidade, abrangente para toda região de estudo, por apresentar o maior valor. A força sísmica foi considerada actuando de forma separada transversal e longitudinalmente ao tabuleiro, actuando no seu centro de gravidade. A expressão para o seu cálculo é dada por:

$$F_{eq,x} = SA\xi I f m_x h_x \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n m_i h_i} \right] \quad (5.2)$$

Onde:

- A Aceleração sísmica horizontal;
- S Factor de resposta sísmica, dado por $0,5\sqrt{T}$, mas não excedendo 1;
- T Período fundamental de vibração da estrutura em segundos na direcção em consideração;
- ξ Factor numérico que reflecte a configuração estrutural e as propriedades mecânicas do material, incluindo o amortecimento, ductilidade e/ou a capacidade energia-absortiva da estrutura, tomado como 1;
- I Factor de importância da estrutura, tomado como 1,3 por ser uma estrutura pós-desastre;
- $\sum_{i=1}^n m_i$ Massa do peso próprio da parte da estrutura a ser considerada, convenientemente subdividida em n porções;
- h_x Altura acima do nível da base da porção m_x da estrutura considerada;
- $i: 1 \dots n$ Refere aos níveis relativos da porção n da estrutura considerada.

A determinação da frequência própria, assim como os resultados da acção sísmica, são apresentados no ANEXO 5. Os valores da frequência própria fundamental, em todos os casos observados, são maiores que 0,5 c/s, significando isso que, a estrutura não é sensível aos efeitos dinâmicos.

5.3.6. Efeitos térmicos

Uma vez que o tabuleiro é um elemento que se encontra exposto ao ambiente, ele estará sujeito aos efeitos da variação de temperatura, essa variação pode ser uniforme ou diferencial, podendo gerar deformações e esforços internos na estrutura. A temperatura máxima efectiva da ponte é de 41 °C e a mínima efectiva é de 11 °C, adoptadas tendo em conta as variações térmicas no país, assim sendo, assumindo uma temperatura média de 25 °C, teve-se uma variação uniforme positiva de 16 °C e negativa de 14 °C.

Para a variação diferencial de temperatura, os valores variam em função da altura do tabuleiro, podendo ser variações positivas ou negativas. Os valores dessas variações para os diferentes intervalos de altura, encontram-se apresentados no ANEXO 6 e as deformações devidas às variações de temperatura encontram-se no ANEXO 11.

5.3.7. Acções de longo prazo (fluência e retracção)

As acções de longo prazo foram determinadas conforme o capítulo 4, onde se consideraram também os efeitos diferenciais resultantes das idades diferentes dos elementos estruturais e do comportamento diferente dos materiais que os compõem.

Para as acções de longo prazo assumiu-se:

- Humidade relativa de 70%;
- Idade do carregamento e de aplicação das vigas de 10 e 30 dias respectivamente.

Esses efeitos foram quantificados e os seus resultados apresentam-se nos ANEXOS 3 e 10, para os esforços internos e para as deformações horizontais, respectivamente.

Os efeitos diferidos diferenciais apresentaram efeitos variados, para os vãos de 22 a 30 metros, a combinação da fluência e da retracção, geraram efeitos favoráveis, reduzindo os momentos flectores e, para os vãos restantes, tiveram o efeito contrário, visto que a espessura efectiva aumenta consoante o vão diminui, tornando maiores os efeitos da retracção em relação à fluência diferencial, aumentando os momentos.

5.4. Combinação de acções

A análise estrutural do tabuleiro foi feita para 3 combinações:

- Combinação 1: inclui acções permanentes, variáveis principais e restritivas de longo prazo;
- Combinação 2: acções permanentes, variáveis principais, acções suplementares e restritivas de curto e longo prazo.
- Combinação 3: acções permanentes, acções suplementares (excluindo as causadas pelo tráfego na ponte) e restritivas de curto e longo prazo.

O resumo das combinações efectuadas pode ser observado no ANEXO 2, e as reacções de apoio para os casos mais desfavoráveis apresentam-se no ANEXO 12.

5.5. Verificação para os estados limites de utilização

A verificação para os estados limites de utilização constitui a verificação para a limitação de tensões, controlo da fendilhação, controlo das deformações e vibrações, mas uma vez que o CPDPRA apenas considera a verificação da última para o caso de ressonância causada por vibração induzida por usuários de pontes pedonais, dispensou-se a sua verificação.

5.5.1. Limitação de tensões e controlo da fendilhação

As tensões e fendilhação foram controladas recorrendo ao pré-esforço e a adopção de armaduras devidamente espaçadas, segundo o EC2. O dimensionamento para o pré-esforço foi efectuado de acordo com as combinações para os estados limites de utilização, tendo sido verificadas três fases, primeiro, a viga pré-fabricada durante o transporte, segundo, a viga pré-fabricada no destino, antes da secagem da laje BIS e sujeita às cargas permanentes, e por fim, a viga pré-fabricada no destino, sujeita às cargas de serviço, com a laje e as vigas em funcionamento conjunto, como apresentado na Figura 5.4, verificando a compressão máxima e a descompressão.

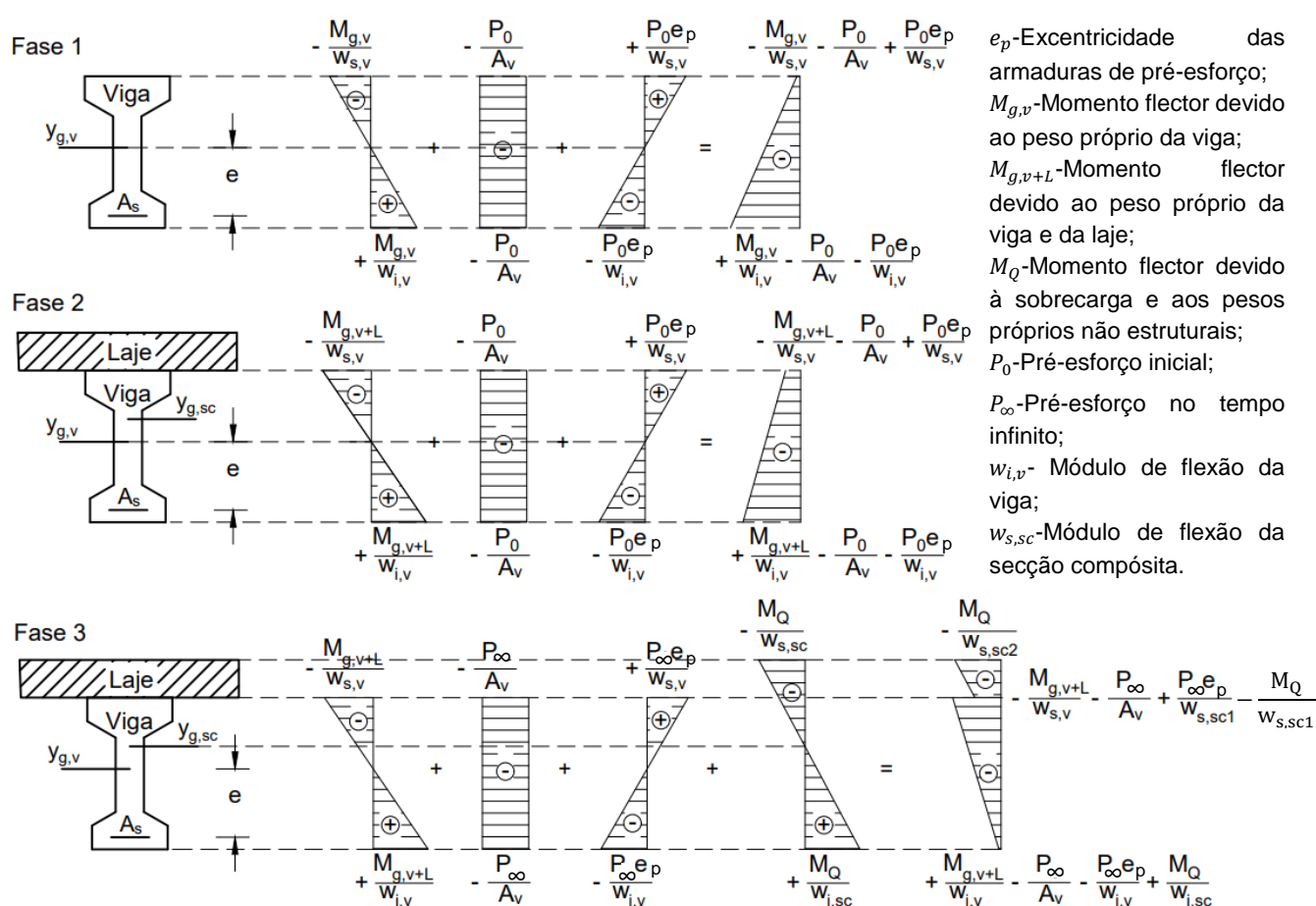


Figura 5.4: Fases consideradas para as vigas, seus carregamentos e respectivos diagramas de tensões.

Uma vez que é feito o uso de pré-lajes durante a betonagem da laje, o peso do betão fresco da laje é suportado pelas mesmas pré-lajes, que por sua vez, são suportadas somente pelas vigas. Dessa forma, somente as sobrecargas e as cargas permanentes adicionadas no tabuleiro após a secagem, são resistidas pelo conjunto viga-laje.

Por ser mais adequado às condições de fábrica, optou-se por pré-esforçar as vigas por pré-tensão, mas, porque para os maiores vãos (20 a 30 metros), podem surgir

inconvenientes relativos ao transporte das vigas, considerou-se igualmente o uso da pós-tensão no intervalo em questão, para possibilitar também a pré-fabricação “*in situ*”. Assim sendo, serão dimensionadas também, secções adaptadas para a pós-tensão.

As equações que governaram o dimensionamento do pré-esforço para cada uma das secções foram:

Fase 1 (somente a viga):

$$C_{máx,fi}: \frac{M_{g,v}}{w_{i,v}} - \frac{P_0}{A_v} - \frac{P_0 e_p}{w_{i,v}} \geq -0,6f_{ck,v} \quad (5.3)$$

$$D_{esc,fs}: -\frac{M_{g,v}}{w_{s,v}} - \frac{P_0}{A_v} + \frac{P_0 e_p}{w_{s,v}} \leq 0 \quad (5.4)$$

Fase 2 (viga com a laje betonada):

$$C_{máx,fi}: \frac{M_{g,v+L}}{w_{i,v}} - \frac{P_0}{A_v} - \frac{P_0 e_p}{w_{i,v}} \geq -0,6f_{ck,v} \quad (5.5)$$

Fase 3 (fase de serviço):

$$D_{esc,fi}: \frac{M_{g,v+L}}{w_{i,v}} - \frac{P_\infty}{A_v} - \frac{P_\infty e_p}{w_{i,v}} + \frac{M_Q}{w_{i,sc}} \leq 0 \quad (5.6)$$

$$C_{máx,fs}: -\frac{M_{g,v+L}}{w_{s,v}} - \frac{P_\infty}{A_v} + \frac{P_\infty e_p}{w_{s,v}} - \frac{M_Q}{w_{s,sc}} \geq -0,6f_{ck,v} \quad (5.7)$$

Onde:

- $C_{máx,fi}$ Tensão de compressão máxima na fibra inferior;
- $C_{máx,fs}$ Tensão de compressão máxima na fibra superior;
- $D_{esc,fi}$ Descompressão na fibra inferior;
- $D_{esc,fs}$ Descompressão na fibra superior;
- e_p Excentricidade das armaduras de pré-esforço;
- $M_{g,v}$ Momento flector devido ao peso próprio da viga;
- $M_{g,v+L}$ Momento flector devido ao peso próprio da viga e da laje;
- M_Q Momento flector devido à sobrecarga e às cargas permanentes não estruturais;
- P_0 Pré-esforço inicial;
- P_∞ Pré-esforço no tempo infinito;
- $w_{i,v}$ Módulo de flexão da viga;
- $w_{s,sc}$ Módulo de flexão da secção compósita.

Para a determinação da largura da laje que irá contribuir para a resistência da viga, recorreu-se a 5.3.2.1 do EC2, e uma vez que a viga e a laje possuem classes diferentes

e conseqüentemente módulos de elasticidades diferentes, para tomar em consideração os diferentes comportamentos, determinou-se a largura efectiva transformada, dada por:

$$b_{Lt} = n_c b_{eff} \quad (5.8)$$

Onde:

n_c Índice modular dado por E_c^L/E_c^v ;

b_{eff} Largura efectiva da laje.

Para a evitar formação de tensões excessivas nas extremidades das vigas e conseqüentemente a ocorrência de fissuração, alguns dos cordões pré-tensionados serão embainhados por tubos plásticos desde as suas extremidades até certo comprimento, dependente dos esforços lá instalados, de forma a eliminar a aderência entre os mesmos cordões e o betão, para haver um menor efeito do pré-esforço no local, causador das referidas fissurações. Assim sendo, o pré-esforço terá efeito apenas nos troços dos cordões em que estes não estão embainhados.

Perdas de pré-esforço:

O valor do pré-esforço tem perdas desde a aplicação inicial ao momento de serviço, denominadas perdas de pré-esforço, que podem ser:

Instantâneas, devidas:

- Ao deslocamento do dispositivo de ancoragem;
- Ao atrito;
- À deformação instantânea do betão;
- À relaxação inicial (caso da pré-tensão).

Diferidas, devidas à:

- Fluência;
- Retracção;
- Relaxação das armaduras.

As perdas de pré-esforço instantâneas foram calculadas consoante o EC2 e as diferidas segundo o CPDPRA, visto que, o último somente apresenta o procedimento para a determinação das perdas diferidas. Deduzindo as perdas instantâneas do pré-esforço de aplicação, obteve-se o pré-esforço no tempo inicial, e deduzindo as perdas diferidas do pré-esforço no tempo inicial, obteve-se o pré-esforço no tempo infinito.

Os resultados do pré-esforço calculado, assim como o fuso limite para as vigas pós-tensionadas, encontram-se apresentados no ANEXO 7. Os valores do pré-esforço de aplicação variaram de 3000 kN para o menor vão e 6600 kN para o maior vão, sendo aplicados um número de cordões que variaram de 16 a 35, em que nas vigas pós-tensionadas fez-se o uso somente de cabos com 7 cordões.

As perdas de pré-esforço foram determinadas no ANEXO 8, onde se teve uma média de perdas instantâneas de 10,1%, e uma média de perdas diferidas de 18,44%, em que, nas vigas pós-tensionadas, tiveram-se maiores perdas por haver maior pré-esforço e, por haver também, perdas devidas ao atrito e reentrada das cunhas.

Para as vigas pós-tensionadas, dimensionaram-se as regiões de ancoragem para cada uma das extremidades, com comprimento determinado de acordo com os esforços lá existentes e largura da alma igual a do banzo inferior, de modo a melhor absorver as forças concentradas geradas devidas às ancoragens dos cabos de pré-esforço. O dimensionamento dessa região encontra-se no ANEXO 7. Fez o uso de armaduras Ø8 verticais e horizontais, assim como de hélices para resistir aos esforços nessas zonas.

5.5.2. Deformações

As deformações foram calculadas para as combinações de acções do estado limite de utilização, deformações essas obtidas automaticamente pelo *software* de cálculo em uso. Obtidas as deformações verticais, fez-se uma comparação com os limites estabelecidos pela ASSHTO, uma vez que o regulamento em uso não apresenta limites de deformação para a estrutura em estudo. Para pontes rodoviárias com tráfego de pedestres, de acordo com Fu *et al.* 2015, o limite dado é de $L/1000$.

Para deformações horizontais, as extensões devidas aos efeitos diferidos foram calculadas de acordo com o capítulo 4, sendo essas deformações importantes para a determinação das juntas de dilatação. Essas deformações e verificações encontram-se no ANEXO 11.

As deformações verticais para as acções permanentes foram, devidas à acção do pré-esforço, todas negativas (contra-flechas) e próximas dos limites, para a maioria dos casos. Com a aplicação das sobrecargas, as deformações verticais irão se aproximar de zero. As extensões longitudinais positivas (deformações horizontais), variaram de 4 a 14 mm, e as negativas de 1 a 3 mm, sendo as deformações crescentes com o vão.

5.6. Estados limites últimos

As verificações para os estados limites últimos foram efectuadas para flexão e esforço transverso, para a combinação mais gravosa consoante o caso, observando as disposições relativas às armaduras, presentes no EC2. As disposições para o transporte e carregamento foram adoptadas de modo que esses estados limites sejam cumpridos, garantindo um sistema estático durante o carregamento, semelhante ao do funcionamento final.

5.6.1. Flexão

A verificação da flexão para os estados limites últimos, foi efectuada para a secção fendilhada, onde a compressão é resistida pelo betão e a tracção pelas armaduras. A resolução do problema foi feita recorrendo às equações de equilíbrio devidas às forças horizontais e aos momentos flectores.

O equilíbrio de forças horizontais:

$$T_s - C = 0 \quad (5.9)$$

$$T_s = A_{ps}f_{ps} \quad (5.10)$$

$$C = \alpha f_{cd} b \beta x \quad (5.11)$$

Onde:

T_s Tracção ao nível das armaduras;

C Compressão instalada no betão;

A_{ps} Área da armadura de pré-esforço;

f_{ps} : Tensão nas armaduras de pré-esforço;

α, β Parâmetros do bloco considerado, dados por 0,8 e 0,85, respectivamente;

x Posição do eixo neutro relativamente à fibra superior.

Os elementos em consideração encontram-se apresentados na Figura 5.5.

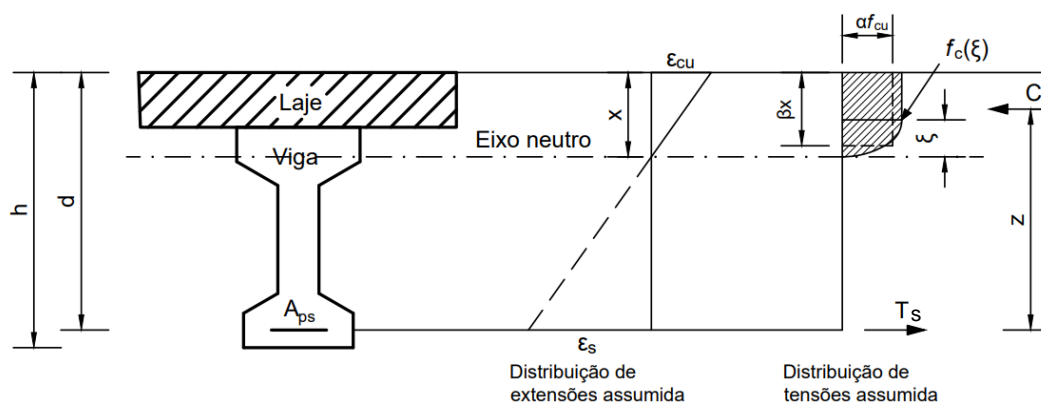


Figura 5.5: Extensão e tensões assumidas para vigas submetidas a momentos flectores.

O equilíbrio de momentos na secção é dado por:

$$M_u = T_s z = -Cz \quad (5.12)$$

Onde z é o binário das forças de compressão e tracção na secção considerada.

Por conveniência, fez-se o eixo de rotação passar pelo centro de gravidade das armaduras, assim sendo, a equação de equilíbrio irá tomar a seguinte forma:

$$M_u = \alpha f_{cd} b \beta x \left(d - \beta \frac{x}{2} \right) \quad (5.13)$$

Determinado o eixo neutro e a quantidade de armadura necessária, efectuou-se a verificação das extensões por:

$$\varepsilon_{ps} = \varepsilon_s - \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{se} \quad (5.14)$$

Extensão elástica ao nível das armaduras devida ao pré-esforço efectivo:

$$\varepsilon_{se} = \frac{f_{se}}{E_p} \quad (5.15)$$

Deformação elástica do betão devida ao pré-esforço ao nível das armaduras tracionadas:

$$\varepsilon_{ce} = \left[\frac{P}{A} + \frac{Pe^2}{I} \right] \frac{1}{E_c} \quad (5.16)$$

A extensão devida ao momento flector é dada por:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d - x}{x} \right) |\varepsilon_{cu}| \quad (5.17)$$

Assim sendo, após a determinação do eixo neutro e das armaduras necessárias para os estados limites, fez-se a verificação das extensões, para que a extensão de cada um dos elementos esteja dentro dos limites, dados por:

$$\begin{cases} \varepsilon_c \leq 3,5\% \\ \Delta\varepsilon_{ps} \leq 10\% \\ \varepsilon_s \leq 10\% \end{cases} \quad (5.18)$$

Os resultados para os momentos flectores nos ELU encontram-se apresentados no ANEXO 9. Do dimensionamento efectuado, verifica-se para todos os casos não ser necessário o uso de armaduras adicionais para resistir a flexão nos ELU, assim sendo, ir-se-á colocar apenas armaduras mínima.

5.6.2. Esforço transversal

Na verificação para o esforço transversal, uma parte da resistência, a devida ao peso próprio da viga e da laje de tabuleiro, é atribuída à viga, e a devida às restantes cargas

permanentes e às sobrecargas, são atribuídas ao sistema composto pela viga e laje, à semelhança da flexão. Assim sendo, considerou-se o faseamento construtivo e a distribuição dos esforços no cálculo da resistência ao esforço transversal.

O esforço transversal foi calculado segundo o 6.2 do EC2, onde se considera a componente do esforço transversal resistido pelo betão sem armadura, e a do esforço transversal equilibrado pelas armaduras para esses esforços, conforme a equação (5.19):

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \quad (5.19)$$

O esforço transversal resistido pelo betão sem armadura de esforço transversal é determinado pela seguinte expressão:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c}k(100\rho_1f_{ck})^{1/3} + k_1\sigma_{cp}]b_wd \quad (5.20)$$

Com um mínimo de:

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1\sigma_{cp})b_wd \quad (5.21)$$

Onde:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ com } d \text{ em mm};$$

$$k_1 = 0,15;$$

$$v_{min} = 0,035k^{3/2}f_{ck}^{1/2};$$

$$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c;$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_wd} \leq 0,02;$$

A_{sl} Área da armadura de tracção prolongada de um comprimento $\geq (l_{bd} + d)$ para além da secção considerada;

b_w Menor largura da secção transversal na área tracionada;

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2f_{cd};$$

N_{Ed} Força axial devida ao pré-esforço

A_c Área da secção transversal de betão.

O valor de cálculo do esforço transversal equilibrado pela armadura de esforço transversal na tensão de cedência é dado pelo menor dos seguintes valores:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (5.22)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (5.23)$$

Onde:

A_{sw} Área da secção transversal das armaduras de esforço transversal;

s	Espaçamento dos estribos;
f_{ywd}	Valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transversal;
v_1	Coefficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal;
α_{cw}	Coefficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido.

Nos casos em que as vigas foram pós-tensionadas, considerou-se a redução do esforço transversal devido ao traçado parabólico das armaduras pré-esforçadas, essa redução é dada pela equação que se segue:

$$P/m = P \frac{8f}{L^2} \quad (5.24)$$

Os resultados do dimensionamento para o esforço transversal encontram-se no ANEXO 10, onde as vigas apresentaram boa resistência para esse esforço, sendo necessária apenas a colocação de uma baixa quantidade de armadura (2rΦ6@300).

5.6.3. Esforço longitudinal na ligação do banzo com a alma

No caso de vigas constituídas por banzos e almas, como é o caso de vigas em “I”, deve-se garantir uma ligação efectiva entre os dois elementos considerados. O esforço longitudinal na ligação entre eles é dado pela variação do esforço normal ao longo de um comprimento considerado:

$$v_{Ed} = \Delta F_d / (h_f \cdot \Delta x) \quad (5.25)$$

Onde:

h_f	Espessura do banzo na ligação;
Δx	Comprimento considerado (geralmente metade do vão, para vãos simplesmente apoiados);
ΔF_d	Variação do esforço normal no banzo ao longo do comprimento Δx .

A armadura transversal foi determinada por:

$$(A_{sf} f_{yd} / s_f) \geq v_{Ed} \cdot h_f / \cot \theta_f \quad (5.26)$$

Para impedir o esmagamento das escoras comprimidas no banzo, o EC2 indica que a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$v_{Ed} \leq v_{fcd} \sin \theta_f \cos \theta_f \quad (5.27)$$

5.6.4. Esforço longitudinal na junta de betonagem

Quando são usadas vigas pré-fabricadas com lajes betonadas *in situ*, deve-se garantir o funcionamento conjunto dos materiais, de tal forma que não se deformem de modo independente, assim sendo, deve-se satisfazer:

$$v_{Edi} \leq v_{Rdi} \quad (5.28)$$

Com:

$$v_{Edi} = \beta V_{Ed} / (z b_i) \quad (5.29)$$

$$v_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd} \quad (5.30)$$

Onde:

v_{Edi}	Valor de cálculo da tensão tangencial na junta;
v_{Rdi}	Valor de cálculo da tensão tangencial resistente na junta;
β	Relação entre o esforço longitudinal na secção de betão novo e o esforço longitudinal total na zona de compressão ou na zona de tracção, ambos calculados na secção considerada;
V_{Ed}	Esforço transverso;
b_i	Largura da junta;
c e μ	Coefficientes que dependem da rugosidade da junta;
ρ	$= A_s / A_i$;
A_s	Área das armaduras que atravessam a junta;
A_i	Área da junta;
α	Ângulo que deve ser limitado a $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$;
ν	Coefficiente de redução de resistência.

Os resultados do dimensionamento para a ligação do banzo com a alma, assim como para os esforços na junta de betonagem, encontram-se no ANEXO 11, onde verifica-se que somente os esforços nas juntas de betonagem tem grande relevância, o que resultou na colocação de estribos adicionais nas vigas rectangulares, para os vãos de 10 e 15 m, assim como o aumento da secção do estribo da viga em "I", para o vão de 18 m.

5.7. Resultados

O dimensionamento foi efectuado de modo a racionalizar e otimizar o uso das cofragens, obedecendo a todos os pressupostos apresentados no presente trabalho.

Chegou-se a quatro secções transversais para as vigas pré-fabricadas, nomeadamente, três em “I” (IPF) e uma rectangular (RPF).

As vigas IPF, para vãos de 16 a 30 m, possuem características geométricas similares, variando somente a altura e, para os vãos de 20 a 30 metros, a largura da alma nas extremidades das vigas junto aos apoios também varia, por se recorrer, para as secções IPF2 e IPF3, também ao uso da pós-tensão, em que é necessário um alargamento da secção nas extremidades devido às forças das ancoragens.

A viga RPF foi dimensionada para o menor intervalo de vãos, de 10 a 15 m.

As características das vigas dimensionadas encontram-se resumidas na Tabela 5.5 e na Figura 5.6, e os seus pormenores, para cada um dos casos considerados, encontram-se apresentados nas peças desenhadas (ANEXO 13).

Tabela 5.5: Características gerais das vigas padronizadas.

Secção	Altura (mm)	Área (mm ²)	Vãos de uso (m)	Peso próprio (t/m)
RPF	900	359600	10-15	0,93
IPF1	1000	451100	16-20	1,20
IPF2	1300	511100	21-25	1,36
IPF3	1600	571500	26-30	1,52

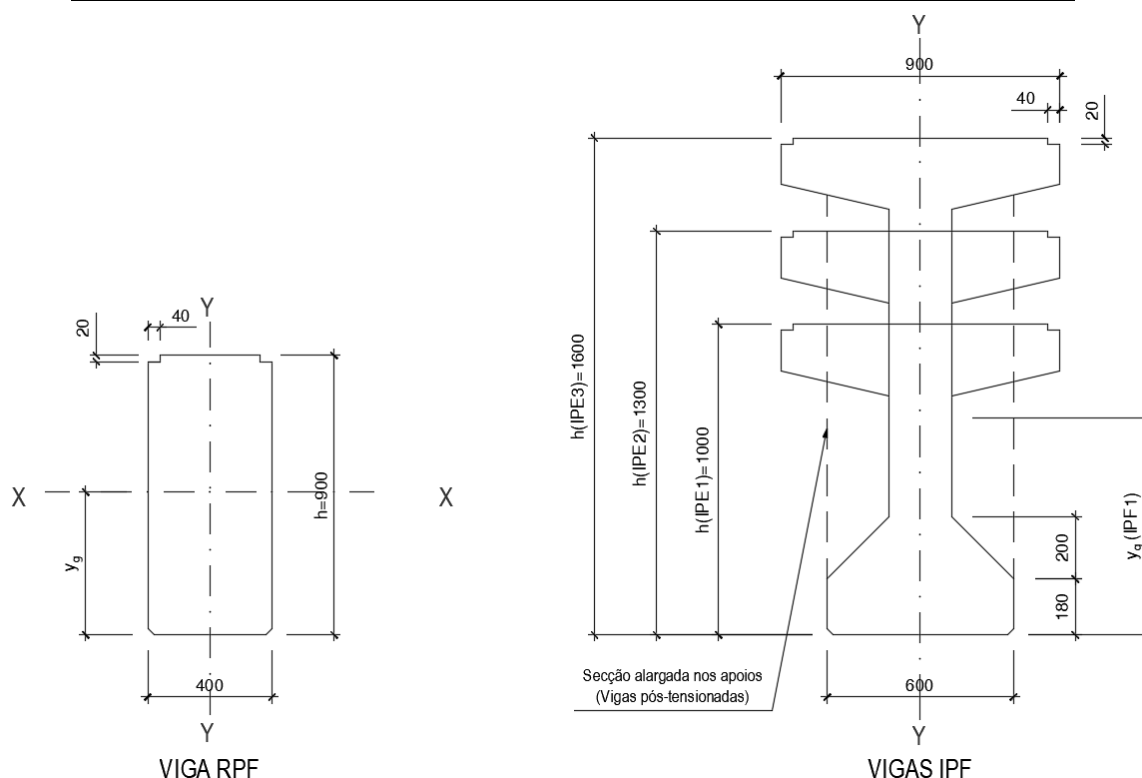


Figura 5.6: Secções transversais das vigas padronizadas.

6. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido consistiu no dimensionamento de vigas de médio vão (de 10 a 30 metros) para tabuleiros de pontes rodoviárias, com o objectivo de obter secções padronizadas para vãos no intervalo considerado, adequadas para a pré-fabricação.

Para alcançar o objectivo, estudaram-se os métodos e disposições construtivas adequados para a pré-fabricação de vigas de tabuleiros, o estado da pré-fabricação na construção de pontes no país, os efeitos diferidos diferenciais entre os elementos estruturais e a aplicação das normas da SADC, de seguida efectuou-se o dimensionamento das referidas vigas para os vãos de 10, 15, 18, 22, 26 e 30 metros.

As conclusões alcançadas no presente estudo foram:

- i. No país a pré-fabricação de vigas de pontes encontra-se ainda muito pouco desenvolvida, havendo falta de fábricas para a sua produção, sendo que, na maior parte dos casos, a pré-fabricação é em estaleiros *in situ*. Das pontes observadas no estudo, apenas 16% foram construídas com recurso a pré-fabricação, e dessas, metade são de vãos maiores que 10 metros, mostrando a baixa aplicação da pré-fabricação na construção de pontes no país, bem como, para os casos aplicados, uma considerável procura para os médios vãos;
- ii. As normas da SADC mostraram-se importantes no estudo efectuado, porque além de serem adequadas para a região em estudo, apresentam abordagens recentes, como as faixas fictícias e diferentes veículos tipo, e cobrem os vários aspectos necessários para o dimensionamento das vigas, como a fluência, retracção e as acções da natureza, consoante as condicionantes locais. Deste modo, apresentam-se vantajosas para a implementação na região de estudo;
- iii. Os efeitos diferidos possuem um papel preponderante no estudo da flexão, devido aos comportamentos diferenciais da laje e das vigas relativamente a esses efeitos, por possuírem idades diferentes. Por questões de simplicidade, esses esforços foram estudados considerando parâmetros representativos, notando-se que, os esforços de flexão foram agravados para os menores vãos e atenuados para os maiores, devido à relação área e semiperímetro exposto, que aumenta consoante o vão diminui. Porque os menores vãos possuem menores esforços, as vigas aplicadas apresentam menores alturas, tornando-se maiores os efeitos da retracção em relação à fluência diferenciais, agravando os momentos flectores;

- iv. O método construtivo adoptado para a construção de pontes com vigas pré-fabricadas possui grande importância no estudo das vigas, sendo que, no caso em estudo, fez-se o uso de pré-lajes como cofragens para a laje de tabuleiro. Visto que essas pré-lajes encontram-se apoiadas às vigas, as vigas devem resistir ao seu peso, das pré-lajes, da laje de tabuleiro e à qualquer carga adicional, enquanto o betão da laje não atingir resistência necessária, tornando desta forma, essas vigas mais solicitadas que uma betonada *in situ*. Assim sendo, o sistema viga-laje, resiste somente às sobrecargas e cargas permanentes não estruturais;
- v. Para o tabuleiro tipo estudado, para a secção transversal, foi mais adequado um número de 6 vigas para a secção em “I” (IPF) e de 9 vigas para a rectangular (RPF), de forma a ter espaçamentos entre vigas adequados, baixa esbelteza, assim como uma baixa espessura para as pré-lajes e a laje do tabuleiro.
- vi. O manuseamento e o transporte das vigas tiveram uma grande influência no seu dimensionamento. Para que não ocorressem esforços adicionais nas vigas durante o manuseamento, colocaram-se os dispositivos de levantamento nos mesmos locais que os apoios. Devido aos possíveis inconvenientes relativos ao transporte, relacionados ao peso e comprimento das peças, considerou-se, para além da pré-fabricação em fábrica, também a pré-fabricação *in situ* para as vigas IPF2 e IPF3, para os vãos de 22, 26 e 30 metros;
- vii. Para tirar vantagem dos métodos de pré-fabricação em fábrica, aplicou-se o pré-esforço por pré-tensão nas vigas, mas, para permitir também a pré-fabricação *in situ*, considerou-se, igualmente, a aplicação da pós-tensão, o que levou a aplicação de maior pré-esforço nesses casos, por haver maiores perdas.
- viii. Ao efectuar-se o dimensionamento das vigas para a padronização, chegou-se a três secções transversais em “I”, IPF1, IPF2 e IPF3, e uma secção rectangular, RPF, onde nas vigas em “I” a alteração das dimensões ocorreu somente na altura, localmente na alma e, nos casos das vigas pós-tensionadas, houve um alargamento da alma nas extremidades das mesmas vigas junto aos apoios, para a acomodação das ancoragens, permitindo que as cofragens possam ser usadas para a produção de qualquer uma das vigas fazendo apenas pequenos ajustes, possibilitando uma maior racionalização das cofragens em questão.

7. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente estudo contribui para a aceleração da construção de pontes, uma vez que além da aplicação da pré-fabricação, efectuou-se também a padronização, que acelera a produção e reduz em demasia os seus custos associados.

No entanto, houve limitações no estudo, uma vez que por questões de tempo não foi possível abranger todas as situações desejáveis, assim sendo propõem-se os seguintes desenvolvimentos para o estudo:

- i. Verificação das vigas para o carregamento do veículo tipo NC-30x5x40. No presente caso se optou por não efectuar o dimensionamento para tal caso de carregamento por não ser corrente o trânsito desse tipo de veículos no país, contudo, é expectável que este tipo de carregamento possa vir a ser frequente, assim sendo, a análise para este caso se torna importante;
- ii. Estudo da aplicabilidade das vigas padronizadas para tabuleiros enviesados, curvos e com larguras variáveis;
- iii. Na padronização das vigas pré-fabricadas, a gestão das cofragens, o processo de produção, assim como o estudo do transporte das mesmas vigas, toma um papel muito importante. Assim sendo, considera-se importante e necessário, um estudo sobre a optimização para padronização de vigas pré-fabricadas para diferentes vãos e tabuleiros tipo além do considerado, tendo em consideração o uso de cofragens, betão, aço, e os pormenores construtivos, estudando para além das variáveis estruturais, que foram as consideradas no presente trabalho, as variáveis económicas;
- iv. Análise das vigas padronizadas para vãos contínuos, onde a continuidade no tabuleiro é completa, verificando se, para tal caso, os intervalos de vãos estabelecidos para cada uma das vigas permanecem viáveis;
- v. Pesquisa sobre betões de alto desempenho técnica e economicamente viáveis na região de estudo para aplicação na pré-fabricação.

BIBLIOGRAFIA

– Referências bibliográficas

1. Ahn, S-H. 2017 – Design for Manufacture (DFM): Concept, Seoul.
2. Calavera Ruiz, J., & Hernández, D. Fernández-Ordóñez. 2002 – Precast bridges in Europe, Seminário sobre pré-fabricação de estruturas de betão, Lisboa.¹
3. CEN, Comité Européan de Normalisation. 2004 – Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão: Regras gerais e regras de edifícios.
4. Clifton, S. P., & Bayrak, O. 2008 – Bridge Deck Overhang Constrution, University of Texas, Austin.
5. Correia, J. F. N. 2015 – Pontes Integrais-Estado da Arte, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
6. Coutinho, A. S., & Gonçalves, A., 1994 – Fabrico e Propriedades do Betão, LNEC, 2^a ed, Lisboa.
7. Cunha, F. N. M. 2010 – Dimensionamento de Tabuleiros de Pontes com Vigas de Betão Pré-Fabricado, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
8. DYWIDAG-SYSTEMS-INTERNATIONAL (DSI). 2017 – DYWIDAG Bonded Post-tensioning Systems using Strands.
9. Elliott, K. S. 2017 – Precast Concrete Structures, 2nd ed, CRC Press, U.S, p 1-19.
10. Fédération Internationale du Béton (FIB). 1999 – Structural Concrete-Manual-textbook, Bulletin n° 1.
11. FIB. 2000 – Guidance for good bridge design-guide to good practice, Bulletin n° 9.
12. FIB. 2004 – Precast concrete bridges-state of art report, Bulletin n° 29.
13. FIB. 2020 – Precast concrete bridge continuity over piers, Bulletin n° 94.
14. FIB. 2021 – Conceptual Design of Precast Concrete Bridge Superstructures, Bulletin n° 99.

¹ Referência não citada directamente.

15. Freitas, A. R. C. 2017 – Optimização de pontes de Betão Armado Pré-Esforçado com Elementos Pré-Fabricados, Dissertação de mestrado Integrado em estruturas, Universidade de Coimbra, Coimbra.
16. Fu, C. C., Zhao, G., Ye, Y., & Zhang, F. 2015 – Serviceability-related issues for bridges live load deflection and construction closure pours, State highway administration, Maryland.
17. Hill, J. J., & Shirole, A. M. 1982 – Current Practices in Systems Construction of Concrete Bridges Structures – em “Transportation Research Record 871”, p. 9-12.
18. Humes. 2013 – Humeslab bridge decking, Australia.
19. Jayanandana, A. D. C. 1989 – Continuity development between precast beams using prestressed slabs, and its effect on flexure and shear, a Thesis Submitted in Fulfilment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of Leeds, United Kingdom.
20. Jensen, J. J. 2001 – A Philatelic Review, Norway.
21. Kim, Min-Koo., McGovern, S., Belsky, M., Middleton, C., & Brilakis, I. 2016 – A suitability analysis of precast components for standardized bridges construction in the United Kingdom em “Creative Construction Conference 2016”, Elsevier, United Kingdom, p. 188-195.
22. Machado, R. N. e Sartorti, A. L. 2010 – Pontes: Patologias dos aparelhos de apoio – em “VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras”, Córdoba.
23. Menn, C. 1986 – Prestressed Concrete Bridges, 1st ed, Springer-Verlag, Wien, Berlin.
24. NP EN 15050, Norma Portuguesa, 2008 – Produtos prefabricados de betão- Elementos de Pontes, Portugal.
25. Oesterle, R. G., & Elremaily, A. F. 2009 – Guidelines for Design and Construction of Decked Precast, Prestressed Concrete Girder Bridges, National Cooperative Highway Research Program, Washington DC.

26. Ong, C. Y., & Choong, K. 2014 – Development and Standardisation of New Precast Concrete Open Spandrel Arch Bridge System em “IABSE Symposium Report 2014”, Madrid, p. 799-806.
27. Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI). 2014 – Bridge Design Manual, 3rd ed, PCI, Chicago
28. Rabbat, B. G., & Russell, H. G. 1982 – Optimized Section for Precast Prestressed Bridge Girders, *PCI Journal*, n 1689 p. 88-104.
29. Ralls, M. L., Medlock, R. D., & Slagle, S. 2002 – Prefabricated Bridge National Implementation Initiative em “2002 Concrete Bridge Conference”.
30. Richardson, J. G. 1973 – Precast Concrete Production, 1st ed, London.
31. SATCC. 1998 – Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts, Division of Roads and Transport Technology, CSI.
32. SETRA. 1996 – Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension: Guide de Conception, França.
33. Sousa, C. F. F. 2004 – Continuidade estrutural em tabuleiros de pontes construídos com vigas pré-fabricadas. Soluções com ligação em betão armado, dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
34. Stone, R. B., McAdams, D. A., & Kayyalethekkel, V. J. 2003 – A product Architecture-Based conceptual DFA Technique, *Design Studies*, Elsevier, 2003.
35. Tarrataca, T. J. S. 2009 – Construção de pontes com aduelas pré-fabricadas, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Porto.
36. Tomim, K. da C. 2019 – Análise e Dimensionamento de Vigas T Invertidas para Aplicação em Pontes e Viadutos, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Marigá.
37. Viana, L. F. D. 2012 – Simulation of a Bridge Deck Construction Usign Precast Beams Supported in Virtual Reality Technology, Universidade técnica de Lisboa, Lisboa.

38. Yardim, Y. 2013 – Performance of Precast Thin Panel as Permanent Formwork for Precast Composite Slabs em “2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering”, Tirana.

Consultas na *internet*

39. abc-utc.fiu.edu/mc-events/partial-depth-precaster-deck-panel-design-and-construction-in-texas, 17 de Maio de 2022
40. aclweb.pt/pt/produtos/outros-produtos/vigas-de-bordadura/viga-de-bordadura, 17 de Maio de 2022.
41. www.bft-international.com/en/artikel/bft_Precast_HIP_girders_for_the_Joure_triangular_expressway_junction_2997304.html, 17 de Maio de 2022.
42. www.concredol.com.br/produtos_e_servicos/produto.php?id=Mzk=, 17 de Maio de 2022.
43. www.diprotec.com.br/produto/neoprene, 22 de Junho de 2022.
44. www.dot.state.mn.us/historicbridges/prestressed-concrete-fabrication.html, 17 de Maio de 2022.
45. www.indiamart.com/proddetail/kunckel-bridge-bearing-18220324612.html, 23 de Maio de 2022.
46. www.noticiasinfoco.com.br/artigo/ponte-de-ibiraquera-recebe-vigas-pre-moldadas, 17 de Maio de 2022.
47. www.precastoverhang.com/construction.html, 23 de Maio de 2022.

– Outra bibliografia consultada

1. Banagher Precast Concrete – Bridge Beam Manual, 2nd ed, Banagher Precast Concrete, Ireland.
2. Beca. & Opus. 2008 – Standard precast concrete bridge beams, *NZ Transport Agency Research Report*, n. 364.

3. Casal, B. B. 2011 – Ligações entre Betões de Idades Diferentes-Aplicações Diversas, Dissertação para a obtenção do Grau em Mestre em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
4. CEN. 2005 – Prestressing steels – Part 3: Strand.
5. Directrizes Sobre Resiliência às Ameaças Naturais, Salvaguardas Ambientais e Sociais para as Edificações Escolares, 2021, “Diploma Ministerial n.º 122/2021, de 1 de Setembro.
6. FIB. 2018 – Sustainability of precast structures, Bulletin nº 88.
7. FIB. 2019 – Serviceability Limit State of Concrete Structures, Bulletin nº 92.
8. Marshall, V. & Robberts, J. M. 2000 – Prestressed Concrete design and practice, 1st ed., Concrete Society of Southern Africa, South Africa.
9. National Transport Commission. 1981 – Design Manual for Standard Box Culverts: Book II-Standard Drawings, Natal Provincial Administration Roads Department.
10. Okumus, P., & Oliva, M. G. 2014 – Strand Debonding for pretensioned bridge girders to control end cracks, *Structural Journal*, vol. 111, n. 1, p. 201-210.
11. Osman, M., & French, C. 2019 – Debonded Strands in Prestressed Concrete Bridge Girders, Minnesota Department of Transportation, Minnesota.
12. REBAP, Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado, 1983, “Decreto-lei nº 349-C/83, de 30 de Julho”.
13. Reis, A. J., & Pedro, J. J. O. 2019 – Bridge Design: Concepts and Analysis, 1^a ed., John Wiley & Sons, Glasgow.
14. South African National Standard (SANS). 2007 – SANS 2001-Construction works Part CC1: Concrete works (structural), 1^a ed., Standards South Africa.
15. Shay Murtagh Precast Concrete – Technical Manual: Prestressed Concrete Beams, Shay Murtagh, Ireland.

ANEXOS

ANEXO 1: Disposição das extremidades das vigas pré-fabricadas relativamente aos aparelhos de apoio

ANEXO 2: Combinação de acções

ANEXO 3: Esforços internos devidos a fluência e retracção diferenciais

ANEXO 4: Acção do vento

ANEXO 5: Acção sísmica

ANEXO 6: Variação diferencial de temperatura

ANEXO 7: Pré-esforço

ANEXO 8: Perdas de pré-esforço

ANEXO 9: Momentos flectores para os estados limites últimos

ANEXO 10: Esforço transversal, esforços nas ligações entre os banzos e as almas, e esforços nas juntas de betonagem

ANEXO 11: Deformações

ANEXO 12: Reacções de apoio

ANEXO 13: Peças desenhadas

ANEXO 1: Disposição das extremidades das vigas pré-fabricadas relativamente aos aparelhos de apoio

ANEXO 1: Disposição das extremidades das vigas pré-fabricadas relativamente aos aparelhos de apoio

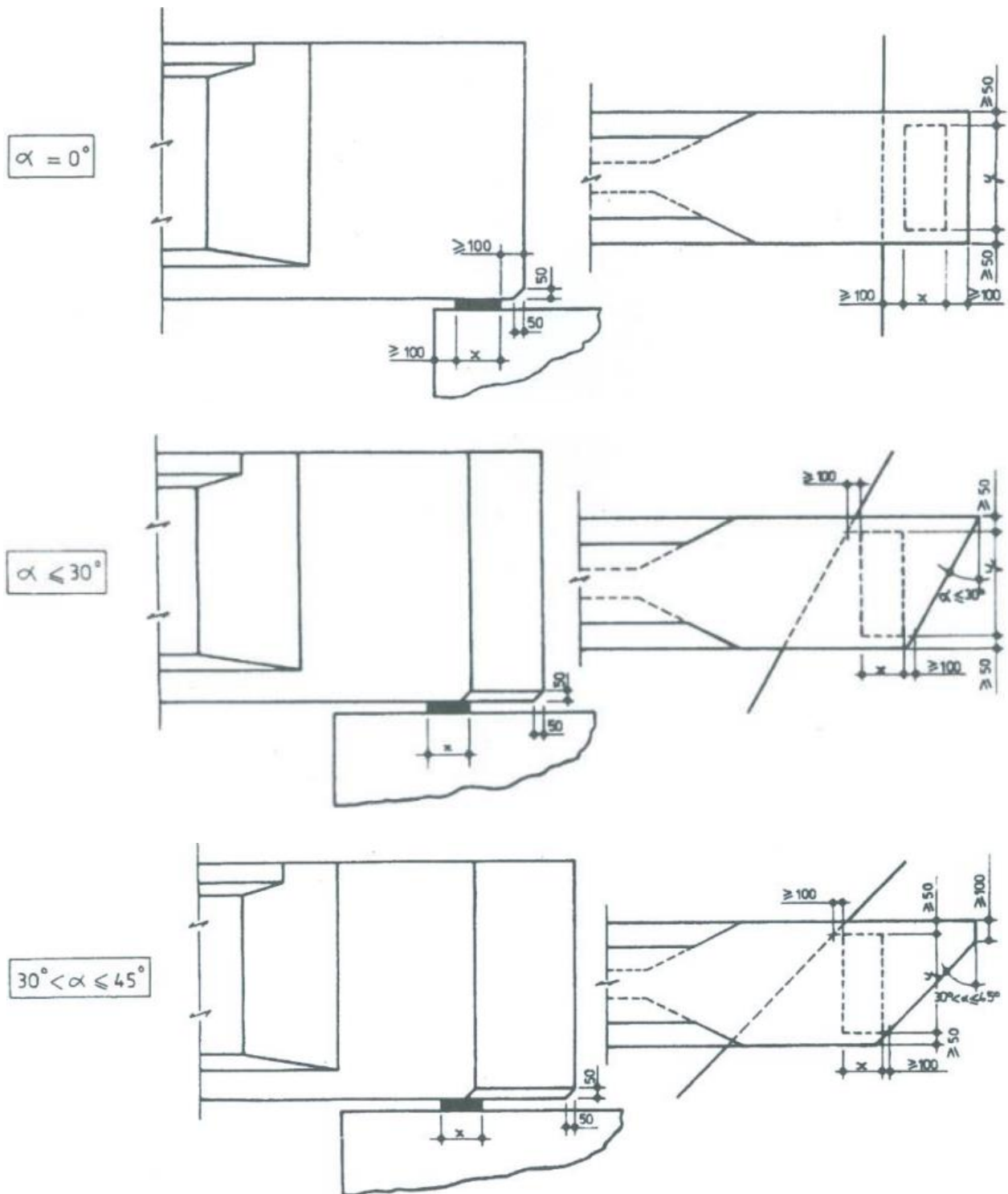


Figura A1-1: Disposições construtivas da viga e do aparelho de apoio na região do apoio para vigas com extremidade normal. Fonte: FIB 2004.

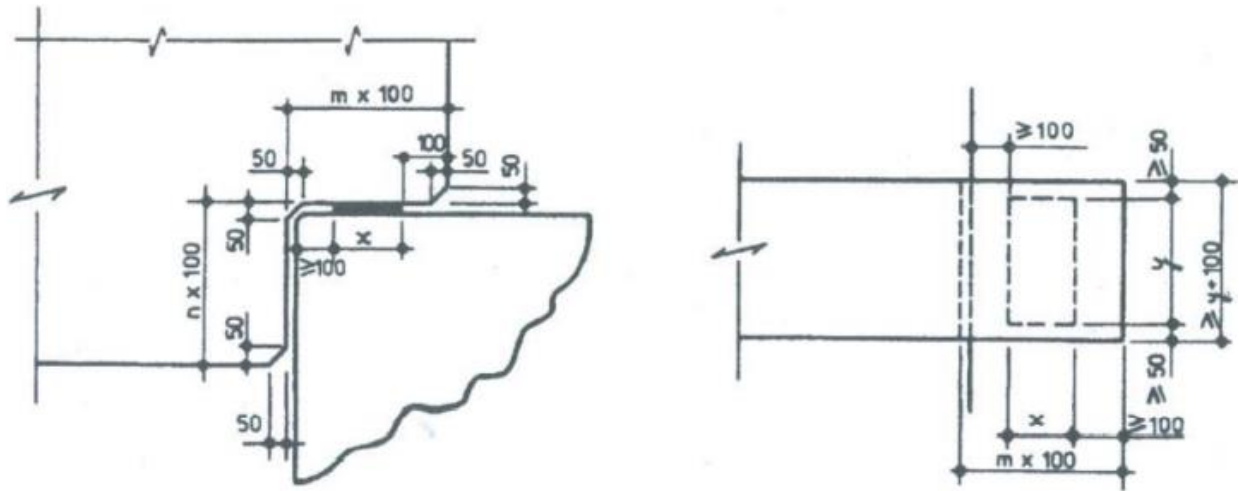


Figura A1-2: Disposições construtivas da viga e do aparelho de apoio na região do apoio para vigas com consola na extremidade. Fonte: FIB 2004.

ANEXO 2: Combinação de acções

ANEXO 2: Combinação de acções

Tabela A2-1: Combinações de acções consideradas. Fonte: Adaptado de CPDPRA.

Tipo de acção		Acção nominal F_k		Notação	EL	Combinação (γ_{fl})				
						1	2	2		
Acções directas	Acções principais	Permanentes	Peso próprio estrutural		g	ELU	1,2	1,05	1,2	
						ELS	1,0	1,0	1,0	
			Outros pesos próprios		g_{ad}	ELU	1,1	1,0	1,1	
						ELS	1,0	1,0	1,0	
		Variáveis	Variável principal	Carga NA		Q_a	ELU	1,5	1,3	-
							ELS	1,0	1,0	-
	Carga NB		Q_b	ELU	1,2	1,1	-			
				ELS	1,0	1,0	-			
	Carga de passeio		Q_p	ELU	1,5	1,3	-			
				ELS	1,0	1,0	-			
	Acções suplementares	Forças secundárias	Longitudinais de arranque e frenagem	Carga NA		F_L	ELU	-	1,25	-
							ELS	-	1,0	-
			Carga NB		F_L	ELU	-	1,1	-	
						ELS	-	1,0	-	
		Forças devidas às causas naturais	Acção do vento	Com cargas permanentes principais		W	ELU	-	-	1,4
							ELS	-	-	1,0
Com cargas permanentes e variáveis principais			W	ELU	-	1,1	-			
				ELS	-	1,0	-			
Efeitos favoráveis		W	ELU	-	1,0	1,0				
			ELS	-	1,0	1,0				
Acção sísmica		F_{eq}	ELU	-	-	1,3				
			ELS	-	-	1,0				
Acções indirectas	Deformações impostas	Fluência e retracção		F_{cc}	ELU	1,0	1,0	1,0		
					ELS	1,0	1,0	1,0		
		Variação de temperatura		F_{tr}	ELU	-	1,3	1,3		
			ELS	-	1,0	1,0				

ANEXO 3: Esforços internos devidos a fluência e retracção diferenciais

A3.1. Esforços internos devidos à fluência diferencial

A3.2. Esforços internos devidos à retracção diferencial

ANEXO 3: Esforços internos devidos a fluência e retracção diferenciais

A3.1. Esforços internos devidos à fluência diferencial

Tabela A3-1: Esforços internos devidos à fluência diferencial para cada um dos vãos.

Vão (m)	K_L	K_m	K_c	K_e	K_j	φ_{30d}	φ	N_{V+L} (kN)	M_{V+L} (kNm)
30	2,3	0,957	1,03	0,794	0,98	0,4331	1,7634	5757,46	836,03
30 p ^(*)	2,3	0,957	1,03	0,794	0,98	0,4334	1,7638	6174,51	716,27
26	2,3	0,957	1,03	0,794	0,98	0,4331	1,7634	4568,46	632,12
26 p	2,3	0,957	1,03	0,794	0,98	0,4334	1,7638	4539,48	727,43
22	2,3	0,957	1,03	0,786	0,98	0,4164	1,7455	4460,33	388,33
22 p	2,3	0,957	1,03	0,7942	0,98	0,4334	1,7638	4539,48	605,63
18	2,3	0,957	1,03	0,7752	0,98	0,3938	1,7214	4690,88	162,22
15	2,3	0,957	1,03	0,7316	0,98	0,2918	1,6248	4083,84	-203,46
10	2,3	0,957	1,03	0,7316	0,98	0,2918	1,6248	3200,39	-223,85

A3.2. Esforços internos devidos à retracção diferencial

Tabela A3-2: Esforços internos devidos à retracção diferencial para cada um dos vãos.

Vão (m)	K_L	K_c	K_e Laje/Viga	K_j Laje/Viga	η	φ_3	N_{cs} (kN)	M_{cs} (kNm)
30	0,000275	1,03	0,45/0,72	0,98/0,24	0,83	0,756	498,65	440,27
30 p	0,000275	1,03	0,45/0,72	0,98/0,24	0,83	0,770	497,94	439,14
26	0,000275	1,03	0,45/0,72	0,98/0,24	0,83	0,812	498,65	440,27
26 p	0,000275	1,03	0,45/0,72	0,98/0,24	0,83	0,809	497,94	439,14
22	0,000275	1,03	0,45/0,71	0,98/0,23	0,83	0,812	529,93	389,85
22 p	0,000275	1,03	0,45/0,72	0,98/0,24	0,83	0,809	497,94	439,14
18	0,000275	1,03	0,45/0,69	0,98/0,22	0,83	0,800	572,41	337,15
15	0,000275	1,03	0,45/0,61	0,98/0,18	0,83	0,825	470,07	270,38
10	0,000275	1,03	0,45/0,61	0,98/0,18	0,83	0,882	470,07	270,38

O “p” a seguir ao valor dos vãos refere-se a vigas pós-tensionadas.

ANEXO 4: Acção do vento

ANEXO 4: Acção do vento

Para a aplicação do vento nas combinações, considerou-se quatro casos separados:

- WD1: Na direcção vertical apenas (W_v);
- WD2: Na direcção transversal (W_t) em combinação com $\pm W_v$;
- WD3: Na direcção longitudinal apenas (W_L);
- WD4: $0,5 W_t$ em combinação com a W_L e $\pm 0,5 W_v$.

As forças determinadas acima representam cargas pontuais, dadas por:

$$W_t = qA_1C_d \quad (\text{A4-1})$$

$$W_{LS} = 0,25qA_1C_d \quad (\text{A4-2})$$

$$W_{LL} = 0,5qA_1C_d \quad (\text{A4-3})$$

$$W_v = qA_3CL \quad (\text{A4-4})$$

Com:

A_1 Área sólida horizontal, consoante o caso (só estrutura e/ou sobrecarga);

A_3 Área em planta;

C_d Coeficiente de arrastamento;

CL Coeficiente de levantamento obtido do CPDPRA.

Para a aplicação no modelo de cálculo, as forças do vento por metro linear, para as componentes horizontais, e por área de aplicação, para a componente vertical, são conforme a tabela que se segue:

Tabela A4-1: Forças do vento aplicadas em cada um dos vãos.

Vão (m)	$F_{w,tS}$ (kN/m)	$F_{w,tL}$ (kN/m)	$F_{w,lS}$ (kN/m)	$F_{w,lL}$ (kN/m)	$F_{w,v}$ (kN/m ²)
30	5,32	4,09	1,33	1,24	0,73
26	4,85	4,09	1,21	1,24	0,73
22	4,14	3,81	1,03	1,24	0,73
18	3,43	3,52	0,86	1,24	0,64
15	2,96	3,34	0,74	1,24	0,55
10	2,96	3,34	0,74	1,24	0,55

ANEXO 5: Acção sísmica

ANEXO 5: Acção sísmica

Para a determinação da força sísmica, deve-se conhecer a frequência própria fundamental da estrutura, para tal, seguiu-se o CPDPRA que considera tal, como:

$$n_o = k_o \frac{\sqrt{EI}}{mL_s^4} \quad (A5-1)$$

Onde:

k_o Parâmetro que depende do sistema estático (1,57 para vãos simplesmente apoiados);

EI Rigidez à flexão do membro equivalente;

m Massa por unidade de comprimento;

L_s Vão do membro equivalente.

Tabela A5-1: Frequência própria fundamental e período de vibração da estrutura para cada um dos vãos.

Vão (m)	I (m ⁴)	m (kg/m)	n_o (c/s)	T (s)
30	2,3486	17711,72	0,8350	1,1977
26	2,3486	17711,72	0,9634	1,0380
22	1,7011	16685,24	1,0286	0,9722
18	0,9782	15658,50	1,0159	0,9844
15	0,7361	14951,30	1,1075	0,9029
10	0,7361	14951,30	1,6612	0,6020

Tabela A5-2: Força sísmica por metro linear sobre o tabuleiro.

Vão (m)	S	m_x (kg/m)	$F_{eq,x} = F_{eq,y}$ (kN/m)
30	0,4569	20101,33	29,131
30 p	0,4569	20101,33	31,292
26	0,4908	20101,33	31,292
26 p	0,4908	20101,33	31,292
22	0,5071	19074,85	30,682
22 p	0,5071	19074,85	30,682
18	0,5039	18048,11	28,850
15	0,5262	17340,91	28,943
10	0,6444	17340,91	35,448

ANEXO 6: Variação diferencial de temperatura

ANEXO 6: Variação diferencial de temperatura

A variação diferencial de temperatura é em função da altura do tabuleiro, apresentando diferentes valores consoante certos intervalos. A variação de temperatura pode ser positiva ou negativa, e os seus valores, assim como os intervalos de variação, foram obtidos do CPDPRA, que são de acordo com a Figura A6-1, e encontram-se nas Tabelas A6-1 e A6-2, respectivamente.

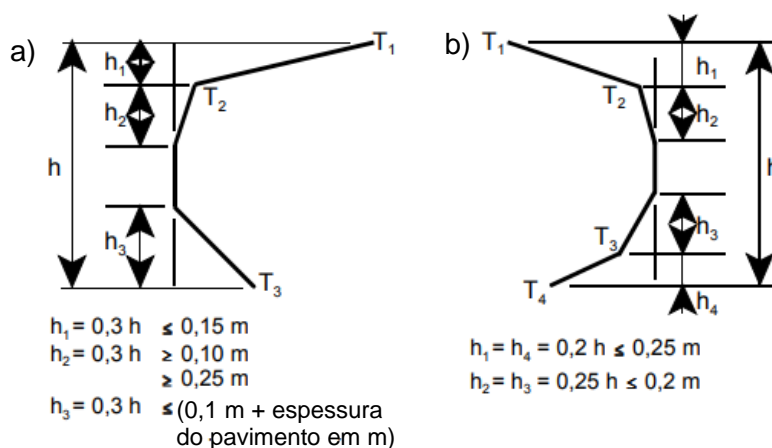


Figura A6-1: Variação diferencial de temperatura em função da altura. a) Variação positiva. b) Variação negativa. Fonte: Adaptado do CPDPRA.

Tabela A6-1: Variações diferenciais de temperatura para cada intervalo de altura.

Vão (m)	Variação positiva °C			Variação negativa °C			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
26-30	17,8	4,0	2,1	10,6	0,7	0,8	6,6
21-25	17,8	4,0	2,1	10,6	0,7	0,8	6,6
16-20	17,8	4,0	2,1	10,5	1,4	1,0	6,5
10-15	17,8	4,0	2,1	10,3	2,1	1,2	6,3

Tabela A6-2: Intervalos de altura para as variações diferenciais de temperatura.

Vão (m)	h (m)	Variação positiva (m)			Variação negativa (m)			
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄
25-30	1,85	0,15	0,56	0,15	0,25	0,2	0,2	0,25
20-25	1,55	0,15	0,47	0,15	0,25	0,2	0,2	0,25
15-20	1,25	0,15	0,38	0,15	0,25	0,2	0,2	0,25
10-15	1,15	0,15	0,35	0,15	0,25	0,2	0,2	0,25

ANEXO 7: Pré-esforço

A7.1. Pré-esforço aplicado para cada um dos vãos

A7.2. Traçado do cabo de pré-esforço para as armaduras pós-tensionadas

A7.3. Armaduras nas zonas de ancoragem

ANEXO 7: Pré-esforço

Standard Strands

Strands are made from 7 individual cold-drawn wires, 6 helically wound outer wires and one center wire (king wire). The mechanical properties of the strand as well as corrosion protection properties are most important to DSI. For a maximum in corrosion protection we offer electrically isolated systems using polyethylene (PE) or polypropylene (PP) ducts. See also page 8.

Strands are usually packaged in so-called coils that can weigh up to 3.5 tons.



Technical Data

Type Code	12.9 mm (0.5")		15.3 mm (0.6")		15.7 mm (0.62")		
	ASTM A 416 Grade 270	prEN 10138 BS 5896	ASTM A 416 Grade 270	prEN 10138	prEN 10138 BS 5896	prEN 10138	
Yield Strength $f_{p0.1k}$	[N/mm ²]	1,670 ¹⁾	1,640 ²⁾	1,670 ¹⁾	1,636 ²⁾	1,560 ²⁾	1,640 ²⁾
Ultimate Strength f_{pk}	[N/mm ²]	1,860	1,860	1,860	1,860	1,770	1,860
Nominal Diameter	[mm]	12.70	12.90	15.24	15.3	15.70	15.70
Cross-Sectional Area	[mm ²]	98.71	100.00	140.00	140.00	150.00	150.00
Weight	[kg/m]	0.775	0.785	1.102	1.093	1.180	1.172
Ultimate Load	[kN]	183.7	186.0	260.7	260.0	265.5	279.0
Modulus of Elasticity	[N/mm ²]	-195,000					
Relaxation ³⁾ after 1,000 h at 0.7 x Ultimate Strength f_{pk}	[%]	max. 2.5					

1) yield measured at 1% effective elongation

2) yield measured at 0.1% residual elongation

3) applicable for relaxation class 2 according to Eurocode prEN 10138/BS 5896: or low relaxation complying with ASTM A 416, respectively.

Figura A7-1: Características dos cordões de pré-esforço utilizados. Fonte: DSI 2017.

A7.1. Pré-esforço aplicado para cada um dos vãos

Devido aos efeitos diferidos diferenciais, tem-se o M_{cs+cc} , que é somado ao momento flector de cálculo M_u para obter o valor final M_{uf} .

Tabela A7-1: Momentos flectores no meio vão e a largura do tabuleiro considerada contribuinte para a resistência da viga em cada caso estudado.

Vão (m)	M_u (kNm)	M_{cs+cc} (kNm)	M_{uf} (kNm)	Combinação (ELS)	b_{eff} (m)	b_{Lt} (m)
30	5842	-398,8	5443,2	C1 NB	1,7	1,55
30 p	5842	-277,1	5564,9	C1 NB	1,7	1,55
26	4512,8	-191,9	4321,0	C1 NB	1,7	1,55
26 p	4512,8	-288,3	4224,5	C1 NB	1,7	1,55
22	3423	1,5	3424,5	C1 NB	1,7	1,55
22 p	3423	-166,5	3256,5	C1 NB	1,7	1,55
18	2402,8	174,9	2577,7	C1 NB	1,7	1,55
15	1363	473,8	1836,8	C1 NB	1,05	0,96
10	844,47	494,23	1338,7	C1 NB	1,05	0,96

Tabela A7-2: Pré-esforço aplicado, inicial e no tempo infinito para cada um dos vãos.

Vão (m)	P_0' (kN)	P_0 (kN)	P_∞ (kN)	Número de cordões	Número de cordões por cabo
30	6200	5430,89	4327,9	34	-
30 p	6600	5955,73	4641,31	35	7,7,7,7,7
26	4500	4115,82	3434,13	24	-
26 p	4700	4256,75	3412,28	27	7,7,7,7
22	4500	4051,47	3355,82	24	-
22 p	4600	4126,52	3257,68	27	7,7,7,7
18	4900	4352,04	3533,26	26	-
15	4100	3681,49	3063,70	22	-
10	3000	2772,00	2400,93	16	-

A7.2. Traçado do cabo de pré-esforço para as armaduras pós-tensionadas

Para as armaduras pós-tensionadas, o traçado de pré-esforço foi efectuado de acordo com equações (5.3) a (5.7) e, assim sendo, definiu-se o intervalo por onde o traçado do cabo equivalente de pré-esforço pode passar, o fuso limite. O fuso limite para cada um dos vãos, assim como o traçado do cabo equivalente, encontram-se representados nas figuras A7-2, A7-3 e A7-4:

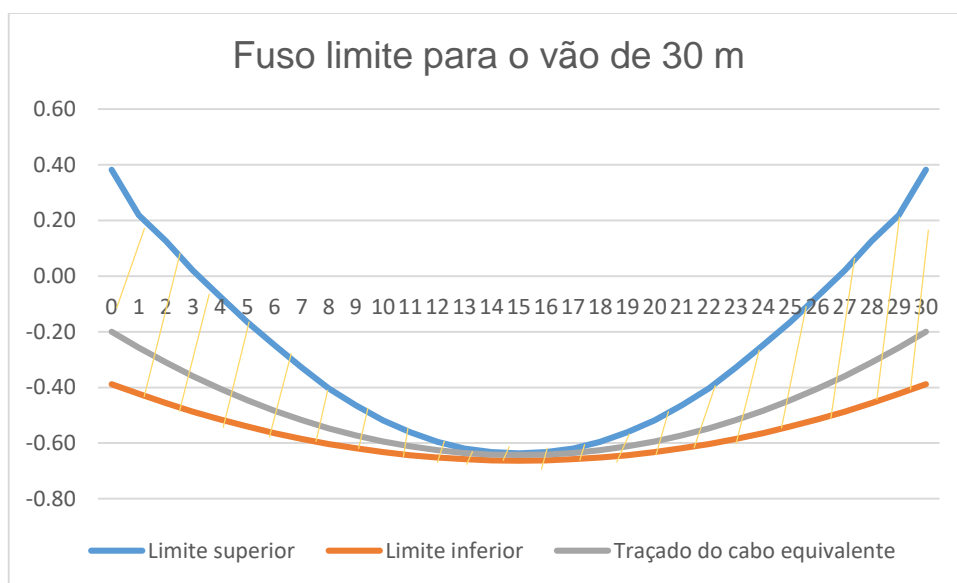


Figura A7-2: Fuso limite e traçado do cabo equivalente para o vão de 30 m.

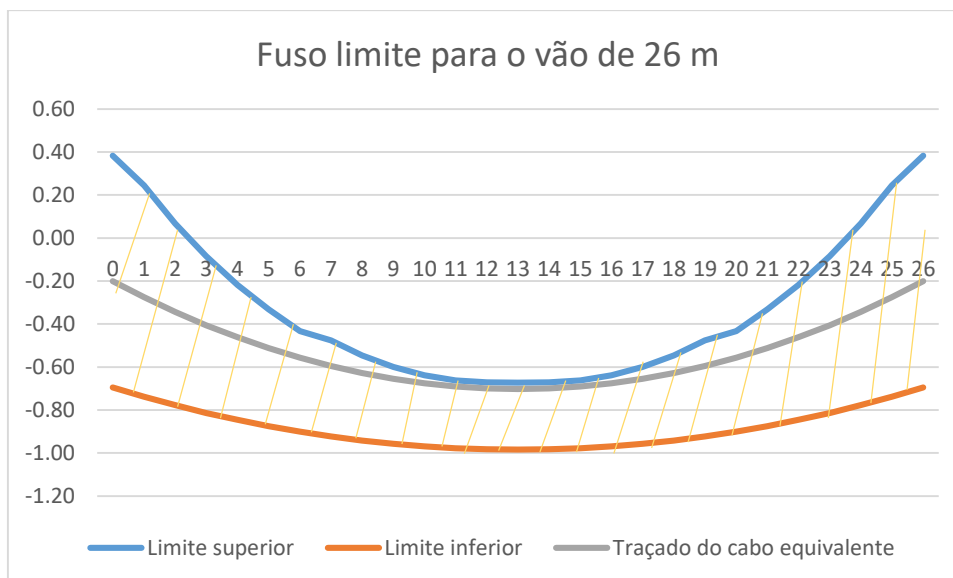


Figura A7-3: Fuso limite e traçado do cabo equivalente para o vão de 26 m.

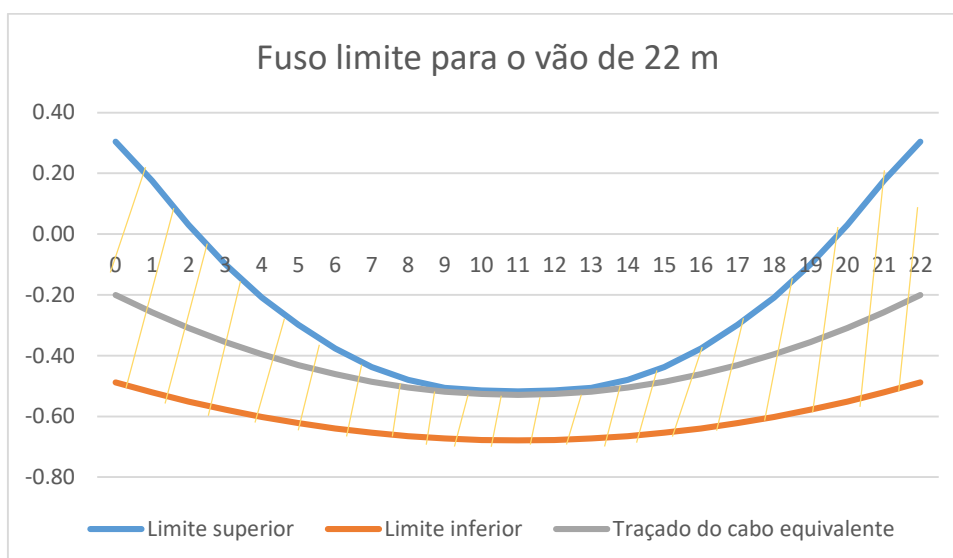


Figura A7-4: Fuso limite e traçado do cabo equivalente para o vão de 22 m.

A7.3. Armaduras nas zonas de ancoragem

Nos casos em que os cordões foram pós-tensionados, nos locais de ancoragem colocaram-se armaduras para resistir às forças concentradas que lá se instalam, devidas ao pré-esforço, para tal, essas forças devem satisfazer a condição do 6.7 do EC2:

$$F_{Rdu} = A_{c0}f_{cd}\sqrt{A_{c1}/A_{c0}} \leq 3,0f_{cd}A_{c0} \quad (A7-1)$$

Em que:

A_{c0} Área carregada;

A_{c1} Maior área de distribuição de cálculo homotética de A_{c0} .

As forças a absorver pelas armaduras são determinadas por:

$$F_{t1,Sd} = 0,3F_{Sd} \left(1 - \frac{a_0}{a_1}\right) \quad (A7-2)$$

Onde:

a_0 Largura correspondente a A_{c0} na direcção considerada;

a_1 Largura correspondente a A_{c1} na direcção em consideração.

Conhecidas as forças que as armaduras devem resistir, essas armaduras podem ser determinadas por:

$$A_s = \frac{F_{t1,Sd}}{f_{syd}} \quad (A7-3)$$

Com a tensão do aço limitada a 200 MPa.

Essas armaduras são dispostas em forma de estribos e posicionadas ao longo de uma longitude correspondente a a_1 .

As ancoragens utilizadas são da *Dywidag Systems International* (DSI 2017), cuja representação pode ser encontrada nos desenhos de especialidade.

As ancoragens para cada um dos casos, assim como as armaduras aplicadas, são encontradas nas tabelas que se seguem:

Tabela A7-3: Descrição da ancoragem e armaduras de extremidade necessárias para cada caso, na direcção horizontal.

Vão (m)	Ancoragem	Cordões na bainha	F_{rd} (kN)	F_{sd} (kN)	$F_{t1,Sd}$ (kN)	A_{c0} (cm ²)	A_{c1} (cm ²)	$A_{sv,h}$ (cm ²)
30	MA com hélice	7	1814	1769	141,5	380,1	706,9	7,08
26				1639	131,1			6,55
22				1635	130,9			6,54

Tabela A7-4: Descrição da ancoragem e armaduras de extremidade necessárias para cada caso, na direcção vertical.

Vão (m)	Ancoragem	Cordões na bainha	$F_{rd,u}$ (kN)	F_{sd} (kN)	$F_{t1,Sd}$ (kN)	A_{c0} (cm ²)	A_{c1} (cm ²)	$A_{sv,v}$ (cm ²)
30	MA com hélice	7	1814	1769	141,5	380,1	706,9	7,08
26				1639	131,1			6,55
22				1636	130,9			6,54

Tabela A7-5: Descrição das armaduras adoptadas e da sua distribuição.

Vão (m)	Cordões na bainha	$A_{sv,h}$ (cm ²)	$A_{sv,v}$ (cm ²)	Distrib. Hor. (cm)	Distrib. Ver. (cm)	Hélice
30	7	8Ø8 2r	8Ø8 2r	10	10	Ø12 em 5 voltas (Comprimento mínimo de 260 mm)
26		7Ø8 2r	7Ø8 2r	10	10	
22		7Ø8 2r	7Ø8 2r	10	10	

ANEXO 8: Perdas de pré-esforço

A8.1. Perdas instantâneas´

A8.2. Perdas diferidas

A8.3. Perdas de pré-esforço para cada um dos vãos

ANEXO 8: Perdas de pré-esforço

No presente trabalho as perdas de pré-esforço já mencionadas foram determinadas segundo o EC2, como se seguem.

A8.1. Perdas instantâneas

a) Perdas devidas à deformação instantânea do betão:

Para vigas pós-tensionadas:

$$\Delta P_{el} = A_p E_p \sum \left[\frac{j \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} \right] \quad (\text{A8-1})$$

Vigas pré-tensionadas:

$$\Delta P_{el} = A_p \frac{E_p}{E_{cm}(t)} \Delta \sigma_c(t) \quad (\text{A8-2})$$

Onde:

$\Delta \sigma_c(t)$ Variação de tensão no centro de gravidade das armaduras no instante t ;
 j Coeficiente igual a $(n - 1)/2n$ em que n é o número de armaduras idênticas sucessivamente traccionadas. Como aproximação, pode adoptar-se para j o valor $\frac{1}{2}$ para as variações devidas às acções permanentes aplicadas após o pré-esforço.

b) Perdas devidas ao atrito:

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{m\acute{a}x} (1 - e^{-\mu(\theta + kx)}) \quad (\text{A8-3})$$

Em que:

θ Soma dos desvios angulares ao longo de um comprimento x (independentemente da sua direcção ou do seu sinal);
 μ Coeficiente de atrito entre a armadura de pré-esforço e a sua bainha;
 k Desvio angular parasita para as armaduras interiores (por unidade de comprimento);
 x Distância ao longo da armadura a partir do ponto em que a força de pré-esforço é igual a $P_{m\acute{a}x}$ (força na extremidade activa durante a aplicação do pré-esforço).

Perdas devidas à reentrada das cunhas:

$$\Delta P_{da} = 2p\omega \quad (\text{A8-4})$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\Delta L \times E_p \times A_p}{p}} \quad (\text{A8-5})$$

Onde:

- p Perda de tensão por atrito, por metro;
 ΔL Comprimento de reentrada das cunhas ($\cong 6\text{mm}$);
 ω Comprimento até onde se faz sentir as perdas por reentrada das cunhas.

c) Perdas devidas à relaxação inicial das armaduras (vigas pré-tensionadas):

Uma vez que o aço usado é de baixa relaxação, correspondente a classe 2 do EC2, o cálculo da perda por relaxação inicial será efectuado de acordo com:

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \rho_{1000} e^{9,1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5} \quad (\text{A8-6})$$

Onde:

- $\Delta\sigma_{pr}$ Valor absoluto das perdas de pré-esforço devidas à relaxação;
 σ_{pi} Para a pós-tensão, σ_{pi} é o valor absoluto da tensão inicial de pré-esforço
 $\sigma_{pi} = \sigma_{pm0}$;
 t Tempo depois da aplicação de pré-esforço (em horas);
 $\mu = \sigma_{pi} / f_{pk}$, em que f_{pk} é o valor característico da resistência à tracção do aço de pré-esforço;
 ρ_{1000} Valor da perda devida à relaxação (em %), às 1000 horas depois da aplicação de pré-esforço e a uma temperatura média de 20°C.

A8.2. Perdas diferidas

As perdas de pré-esforço devidas aos efeitos diferidos são dadas por:

$$\frac{\Delta\sigma_d}{A_{ps}} = \frac{\alpha_e f_{co} \Phi_{ti} + \eta \Delta\sigma_{pr} + \varepsilon_{cst} E_s}{1 + \rho \alpha_e (1 + \alpha_s^2 / i^2) (1 + \eta \Phi_{ti})} \quad (\text{A8-7})$$

Onde f_{co} é a tensão no betão no nível dos cordões devida ao pré-esforço inicial e às cargas permanentes.

A relaxação de longo prazo é dada pela expressão seguinte:

$$\Delta\sigma_{pr,j} = 0,66 \rho_{1000} e^{9,1\mu} \left(\frac{t_e + \Delta t_i}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \left\{ \sigma_{p,j}^+ + \sum_1^{i+1} \Delta\sigma_{pr,j} \right\} 10^{-5} - \sum_1^{i-1} \Delta\sigma_{pr,j} \quad (\text{A8-8})$$

A8.3. Perdas de pré-esforço para cada um dos vãos

As perdas determinadas no trabalho tomaram os valores das tabelas que se seguem:

Tabela A8-1: Perdas de pré-esforço instantâneas e diferidas para cada um dos casos, no meio vão.

Vão (m)	$\Delta\sigma_{i,el}$ (kPa)	$\Delta\sigma_{i,rcp}$ (kPa)	$\Delta\sigma_{i,at}$ (kPa)	$\Delta\sigma_{i,da}$ (kPa)	$\Sigma\Delta\sigma_i$ (kPa)	$\Delta\sigma_{d,rlp}$ (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (kPa)
30	119969,4	28891,3	-	-	148860,7	73783,5	213480
30 p	47384,3	-	46134,0	28306,6	121824,9	125553,1	248546,3
26	89043,4	30046,91	-	-	119090,3	76734,85	186976,8
26 p	34724,5	-	42703,8	40269,5	117687,8	125553,1	224233,1
22	94344,5	30046,91	-	-	124391,4	76734,85	192928,8
22 p	36817,0	-	39263,8	52375,1	128456,0	125553,1	235721,9
18	109515,1	30046,91	-	-	139562,1	76734,85	208539,1
15	97342,1	30046,91	-	-	127389,0	76734,85	188050,6
10	64802,9	30046,91	-	-	94849,82	76734,85	154361,3

Tabela A8-2: Percentagem das perdas de pré-esforço instantâneas e diferidas.

Vão (m)	$\Delta\sigma_i$ (%)	$\Delta\sigma_d$ (%)
30	12,61	20,31
30 p	9,76	22,07
26	9,54	16,56
26 p	9,43	19,84
22	9,97	17,17
22 p	10,29	21,06
18	11,18	18,81
15	10,21	16,78
10	7,60	13,39

ANEXO 9: Momentos flectores para os estados limites últimos

ANEXO 9: Momentos flectores para os estados limites últimos

Tabela A9-1: Momento flector aplicado e as forças na secção do meio vão para os momentos flectores nos estados limites últimos.

Vão (m)	M _{sd} (kNm)	Combinação	M _{cs+cc} (kNm)	M _r (kNm)	d (m)	x (m)	T=C (kN)
30	6775,22	C2 NA WD2	-398,76	6376,46	1,71	0,444	4865,5
30 p	6775,22	C2 NA WD2	-277,13	6498,09	1,71	0,428	5159,4
26	5836,02	C1 NA	-191,85	5644,17	1,71	0,446	4278,9
26 p	5836,02	C1 NA	-288,29	5547,73	1,71	0,443	4233,1
22	4193,10	C1 NB	1,52	4194,62	1,39	0,360	4035,2
22 p	4193,10	C1 NB	-166,49	4026,61	1,39	0,360	3873,5
18	955,89	C2 NB WD2	174,92	1130,81	1,07	0,276	1462,9
15	1643,76	C1 NB	473,84	2117,60	0,92	0,238	2586,5
10	1016,13	C1 NB	494,23	1510,36	0,88	0,223	1928,3

Tabela A9-2: Armaduras necessárias e existentes no meio vão, devidas ao momento flector para os estados limites últimos.

Vão (m)	A _{s,necessária} (mm ²)	A _{s,existente} (mm ²)	ε _{se} (‰)	ε _{ce} (‰)	ε _s (‰)	ε _{ps} (‰)
30	3024,5	5166,7	4,30	0,56	10,0	13,71
30 p	3207,2	5288,5	4,50	0,55	10,0	13,95
26	2659,8	3645,8	4,83	0,45	10,0	14,38
26 p	2631,4	3766,0	4,64	0,44	10,0	14,22
22	2508,4	3605,8	4,77	0,45	10,0	14,35
22 p	2407,9	3685,9	4,53	0,44	10,0	14,10
18	909,4	3926,3	4,61	0,48	10,0	14,22
15	1607,8	3285,3	4,78	0,43	10,0	14,36
10	1198,6	2403,8	5,12	0,29	10,0	14,86

**ANEXO 10: Esforço transversal, esforços nas ligações entre os banzos e as
almas, e esforços nas juntas de betonagem**

A10.1. Esforço transversal

A10.2. Ligação entre o banzo e a alma

A10.3. Esforços nas juntas de betonagem

ANEXO 10: Esforço transverso, esforços nas ligações entre os banzos e as almas, e esforços nas juntas de betonagem

A10.1. Esforço transverso

Tabela A10-1: Esforço transverso nas vigas e as suas resistências.

Vão (m)	$V_{sd,P}$ (kN)	$V_{sd,Csc}$ (kN)	Comb	$V_{sd,v}$ (kN)	$V_{rd,cv}$ (kN)	$V_{rd,csc}$ (kN)	$V_{rd,máx V}$ (kN)	$V_{rd,máx sc}$ (kN)
30	-	1308,4	C1 NB	400,0	491,8	562,9	1708,6	2227,4
30 p	-274,2	1034,2	C1 NB	125,8	491,8	562,9	1708,6	2227,4
26	-	1164,6	C1 NA	341,5	491,8	562,9	1706,9	2227,4
26 p	-264,1	900,5	C1 NA	77,4	491,8	562,9	1706,9	2227,4
22	-	1137,8	C1 NA	276,0	405,8	477,5	1386,8	1866,2
22 p	-195,0	942,8	C1 NA	81	405,8	477,5	1386,8	1866,2
18	-	982,8	C1 NB	209,8	318,9	391,4	1066,8	1505
15	-	861,8	C1 NB	118,4	579,5	725,0	1920,2	2769,2
10	-	735,84	C1 NB	78,5	579,5	725,0	1920,2	2769,2

Tabela A10-2: Armaduras das vigas para cada um dos vãos, devidas ao esforço transverso.

Vão (m)	A_{sw}/s_{nec} (mm)	Φ (mm)	A_{sw} (mm ²)	s (mm)	A_s
30	0,8581	6	570	664	2r Φ 6@300
30 p	0,5424	6	570	1051	2r Φ 6@300
26	0,6926	6	570	823	2r Φ 6@300
26 p	0,3886	6	570	1467	2r Φ 6@300
22	0,9073	6	570	628	2r Φ 6@300
22 p	0,6393	6	570	892	2r Φ 6@300
18	1,0077	8	1010	1002	2r Φ 8@300
15	min	6	570	2249	2r Φ 6@300
10	min	6	570	28286	2r Φ 6@300

A10.2. Ligação entre o banzo e a alma

Tabela A10-3: Armaduras de ligação entre o banzo e a alma.

Vão (m)	V_{Ed} (kPa)	ΔF_d (kN)	$V_{Ed,máx}$ (kPa)	h_f (m)	Δx (m)	A_{st}/S_f (mm)	$A_{s,adicional}$
30	1297,5	4865,5	5556,9	0,25	15	0,00062	-
26	1316,6	4278,9	5556,9	0,25	13	0,00063	-
22	1467,3	4035,2	5556,9	0,25	11	0,00070	-
18	650,2	1462,9	5556,9	0,25	9	0,00031	-

Onde para todos os casos presentes, $\text{Cot } \theta_f = 1,5$.

A10.3. Esforços nas juntas de betonagem

Tabela A10-4: Armaduras devidas aos esforços nas juntas de betonagem.

Vão (m)	V_{Edi} (kPa)	z (m)	b_i (m)	β	V_{Rdi} (kPa)	ρ	σ_n (kPa)	$A_{s,adicional}$
30	568,4	1,44	0,9	0,563	921,9	0,0019	20	-
26	504,0	1,44	0,9	0,561	921,9	0,0019	20	-
22	751,3	1,17	0,9	0,695	921,9	0,0019	20	-
18	1099,9	0,90	0,9	0,907	1227,9	0,0034	20	-
15	2659,9	0,81	0,4	1	3013,4	0,0119	45	2rΦ8@300
10	2271,1	0,81	0,4	1	3702,1	0,0152	45	2rΦ8@300

Para todos os casos considerou-se superfície lisa, $c=0,35$ e $\mu=0,6$.

ANEXO 11: Deformações

A11.1. Deformações verticais

A11.2. Deformações horizontais

ANEXO 11: Deformações

A11.1. Deformações verticais

Tabela A11-1: Deformações verticais nas vigas para as acções permanentes.

Vão (m)	Limite (mm)	Flecha (peso próprio) (mm)	Contra-flecha (pré-esforço) (mm)	Total (mm)
30	±30	28,7	64,7	-36
30 p	±30	28,7	60,9	-32,2
26	±26	11	26,3	-15,3
26 p	±26	11	35,5	-24,5
22	±22	8,5	28,1	-19,6
22 p	±22	8,5	32,4	-24,0
18	±18	7,7	25,7	-18,0
15	±15	4,6	16,2	-11,6
10	±10	1,0	4,7	-3,7

A11.2. Deformações horizontais

Tabela A11-2: Extensões devidas aos efeitos diferidos.

Vão (m)	ϵ_{cc} (‰)	ϵ_{ccf} (‰)	$\Delta\chi_{cc}$ (10^{-5})	$\epsilon_{cs,L}$ (‰)	$\epsilon_{cs,v}$ (‰)	$\epsilon_{cs,dif}$ (‰)	$\Delta\chi_{cs}$ (10^{-5})
30	0,2817	0,1766	6,7326	0,0871	0,0492	0,0379	3,5328
30 p	0,3090	0,1894	5,7580	0,0870	0,0379	0,0870	3,5302
26	0,2135	0,1401	5,0723	0,0871	0,0399	0,0871	3,5328
26 p	0,2208	0,1393	5,8477	0,0870	0,0399	0,0870	3,5302
22	0,2080	0,1460	4,9942	0,0872	0,0382	0,0872	5,0137
22 p	0,2141	0,1393	4,8685	0,0870	0,0399	0,0870	3,5302
18	0,2080	0,1645	3,7295	0,0874	0,0352	0,0874	7,7511
15	0,1759	0,2005	-8,1988	0,0883	0,0252	0,0883	10,8955
10	0,1325	0,1572	-9,0207	0,0883	0,0252	0,0883	10,8955

As tensões no tabuleiro devidas as forças horizontais foram determinadas por:

$$\sigma_h = \frac{F_L}{A_t} \quad (\text{A11-1})$$

Onde A_t é a área do tabuleiro.

Tabela A11-3: Forças horizontais longitudinais mais desfavoráveis e tensões no tabuleiro devidas a essas forças.

Vão (m)	F_L^+ (kN)	F_L^- (kN)	A_t (m ²)	σ_h^+ (kPa)	σ_h^- (kPa)
30	505,6	-864,7	5,94	85,17	-145,66
30 p	505,6	-864,7	5,94	85,17	-145,66
26	468,6	-623,5	5,94	78,94	-105,02
26 p	468,6	-623,5	5,94	78,94	-105,02
22	411,3	-604,8	5,57	73,79	-108,51
22 p	411,1	-604,8	5,57	73,79	-108,51
18	353,5	-561,7	5,21	67,80	-107,72
15	261,3	-372,5	4,66	56,02	-79,85
10	129,8	-204,5	4,66	27,83	-43,84

A extensão devida à variação de temperatura (ε_{cT}) é dada por:

$$\varepsilon_{cT} = \Delta T \alpha_{cT} \quad (\text{A11-2})$$

As extensões totais:

$$\varepsilon_t^{(+)} = \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs,dif} + \varepsilon_{cT}^+ + \varepsilon_{cF}^+ \quad (\text{A11-3})$$

$$\varepsilon_t^{(-)} = \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs,dif} + \varepsilon_{cT}^- + \varepsilon_{cF}^- \quad (\text{A11-4})$$

Tabela A11-4: Extensões totais nos tabuleiros.

Vão (m)	ε_{cc} (‰)	$\varepsilon_{cs,dif}$ (‰)	ε_{cT}^+ (‰)	ε_{cT}^- (‰)	ε_{cF}^+ (‰)	ε_{cF}^- (‰)	$\varepsilon_t^{(+)}$ (mm)	$\varepsilon_t^{(-)}$ (mm)
30	0,1766	0,0871	5,8	-5,0	0,0025	-0,0043	14	3
30 p	0,1894	0,0870	5,8	-5,0	0,0025	-0,0043	14	3
26	0,1401	0,0871	5,0	-4,4	0,0023	-0,0031	11	1
26 p	0,1393	0,0870	5,0	-4,4	0,0023	-0,0031	11	1
22	0,1460	0,0872	4,2	-3,7	0,0022	0,0032	9	2
22 p	0,1393	0,0870	4,2	-3,7	0,0022	0,0032	9	1
18	0,1645	0,0874	3,5	-3,0	0,0020	-0,0032	8	1
15	0,2005	0,0883	2,9	-2,5	0,0016	-0,0023	7	2
10	0,1572	0,0883	1,9	-1,7	0,0008	0,0013	4	1

ANEXO 12: Reacções de apoio

ANEXO 12: Reacções de apoio

Para todos os vãos, consideraram-se tramos simplesmente apoiados longitudinalmente, contudo, certos apoios possuem um grau de liberdade correspondente ao deslocamento horizontal transversal ao tabuleiro, e outros não, assim sendo, nas Figuras A12-1 e A12-2 apresenta-se o sistema estático em planta para as reacções de apoio das vigas do tabuleiro.

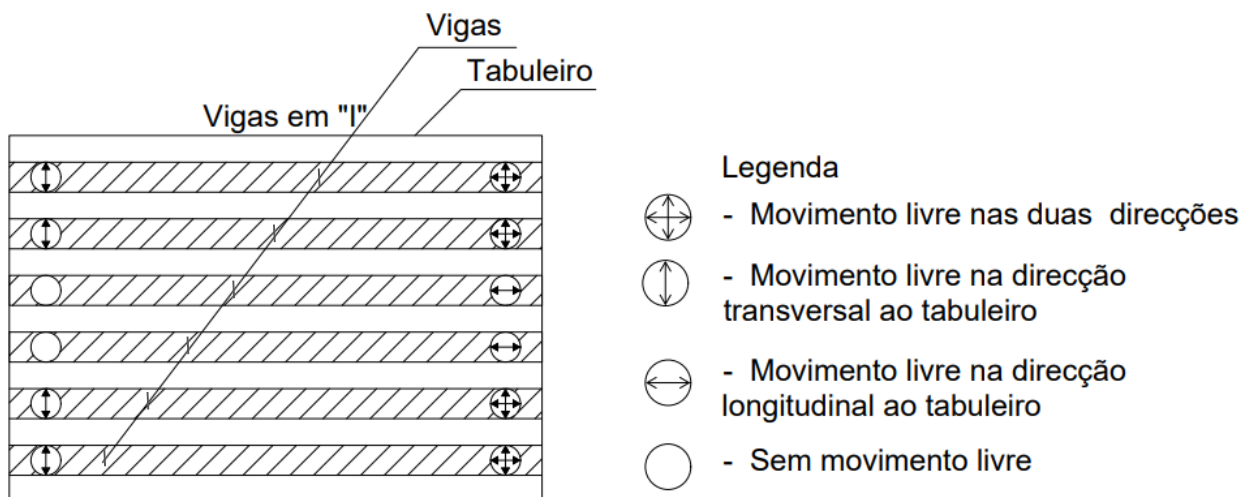


Figura A12-1: Representação dos aparelhos de apoio para o tabuleiro com vigas em "I".

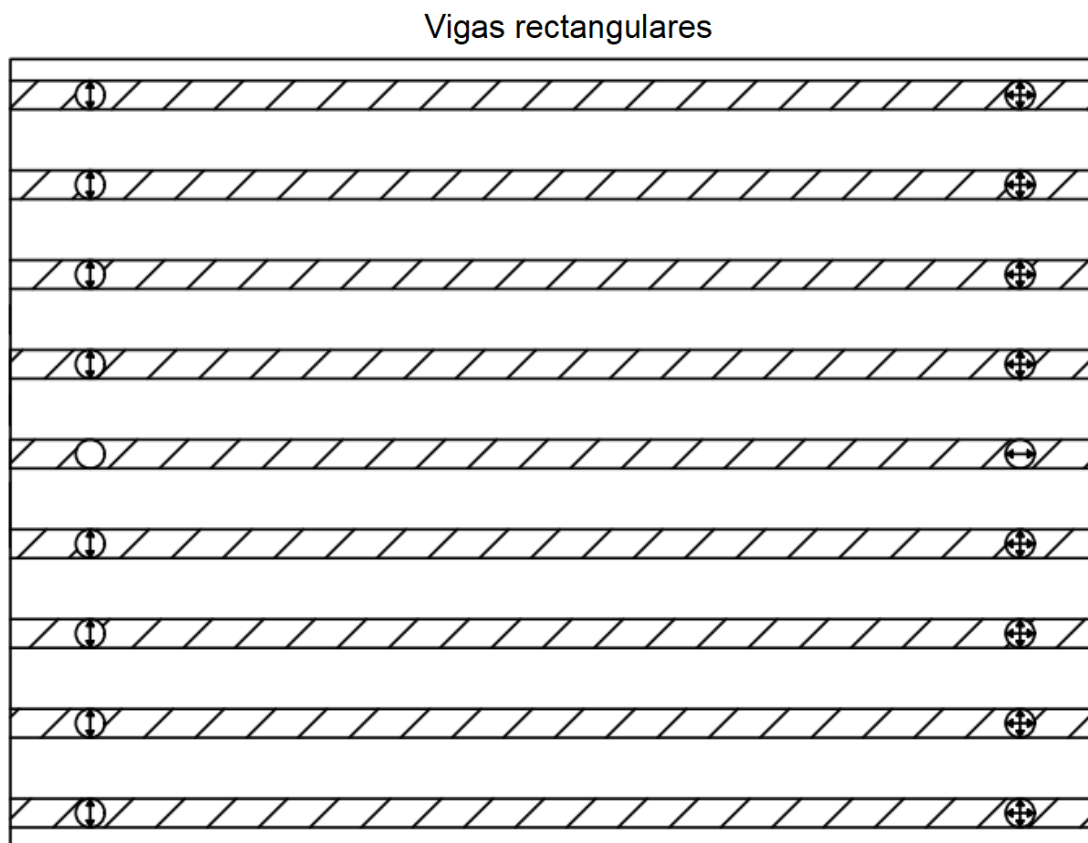


Figura A12-2: Representação dos aparelhos de apoio para o tabuleiro com vigas rectangulares.

Nas tabelas que se seguem apresentam-se as reacções de apoio para os casos mais desfavoráveis para cada um dos vãos, assim como as combinações de acções que as geraram.

Tabela A12-1: Reacções de apoio mais desfavoráveis, para os vãos de 30 a 18 m.

Vão m	RV1=RV6 (kN)		RV2=RV5 (kN)		RV3=RV4 (kN)		RH1=RH6 (kN)		RH2=RH5 (kN)		RH3=RH4 (kN)	
30	1433,4	C1 NA	1558,3	C1 NA	1682,3	C1 NA	0	0	291,6	C2 NA WD 2		
30 p	1433,4	C1 NA	1558,3	C1 NA	1682,3	C1 NA	0	0	291,6	C2 NA WD 2		
26	1253,4	C1 NA	1405,9	C1 NA	1528,2	C1 NA	0	0	298,8	C3 TP ST		
26 p	1253,4	C1 NA	1405,9	C1 NA	1528,2	C1 NA	0	0	298,8	C3 TP ST		
22	1061,6	C1 NB	1266,4	C1 NB	1320,1	C1 NA	0	0	276,8	C2 NB WD1		
22 p	1061,6	C1 NB	1266,4	C1 NB	1320,1	C1 NA	0	0	276,8	C2 NB WD1		
18	923,9	C1 NB	1140,0	C1 NB	1107,4	C1 NA	0	0	273,5	C2 NB WD1		

Tabela A12-2: Reacções de apoio horizontais no sentido longitudinal mais desfavoráveis, para os vãos de 30 a 18 m.

Vão m	RL1=RL6 (kN)		RL2=RL5 (kN)		RL3=RL4 (kN)	
30	976,9	C1	782,9	C1 NA	773,7	C1 NA
30 p	976,9	C1	782,9	C1 NA	773,7	C1 NA
26	792	C2 NB WD2	656,9	C1 NA	678,3	C1 NA
26 p	792	C2 NB WD2	656,9	C1 NA	678,3	C1 NA
22	722,4	C2 NB WD1	570,9	C2 NB WD1	584,82	C1
22 p	722,4	C2 NB WD1	570,9	C2 NB WD1	584,82	C1
18	615,6	C2 NB WD1	515,7	C2 NB WD1	471,2	C2 NB WD2

Tabela A12-3: Reacções de apoio verticais mais desfavoráveis, para os vãos de 15 e 10 m.

Vão m	RV1=RV9 (kN)		RV2=RV8 (kN)		RV3=RV7 (kN)		RV4=RV6 (kN)		RV5 (kN)	
15	590,6	C1 NB	467,4	C1 NB	895,1	C1 NB	823,1	C1 NA	1026,1	C1 NB
10	446	C1 NB	341	C1 NB	762,9	C2 NB WD2	648,0	C1 NA	898,5	C1 NB

Tabela A12-4: Reacções de apoio horizontais transversais mais desfavoráveis, para os vãos de 15 a 10 m

Vão m	RH1=RH9 (kN)	RH2=RH8 (kN)	RH3=RH7 (kN)	RH4=RH6 (kN)	RH5 (kN)	
15	0	0	0	0	388,2	C3 TP ST
10	0	0	0	0	281,7	C3 TP ST

Tabela A12-5: Reacções de apoio horizontais longitudinais mais desfavoráveis, para os vãos de 15 a 10 m.

Vão m	RL1=RL9 (kN)		RL2=RL8 (kN)		RL3=RL7 (kN)		RL4=RL6 (kN)		RL5 (kN)	
15	341,3	C2 NB WD2	241,6	C2 NB WD2	356,2	C2 NB WD2	380,5	C1 NA	423,6	C2 NB WD4
10	266,0	C2 NB WD1	182,1	C2 NB WD3	273,3	C2 NB WD2	249,4	C1 NA	323,6	C2 NB WD4

Legenda:

- TP Combinação de acções com variação diferencial de temperatura positiva
- TN Combinação de acções com variação diferencial de temperatura negativa
- ST Combinação de acções com força sísmica aplicada transversalmente ao tabuleiro
- SL Combinação de acções com força sísmica aplicada longitudinalmente ao tabuleiro
- RV Reacção de apoio vertical
- RH Reacção de apoio horizontal transversal
- RL Reacção de apoio horizontal longitudinal

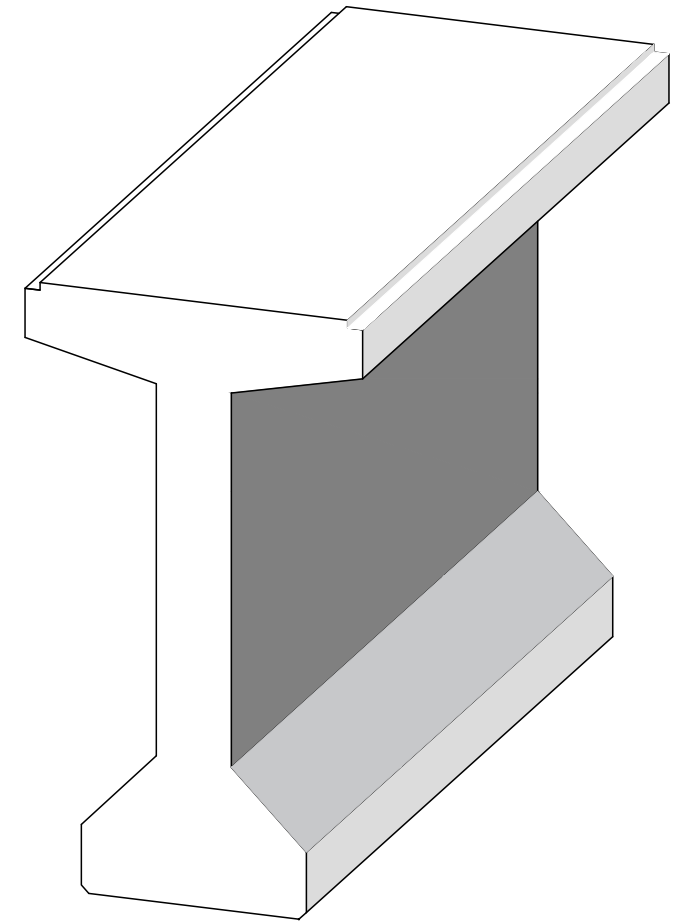
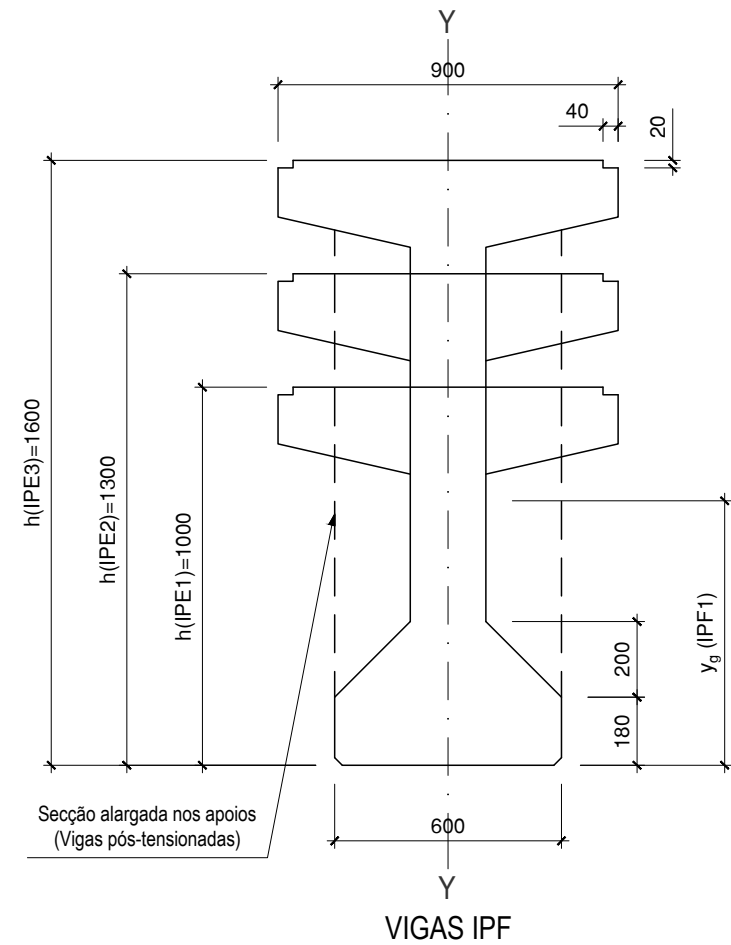
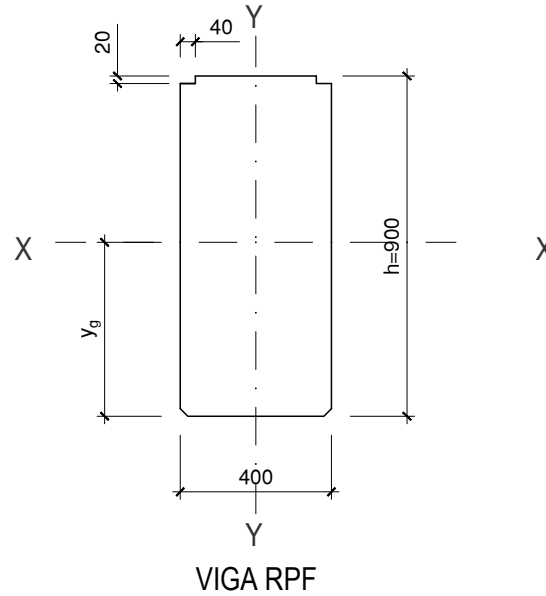
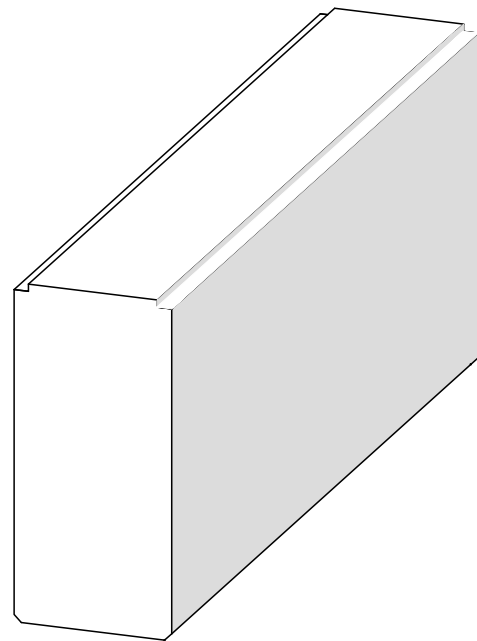
ANEXO 13: Peças desenhadas

ANEXO 13- PEÇAS DESENHADAS

Índice de desenhos

Título	Número do desenho	Título	Número do desenho
<u>DESENHOS GERAIS</u>		<u>VIGAS EM "I" (IPF cont.)</u>	
Características geométricas das vigas e informações gerais	01	Viga IPF2 pós-tensionada para o vão de 22 m: Detalhes de ancoragem	12
Características e informações gerais	02		
<u>VIGAS RECTANGULARES (RPF)</u>		Viga IPF3 pré-tensionada para os vãos de 26 m & 30 m: Disposições e dimensões	13
Viga RPF pré-tensionada para os vãos de 10 m & 15 m: Disposições e dimensões	03	Viga IPF3 pré-tensionada para o vão de 26 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas	14
	04		
Viga RPF pré-tensionada para o vão de 10 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas	05	Viga IPF3 pré-tensionada para o vão de 30 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas	15
Viga RPF pré-tensionada para o vão de 15 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas			
<u>VIGAS EM "I" (IPF)</u>		Viga IPF3 pós-tensionada para os vãos de 26 m & 30 m: Disposições e dimensões	16
Viga IPF1 para o vão de 18 m: Disposições e dimensões	06	Viga IPF3 pós-tensionada para o vão de 26 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas	17
Viga IPF1 para o vão de 18 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas	07	Viga IPF3 pós-tensionada para o vão de 26 m: Detalhes de ancoragem	18
		Viga IPF3 pós-tensionada para o vão de 30 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas	19
Viga IPF2 pré-tensionada para o vão de 22 m: Disposições e dimensões	08	Viga IPF3 pós-tensionada para o vão de 30 m: Detalhes de ancoragem	20
Viga IPF2 pré-tensionada para o vão de 22 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas	09		
		Vigas IPF2 e IPF3 pós-tensionadas para os vãos de 22 m, 26 m & 30 m: Armaduras (cont.)	21
Viga IPF2 pós-tensionada para o vão de 22 m: Disposições e dimensões	10		
Viga IPF2 pós-tensionada para o vão de 22 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas	11		

Propriedade das vigas (meio vão)							
Secção	Altura h (mm)	Área A (mm ²)	Centro de gravidade y _g (mm)	Módulo de flexão (mm ³ x10 ⁶)		Momento de inércia I _x (mm ⁴ x10 ⁹)	Peso próprio aproximado (kN/m)
				Fibra superior w _s	Fibra inferior w _i		
RPF	900	359600	450	53,8	53,8	24,20	9,16
IPF1	1000	451100	536	116	100	53,60	11,73
IPF2	1300	511100	689	176	156	107,40	13,29
IPF3	1600	571500	842	243,4	219,1	184,50	14,86



SECÇÃO TRANSVERSAL DAS VIGAS

1:20

Tabela de vãos

Metros	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
RPF	█																						
IPF1						█																	
IPF2											█												
IPF3																	█						



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Características geométricas das vigas e informações gerais

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

01

Escala

1:20

Papel

A3

Informações gerais

1. **CLASSE DE BETÃO (NP EN 206-1: 2007)**
 Viga pré-fabricada: C35/45.XC4/XD1/XS1(P).CI
 0,20.Dmáx20.S3
 Laje betonada "in situ": C25/30.XC4/XD1/XS1(P).CI
 0,20.Dmáx20.S3(min)

2. **ARMADURA ORDINÁRIA**
 A400 NR

3. **RECOBRIMENTO**
 O recobrimento mínimo usado nas vigas é de 30 mm.

4. **CHANFROS**
 As extremidades das superfícies inferiores dos banzos inferiores das vigas devem ser chanfradas a 20 mm ou ter um raio de 20 mm, caso não seja mostrado diferente.

5. **PRÉ-ESFORÇO**
 São usados cordões de 15,7 mm de baixa relaxação, formados por 7 fios não revestidos, de acordo com prEN 10138/BS 5896, com uma resistência última de 265,5 kN. As bainhas dos cabos pós-tensionados são de metal corrugado, e devem ser injectadas com calda de cimento (desenho C) pelos pontos de menores cotas da bainha. A ordem de tensionamento dos cabos é conforme apresentada nos desenhos de pormenor.

Para as vigas pré-tensionadas, na libertação da tensão, primeiro devem ser libertados os cordões não encamisados, de seguida os com menor comprimento do encamisamento e por fim os restantes cordões.

No período de 24 h após a libertação, todas as aberturas entre os cordões e os encamisamentos devem ser seladas por epóxi ou silicone selante.

Todos os cordões devem ser cortados nas extremidades, escovados e protegidos com um mínimo de 5 mm de argamassa de reparação.

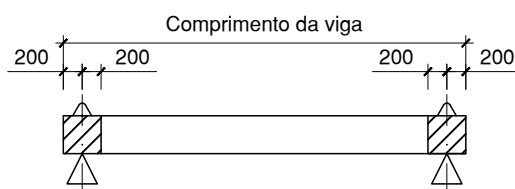
6. **MATERIAL PARA O ENCAMISAMENTO DOS CORDÕES:**
 Os cordões serão encamisados por um tubo de plástico polimérico flexível (podendo ser de polietileno de alta densidade ou polipropileno), sendo esse material não reagente com o aço ou o betão, com diâmetro de 0,6 mm a 3,6 mm maior que o diâmetro do cordão e com uma espessura mínima de 0,6 mm. Os limites entre o encamisamento e a parte do cordão não encamisada devem ser protegidos por uma fita a prova de água,

conforme o desenho D.

7. **PRÉ-LAJES (NP EN 015050 2008)**
 Durante a betonagem da laje de tabuleiro, serão utilizadas pré-lajes como cofragens perdidas, cofragens essas constituídas por lajes de pequena espessura que serão apoiadas nas vigas pré-fabricadas, onde para isso, irá se garantir no banzo superior das vigas um comprimento de apoio de 40 mm e uma profundidade de engate de 20 mm.

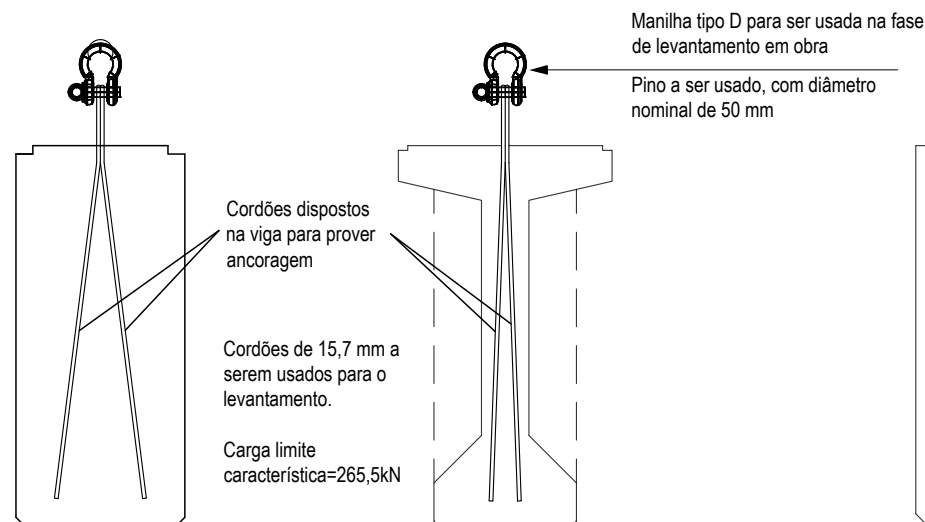
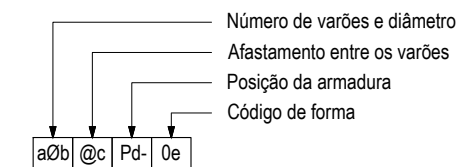
8. **ACABAMENTO DAS SUPERFÍCIES (SANS 2001-CC1:2007)**
 A superfície superior dos banzos superiores e das pré-lajes devem ter um acabamento rugoso para maior aderência com o betão da laje, as restantes superfícies, um acabamento liso.

9. **LEVANTAMENTO E MANUSEAMENTO**
 As vigas devem ser sempre mantidas na posição vertical e apoiadas próxima das suas extremidades. Devem ser levantadas sempre pelos dispositivos colocados nos banzos superiores, conforme se apresentam nos desenhos A e E. Após posicionadas as vigas no destino, as partes sobressainentes desses dispositivos devem ser cortadas.



A. SUPORTE DAS VIGAS E PONTOS DE LEVANTAMENTO

10. **LEGENDA DAS ARMADURAS**
 A legenda das armaduras consiste em três números que servem para identificar o varão e outros componentes que se seguem:

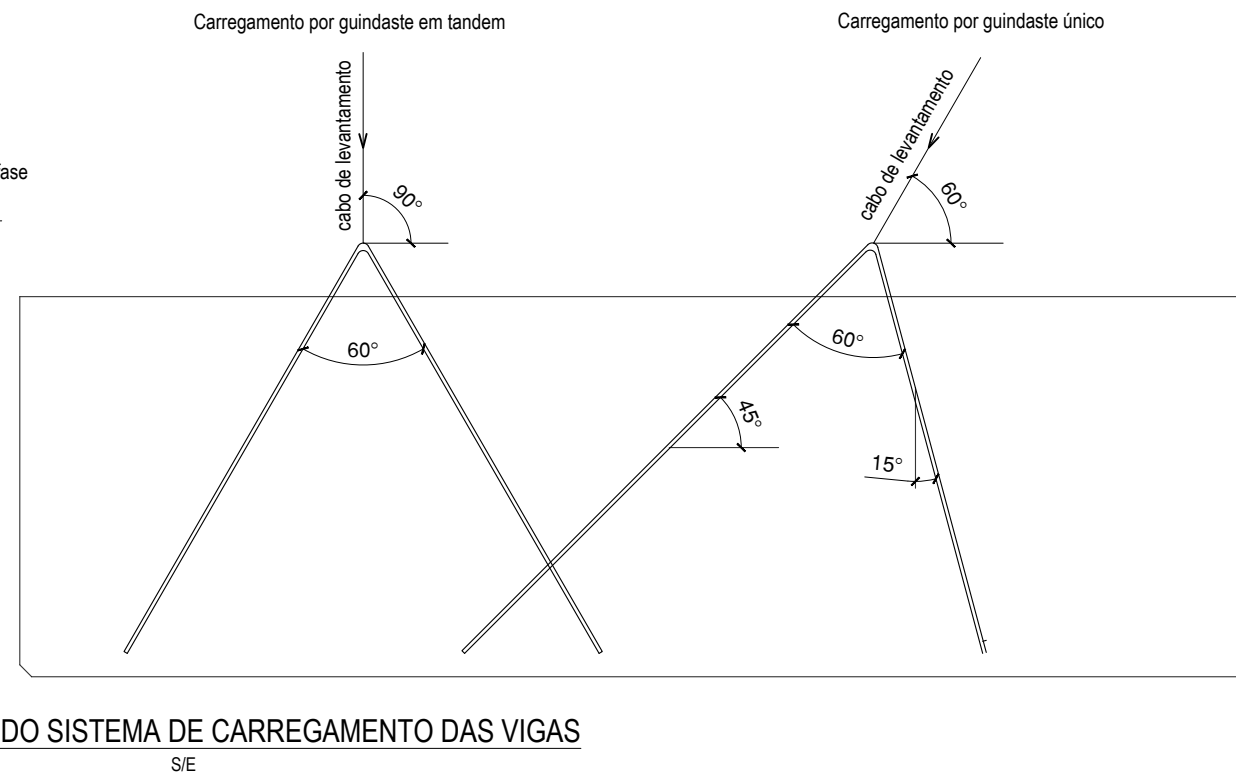
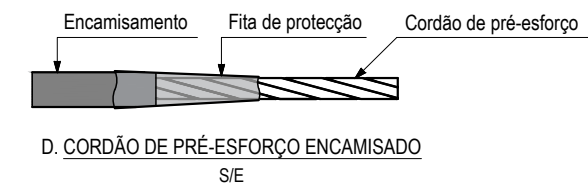
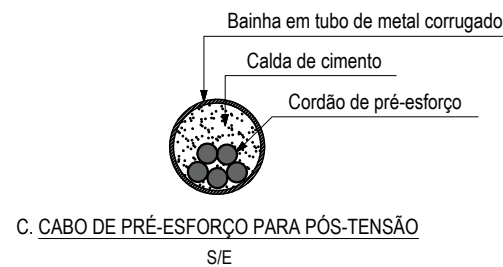
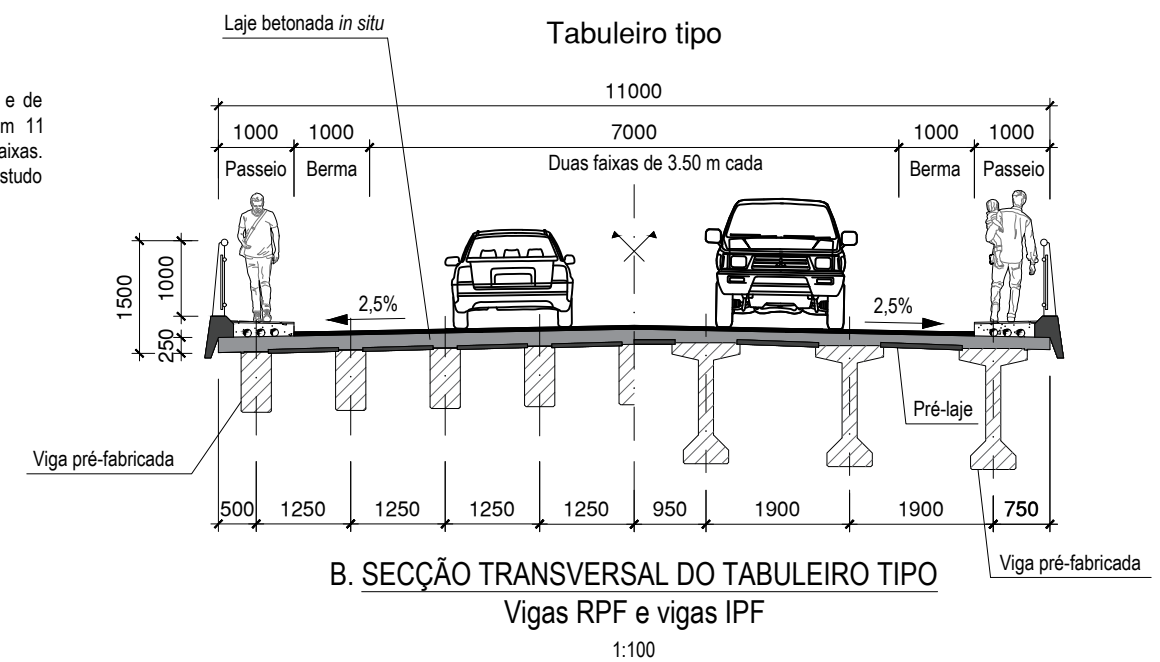


Dados de dimensionamento

1. **DETALHES DA ANÁLISE**
 A análise foi feita aos estados limites últimos e de utilização para um tabuleiro tipo (desenho B) com 11 metros de largura, contendo uma via com duas faixas. Para casos diferentes será necessário um estudo adicional.

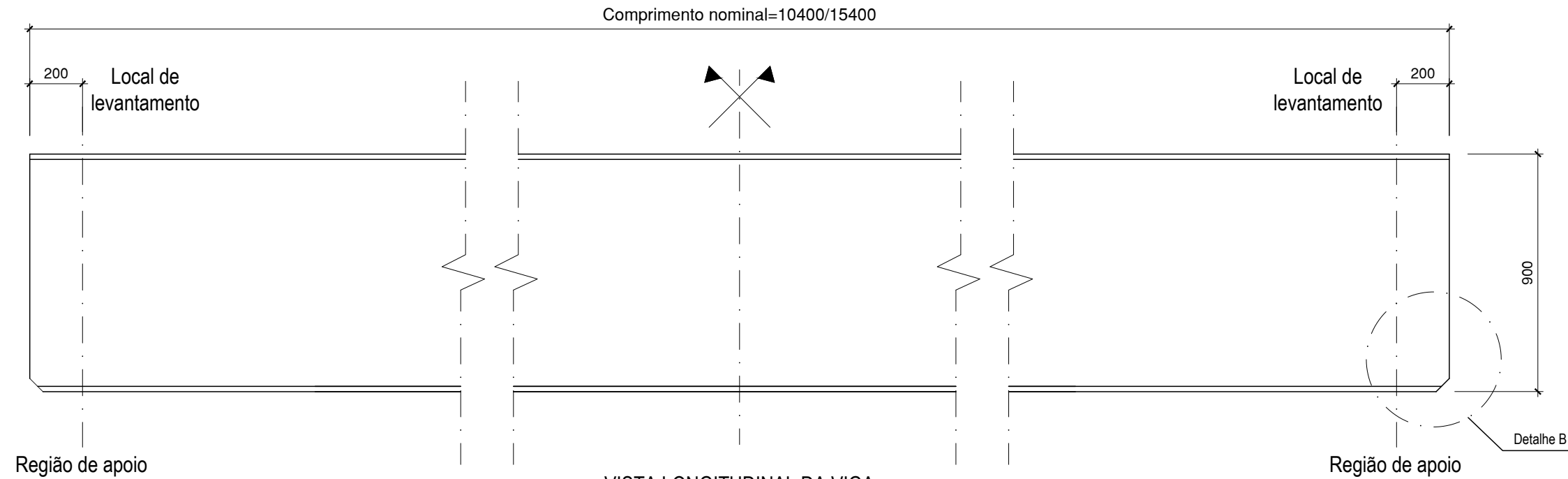
2. **ACÇÃO DE TRÁFEGO**
 Acções de acordo com o código da SATCC:
 NA
 NB: 36 unidades

3. **FACTORES CLIMÁTICOS**
 Variação de temperatura: 25°C(11° - 41°C)
 Humidade: 70%
 Vento: 57 m/s
 Sismo: grau VIII na escala mercalli



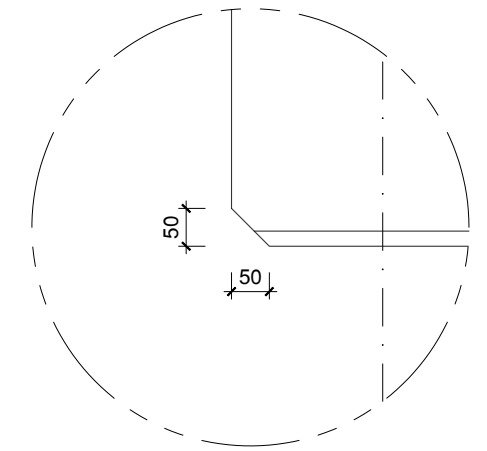
NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.



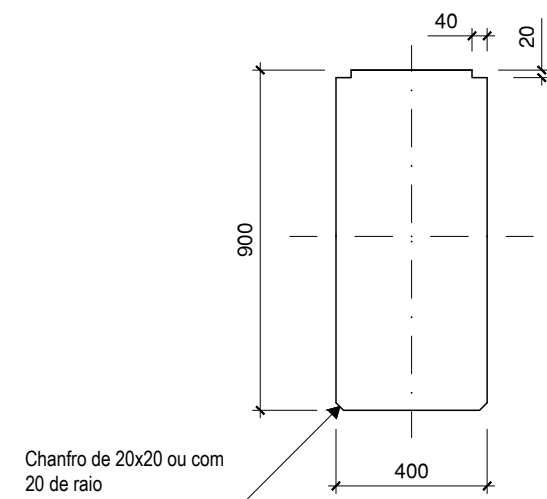
VISTA LONGITUDINAL DA VIGA

1:20



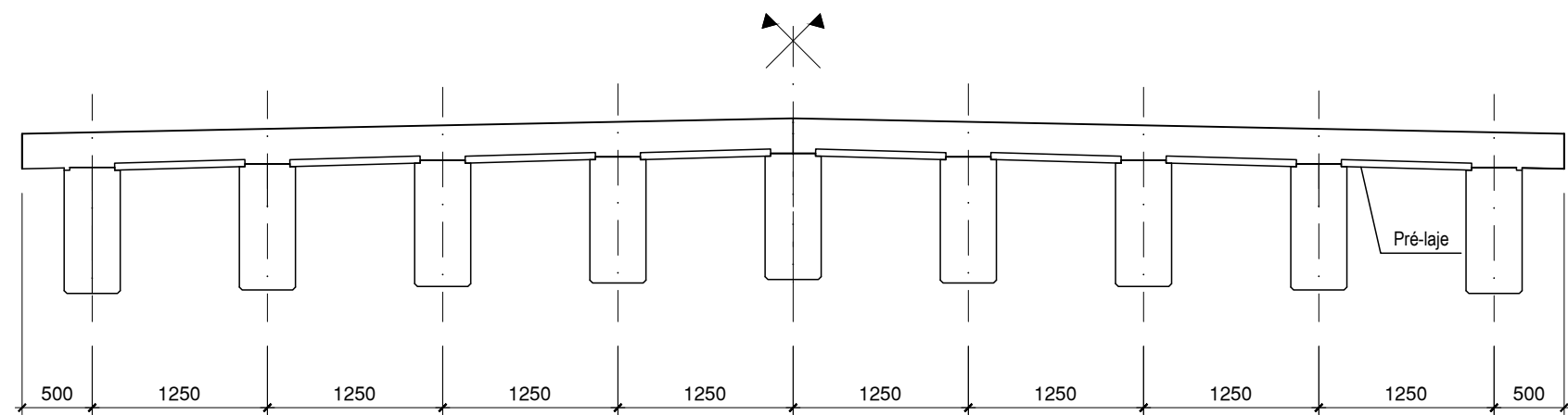
Detalhe B

1:10



SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA

1:20



SECÇÃO TRANSVERSAL DO TABULEIRO TIPO

1:50

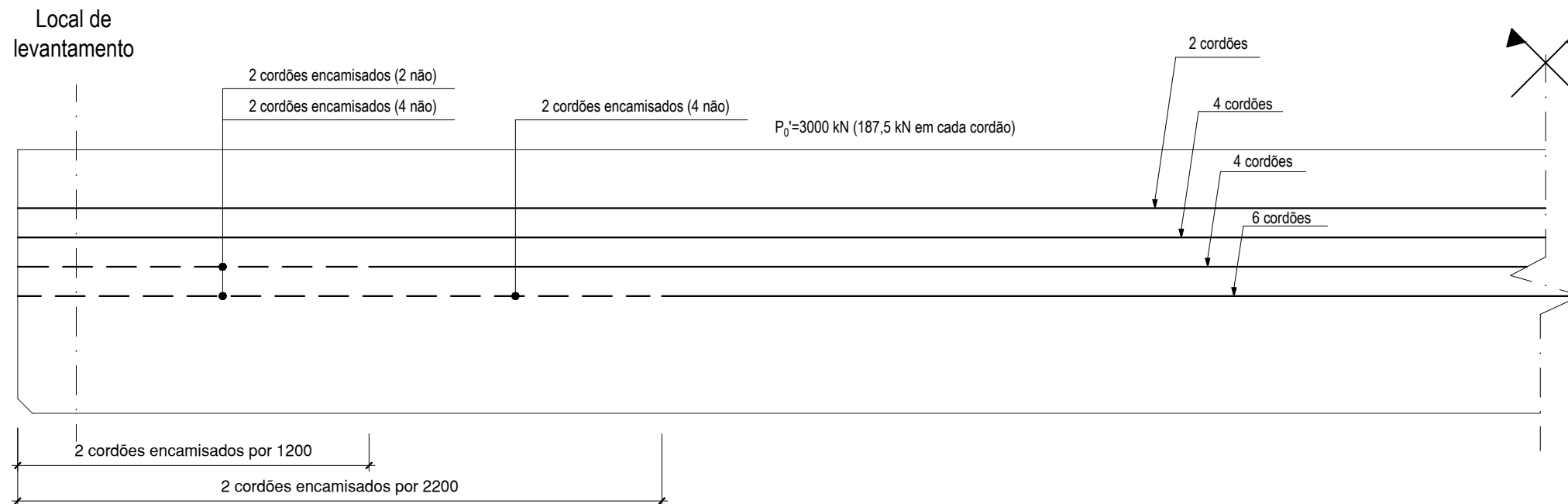


UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

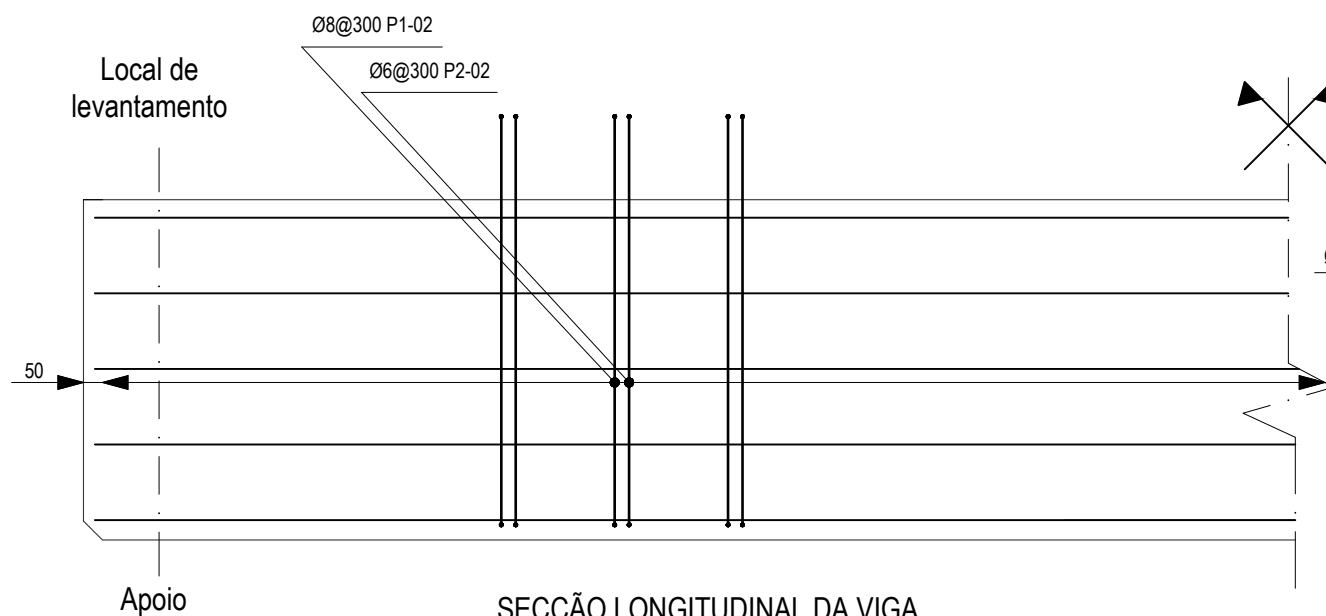
NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

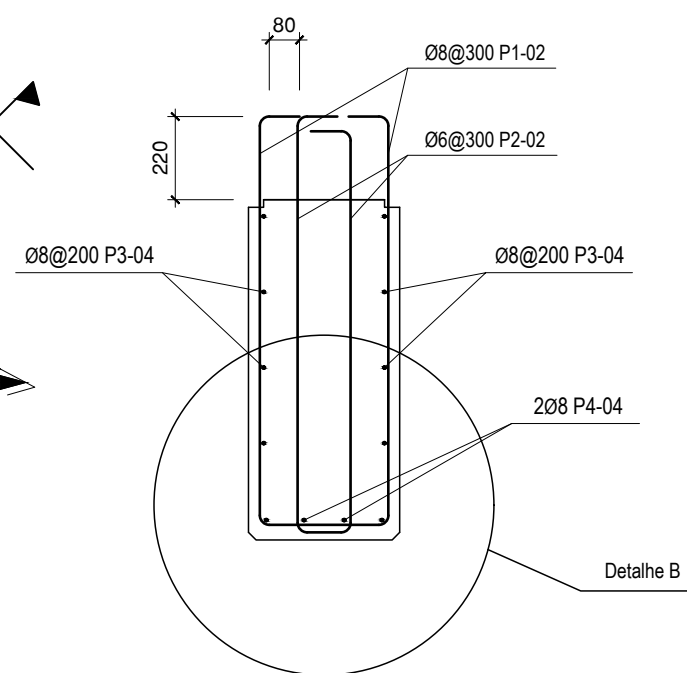
<p>Título TRABALHO DE LICENCIATURA PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS</p>				
<p>Viga RPF pré-tensionada para os vãos de 10 m & 15 m: Disposições e dimensões</p>				
<p>Autor Culpa Virgílio Emílio António</p>	<p>Data Fevereiro de 2023</p>	<p>Desenho nº 03</p>	<p>Escala No desenho</p>	<p>Papel A3</p>



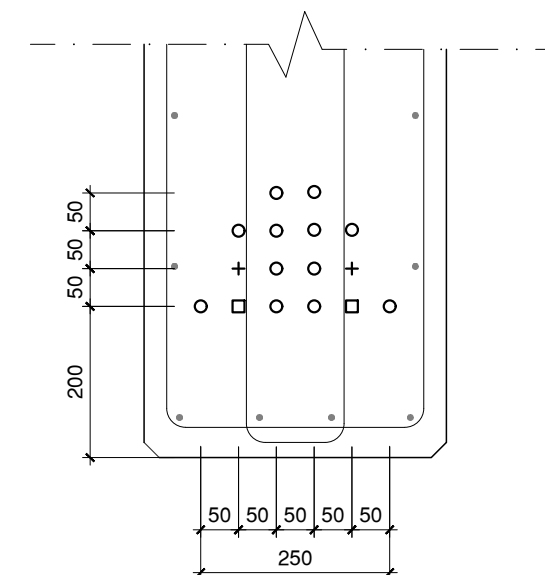
SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras pré-tensionadas
1:20



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras ordinárias
1:20

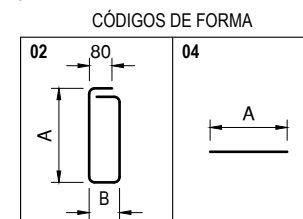


SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA
Armaduras ordinárias
1:20



DETALHE B
Armaduras pré-esforçadas
1:10

- Cordões aderentes em toda a extensão
- + Cordões encamisados por 1,2 m em cada extremidade
- Cordões encamisados por 2,2 m em cada extremidade



QUADRO DE ARMADURAS								
Armadura	Comprimento	A	B	Diâmetro	Espaçamento	Quantidade	Peso un.[kg/m]	Peso total [kg]
P1-02	2660	1080	340	8	300	35	0,395	36,77
P2-02	2460	1080	140	6	300	35	0,222	19,11
P3-04	10340	10340		8	200	10	0,395	40,84
P4-04	10340	10340		8		2	0,395	8,17
Cordões	10400			15,7	50	16	1,18	196,35



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga RPF pré-tensionada para o vão de 10 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

04

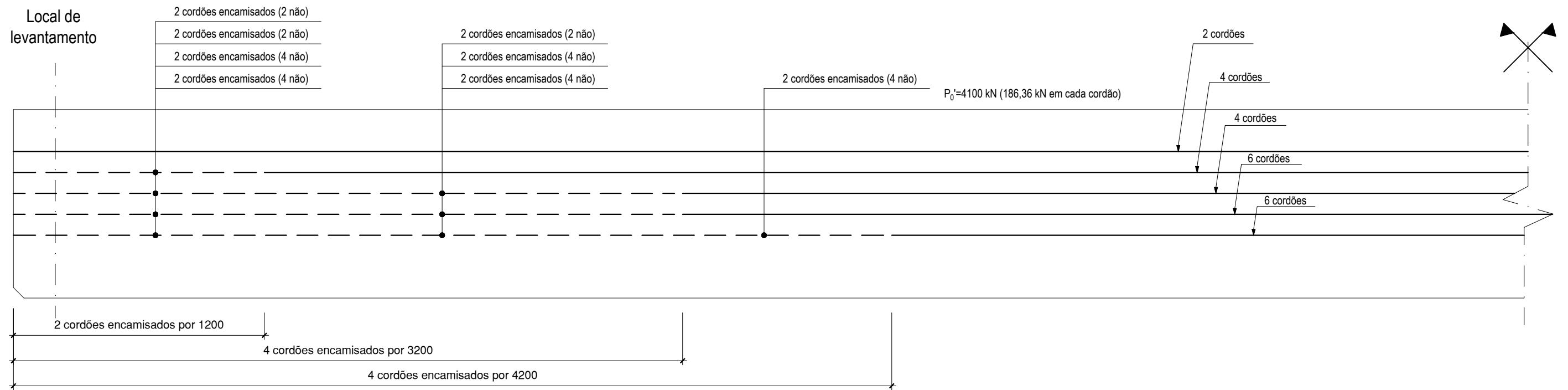
Escala

No desenho

Papel

A3

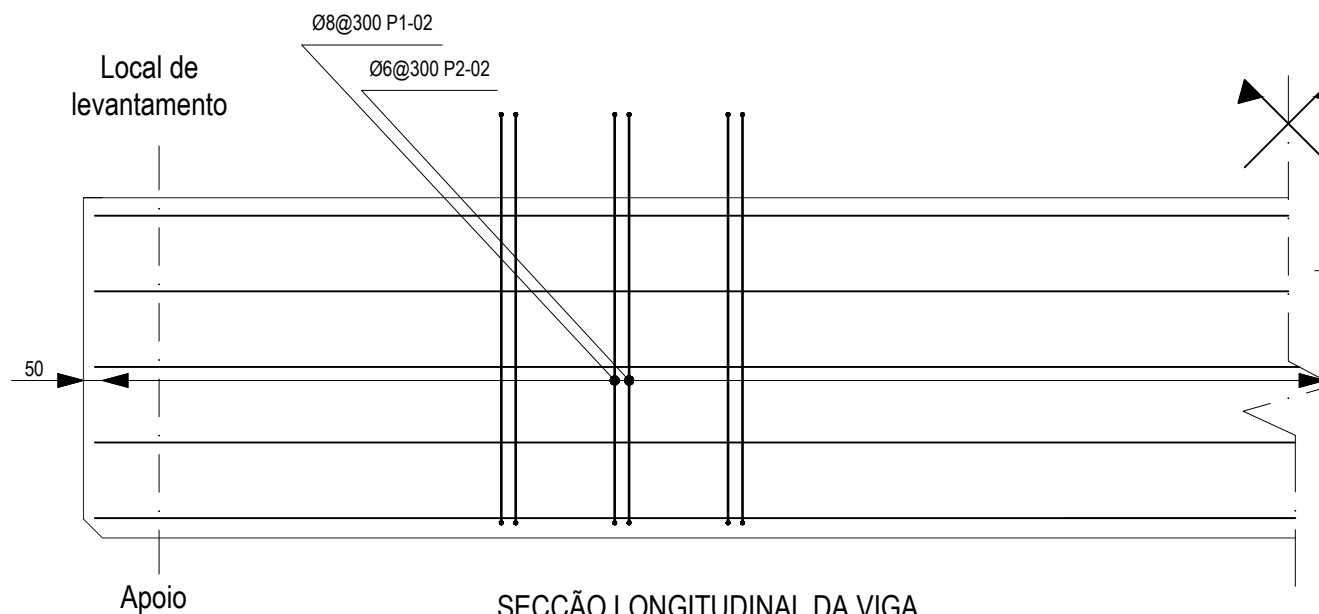
Local de levantamento



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA

Armaduras pré-tensionadas

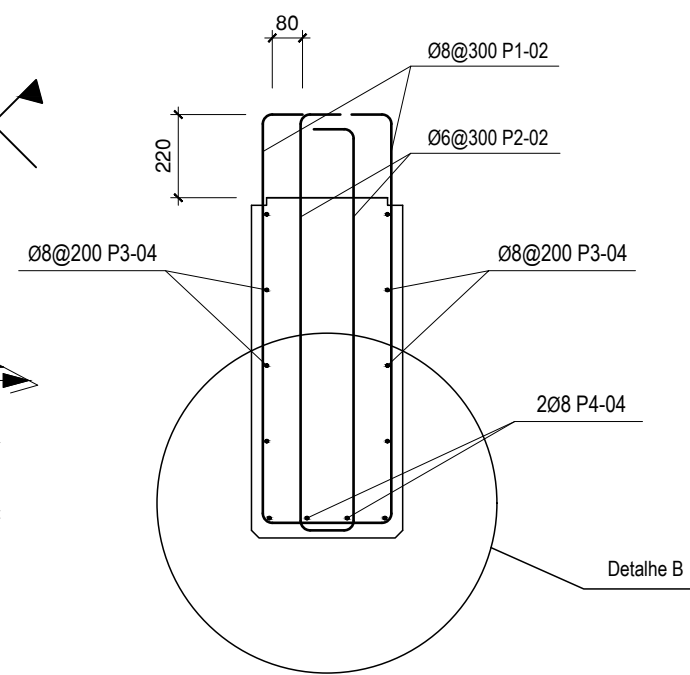
1:20



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA

Armaduras ordinárias

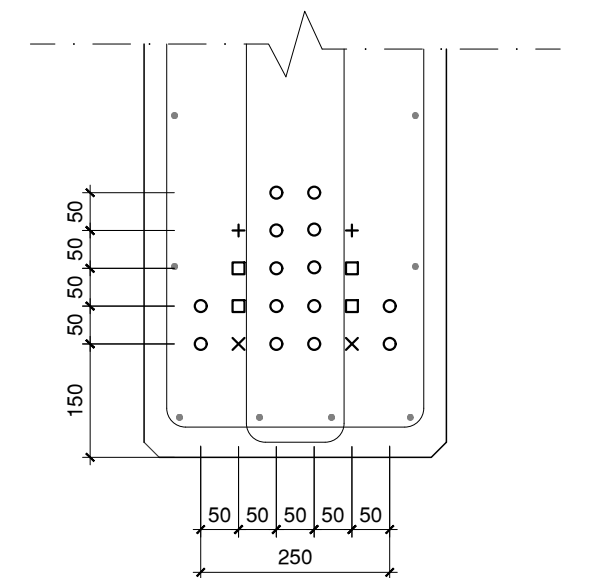
1:20



SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA

Armaduras ordinárias

1:20



DETALHE B

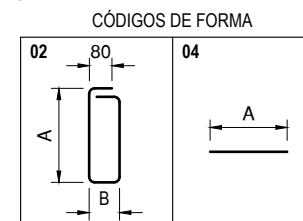
Armaduras pré-esforçadas

1:10

- Cordões aderentes em toda a extensão
- + Cordões encamisados por 1,2 m em cada extremidade
- Cordões encamisados por 3,2 m em cada extremidade
- × Cordões encamisados por 4,2 m em cada extremidade

QUADRO DE ARMADURAS

Armadura	Comprimento	A	B	Diâmetro	Espaçamento	Quantidade	Peso un. [kg/m]	Peso total [kg]
P1-02	2660	1080	340	8	300	52	0,395	54,64
P2-02	2460	1080	140	6	300	52	0,222	28,40
P3-04	15340	15340		8	200	10	0,395	60,59
P4-04	15340	15340		8		2	0,395	12,12
Cordões	15400			15,7	50	22	1,18	399,78



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

1. Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
2. Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
3. Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
4. Vigas para vãos simplesmente apoiados;
5. Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA

PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga RPF pré-tensionada para o vão de 15 m: Armaduras ordinárias e pré-esforçadas

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

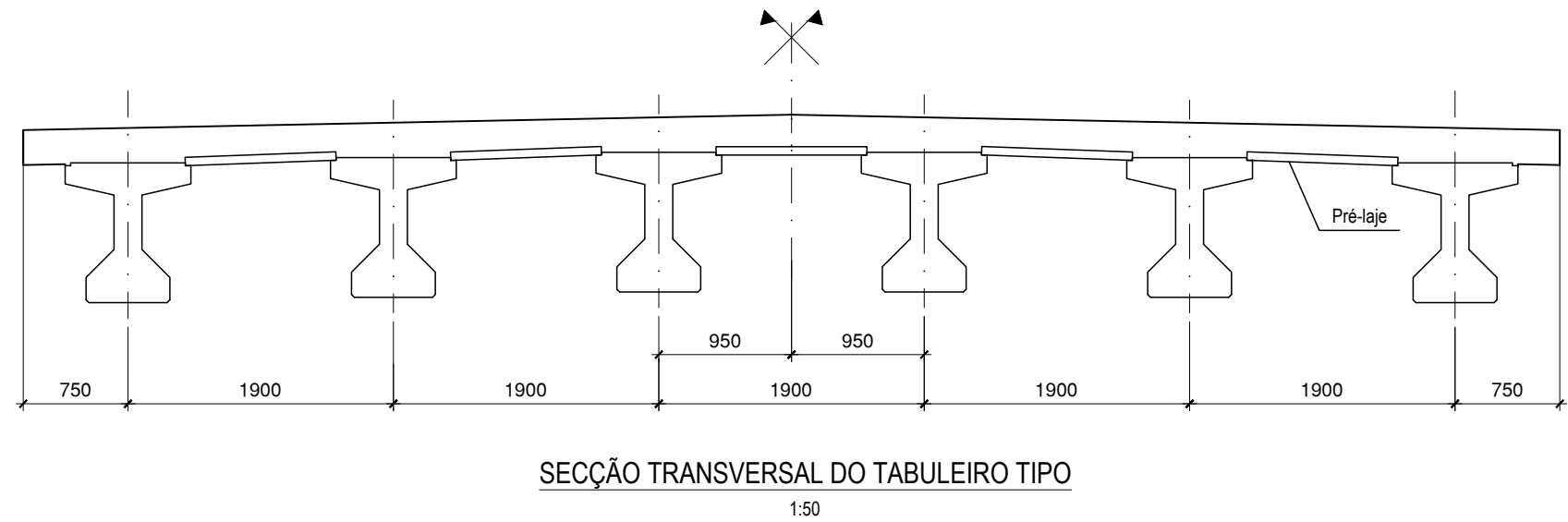
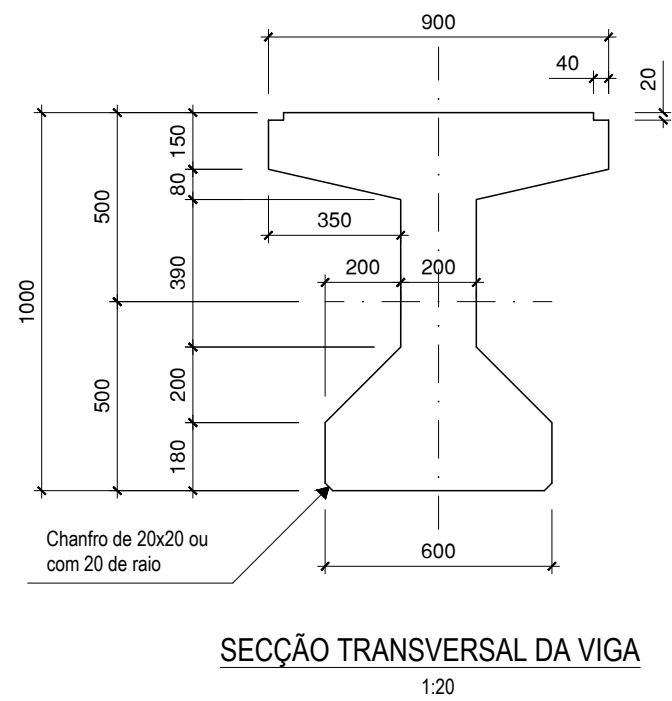
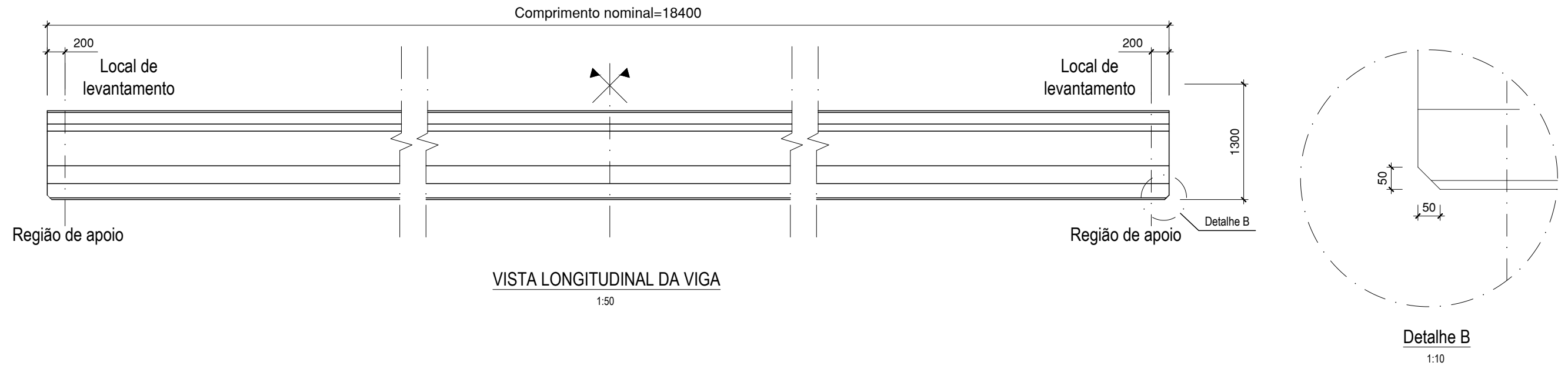
05

Escala

No desenho

Papel

A3



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Titulo

**TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS**

Viga IPF1 pré-tensionada para o vão de 18 m: Disposições & dimensões

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

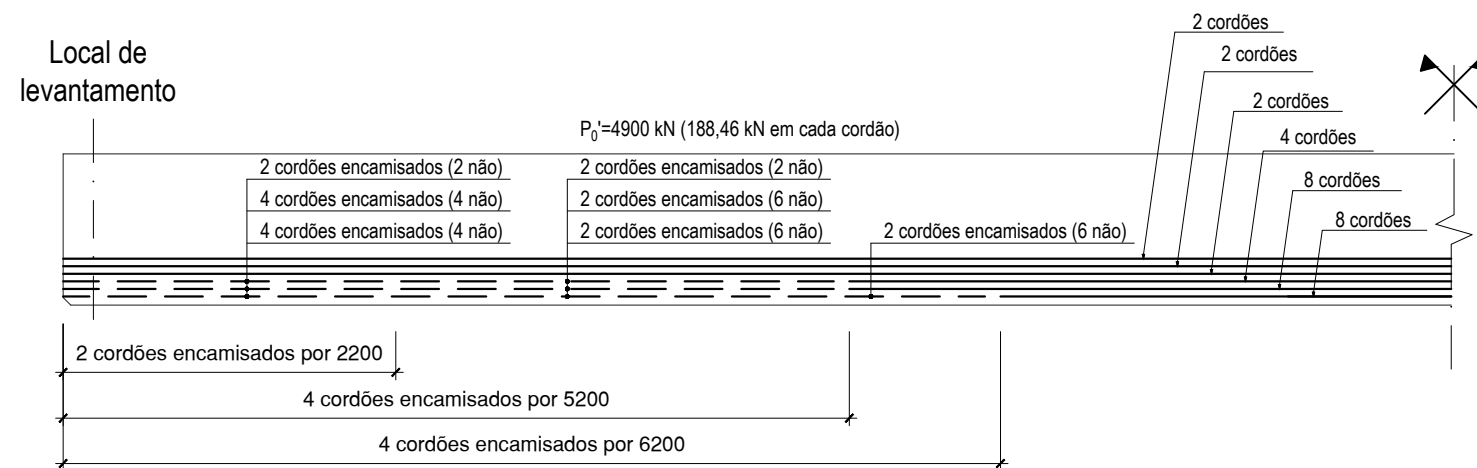
06

Escala

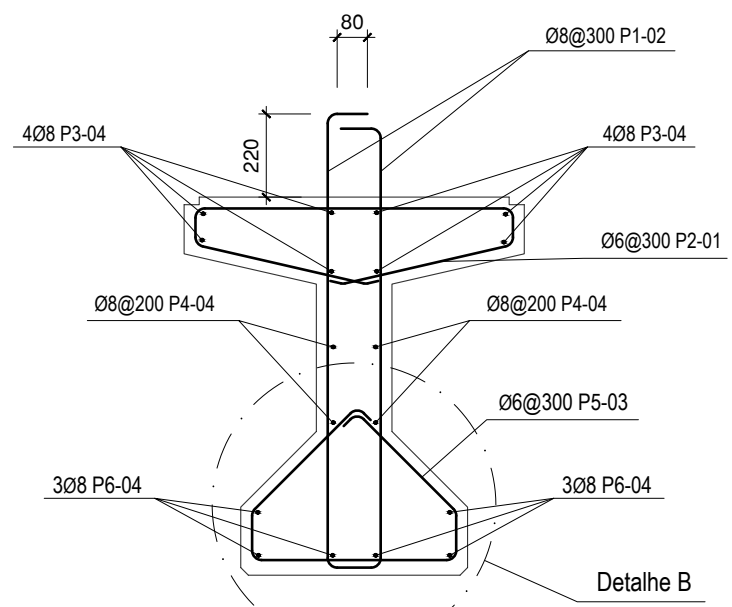
No desenho

Papel

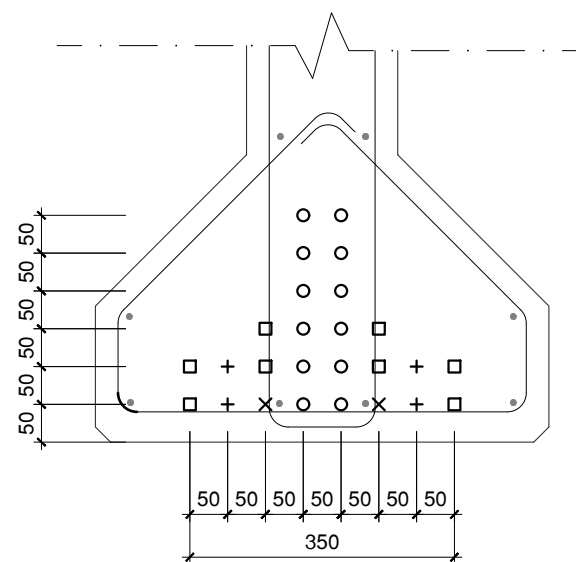
A3



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras pré-tensionadas
1:50

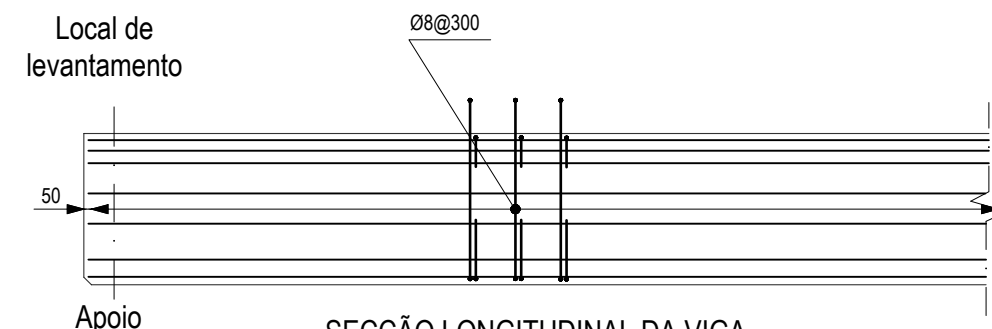


SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA
Armaduras ordinárias
1:20

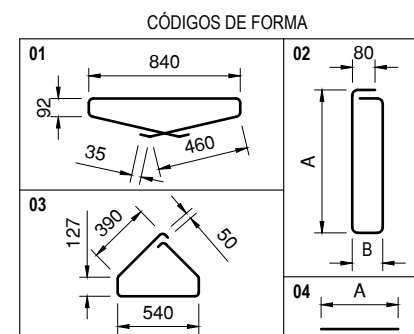


DETALHE B
Armaduras pré-esforçadas
1:10

- Cordões aderentes em toda a extensão
- + Cordões encamisados por 2,2 m em cada extremidade
- Cordões encamisados por 5,2 m em cada extremidade
- × Cordões encamisados por 6,2 m em cada extremidade



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras ordinárias
1:50



QUADRO DE ARMADURAS								
Armadura	Comprimento	A	B	Diâmetro	Espaçamento	Quantidade	Peso un.[kg/m]	Peso total [kg]
P1-02	2660	1180	140	8	300	61	0,395	64,09
P2-01	1992			6	300	61	0,222	26,98
P3-04	18340	18340		8		8	0,395	57,95
P4-04	18340	18340		8	200	4	0,395	28,98
P5-03	1730			6	300	61	0,222	23,43
P6-04	18340	18340		8		6	0,395	43,46
Cordões	18400			15,7	50	26	1,18	564,51



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF1 pré-tensionada para o vão de 18 m: armaduras ordinárias & pré-esforçadas

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

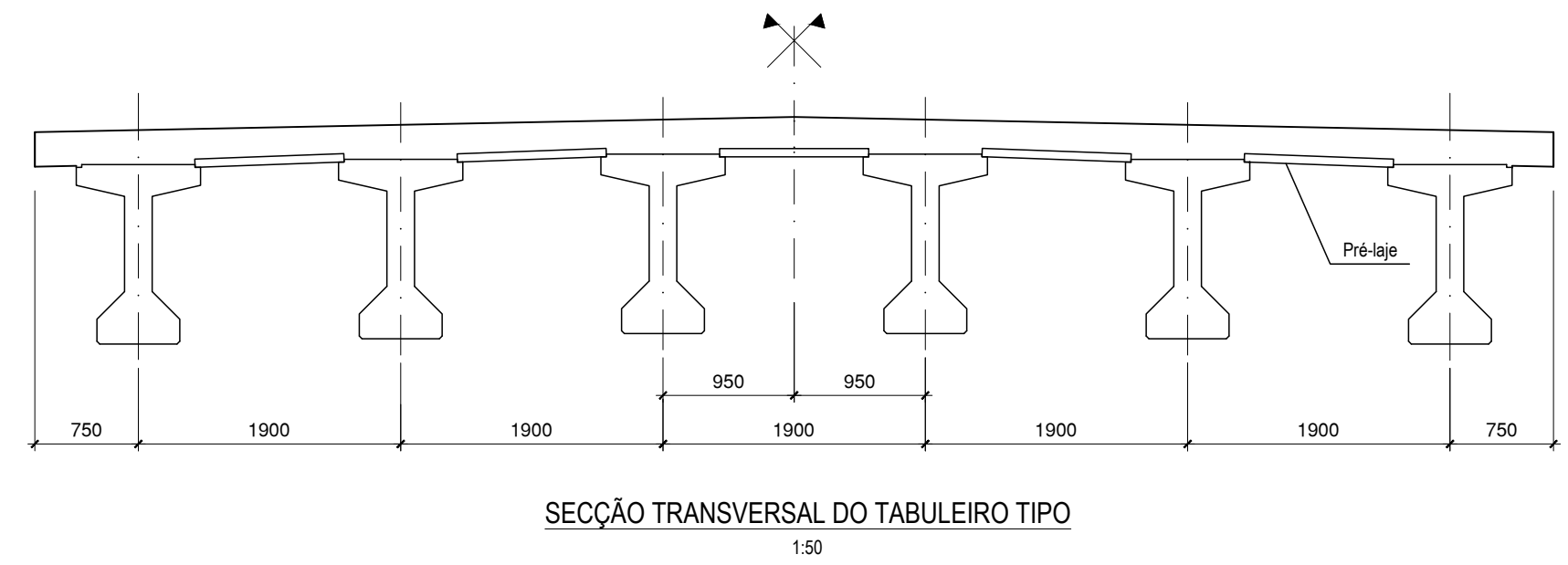
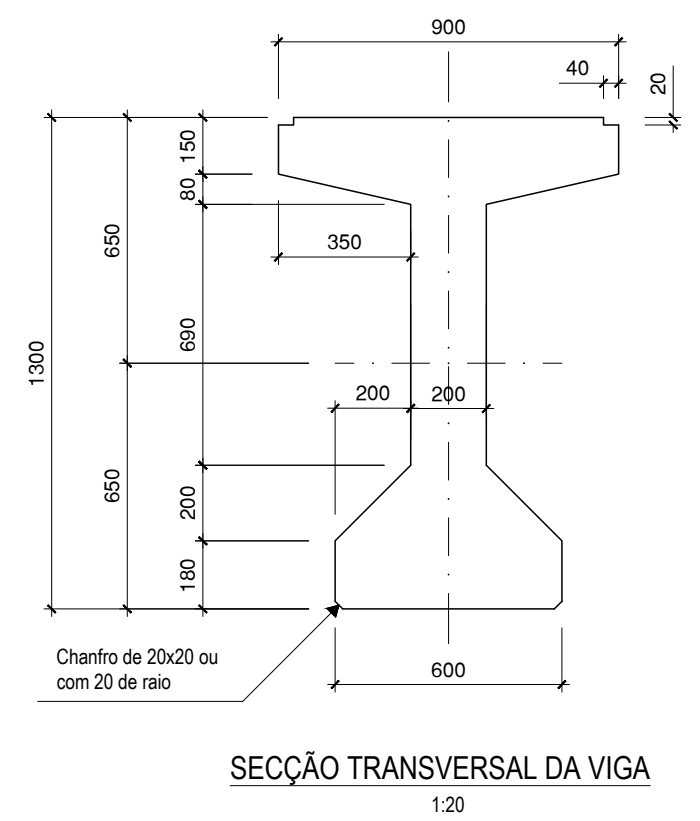
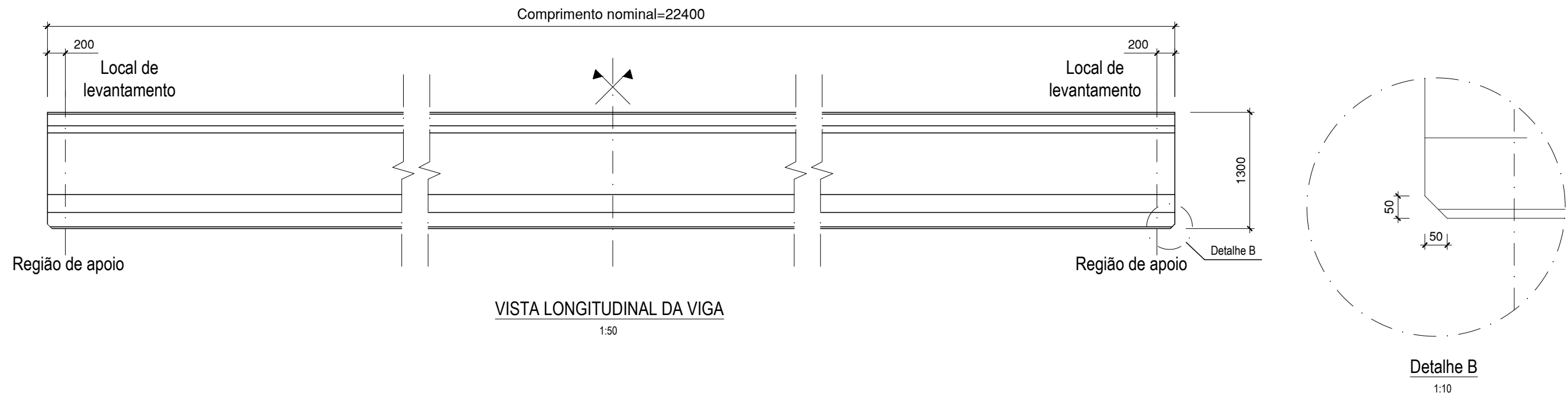
07

Escala

No desenho

Papel

A3



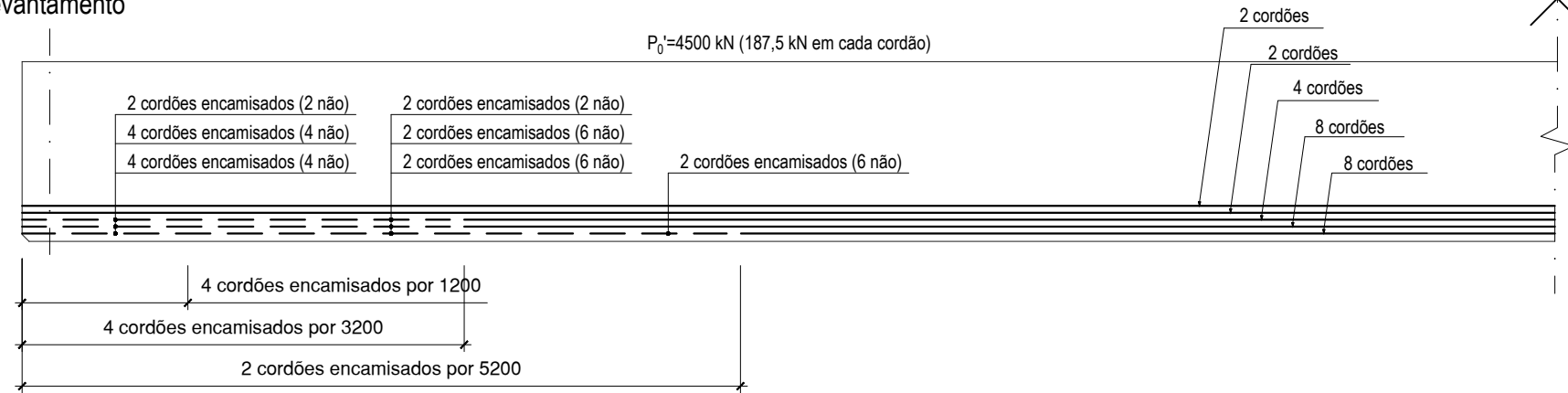
UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

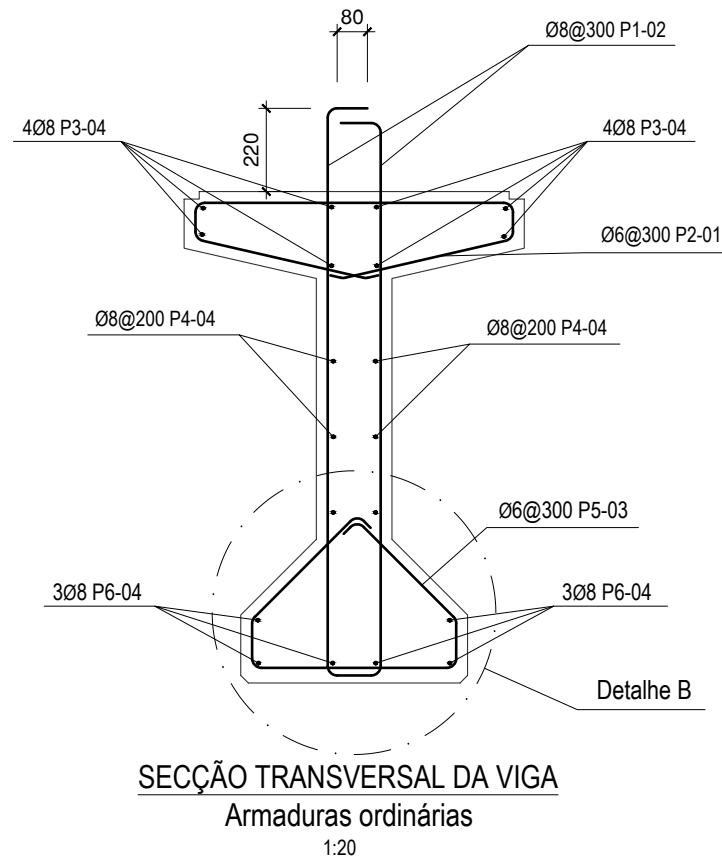
- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título				
TRABALHO DE LICENCIATURA PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS				
Viga IPF2 pré-tensionada para o vão de 22 m: Disposições & dimensões				
Autor	Data	Desenho nº	Escala	Papel
Culpa Virgílio Emílio António	Fevereiro de 2023	08	No desenho	A3

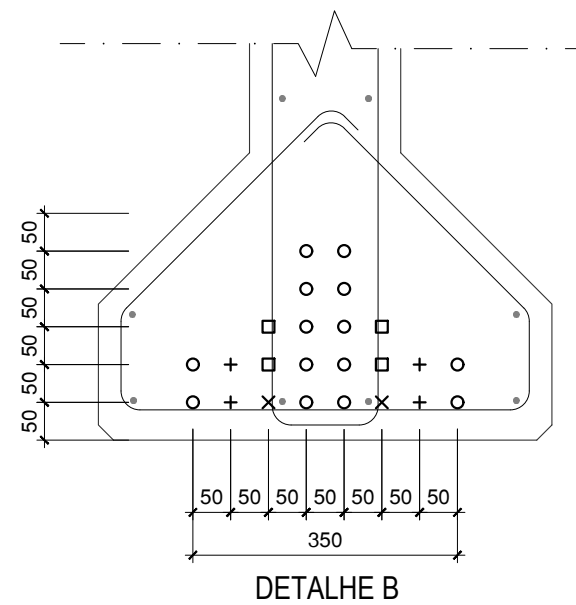
Local de levantamento



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras pré-tensionadas
1:50



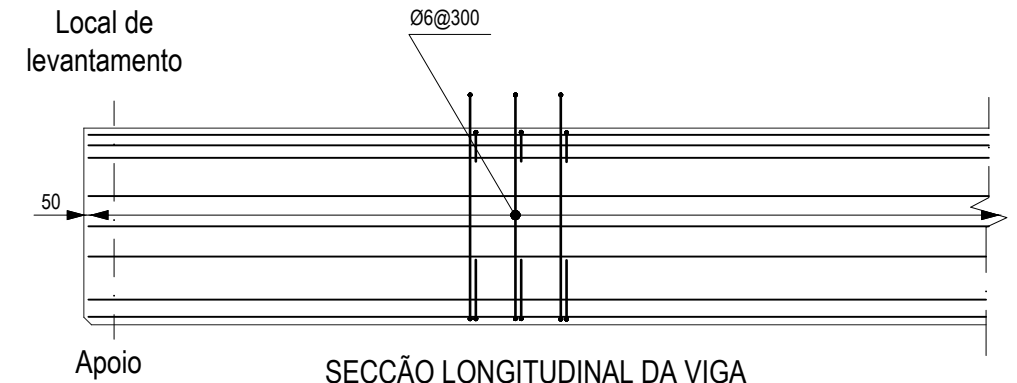
SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA
Armaduras ordinárias
1:20



DETALHE B
Armaduras pré-esforçadas
1:10

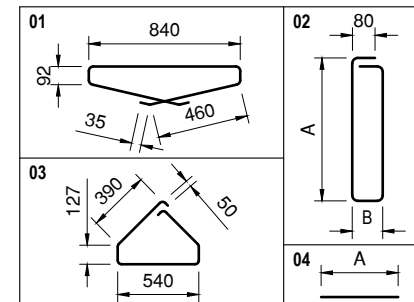
- Cordões aderentes em toda a extensão
- + Cordões encamisados por 1,2 m em cada extremidade
- Cordões encamisados por 3,2 m em cada extremidade
- × Cordões encamisados por 5,2 m em cada extremidade

Local de levantamento



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras ordinárias
1:50

CÓDIGOS DE FORMA



QUADRO DE ARMADURAS

Armadura	Comprimento	A	B	Diâmetro	Espaçamento	Quantidade	Peso un.[kg/m]	Peso total [kg]
P1-02	3260	1480	140	6	300	75	0,222	54,28
P2-01	1992			6	300	75	0,222	33,17
P3-04	22340	22340		8		8	0,395	70,59
P4-04	22340	22340		8	200	6	0,395	52,95
P5-03	1730			6	300	75	0,222	28,80
P6-04	22340	22340		8		6	0,395	52,95
Cordões	22400			15,7	50	24	1,18	634,37



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF2 pré-tensionada para o vão de 22 m: armaduras ordinárias & pré-esforçadas

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

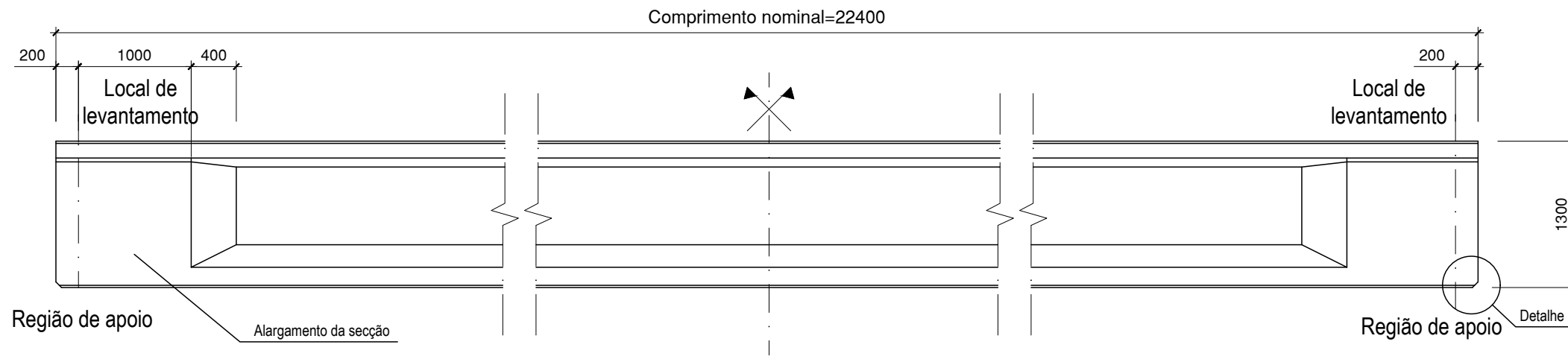
09

Escala

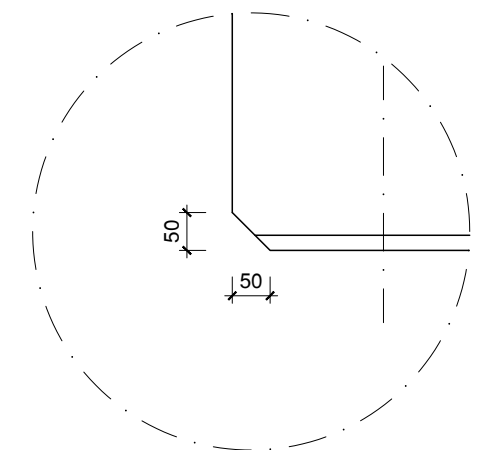
No desenho

Papel

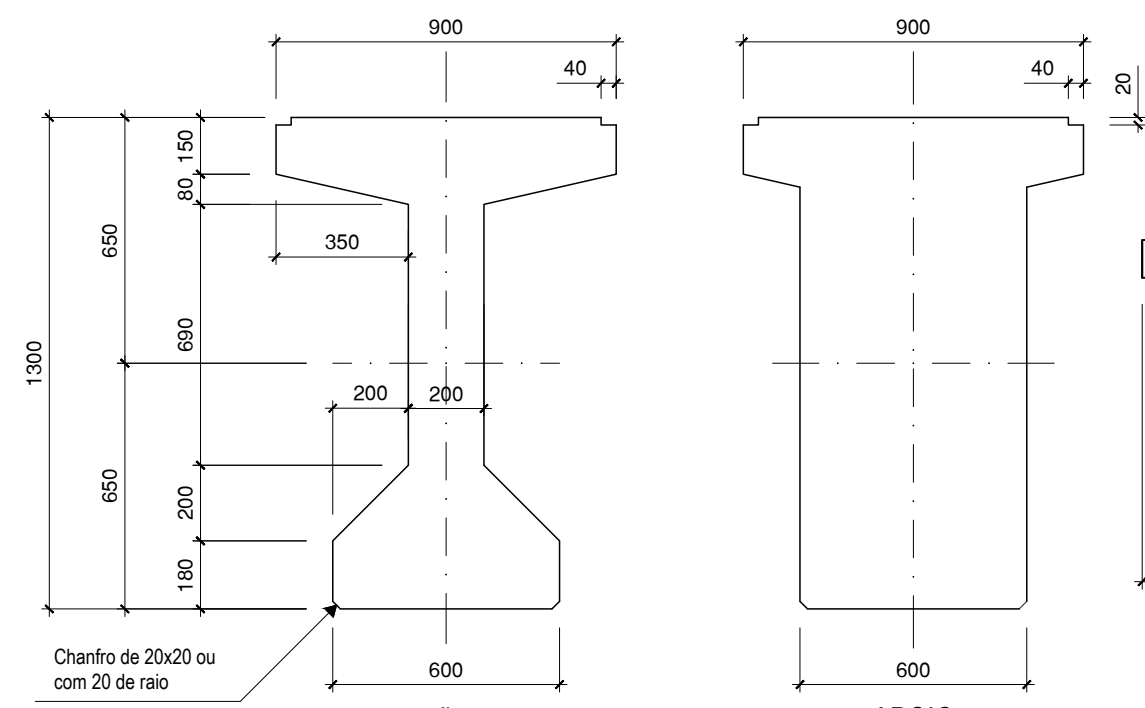
A3



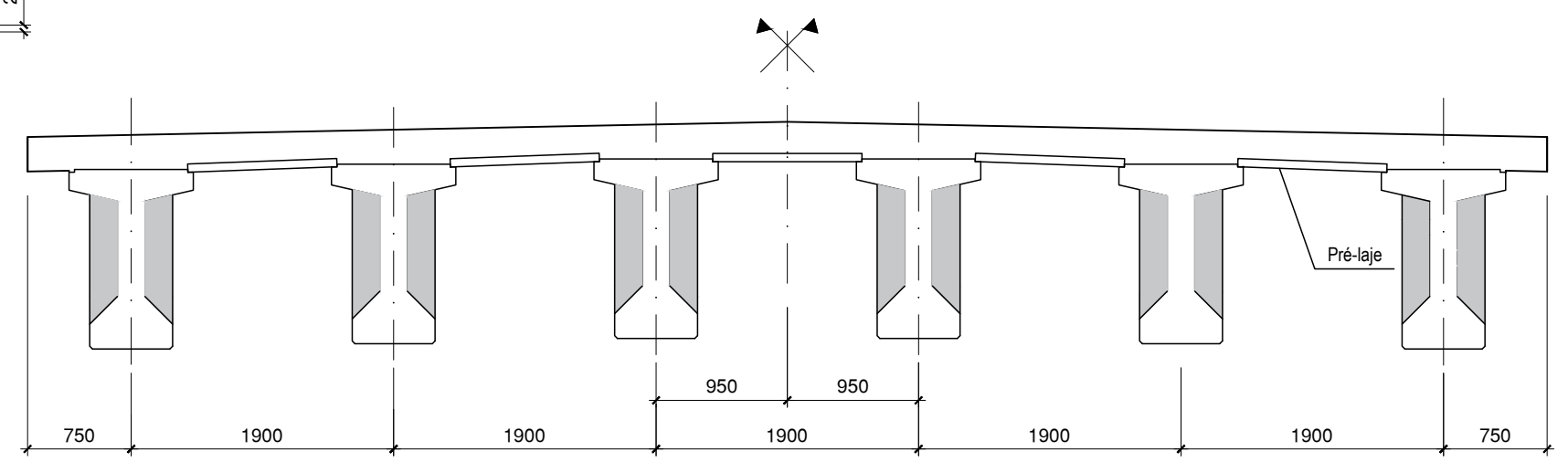
VISTA LONGITUDINAL DA VIGA
1:50



Detalhe B
1:10



SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA
1:20



SECÇÃO TRANSVERSAL DO TABULEIRO TIPO
1:50

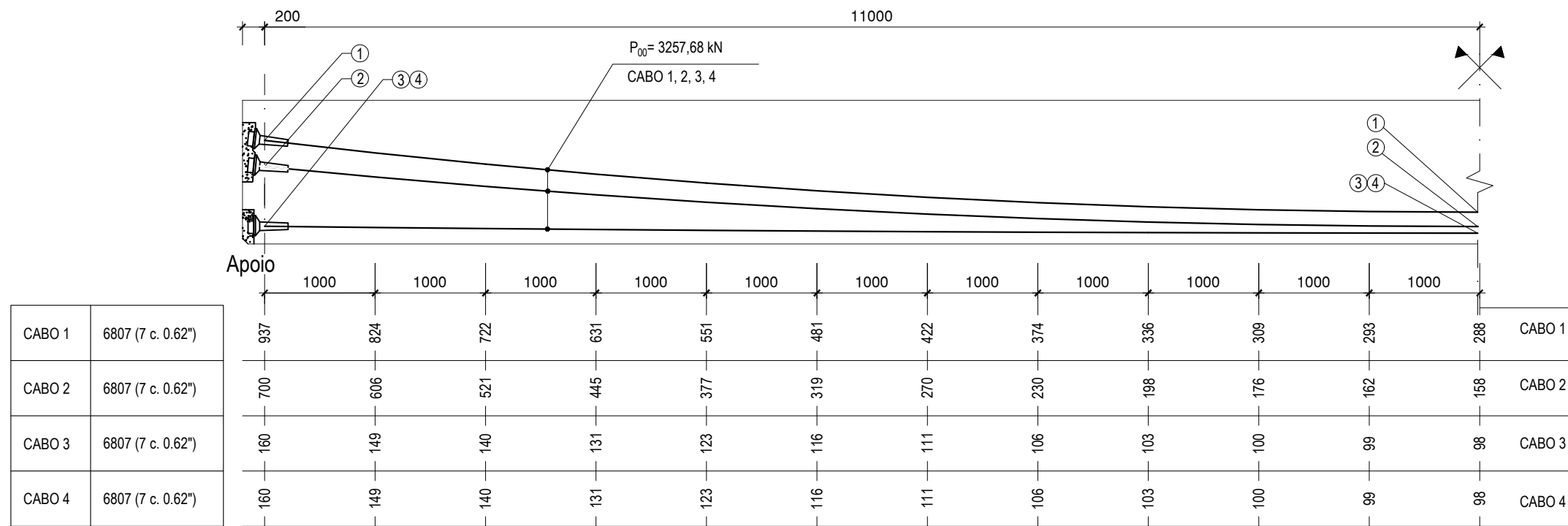


UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

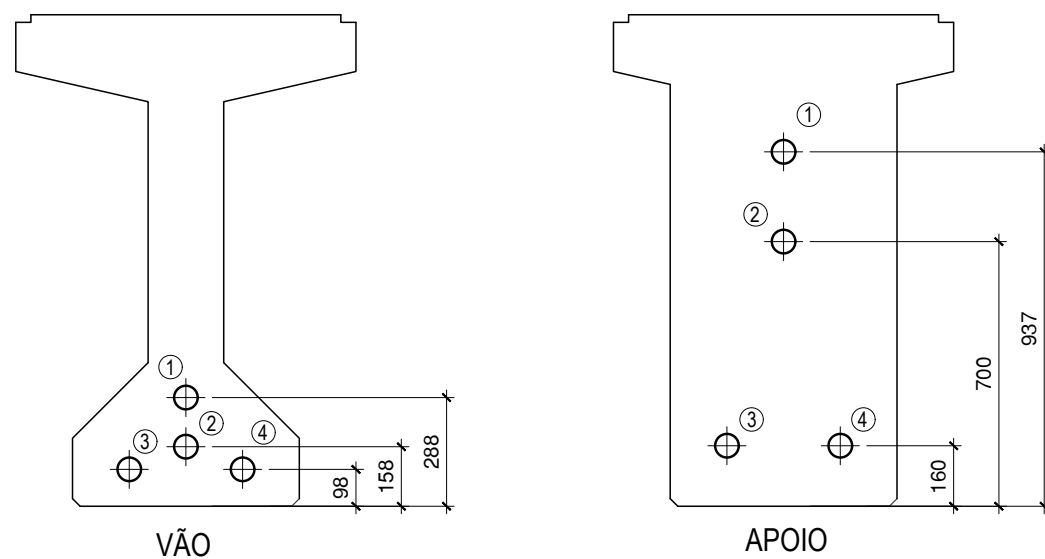
1. Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
2. Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
3. Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
4. Vigas para vãos simplesmente apoiados;
5. Todas as dimensões em milímetros.

<p>Título TRABALHO DE LICENCIATURA PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS</p>				
<p>Viga IPF2 pós-tensionada para o vão de 22 m: Disposições e dimensões</p>				
Autor	Data	Desenho nº	Escala	Papel
Culpa Virgílio Emílio António	Fevereiro de 2023	10	No desenho	A3



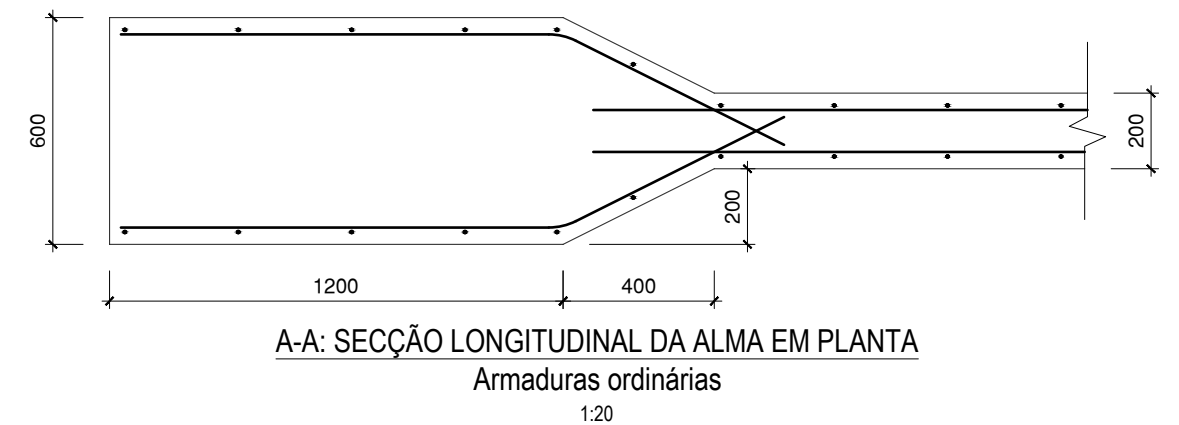
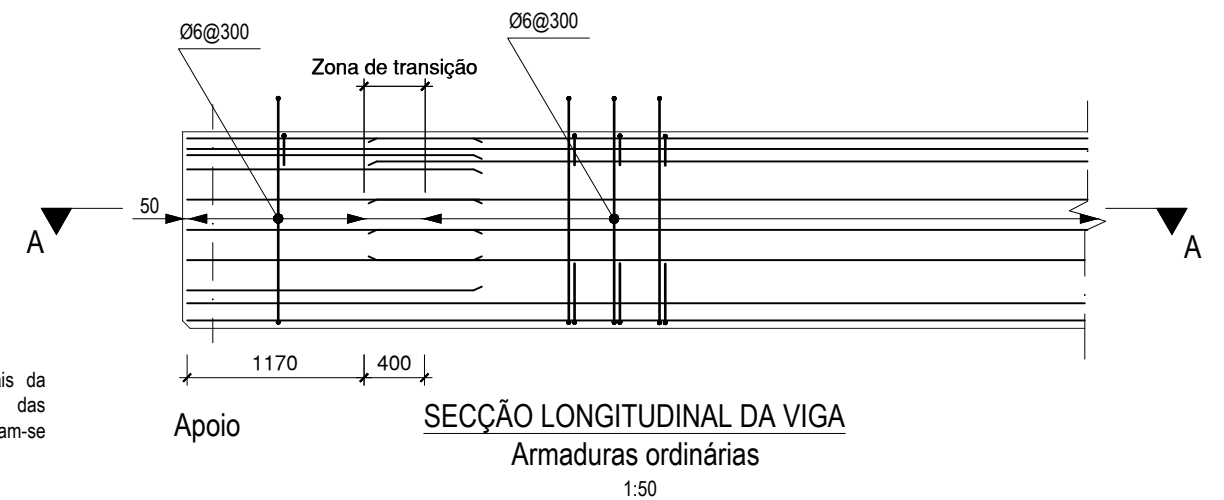
SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras pós-tensionadas
1:50

Nota:
As cotas indicadas no traçado são medidas na vertical,
tendo como referência a superfície inferior da viga.



SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA
Cabos de pré-esforço
1:20

Nota: As secções transversais da
viga para a representação das
armaduras ordinárias encontram-se
apresentados na folha 21.



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

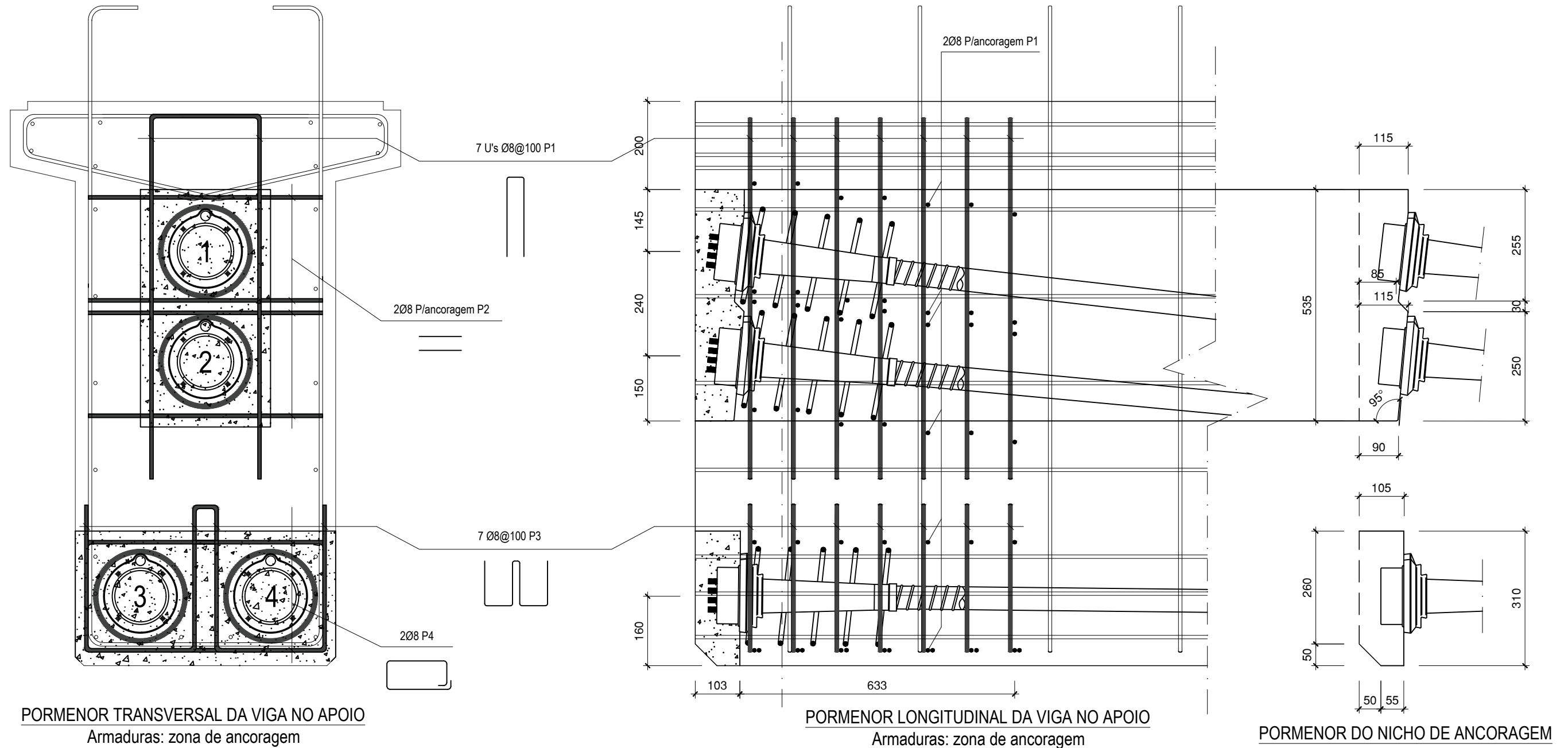
NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título
TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF2 pós-tensionada para o vão de 22 m: Armaduras

Autor Culpa Virgílio Emílio António	Data Fevereiro de 2023	Desenho nº 11	Escala No desenho	Papel A3
--	---------------------------	------------------	----------------------	-------------



ORDEM DE TENSIONAMENTO (P₀)

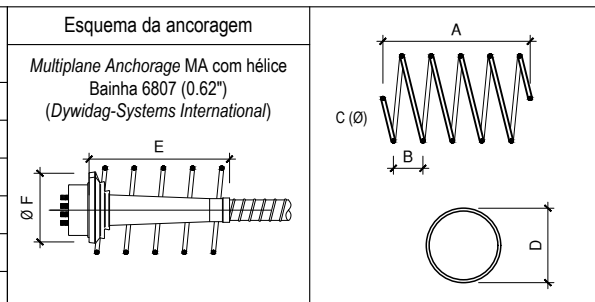
- 1.º CABO 2 - 1150 kN
- 2.º CABO 1 - 1150 kN
- 3.º CABO 3 - 1150 kN
- 4.º CABO 4 - 1150 kN

LEGENDA:

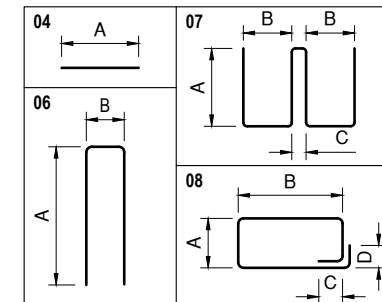
	Armaduras ordinárias
	Armaduras de reforço de ancoragem
	A betonar em segunda fase com betão não retráctil

Dimensão	Bainha 6807 (0.62")
A	360
B	75
C (Ø)	12
D	65
E	310
Ø F	170

QUADRO DE HÉLICES/BAINHAS



CÓDIGOS DE FORMA



QUADRO DE ARMADURAS

Armadura	Código de forma	A	B	C	D
P1	06	840	250		
P2	04	540			
P3	07	340	245	50	
P4	08	240	540	80	80



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

1. Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
2. Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
3. Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
4. Vigas para vãos simplesmente apoiados;
5. Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF2 pós-tensionada para o vão de 22 m: Detalhes de ancoragem

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho n.º

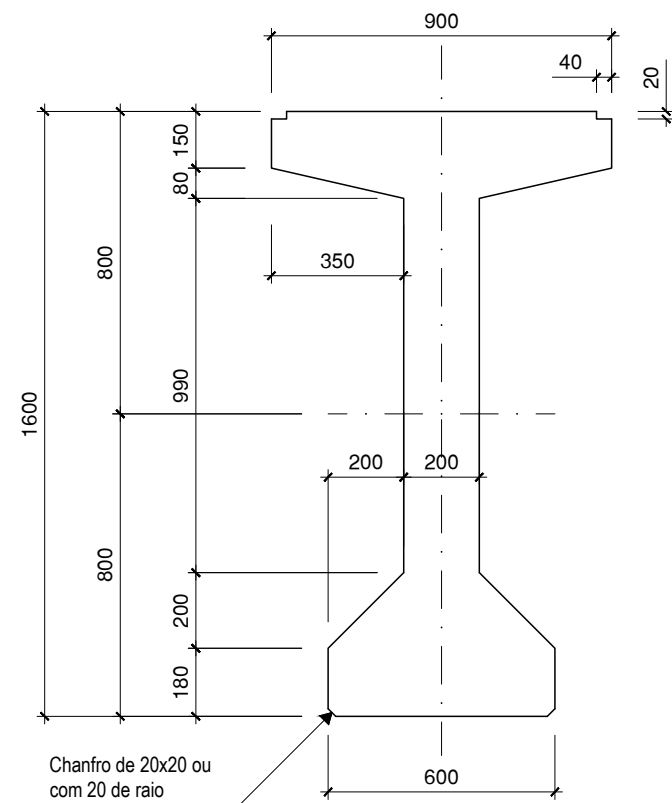
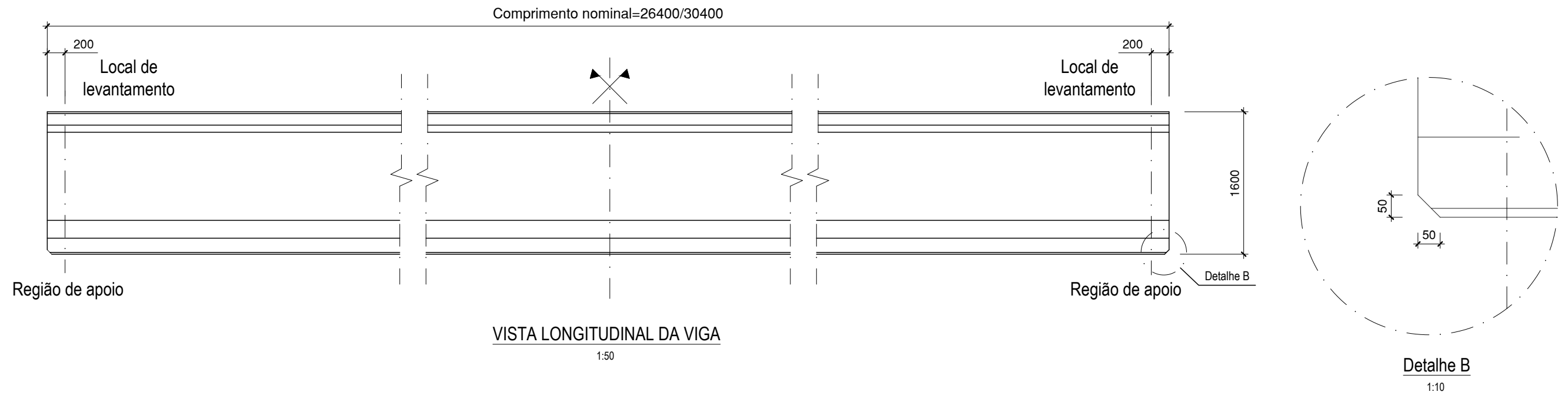
12

Escala

1:10

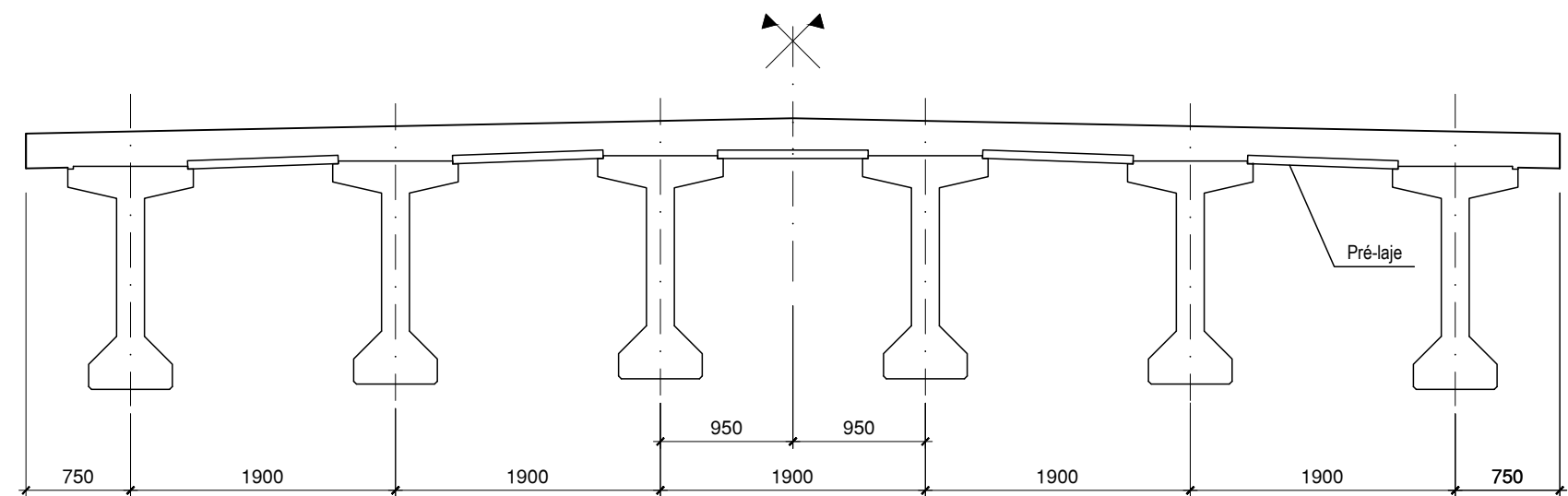
Papel

A3



SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA

1:20



SECÇÃO TRANSVERSAL DO TABULEIRO TIPO

1:50



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF3 pré-tensionada para os vãos de 26 m & 30 m: Disposições & dimensões

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

13

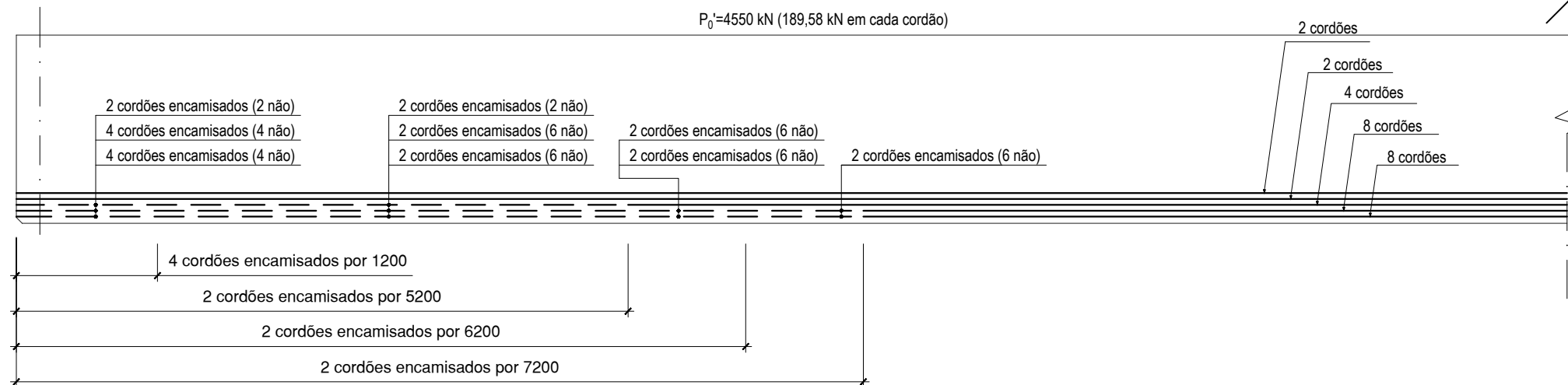
Escala

No desenho

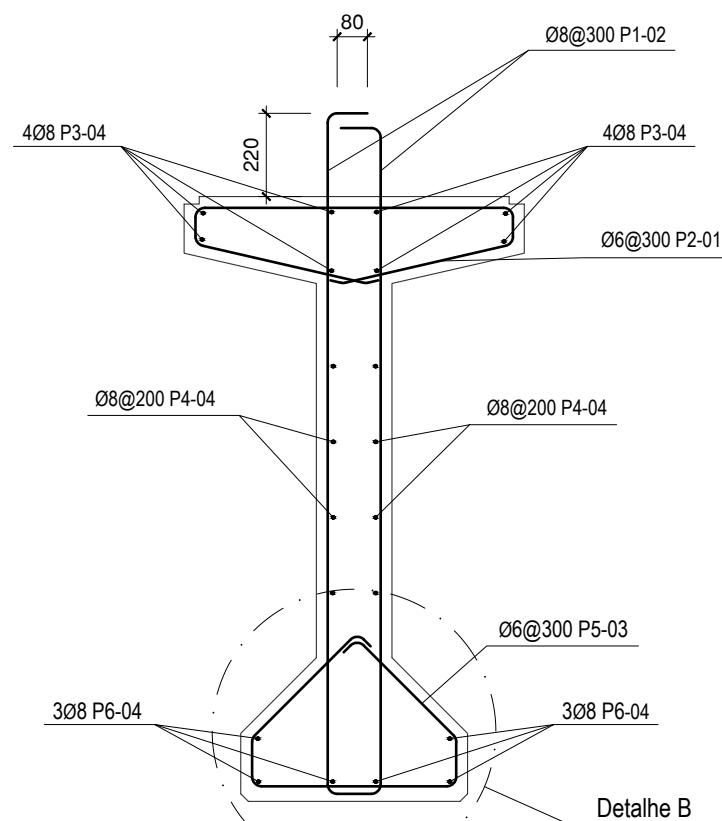
Papel

A3

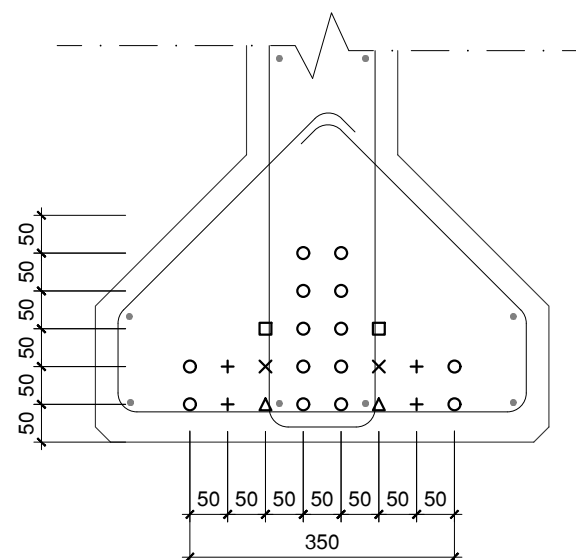
Local de levantamento



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras pré-tensionadas
1:50



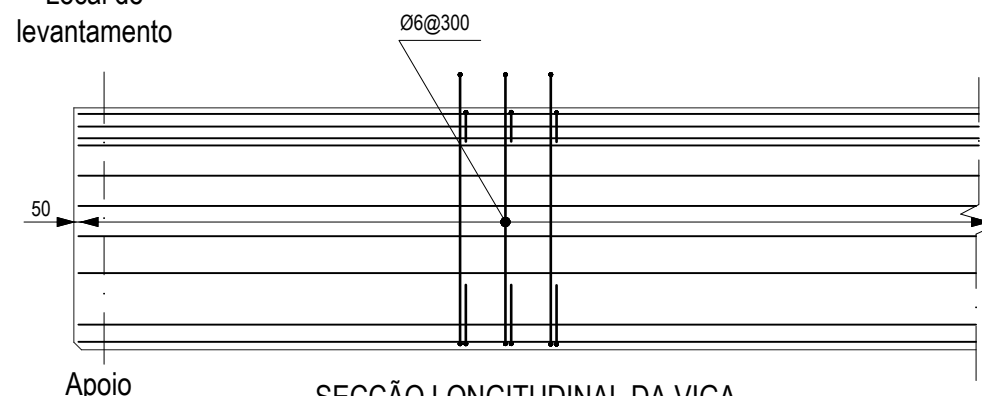
SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA
Armaduras ordinárias
1:20



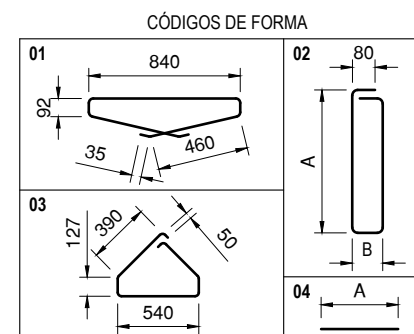
DETALHE B
Armaduras pré-esforçadas
1:10

- Cordões aderentes em toda a extensão
- + Cordões encamisados por 1,2 m em cada extremidade
- Cordões encamisados por 5,2 m em cada extremidade
- × Cordões encamisados por 6,2 m em cada extremidade
- △ Cordões encamisados por 7,2 m em cada extremidade

Local de levantamento



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras ordinárias
1:50



CÓDIGOS DE FORMA

QUADRO DE ARMADURAS

Armadura	Comprimento	A	B	Diâmetro	Espaçamento	Quantidade	Peso un.[kg/m]	Peso total [kg]
P1-02	3880	1780	140	6	300	88	0,222	75,80
P2-01	1992			6	300	88	0,222	38,92
P3-04	26340	26340		8		8	0,395	83,23
P4-04	26340	26340		8	200	8	0,395	83,23
P5-03	1730			6	300	88	0,222	33,80
P6-04	26340	26340		8		6	0,395	62,43
Cordões	26400			15,7	50	24	1,18	747,65



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF3 pré-tensionada para o vão de 26 m: armaduras ordinárias & pré-esforçadas

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

14

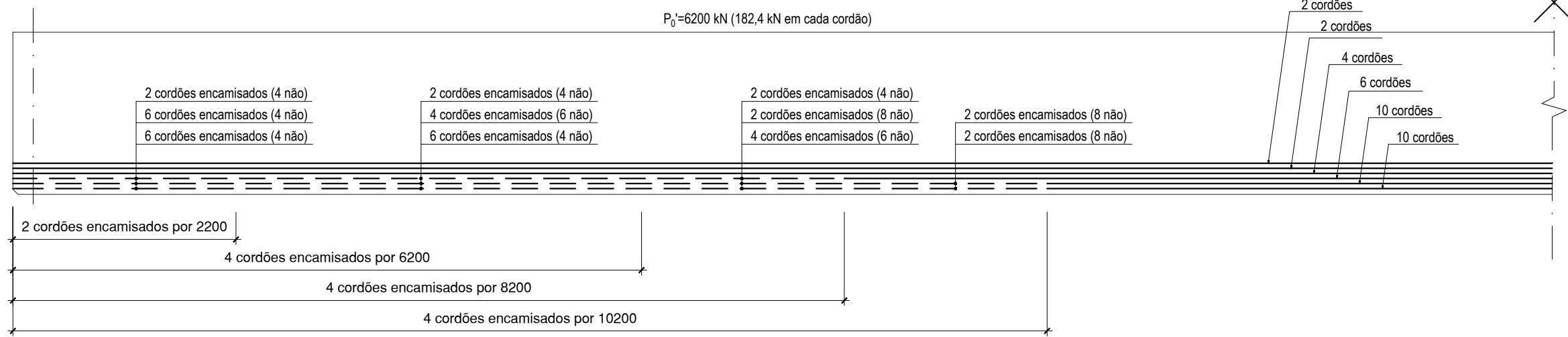
Escala

No desenho

Papel

A3

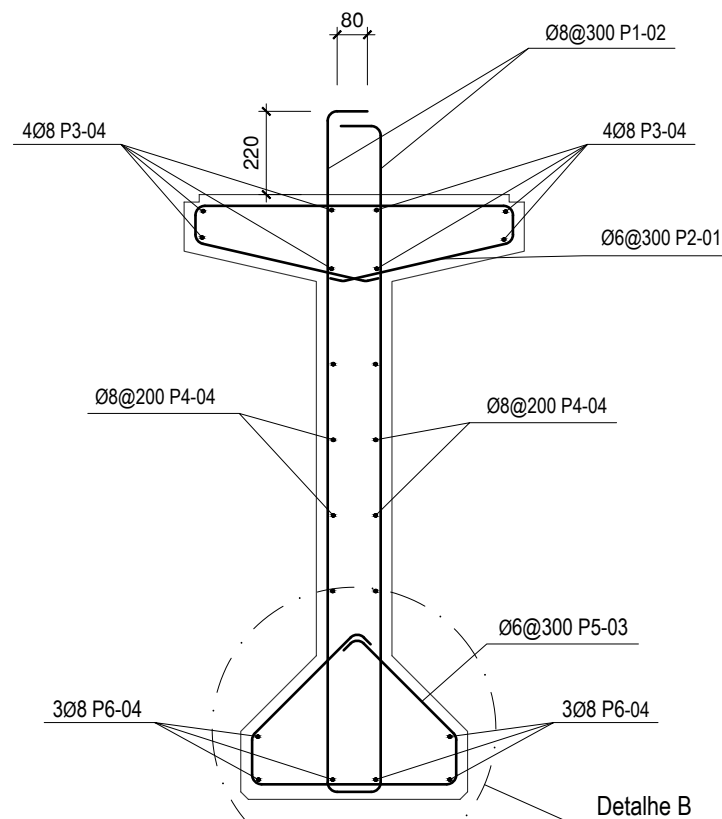
Local de levantamento



SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA

Armaduras pré-tensionadas

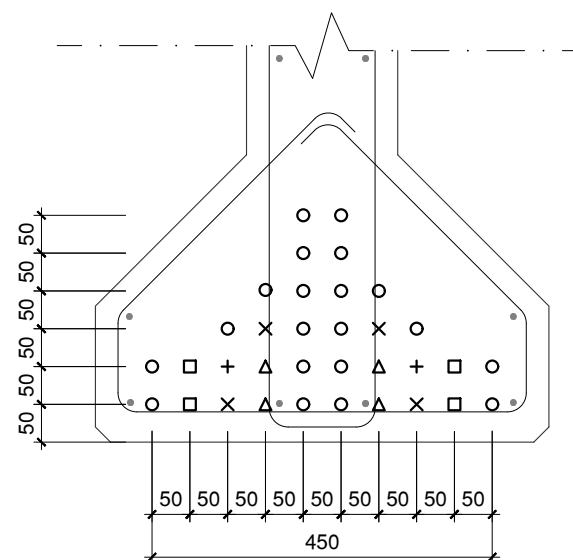
1:50



SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA

Armaduras ordinárias

1:20



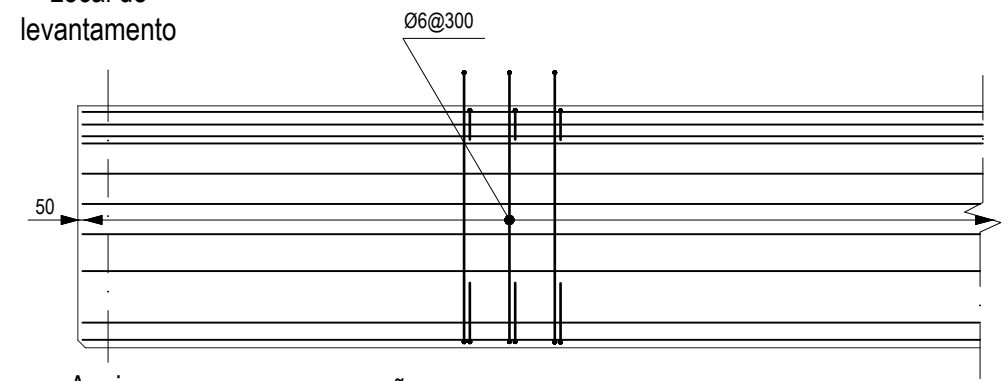
DETALHE B

Armaduras pré-esforçadas

1:10

- Cordões aderentes em toda a extensão
- + Cordões encamisados por 2,2 m em cada extremidade
- Cordões encamisados por 6,2 m em cada extremidade
- × Cordões encamisados por 8,2 m em cada extremidade
- △ Cordões encamisados por 10,2 m em cada extremidade

Local de levantamento

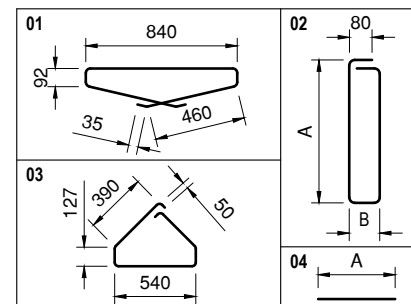


SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA

Armaduras ordinárias

1:50

CÓDIGOS DE FORMA



QUADRO DE ARMADURAS

Armadura	Comprimento	A	B	Diâmetro	Espaçamento	Quantidade	Peso un. [kg/m]	Peso total [kg]
P1-02	3880	1780	140	6	300	102	0,222	87,86
P2-01	1992			6	300	102	0,222	45,11
P3-04	30340	30340		8		8	0,395	95,87
P4-04	30340	30340		8	200	8	0,395	95,87
P5-03	1730			6	300	102	0,222	39,17
P6-04	30340	30340		8		6	0,395	71,91
Cordões	30400			15,7	50	34	1,18	1219,65



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA

PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF3 pré-tensionada para o vão de 30 m: armaduras ordinárias & pré-esforçadas

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

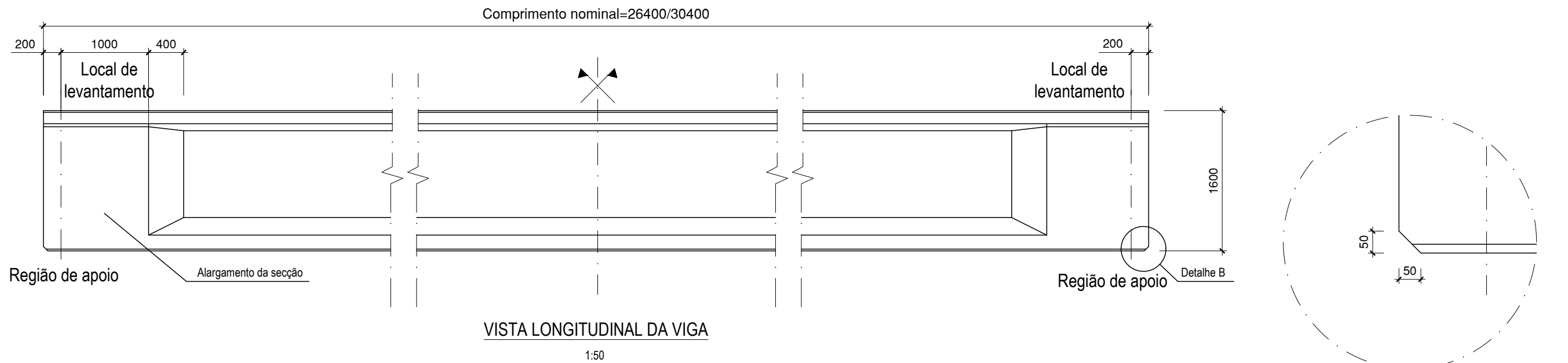
15

Escala

No desenho

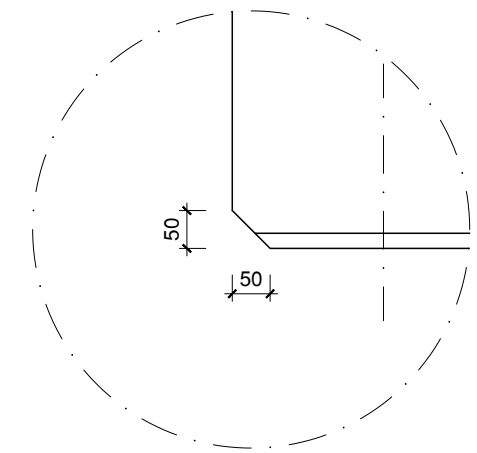
Papel

A3



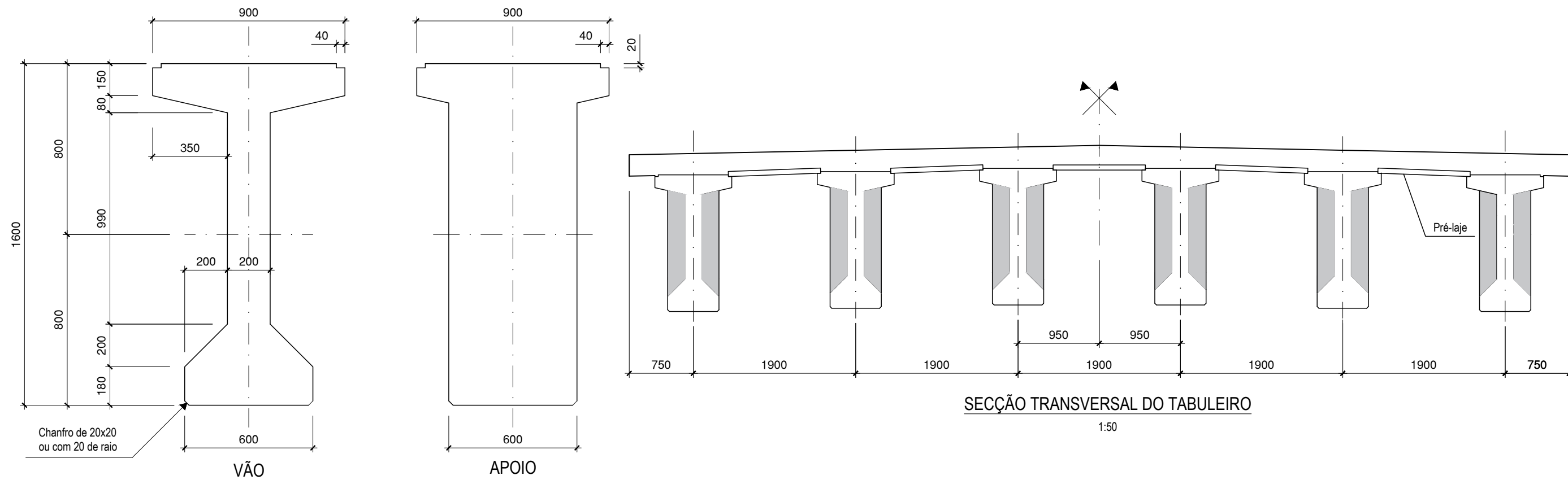
VISTA LONGITUDINAL DA VIGA

1:50



Detalhe B

1:10



SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA

1:20

SEÇÃO TRANSVERSAL DO TABULEIRO

1:50



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF3 pós-tensionada para os vãos de 26 & 30 m: Disposições e dimensões

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

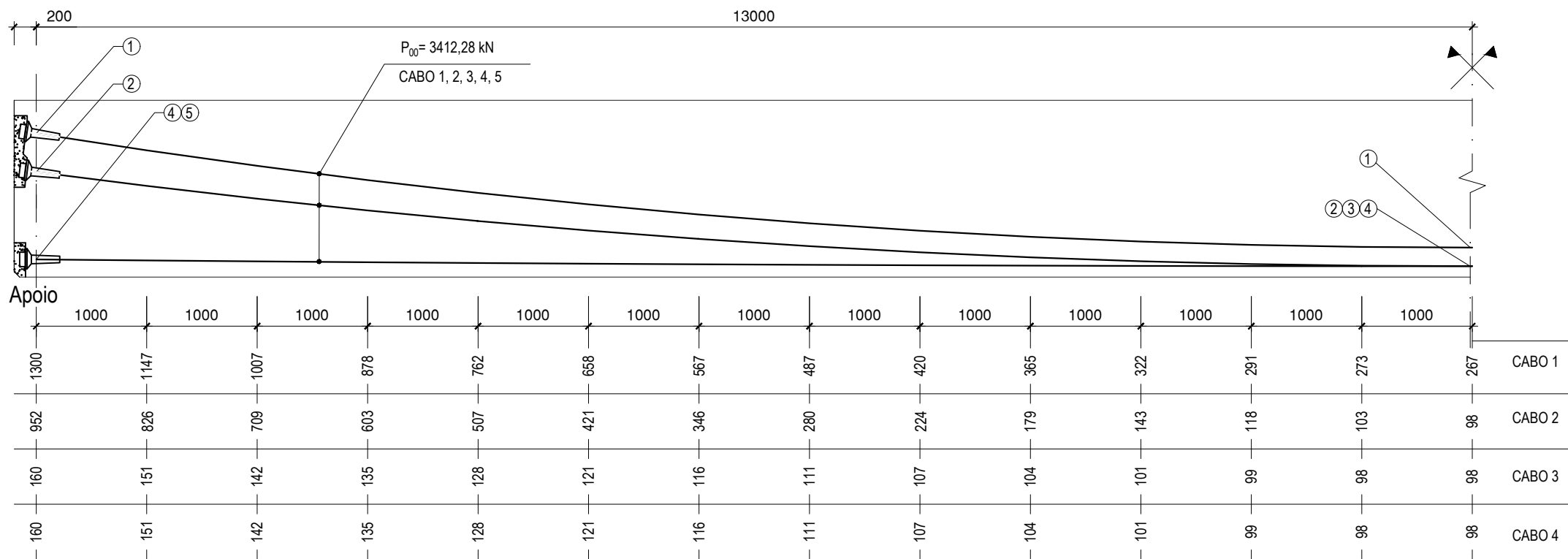
16

Escala

No desenho

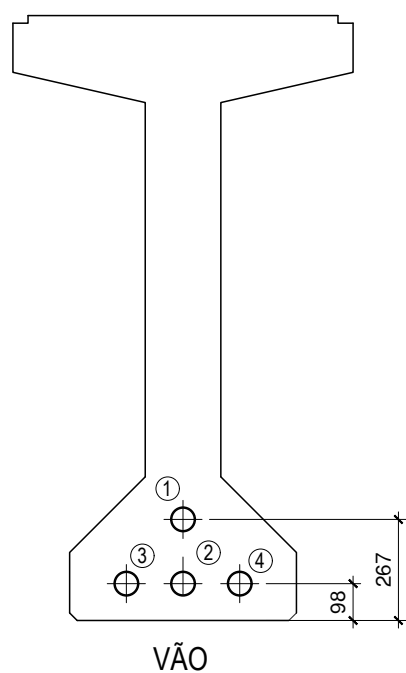
Papel

A3

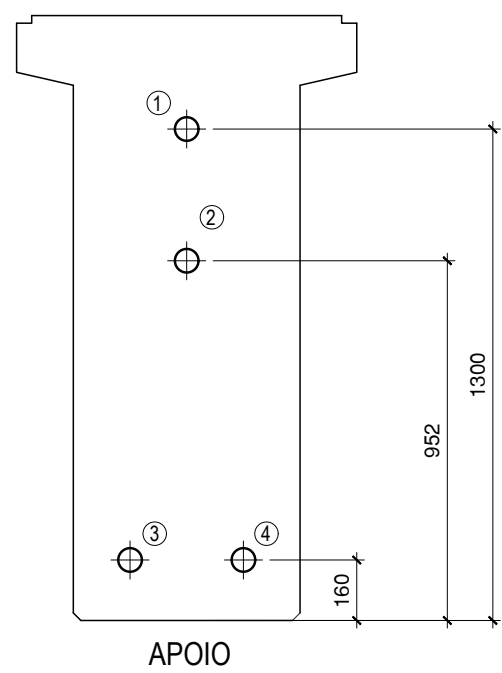


SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
Armaduras pós-tensionadas
1:50

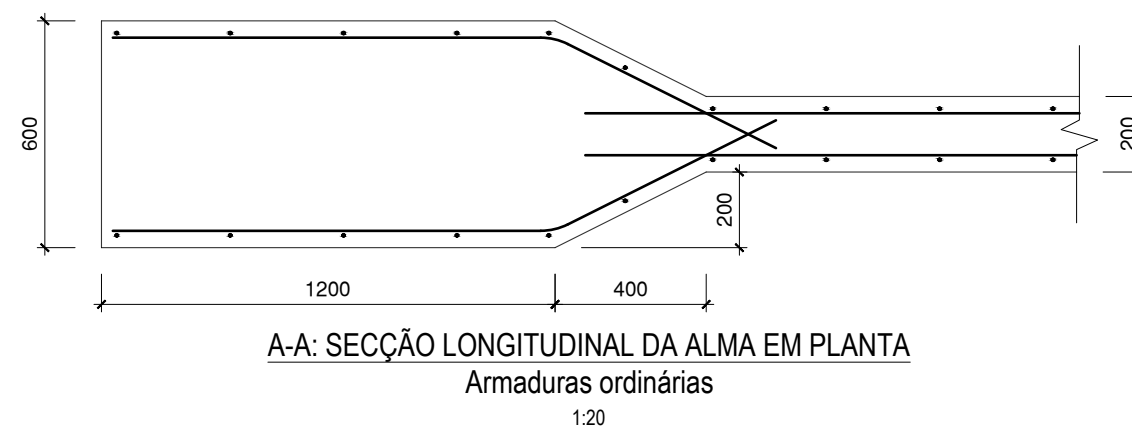
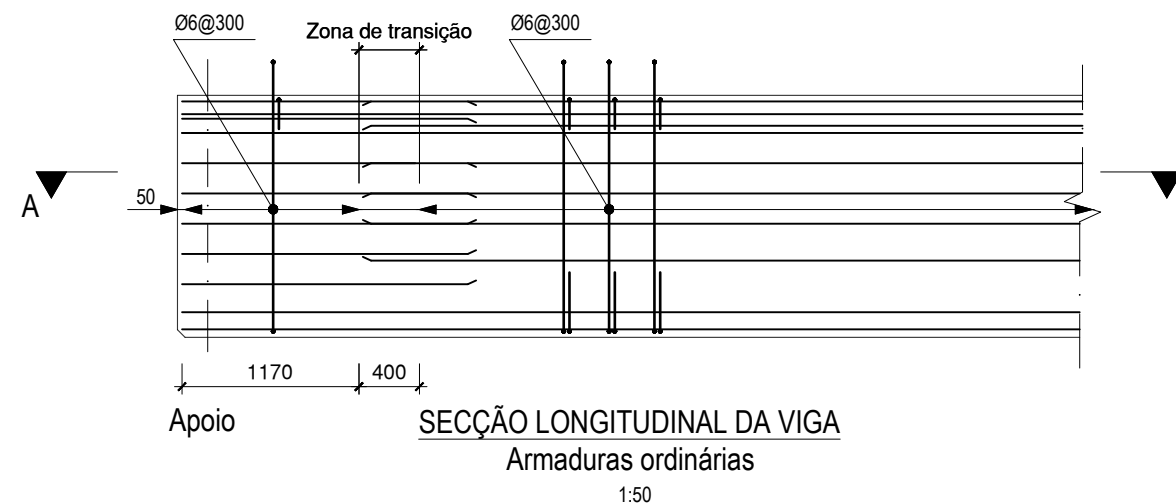
Nota:
As cotas indicadas no traçado são medidas na vertical,
tendo como referência a superfície inferior da viga.



SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA
Cabos de pré-esforço
1:20



Nota: As secções transversais da viga para a representação das armaduras ordinárias encontram-se apresentados na folha 21.



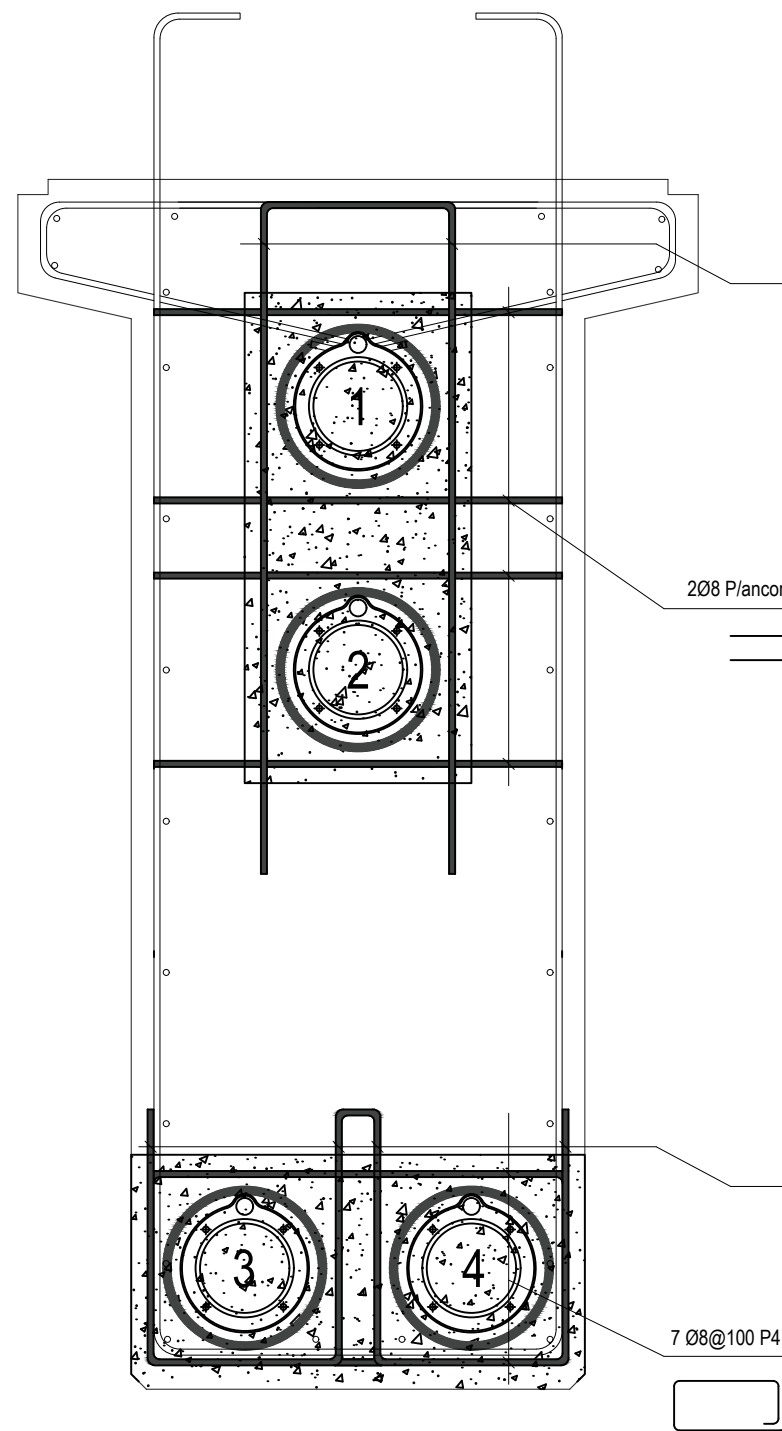
NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Ação de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

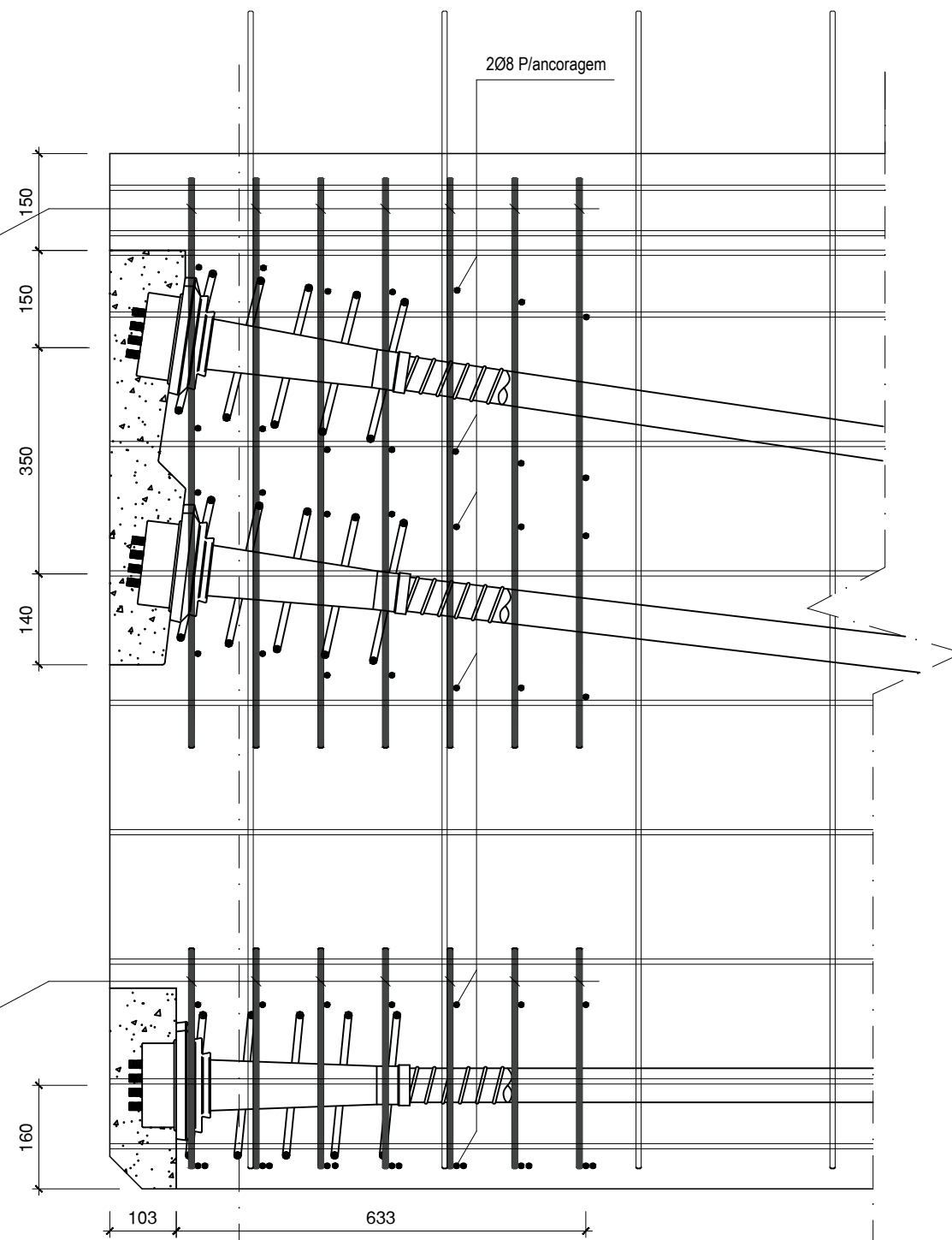
Título
TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF3 pós-tensionada para o vão de 26 m: Armaduras

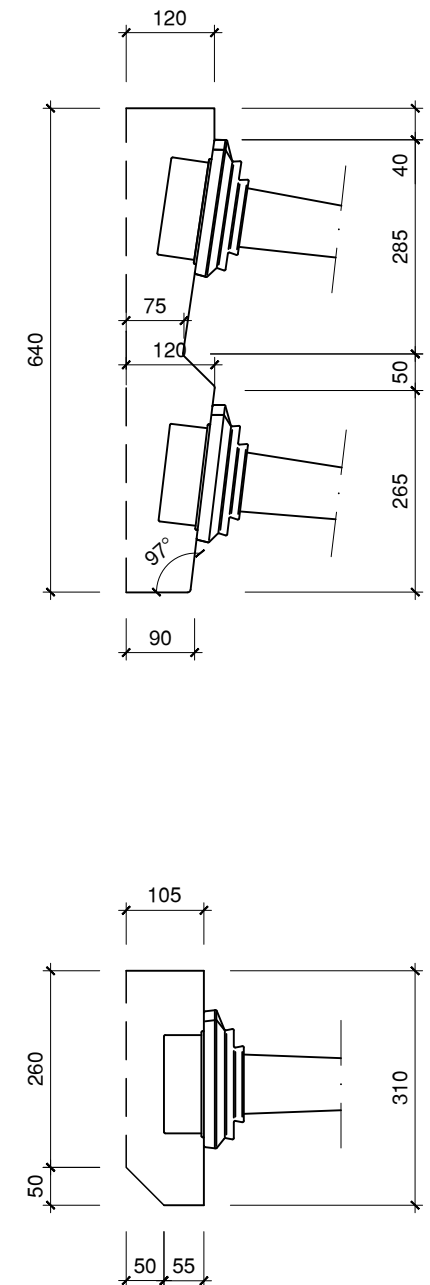
Autor Culpa Virgílio Emílio António	Data Fevereiro de 2023	Desenho n.º 17	Escala No desenho	Papel A3
--	---------------------------	-------------------	----------------------	-------------



PORMENOR TRANSVERSAL DA VIGA NO APOIO
Armaduras: zona de ancoragem



PORMENOR LONGITUDINAL DA VIGA NO APOIO
Armaduras: zona de ancoragem



PORMENOR DO NICHOS DE ANCORAGEM

ORDEM DE TENSIONAMENTO (P₀)

- 1.º CABO 2 - 1175 kN
- 2.º CABO 1 - 1175 kN
- 3.º CABO 3 - 1175 kN
- 4.º CABO 4 - 1175 kN

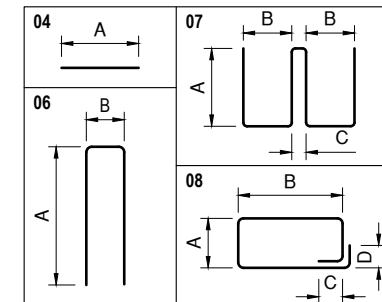
LEGENDA:

	Armaduras ordinárias
	Armaduras de reforço de ancoragem
	A betonar em segunda fase com betão não retráctil

QUADRO DE HÉLICES/BAINHAS

Dimensão	Bainha 6807 (0.62")	Esquema da ancoragem
A	360	
B	75	
C (Ø)	12	
D	65	
E	310	
Ø F	170	

CÓDIGOS DE FORMA



QUADRO DE ARMADURAS

Armadura	Código de forma	A	B	C	D
P1	06	1140	250		
P2	04	540			
P3	07	340	245	50	
P4	08	240	540	80	80



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

1. Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
2. Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
3. Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
4. Vigas para vãos simplesmente apoiados;
5. Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF3 pós-tensionada para o vão de 26 m: Detalhes de ancoragem

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho n.º

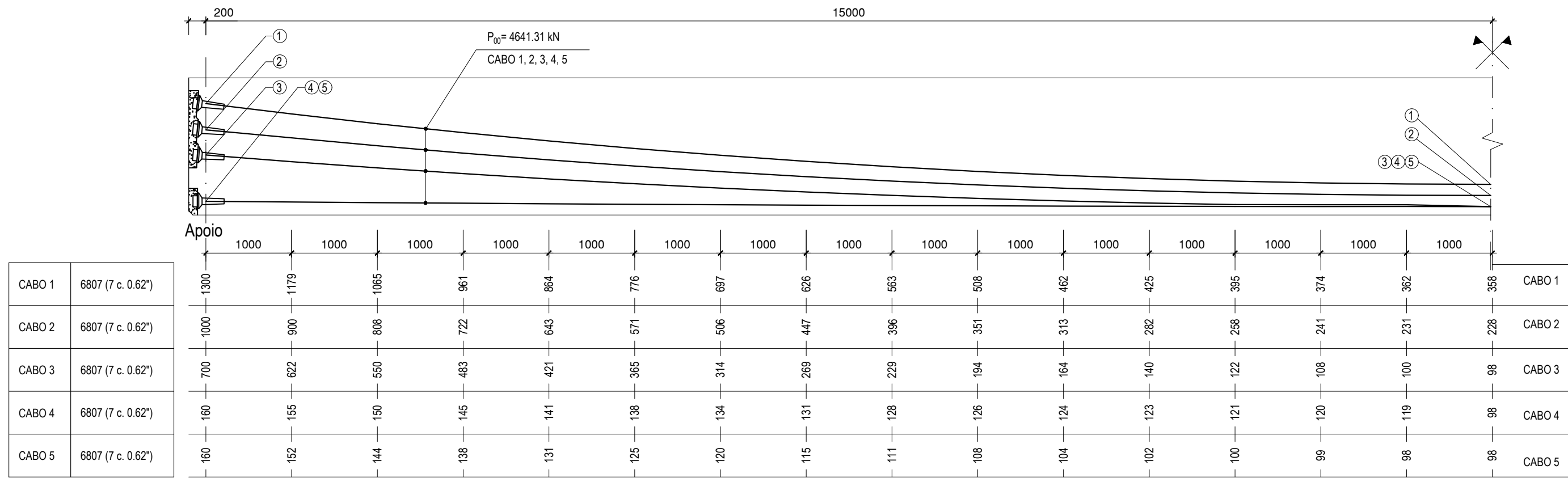
18

Escala

1:10

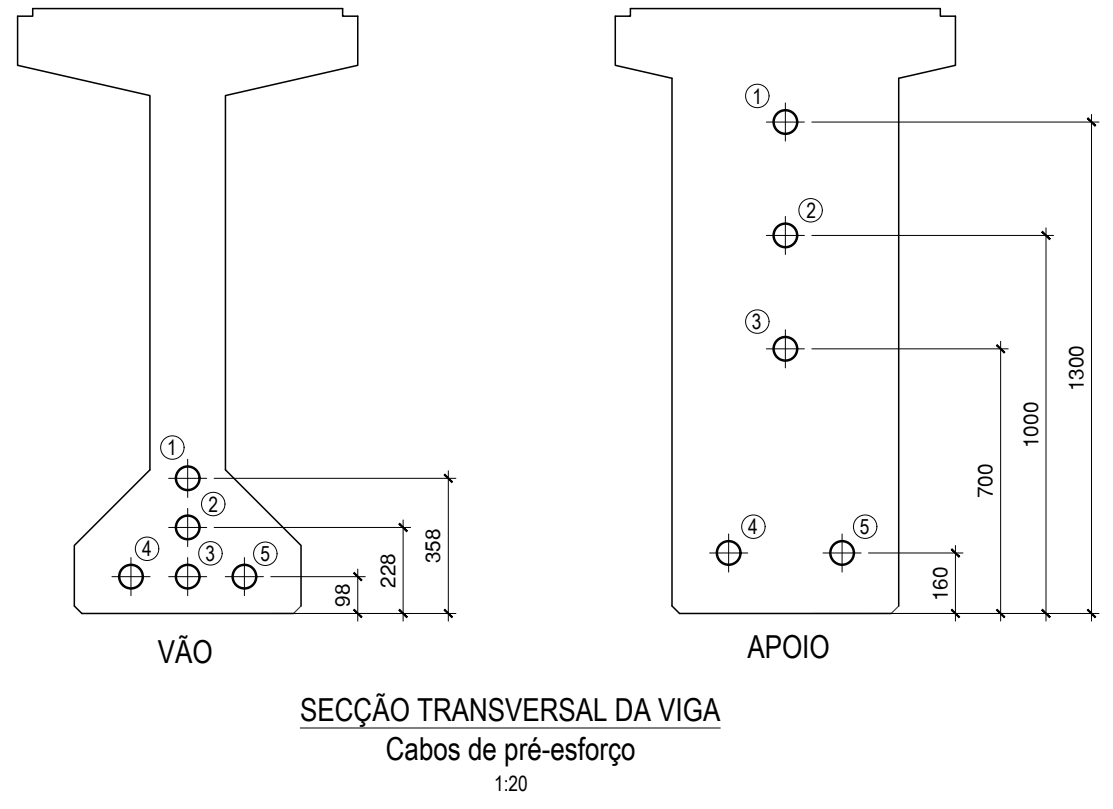
Papel

A3

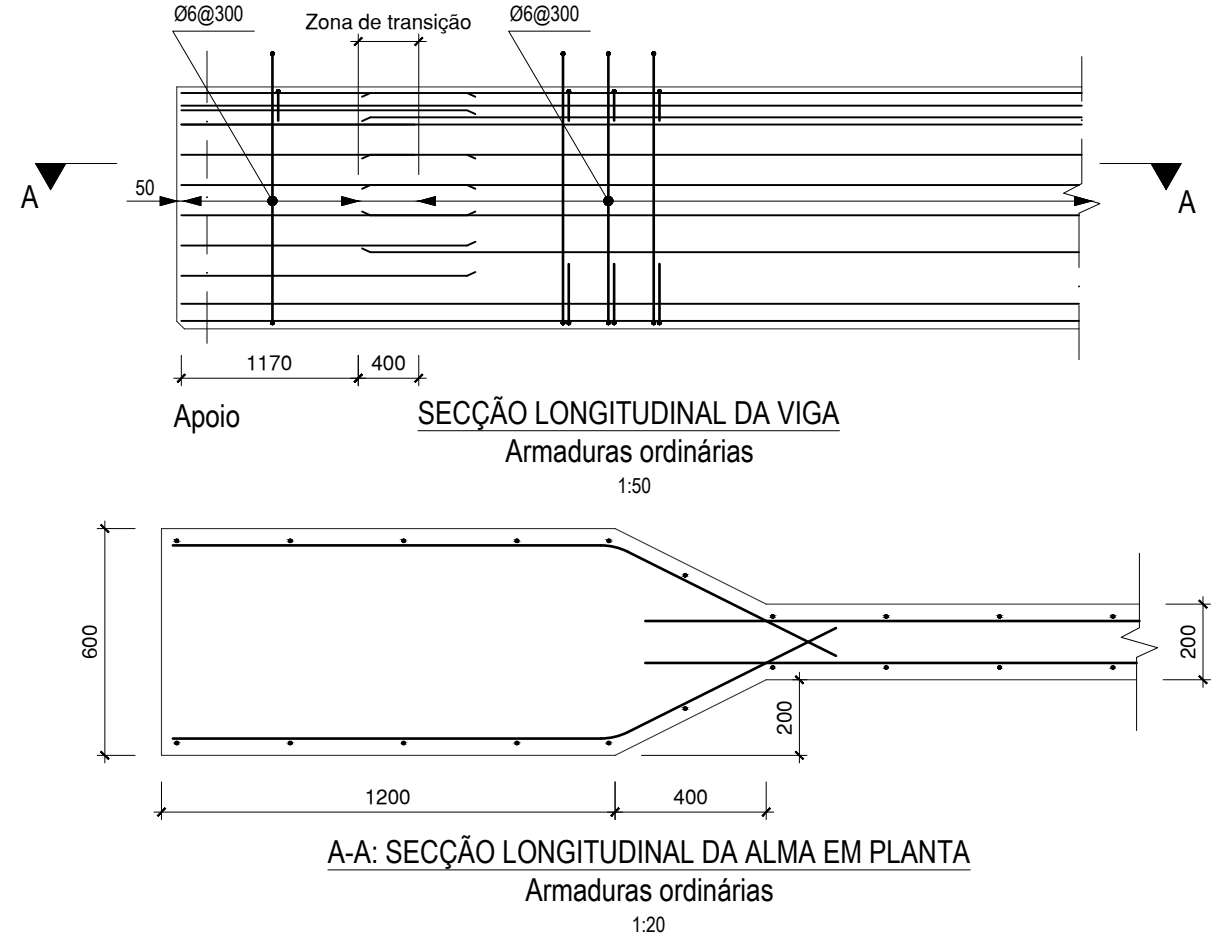


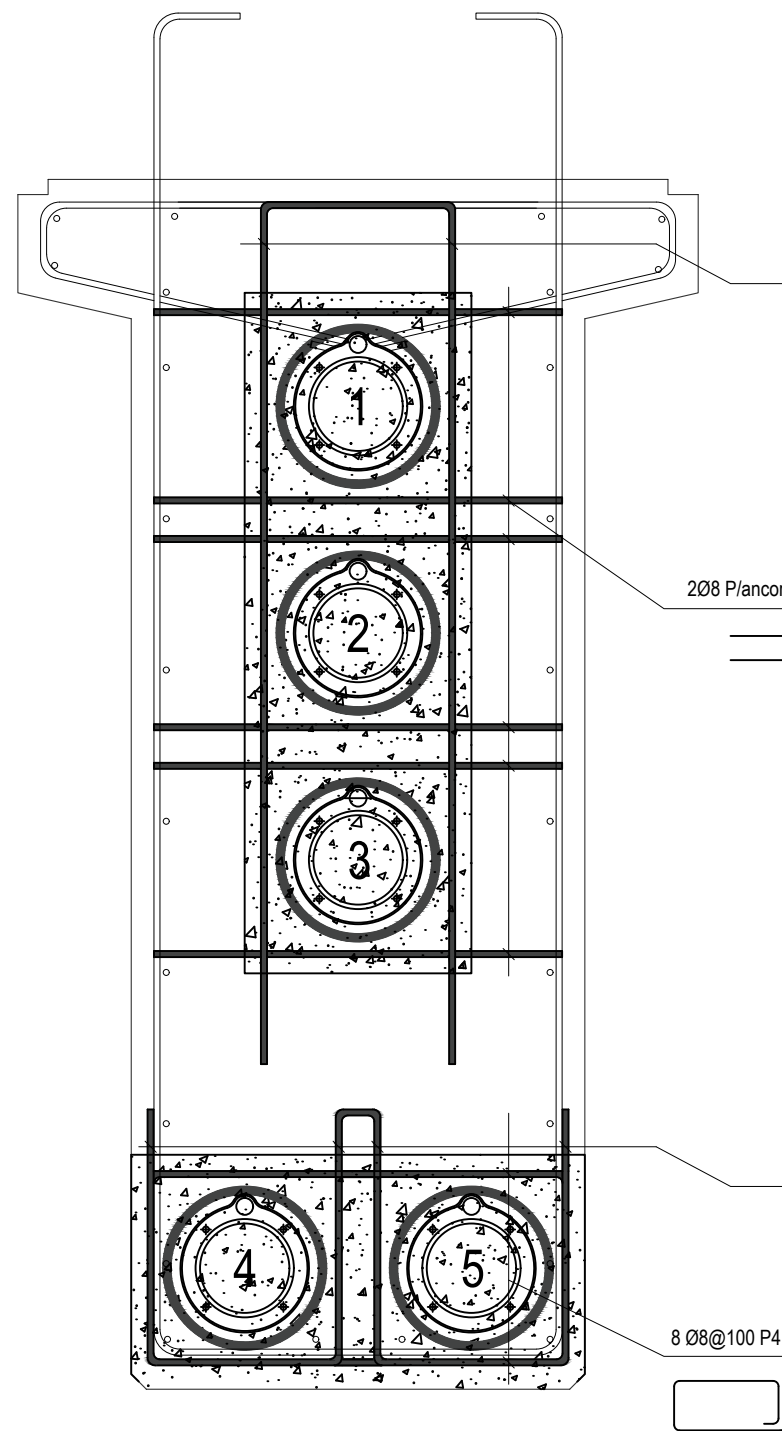
SECÇÃO LONGITUDINAL DA VIGA
 Armaduras pós-tensionadas
 1:50

Nota:
 As cotas indicadas no traçado são medidas na vertical, tendo como referência a superfície inferior da viga.

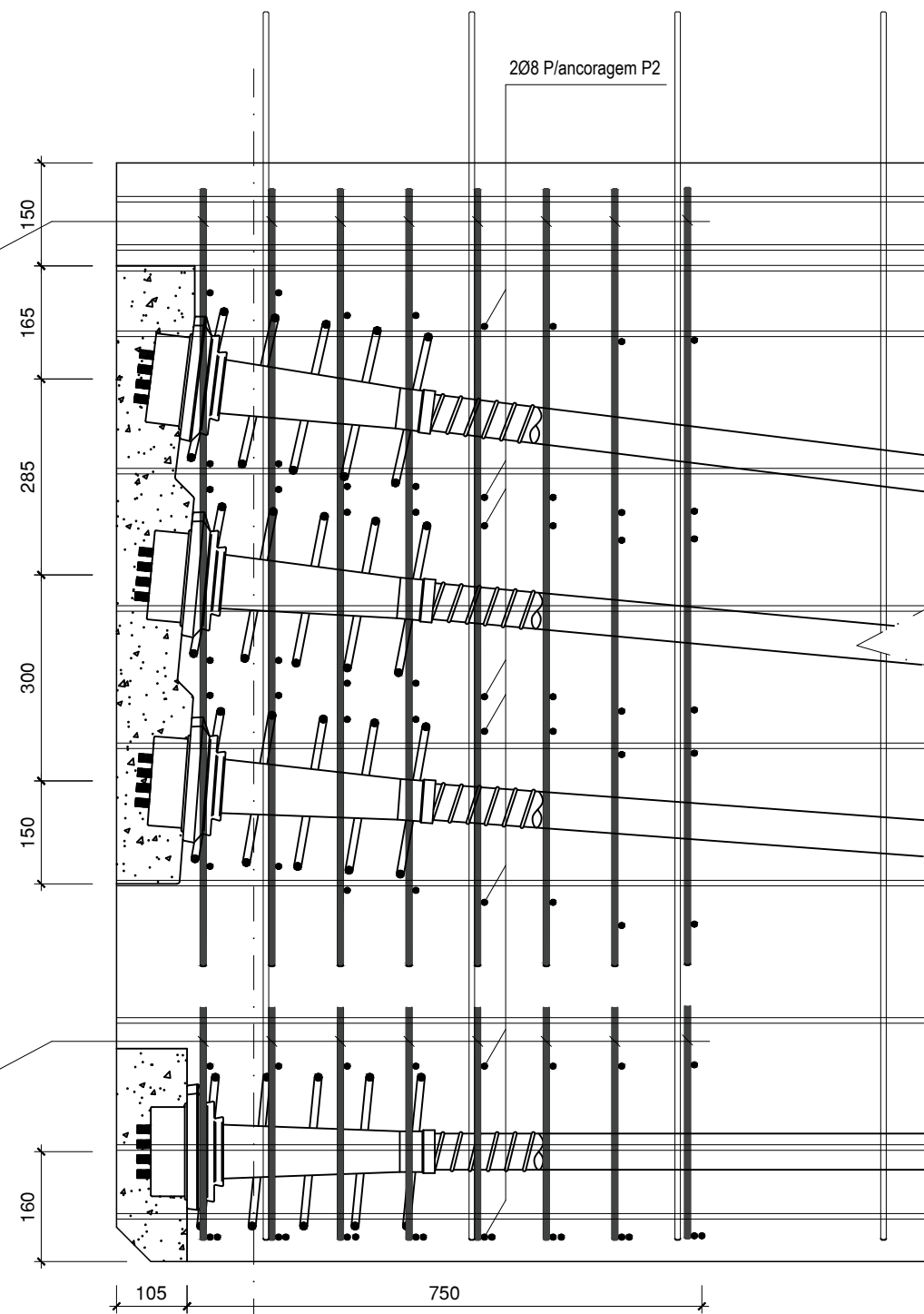


Nota: As secções transversais da viga para a representação das armaduras ordinárias encontram-se apresentados na folha 21.

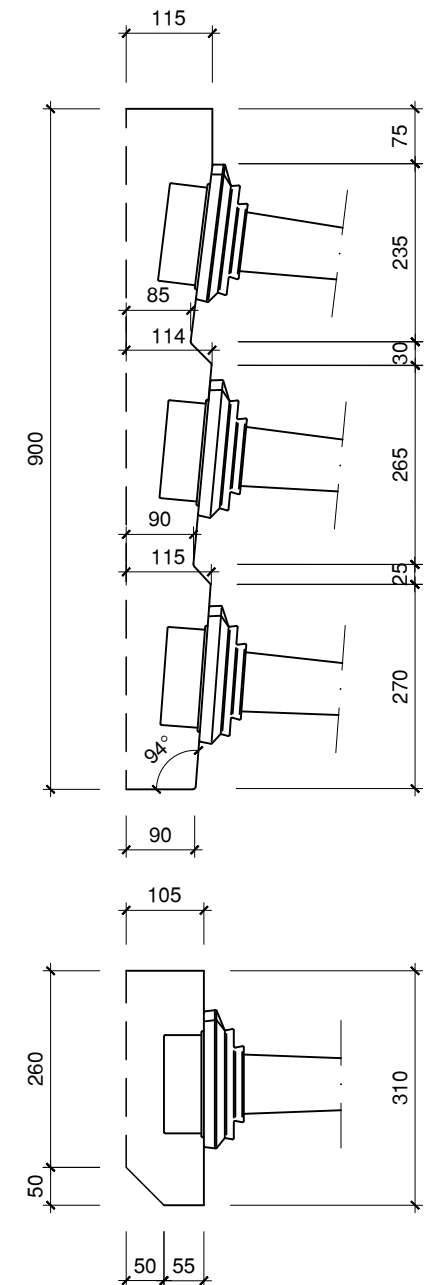




PORMENOR TRANSVERSAL DA VIGA NO APOIO
Armaduras: zona de ancoragem



PORMENOR LONGITUDINAL DA VIGA NO APOIO
Armaduras: zona de ancoragem



PORMENOR DO NICHOS DE ANCORAGEM

ORDEM DE TENSIONAMENTO (P₀)

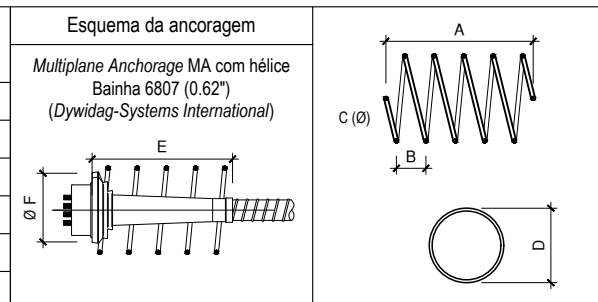
- 1.º CABO 2 - 1320 kN
- 2.º CABO 3 - 1320 kN
- 3.º CABO 1 - 1320 kN
- 4.º CABO 4 - 1320 kN
- 5.º CABO 5 - 1320 kN

LEGENDA:

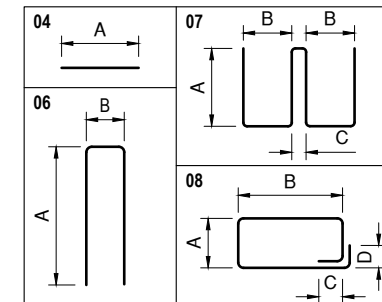
	Armaduras ordinárias
	Armaduras de reforço de ancoragem
	A betonar em segunda fase com betão não retráctil

Dimensão	Bainha 6807 (0.62")
A	360
B	75
C (Ø)	12
D	65
E	310
Ø F	170

QUADRO DE HÉLICES/BAINHAS



CÓDIGOS DE FORMA



QUADRO DE ARMADURAS

Armadura	Código de forma	A	B	C	D
P1	06	1140	250		
P2	04	540			
P3	07	340	245	50	
P4	08	240	540	80	80



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

1. Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
2. Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
3. Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
4. Vigas para vãos simplesmente apoiados;
5. Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF3 pós-tensionada para o vão de 30 m: Detalhes de ancoragem

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho n.º

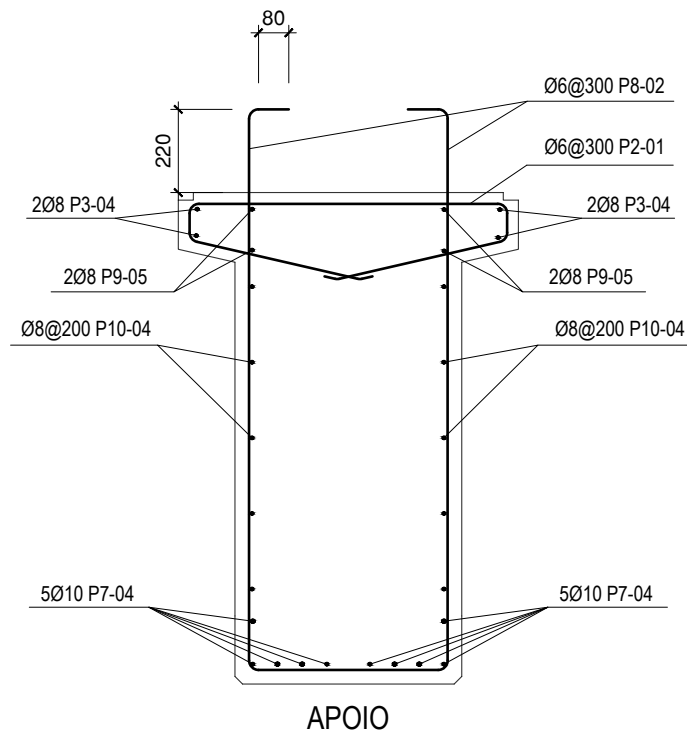
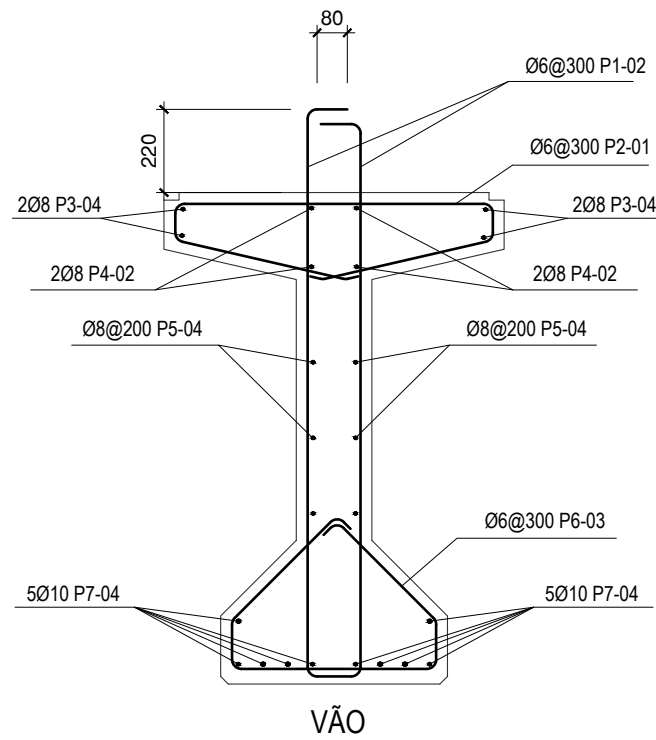
20

Escala

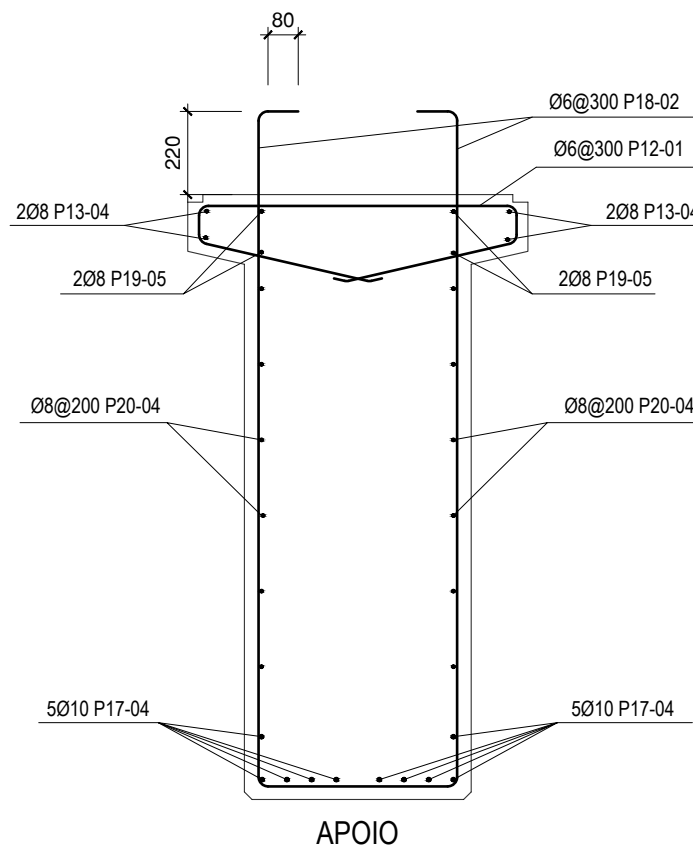
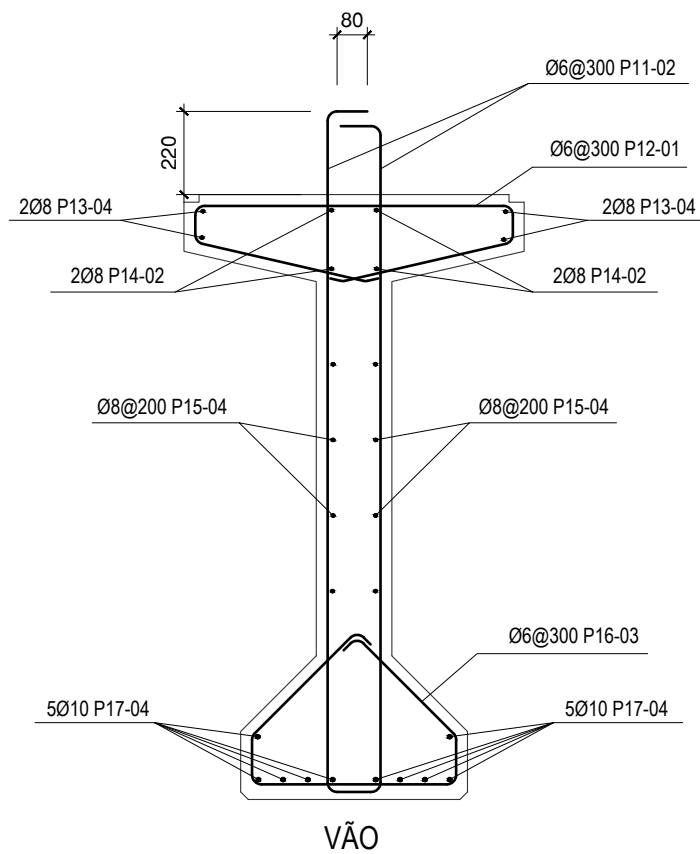
1:10

Papel

A3



VIGA IPF2: VÃO DE 22 M

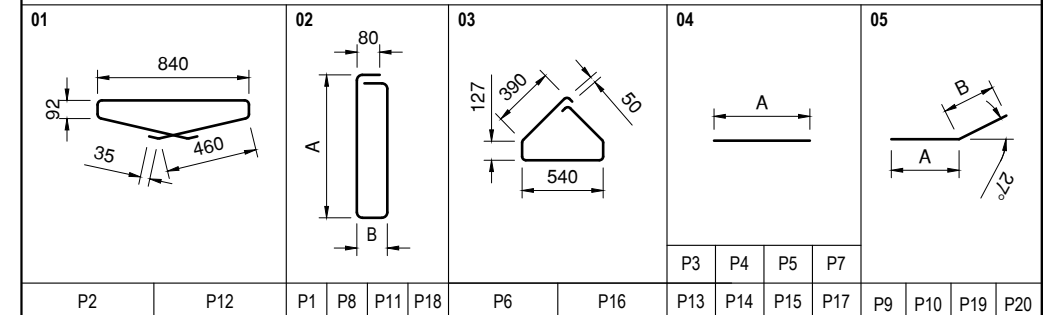


VIGA IPF3- VÃOS DE 26 E 30 M
SECÇÃO TRANSVERSAL DAS VIGAS
Armaduras ordinárias

QUADRO DE ARMADURAS

Viga	Armadura	Comprimento	A	B	Diâmetro	Espaçamento	Quantidade	Peso un.[kg/m]	Peso total [kg]
IPF2-vão de 22 m	P1-02	3280	1780	140	6	300	67	0,222	48,79
	P2-01	1992			6	300	75	0,222	33,17
	P3-04	22340	22340		8		4	0,395	35,30
	P4-04	20000	20000		8		4	0,395	31,60
	P5-04	20000	20000		8	200	6	0,395	47,40
	P6-03	1730			6	300	75	0,222	28,80
	P7-04	22340	22340		10		10	0,790	176,49
	P8-02	3660	1480	540	6	300	8	0,222	6,50
	P9-02	1940	1170	770	8		8	0,395	6,13
	P10-05	1940	1170	770	8	200	20	0,395	15,33
Cordões	22520			15,7		28	1,18	774,06	
IPF3-vão de 26 m	P11-02	3880	1780	140	6	300	80	0,222	68,91
	P12-01	1992			6	300	88	0,222	38,92
	P13-04	26340	26340		8		4	0,395	41,62
	P14-04	24000	24000		8		4	0,395	37,92
	P15-04	24000	24000		8	200	8	0,395	75,84
	P16-03	1730			6	300	88	0,222	33,80
	P17-04	26340	26340		10		10	0,790	208,09
	P18-02	4260	1780	540	6	300	8	0,222	7,57
	P19-05	1940	1170	770	8		8	0,395	6,13
	P20-05	1940	1170	770	8	200	24	0,395	18,39
Cordões	26520			15,7		28	1,18	876,22	
IPF3-vão de 30 m	P11-02	3880	1780	140	6	300	94	0,222	80,97
	P12-01	1992			6	300	102	0,222	45,11
	P13-04	30340	30340		8		4	0,395	47,94
	P14-04	28000	28000		8	200	4	0,395	44,24
	P15-04	28000	28000		8	200	8	0,395	88,48
	P16-03	1730			6	300	102	0,222	39,17
	P17-04	30340	30340		10		10	0,790	239,69
	P18-02	4260	1780	540	6	300	8	0,222	7,57
	P19-05	1940	1170	770	8	200	8	0,395	6,13
	P20-05	1940	1170	770	8	200	24	0,395	18,39
Cordões	30520			15,7		35	1,18	1260,48	

CÓDIGOS DE FORMA



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NOTAS GERAIS:

- Os desenhos devem ser lidos em conjunto com as notas e as peças escritas;
- Acção de tráfego: Código de prática para o dimensionamento de pontes rodoviárias e aquedutos da SATCC;
- Regulamento de dimensionamento: Eurocódigo 2;
- Vigas para vãos simplesmente apoiados;
- Todas as dimensões em milímetros.

Título

TRABALHO DE LICENCIATURA
PADRONIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO PRÉ-FABRICADO PARA TABULEIROS DE PONTES RODOVIÁRIAS

Viga IPF2 e IPF3 pós-tensionadas para os vãos de 22 m, 26 m & 30 m: Armaduras (cont.)

Autor

Culpa Virgílio Emílio António

Data

Fevereiro de 2023

Desenho nº

21

Escala

1:20

Papel

A3