U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E MODELAÇÃO BIM DE VIGAS PRÉ-FABRICADAS PRÉ-ESFORÇADAS DE INÉRCIA VARIÁVEL

Desenvolvimento de Aplicação em *Python*

LUÍS MARIA BARBOSA ALCOFORADO CÔRTE-REAL

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz

Coorientador: Engenheiro José Rui Cunha Matos Lopes Pinto

JUNHO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

A ciência não é apenas uma disciplina de razão, mas também de paixão.

Stephen Hawking

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação é fruto de um trabalho realizado ao longo de 4 meses, mas que reflete a conclusão de uma grande etapa. Ao longo deste percurso tive o privilégio de aprender lições que levo para o resto da vida, não só profissional, mas também pessoal. Aproveito este espaço para fazer alguns sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador Professor Miguel Ferraz, pela orientação académica e pessoal ao longo de grandes conversas.

Ao meu coorientador Eng.º José Rui Pinto, pela sua disponibilidade e por todo o acompanhamento ao longo do desenvolvimento da dissertação, e da sua restante equipa.

Ao Eng.º Manuel da Mota por me ter proporcionado a oportunidade de ter desenvolvido esta dissertação na Mota-Engil.

A toda a equipa da Mota-Engil com a qual privei ao longo deste período, e que contribuíram no meu desenvolvimento, em particular aos Eng.º André Martins e Eng.º Daniel Cardoso.

À minha família, em particular aos meus Pais e irmãos, pela forma como sempre me apoiaram ao longo de todo o meu percurso.

Por fim desejo agradecer à Marta pelo apoio incondicional que me dá em tudo.

RESUMO

A presente dissertação tem como principal objetivo otimizar o processo de desenvolvimento de elementos estruturais pré-fabricados. Esse processo é um trabalho multidisciplinar entre as equipas de dimensionamento estrutural, desenho técnico, preparação e fabrico. Cada equipa desempenha um papel fundamental no processo, pelo que a colaboração entre as equipas envolvidas é essencial para garantir um resultado final satisfatório em termos de segurança e desempenho. Nesta dissertação pretende-se intervir no processo a nível do dimensionamento estrutural, desenho técnico e preparação, deixando de fora o fabrico.

A presente dissertação explora o potencial da linguagem de programação *Python* de duas formas: no desenvolvimento de um modelo de análise estrutural e dimensionamento de vigas pré-fabricadas pré-esforçadas de inércia variável e no desenvolvimento de um plugin para Autodesk Revit capaz de criar modelos Building Information Modeling (BIM) das referidas vigas.

A análise estrutural e dimensionamento de vigas pré-fabricadas pré-esforçadas de inércia variável é um processo relativamente complexo pois implica um número muito elevado de análises e verificações sujeitas a inúmeras variáveis. Desta forma, um modelo automático ou semiautomático de análise e dimensionamento deste tipo de estruturas é uma importante mais valia em termos de eficiência e segurança.

A construção em betão pré-fabricado tem ganho uma popularidade significativa devido às suas inúmeras vantagens, tais como redução de tempo de execução das obras e melhoria das capacidades técnicas alcançadas. O BIM, enquanto modelo computacional das características físicas e funcionais de edifícios ou outros elementos construtivos, tem-se revelado uma ferramenta com elevado potencial para otimizar o processo de construção, nesta dissertação pretende-se estudar a interoperabilidade entre o dimensionamento estrutural de elementos pré-fabricados sujeitos a ações de pré-esforço e a sua modelação em ambiente BIM.

Os resultados deste estudo indicam que a implementação do BIM na indústria da pré-fabricação tem benefícios significativos, incluindo a redução de erros e retrabalho, melhor visualização e otimização do planeamento da construção. No entanto, também são identificados certos desafios, como custos iniciais elevados, falta de conhecimentos em BIM e resistência à mudança.

Em conclusão, esta dissertação destaca o potencial da interoperabilidade entre a programação em *Python* e o BIM, no processo de desenvolvimento de elementos estruturais pré-fabricados , e pretende ser uma mais valia para profissionais e investigadores.

PALAVRAS-CHAVE: BIM, BETÃO PRÉ-ESFORÇADO, BETÃO PRÉ-FABRICADO, INÉRCIA VARIÁVEL, *PYTHON*.

ABSTRACT

The present dissertation aims to optimize the development process of precast structural elements. This process involves a multidisciplinary collaboration among teams responsible for structural design, technical drawing, preparation, and manufacturing. Each team plays a crucial role in the process, making collaboration essential to ensure a satisfactory final outcome in terms of safety and performance. This dissertation focuses on intervening in the structural design, technical drawing, and preparation stages, excluding the manufacturing phase.

This dissertation explores the potential of the Python programming language in two ways: first, in developing a model for the structural analysis and dimensioning of pre-stressed precast beams with variable inertia, and second, in creating a plugin for Autodesk Revit capable of generating Building Information Modeling (BIM) models of these beams.

The structural analysis and dimensioning of pre-stressed precast beams with variable inertia is a relatively complex process, involving numerous analysis and checks subject to various variables. Therefore, an automatic or semi-automatic model for analyzing and dimensioning such structures would be a significant asset in terms of efficiency and safety.

Precast concrete construction has gained significant popularity due to its numerous advantages, such as reduced construction time and improved technical capabilities. BIM, as a computational model of the physical and functional characteristics of buildings or other construction elements, has proven to be a highly potential tool for optimizing the construction process. In this dissertation, the focus is on studying the interoperability between the structural design of precast elements subjected to pre-stress actions and their modeling in the BIM environment.

The results of this study indicate that implementing BIM in the precast industry has significant benefits, including error and rework reduction, improved visualization, and optimized construction planning. However, certain challenges are also identified, such as high initial costs, lack of BIM knowledge, and resistance to change.

In conclusion, this dissertation highlights the potential of interoperability between Python programming and BIM in the development process of precast structural elements and aims to be a valuable resource for professionals and researchers.

KEYWORDS: BIM, PRE-STRESSED CONCRETE, PRECAST CONCRETE, VARIABLE INERTIA, PYTHON.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1 INTRODUÇÃO 1
1.1. Motivação 1
1.2. Apresentação do Grupo Mota-Engil 1
1.3. Apresentação da Mota-Engil Prefabricados 2
1.4. Objetivos da dissertação 2
1.5. Estrutura da dissertação 3
2 ESTADO DA ARTE 5
2.1. Pré-fabricação 5
2.1.1. Apresentação histórica 5
2.1.2. Diversidade de soluções 6
2.1.3. Otimização de processos 9
2.2. Building Information Modeling – BIM 9
2.2.1. Definição 9
2.2.2. Níveis de desenvolvimento 9
2.2.3. BIM na pré-fabricação 10
2.3. Python 11
2.3.1. Apresentação 11
2.3.2. *Python* na engenharia civil 11
2.3.3. Interoperabilidade com Autodesk Revit 12
3 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL 13
3.1. Considerações iniciais 13
3.2. Regulamentação 13
3.3. Ações e combinações de ações 14
3.3.1. Ações permanentes 14
3.3.1.1. Peso próprio (PP) 14
3.3.1.2. Restantes cargas permanentes (RCP) 15
3.3.2. Ações variáveis 16
3.3.2.1. Sobrecargas (Sob) 16
3.3.3. Combinações de ações 16
3.3.3.1. Combinação característica 17
3.3.3.2. Combinação frequente 17

3.3.3.3. Combinação quase-permanente ... 17
3.4. Materiais ... 17
3.4.1. Betão ... 17
3.4.2. Aço ... 18
3.5. Pré-esforço ... 19
3.5.1. Considerações iniciais ... 19
3.5.2. Força de pré-esforço ... 20
3.5.3. Amarração dos cordões de pré-esforço ... 21
3.6. Verificação dos estados limites ... 22
3.6.1. Estados limites de utilização ... 22
3.6.2. Estados limites últimos ... 23
3.6.2.1. Flexão composta ... 23
3.6.2.2. Esforço transverso ... 25
4 VIGAS PRÉ-FABRICADAS PRÉ-ESFORÇADAS DE INÉRCIA VARIÁVEL ... 29
4.1. Considerações iniciais ... 29
4.2. Composição geométrica ... 30
4.3. Processo de dimensionamento e preparação ... 31
4.4. Processo de produção ... 35
4.5. Transporte e montagem ... 38
5 MODELO DESENVOLVIDO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO 43
5.1. Considerações iniciais ... 43
5.2. Ações e combinações de ações ... 44
5.2.1. Ações permanentes ... 44
5.2.1.1. Peso próprio (PP) ... 44
5.2.1.2. Restantes cargas permanentes (RCP) ... 46
5.2.2. Ações variáveis ... 46
5.2.2.1. Sobrecargas ... 46
5.2.3. Combinações de ações ... 47
5.3. Materiais ... 47
5.3.1. Betão ... 47
5.3.2. Aço ... 48
5.4. Pré-esforço ... 48
5.4.1. Força de pré-esforço ... 48
5.5. Verificação dos estados limite ... 49
5.5.1. Estados limites de utilização ... 49
5.5.1.1. Transferência de pré-esforço ... 50
5.5.1.2. Armazenamento e transporte ... 51
5.5.1.3. Combinação característica ... 52
5.5.1.4. Combinação frequente ... 53

5.5.1.5. Combinação quase-permanente 53
5.5.2. Estados limites últimos 54
5.5.2.1. Flexão composta 54
5.5.2.2. Esforço transverso 55
5.6. *Plug-in Revit* desenvolvido 56
5.7. Processamento de resultados 58
5.7.1. Desenhos técnicos 58
5.7.2. Mapas de pormenores construtivos (armaduras) 58
5.7.3. Mapas de quantidades 60
5.8. Considerações finais 61
6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 63
6.1. Conclusões 63
6.2. Desenvolvimentos futuros 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – W Hotel Albufeira 6
Figura 2 – Modelo BIM de quarto de banho 6
Figura 3 – Depósito de água tipo Paver 7
Figura 4 – Viga pré-fabricada pré-esforçada de inércia variável 7
Figura 5 – Painel GRC de geometria complexa 8
Figura 6 – Molde de painel GRC 8
Figura 7 – Fabrico de painel GRC 8
Figura 8 - Cobertura de pavilhão industrial 15
Figura 9 – Diagrama de tensões-extensões do aço típico de pré-esforço 18
Figura 10 - Pista de pré-esforço 19
Figura 11 - Traçado de cordão de pré-esforço curvilíneo 19
Figura 12 - Comprimento de amarração de varões de pré-esforço 21
Figura 13 - Diagrama parábola-retângulo para o betão comprimido 24
Figura 14 - Diagramas, idealizado e de cálculo, tensões-extensões do aço das armaduras para BA 24
Figura 15 - Diagramas, idealizado e de cálculo, de tensões-extensões para aços de pré-esforço 25
Figura 16 - Distribuições de extensões admissíveis no estado limite último 25
Figura 17 - Definição de Asl 26
Figura 18 – Exemplos de armaduras de esforço transverso 27
Figura 19 - Interior da fábrica da Maprel 29
Figura 20 - Modelo BIM de viga de inércia variável 30
Figura 21 - Vista 3D de zona maciça de viga de inércia variável 30
Figura 22 - Vistas 3D de zona de transição de viga de inércia variável 31
Figura 23 - Zona aligeirada de viga de inércia variável 31
Figura 24 - Corte longitudinal de viga de inércia variável com identificação de estribos 32
Figura 25 - Desenhos técnicos com pormenorização de dimensões de estribos 32
Figura 26 - Topo de viga de inércia variável 33
Figura 27- Diagrama de tensões no instante de transferência (hip. A) 34
Figura 28 - Diagrama de tensões no instante de transferência (hip. B) 34
Figura 29 - Diagrama de tensões em armazenamento e transporte (hip. A) 34
Figura 30 - Diagrama de tensões em armazenamento e transporte (hip. B) 34
Figura 31 - Diagrama de tensões de combinação característica (hip. A) 34
Figura 32 - Diagrama de tensões de combinação característica (hip. B) 34
Figura 33 - Marcação no chão para afastamento de estribos 35
Figura 34 - Máquina de dobrar e cortar varões de aço 35
Figura 35 – Gabari de alinhamento de cordões de pré-esforço 36
Figura 36 - Esquema de gabari de cordões de pré-esforço 36
Figura 37 – Betonagem de viga de inércia variável 37
Figura 38 - Içamento de vigas de inércia variável por pontes rolantes 38
Figura 39 - Transporte de viga em veículo de transportes especiais 38
Figura 40 - Montagem de viga de inércia variável com recurso a uma grua automóvel 40
Figura 41 - Montagem de viga de inércia variável com recurso a duas gruas automóveis 40
Figura 42 - Pormenor de ligação entre viga e pilar de elementos pré-fabricados 41
Figura 43 - Argola de içamento da viga 41
Figura 44 - Secção transversal de viga de inércia variável de banzos 0,40 m a 0,42 m 44
Figura 45 - Diagrama de ação de peso próprio 45
Figura 46 - Valores produzidos pela aplicação em *Python* 45
Figura 47 - Diagrama de momentos fletores, PP ($kN \cdot m$) 45
Figura 48 - Valores de RCP extraídos de catálogo fornecedor de materiais de construção 46
Figura 49 - Diagramas comparativos entre carregamento distribuído e pontual aplicado a meio vão. 46
Figura 50 - Relatório de ensaio laboratorial a cordões de pré-esforço 48
Figura 51 – Diagrama de força de pré-esforço instantâneo 50
Figura 52 - Diagrama de força de pré-esforço a tempo infinito 50
Figura 53 - Diagrama de tensões no instante de transferência 51
Figura 54 - Diagrama de tensões em armazenamento e transporte 51

Figura 55 – Diagrama de tensões de combinação característica 52
Figura 56 - Diagrama de tensões de combinação frequente 53
Figura 57 - Diagrama de tensões de combinação quase-permanente 53
Figura 58 – Diagrama de momentos fletores ELU $Msd \leq MRd$ 54
Figura 59 – Algoritmo de cálculo do M_{Rd} 55
Figura 60 – Algoritmo de cálculo dos estribos 56
Figura 61 - Plug-in Revit - Criação de geometria externa 57
Figura 62 - Plug-in Revit – Criação de armadura 57
Figura 63 – Desenho técnico BIM 58
Figura 64 - Zona maciça 59
Figura 65 - Zona de transição 59
Figura 66 - Zona aligeirada 59
Figura 67 - Mapa de quantidade de betão em modelo BIM 60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Pesos volúmicos de materiais de construção segundo EC1 14
Tabela 2 – Categorias de coberturas 16
Tabela 3 - Sobrecargas em coberturas da Categoria H 16
Tabela 4 - Valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios 17
Tabela 5 - Valores característicos de cordões de pré-esforço de diâmetro 15,2mm e 15,7mm 18
Tabela 6 - Valores recomendados de $wmax\ (mm)$ 23
Tabela 7 - Frota de gruas automóveis da Mota-Engil 39
Tabela 8 - Formulações de betão C50/60 da Mota-Engil Prefabricados 48
Tabela 9 - Disposição de cordões de pré-esforço 50
Tabela 10 - Verificação de segurança à flexão composta 54
Tabela 11 – Verificação de segurança ao esforço transverso 56
Tabela 12 - Mapa de aço utilizado em modelo BIM 60

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

2D	Bi-dimensional
3D	Tri-dimensional
A	Área
API	*Application Programming Interface*
AN	Anexo Nacional
BA	Betão Armado
BIM	*Building Information Modelling*
EC	Eurocódigo
ELS	Estados Limites de Serviço
ELU	Estados Limites Últimos
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ck}	Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade
f_{yd}	Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
f_{yk}	Valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
GRC	*Glass reinforced concrete*
LOD	*Level of Development*
M_{Rd}	Valor de cálculo do momento fletor resistente
M_{Sd}	Valor de cálculo do momento fletor solicitante
PDF	*Portable Document Format*
PE	Pré-esforço
PP	Peso próprio
RCP	Restantes cargas permanentes
SOB	Sobrecargas

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A rápida evolução global tem exigido que as empresas se adaptem constantemente para enfrentar os desafios competitivos apresentados pelos seus clientes. Nesse contexto, a investigação desenvolvida em ambiente empresarial ganha relevância como uma abordagem valiosa para a obtenção de soluções práticas para problemas reais enfrentados pelas empresas. Desta forma a presente dissertação foi realizada em ambiente empresarial na empresa Mota-Engil.

1.2. APRESENTAÇÃO DO GRUPO MOTA-ENGIL

Em 1946 o Engenheiro Manuel António da Mota fundou a Mota & Companhia, em Amarante, e criou a respetiva sucursal em Angola, onde a empresa atuou exclusivamente até ao ano de 1974.

A primeira atividade da empresa foi a exploração e transformação de madeiras, e veio 2 anos mais tarde a acumular atividades na área de Construção e Obras Públicas. Foi adjudicada a sua primeira grande obra em 1952, a execução do Aeroporto Internacional de Luanda, que serviu de referência e foi impulsionadora para grandes obras que foram realizadas mais tarde. A Mota & Companhia internacionalizou-se em África em 1975 ao iniciar a sua atividade na Namíbia e no Botsuana, e mais tarde no Gabão, Swazilândia, Malawi e Moçambique. A Mota & Companhia expandiu os seus horizontes para a América Latina ao apostar em empreitadas na Venezuela e no Peru. Mais tarde, em 1996, explorou os mercadas Europeus na Polónia, Hungria e República Checa. Participou no consórcio liderado pela empresa portuguesa Lusoponte e foi uma das empresas responsáveis pela construção e manutenção da Ponte Vasco da Gama, inaugurada em 1998 como sendo a ponte mais longa da Europa, com um comprimento total de 17,2 quilómetros.

A Engil, Sociedade de Engenharia Civil Lda. foi fundada a 3 de setembro de 1952 pelo Eng.º Fernando José Saraiva e pelo Sr. António Lopes de Almeida. Dedicaram-se inicialmente ao setor da habitação na região de Lisboa, e mais tarde expandiram os seus horizontes ao resto do país. Foi responsável por obras notáveis tais como a Ponte sobre o Rio Tua e a Barragem do Lindoso.

Em julho do ano 2000 as empresas do universo da família Mota lançaram uma Oferta Pública de Aquisição sobre a totalidade do capital da Engil SGPS, resultando na constituição da maior construtora portuguesa, o Grupo Mota-Engil.

Atualmente o Grupo Mota-Engil atua em diversos setores, destacando-se principalmente nos ramos da construção, engenharia e infraestruturas. Alguns dos principais ramos da atuação da empresa incluem infraestruturas e transportes, construção civil, ambiente e serviços, mineração e recursos naturais, concessões e operações. O grupo emprega cerca de 33.000 trabalhadores em todo o mundo, distribuídos por mais de 30 países.

1.3. APRESENTAÇÃO DA MOTA-ENGIL PREFABRICADOS

A Mota-Engil Prefabricados é uma empresa do Grupo Mota-Engil que se dedica à produção e comercialização de elementos pré-fabricados de betão para a construção civil e obras públicas. Tem como origem a Maprel, fundada em 1960, e adquirida em 1987 pela Mota & Companhia. A empresa tem fábricas em Portugal e em outros países onde o Grupo Mota-Engil atua, como Angola, Moçambique e Peru. Em Portugal a empresa possui duas unidades fabris, uma em Nelas e outra em Rio Maior.

A Mota-Engil Prefabricados produz uma ampla variedade de elementos pré-fabricados de betão, incluindo vigas pré-esforçadas, pilares, sapatas, painéis de fachada, estruturas de contenção de terras, depósitos de água, painéis acústicos, passagens superiores, estruturas *Matière*, obras de arte, entre outros. Estes elementos são produzidos em fábrica, de acordo com especificações técnicas, o que permite um maior controle de qualidade e eficiência na construção de edifícios e infraestruturas, sobretudo nos tempos de montagem de obra que conseguem ser significativamente menores comparando com soluções clássicas de betonagem *in-situ*.

1.4. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Para uma melhor compreensão dos objetivos da presente dissertação é importante explicar brevemente as fases do processo produtivo de um elemento genérico pré-fabricado.

O fornecimento de um elemento pré-fabricado pode ter como origem diversas fontes, desde empresas de construção que precisem que sejam fabricados elementos previamente dimensionados por gabinetes de projeto, a soluções finais como depósitos de água ou pavilhões industriais ou comerciais cuja estrutura é totalmente composta por elementos pré-fabricados. Após receção do pedido, segue-se a fase de dimensionamento estrutural que tem como base as ações e combinações de ações a que o elemento será sujeito. Esta fase é geralmente conduzida com recurso a folhas de cálculo assim como ferramentas de cálculo automático de estruturas genéricas e é um processo relativamente expedito. As peças têm um elevado nível de pormenor geométrico o que leva a que o processo de desenvolvimento dos elementos seja um trabalho multidisciplinar entre desenhadores técnicos e engenheiros civis. Após a finalização de todos os desenhos técnicos para fabrico os mesmos são transmitidos aos elementos da equipa encarregues de fazerem as folhas de preparação que consiste no levantamento de materiais e quantidades para que se possa ser dada a ordem de produção à unidade fabril. Este é um processo que é levado a cabo de forma manual, que consiste em listar em folhas de cálculo os diferentes materiais presentes na elaboração da peça e as respetivas quantidades, sejam volumes, metros lineares, ou unidades, e dos pormenores geométricos para que toda a preparação possa ser conduzida em fábrica, e ser orçamentado o custo dos materiais envolvidos. O processo é concluído com a ordem de produção à unidade fabril, onde é feita a execução das peças.

Esta dissertação tem como objetivo a otimização do processo de conceção de um elemento pré-fabricado em todas as fases envolvidas na preparação da informação que é enviada à unidade fabril. Este processo de otimização inicia-se com o desenvolvimento de um programa de cálculo capaz de realizar análises de forma automatizada, permitindo melhorar a eficiência da equipa de projeto e analisar

automaticamente parâmetros que atualmente são desenvolvidos manualmente. Pretende-se que a tecnologia BIM seja implementada em todo o processo de preparação para reduzir o tempo de realização do processo e eliminar a possibilidade de haver erro humano em processos repetitivos, levando a que a atuação da empresa seja capaz de dar resposta com maior prontidão a novos desafios e aumente o seu grau de competitividade no mercado.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação divide-se em seis capítulos. Para o estudo de "Dimensionamento estrutural e modelação BIM de vigas pré-fabricadas pré-esforçadas de inércia variável – Desenvolvimento de aplicação em *Python*" é necessário o domínio prévio das temáticas abordadas no contexto do tema, nomeadamente relacionados com o material de construção betão, tanto reforçado com armadura passiva, como com armadura de pré-esforço.

O capítulo 2 é dedicado a apresentar o Estado da Arte relativo aos principais tópicos abordados no corrente estudo, nomeadamente a pré-fabricação, o BIM, e a programação em *Python*. Pretende-se dar a conhecer a história do desenvolvimento destas tecnologias, as suas vantagens, limitações e o seu posicionamento atual na utilização por parte da indústria a nível global.

No capítulo 3 é descrito o processo de dimensionamento estrutural de vigas de betão pré-esforçado, segundo o Eurocódigo 2. É feita uma apresentação dos materiais envolvidos e das ações atuantes. São discriminadas todas as verificações de segurança que devem ser conduzidas, tanto em Estado Limite de Utilização, como para o Estado Limite Último.

O capítulo 4 apresenta o conceito de vigas de inércia variável e são descritos os processos envolvidos desde o seu dimensionamento estrutural, desenho técnico e desenvolvimento de mapas de preparação à produção e, finalmente, processo de produção em unidade fabril. É feita uma abordagem a limitações e dificuldades atualmente existentes, bem como a vantagens que estas geometrias oferecem sobre outras soluções.

O capítulo 5 consiste no desenvolvimento do modelo de análise e dimensionamento estrutural e da sua aplicação a um caso prático de estudo. Como exemplo de aplicação, é apresentado o dimensionamento estrutural de uma viga de cobertura com 29.80m de comprimento sujeita a ações verticais, com recurso a uma aplicação desenvolvida de raiz em *Python*, capaz de realizar todas as verificações de segurança previstas no Eurocódigo 2. São também de desenvolvidos de raiz dois *plug-ins* capazes de modelar automaticamente vigas de inércia variável em ambiente BIM, e modelação de armadura passiva e de pré-esforço, respetivamente. O modelo BIM permite a extração de informações pertinentes à preparação da produção das vigas em fábrica, nomeadamente desenhos técnicos, mapas de quantidades e mapas de preparação de armaduras.

No capítulo 6 é feita a conclusão e reflexão da presente dissertação, assim como se propõe alguns temas que poderão ser desenvolvidos futuramente.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. PRÉ-FABRICAÇÃO

2.1.1. APRESENTAÇÃO HISTÓRICA

A Roma Antiga desempenhou um papel preponderante no desenvolvimento da construção e no conceito de pré-fabricação, evidenciando a engenhosidade e o avanço tecnológico da sua época. Os romanos foram pioneiros na utilização do betão como material de construção, desenvolvendo uma mistura conhecida à data por *opus caementicium*. Esta mistura, composta por cal, areia, fragmentos de pedra e água, resultava numa pasta moldável e resistente após secagem, com uma vasta versatilidade na sua utilização no desenvolvimento das infraestruturas. A durabilidade e resistência mecânica do *opus caementicium* e a sua capacidade de se moldar à geometria de uma forma terão sido determinantes para que edifícios como o Panteão, em Roma, fossem possíveis de construir (Riyadh Raouf, N., 2020).

Nas décadas seguintes à Segunda Guerra Mundial houve um investimento imobiliário extraordinário nos setores de habitação e educação, com a necessidade de construção de escolas, faculdades e universidades. Este fenómeno apresentou um desafio para a indústria da construção, num período de transformação global. A produção de elementos construtivos passou a tomar lugar em fábricas em resposta à crescente escassez de mão de obra qualificada, e de forma a dar resposta aos novos desafios impostos pela sociedade. A fabricação de elementos construtivos em série conduziu a um impacto positivo em essencialmente três aspetos: tempo, custo e qualidade. A conjugação simultânea destes três fatores conduziria a uma solução ideal, no entanto, em determinadas situações, a validação de apenas um ou dois dos fatores pode ser determinante na adjudicação de uma empreitada (Burchardt, J.).

A produção em série permite tirar proveito de vários mecanismos que contribuem para a otimização destes fatores, de forma isolada ou conjunta. O aproveitamento e utilização sistemática dos mesmos moldes e formas conduz simultaneamente a redução de prazos de execução das peças, redução de custos de produção, e melhoria na qualidade das mesmas no sentido em que são minorados potenciais defeitos e erros inerentes ao processo de fabrico. A fabricação em ambiente industrial permite maior homogeneidade e controlo sobre os processos, assim como controla os prejuízos temporais resultantes de ocorrências climatéricas desfavoráveis à construção *in-situ (Elliott, K.S., 2019)*.

2.1.2. DIVERSIDADE DE SOLUÇÕES

As possibilidades de construções alcançáveis por meio do uso de betão pré-fabricado são vastas e abrangentes. Este método construtivo permite a criação de estruturas robustas, eficientes e esteticamente apelativas, adequadas uma ampla gama de aplicações. Diversos tipos de elementos podem ser fabricados, tais como painéis de fachada, vigas, pilares, lajes, e até mesmo módulos completos de edifícios.

A Figura 1 corresponde a uma obra de um hotel em que foram utilizados painéis de betão reforçado com fibras de vidro (GRC) para realizar a estrutura. Este é um exemplo de aplicações possíveis de alcançar com recurso a pré-fabricação, que de outra forma seriam inviáveis de realizar (Vergara, E.C. [et al.], 2017).

Figura 1 – W Hotel Albufeira

A Figura 2 ilustra o exemplo de um quarto de banho totalmente construído industrialmente em fábrica. A instalação destas estruturas é bastante simples, simplificando o trabalho de mão-de-obra especializada *in-situ (Liang, N. and Yu, M., 2021)*.

Figura 2 – Modelo BIM de quarto de banho

Podem ainda ser executados depósitos (Figura 3) capazes de armazenar uma elevada diversidade de líquidos, que podem até ser executados em forma de silos.

Figura 3 – Depósito de água tipo Paver

A utilização de pré-esforço em determinadas peças pré-fabricadas, tais como vigas, tem a vantagem de permitir que sejam vencidos vão substancialmente maiores, economizando no material e resultando em peças mais leves, económicas e com melhor prestação estrutural (Kurt, A., 2021). A Figura 4 ilustra um exemplo de uma viga pré-fabricada pré-esforçada de inércia variável.

Figura 4 – Viga pré-fabricada pré-esforçada de inércia variável

Embora seja possível realizar uma variedade de elementos pré-fabricados, existem limitações em relação às dimensões e às formas que podem ser concretizadas. Elementos de dimensões elevadas ou com formas complexas podem representar dificuldades acrescidas no processo não só de fabrico, mas também de transporte e montagem. Algumas limitações geométricas podem ser superadas com a construção de moldes personalizados, que geralmente representam um custo inicial significativamente elevado. A Figura 5 ilustra um exemplo de um painel GRC executado com uma geometria complexa. Para produzir este painel foi necessário desenvolver um molde único (Figura 6). O processo de fabrico é apresentado na Figura 7.

Figura 5 – Painel GRC de geometria complexa

Figura 6 – Molde de painel GRC

Figura 7 – Fabrico de painel GRC

2.1.3. OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS

Otimização refere-se ao processo de encontrar a melhor solução possível para um problema com base em restrições, e num objetivo estabelecido.

No contexto da engenharia a otimização envolve encontrar o conjunto de parâmetros ou variáveis que maximizam ou minimizam a função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições. A função objetivo poderá ser a otimização de custos, de tempo, de desempenho ou de recursos (Reichenbach, S. and Kromoser, B., 2021).

No contexto do desenvolvimento e conceição de uma viga, os parâmetros geométricos que a mesma adquire são determinantes na sua resposta estrutural. A construção em ambiente fabril permite tirar proveito do conceito de otimização de custos e de desempenho na medida em desta forma podem ser desenvolvidas geometrias inviáveis de materializar *in-situ*.

2.2. BUILDING INFORMATION MODELING – BIM

2.2.1. DEFINIÇÃO

O Building Information Modeling (BIM) é uma metodologia de projeto, construção e operação de edifícios que tem sido amplamente adotada pela indústria da construção civil. É um processo colaborativo baseado em modelos 3D que permite a criação, visualização e gestão de informações detalhadas sobre um projeto de construção ou infraestrutura. O BIM abrange não apenas a geometria do modelo 3D, mas também dados adicionais relacionados com os elementos da construção, como propriedades físicas, propriedades dos materiais, cronogramas, custos, especificações, entre outras possibilidades. Em vez das habituais representações 2D de cada especialidade envolvida no projeto (projeto de arquitetura, projeto de estrutura, acabamentos, instalações hidráulicas, energéticas, etc.) o BIM permite a criação de um modelo virtual unificado e colaborativo que integra todas as informações relativas à totalidade das especialidades envolvidas.

2.2.2. NÍVEIS DE DESENVOLVIMENTO

Os níveis de desenvolvimento (LOD) são uma forma de definir o nível de detalhamento e precisão do modelo BIM em cada fase de projeto. A American Institute of Architects (AIA) desenvolveu uma padronização de níveis de desenvolvimento, que varia de LOD 100 a LOD 500, indicando o grau de informação e maturidade dos elementos do modelo. Cada nível é definido pela quantidade e qualidade das informações contidas no modelo BIM. LOD é crucial para estabelecer expectativas claras quanto ao grau de desenvolvimento e empenho de cada equipa interveniente afeta ao projeto. Embora possam variar dependendo do contexto e do padrão adotado, os níveis LOD padronizados pela American Institute of Architects são:

- LOD 100: Representação conceitual, não gráfica, com informações básicas como formas aproximadas e tamanhos dos elementos, mas sem detalhes específicos.
- LOD 200: Representação esquemática, com informações detalhadas dos elementos, com formas precisas, tamanhos e relações espaciais dos elementos. Pode faltar informação relativamente aos materiais e componentes.
- LOD 300: Representação com informação detalhada dos elementos, incluindo formas, tamanhos materiais e especificações e informações de fabricantes. É geralmente usado para desenvolver projetos construtivos e permitir análises mais precisas.

- LOD 400: Representação de construção, com informações específicas da construção, como detalhes de montagem, tolerâncias, métodos de instalação e faseamento de construção. É usado principalmente para planeamento e coordenação da construção.
- LOD 500: Representação *as-built*, com precisão sobre os elementos contruídos e instalados, incluindo informação sobre operação e manutenção. É usado para auxiliar a gestão e manutenção de edifícios e infraestruturas, após a conclusão da construção.

2.2.3. BIM NA PRÉ-FABRICAÇÃO

O BIM pode desempenhar um papel essencial na indústria da pré-fabricação de betão, trazendo benefícios para todo o processo, desde o projeto até à produção e montagem das peças pré-fabricadas. De seguida são apresentadas algumas aplicações em que o domínio do BIM e pode acrescentar valor ao setor da pré-fabricação de betão:

- Desenho detalhado: o BIM permite criar modelos 3D detalhados das peças de betão pré-fabricado, fornecendo informações precisas sobre a geometria, dimensões e relações espaciais.
- Colaboração multidisciplinar: o BIM facilita a colaboração entre as diferentes disciplinas envolvidas na pré-fabricação de betão, como projeto de arquitetura, projeto de estrutura, entre outros projetos de especialidades.
- Deteção de conflitos: o uso desta tecnologia permite identificar e resolver antecipadamente não só problemas de incompatibilidade entre as peças de betão e outros elementos existentes, como de incompatibilidades internas. Estas incompatibilidades podem ter como origem aspetos de várias naturezas, tais como conflitos entre posicionamento de armaduras, bainhas de montagem, raios de curvatura de dobragem de armaduras, entre outros.
- Informações integradas: é possível agregar informações adicionais às peças de betão pré-fabricado, como dados de materiais, especificações, detalhes de fabrico, tempos de cura, acabamento, entre outros. Essas informações podem acrescentar valor no âmbito do controlo de qualidade, rastreabilidade e gestão da manutenção ao longo do ciclo de vida dos elementos.
- Otimização do processo: o modelo BIM permite a geração de vários documentos com elevado interesse, de forma integrada. É possível criar desenhos técnicos com informação detalhada para auxiliar o processo de fábrica, assim como tabelas de materiais e quantidades para que seja feita a melhor gestão de aprovisionamento e orçamentação.

Algumas desvantagens ou limitação de usar o BIM na pré-fabricação de betão são apresentadas:

- Curva de aprendizagem e formação: a implementação do BIM na pré-fabricação de betão requer um tempo significativo para a curva de aprendizagem e a formação adequada da equipa. O domínio das ferramentas e técnicas do BIM pode exigir investimentos em capacitação e formação dos profissionais envolvidos. Isso pode resultar em custos adicionais e um período de transição até que a equipa esteja plenamente familiarizada com a tecnologia.
- Custo inicial e investimento em tecnologia: a implementação do BIM na pré-fabricação de betão envolve custos iniciais significativos, incluindo aquisição de software, hardware e infraestrutura adequados.
- Limitações na representação detalhada: o BIM pode apresentar limitações na representação de detalhes complexos de elementos pré-fabricados. A modelação detalhada de conexões

específicas, juntas especiais ou características personalizadas podem exigir soluções alternativas.

- Limitações nas bibliotecas de elementos pré-fabricados: embora o BIM permita a criação de bibliotecas de famílias e parâmetros personalizados, a flexibilidade na personalização de elementos pré-fabricados por ser limitada. Algumas características especificas podem não ser facilmente configuráveis no ambiente BIM, o que pode requerer adaptações adicionais.
- Complexidade na representação de processos de fabrico: a modelação de processos de fabrico específicos da pré-fabricação de betão, como moldagem, cura e montagem de elementos, pode ser complexa no BIM. Esses processos muitas vezes envolvem etapas e considerações detalhadas que podem ser desafiadores de representar adequadamente.

2.3. PYTHON

2.3.1. APRESENTAÇÃO

O *Python* é uma linguagem de programação de alto nível, de código aberto e com uma sintaxe simples e de fácil compreensão. Foi desenvolvida no final dos anos 1980 pelo programador holandês Guido van Rossum. Foi concebida com o propósito de oferecer uma sintaxe clara e acessível, tornando-se facilmente compreensível tanto para programadores iniciantes quanto experientes. Lançada publicamente em 1991, *Python* conquistou gradualmente reconhecimento e adesão no meio da programação, sobretudo pela sua facilidade de uso e legibilidade. Essas características têm impulsionado o seu sucesso entre programadores iniciantes, dado a sua estrutura clara e intuitiva. Ao longo dos anos esta linguagem tem-se consolidado com uma das mais proeminentes a nível global. Tem sido adotada amplamente em atividades de diversas áreas tais como desenvolvimento web, análise de dados, inteligência artificial, automação de tarefas, criação de jogos, entre outras. O seu sucesso é atribuído, em parte, à sua biblioteca dotada de uma ampla gama de módulos e ferramentas para as mais diversas finalidades. A comunidade de desenvolvedores é extremamente ativa, contribuindo constantemente com pacotes de código aberto, enriquecendo o ecossistema da linguagem.

2.3.2. *PYTHON* NA ENGENHARIA CIVIL

Python tem ganho popularidade na engenharia civil devido à sua versatilidade e à variedade de bibliotecas disponíveis para análise de dados, modelação e processamento de informação. De seguida são apresentadas algumas aplicações de *Python* na engenharia civil:

- Análise e processamento de dados: Bibliotecas como *NumPy* e *Pandas* permitem manipular e analisar dados de uma forma mais rápida, poderosa e eficiente (Quraishi, A. and Dhapekar, N., 2021).
- Modelação e simulação: A biblioteca *SciPy* oferece recursos para resolver problemas matemáticos complexos, realizar simulações numéricas e resolver equações diferenciais. Estas capacidades podem ser exploradas em domínios tais como análises sísmicas, ou análises de segunda ordem (Quraishi, A. and Dhapekar, N., 2021).
- Visualização de dados: *Python* possui bibliotecas de visualização gráfica de dados, tais como Matplotlib e Seaborn. Estas ferramentas permitem criar gráficos 2D e 3D, diagramas, mapas e visualizações interativas para análise de resultados e apresentações (Molin, S. and Jee, K., 2021).

- Automação de tarefas: pode ser usado para automatizar tarefas repetitivas e rotineiras. Podem ser desenvolvidas rotinas para processar dados, gerar relatórios automaticamente, manipular ficheiros e executar tarefas (Sweigart, A., 2019). Atualmente a tecnologia de processamento de imagens permite ainda que sejam analisados dados tais como danos causados em estruturas de betão armado, automaticamente a partir de imagens captadas, ou registadas em tempo real (Jha, S. and Kaur, A., 2023).
- Desenvolvimento de ferramentas e aplicações: permite o desenvolvimento de ferramentas personalizadas e aplicações para dar resposta a necessidades específicas. Bibliotecas como *PyQT* ou *Django* permitem criar interfaces gráficas, locais ou alojadas num servidor, para facilitar a operabilidade dos programas (Sarvade, S.M. and Pore, S.M., 2019).
- Integração de software: *Python* é frequentemente usado para integração de software e interoperabilidade. Pode ser utilizado para criar scripts que comunicam com outros software utilizados no ramo da engenharia civil, como CAD, BIM, e software de análise estrutural, permitindo uma maior eficiência e troca de informações entre diferentes ferramentas. Alguns exemplos de software comercialmente disponível cuja interoperabilidade com o *Python* está prevista são: Autodesk Robot Structural Analysis, Autodesk Revit, CSI SAP2000 (Guan, X. [et al.], 2020).

2.3.3. Interoperabilidade com Autodesk Revit

O API do Revit é uma interface de programação de aplicações que permite aos programadores interagirem com o software Autodesk Revit. O API do Revit foi desenvolvido sob o *framework .NET*, para ser principalmente manipulado com a linguagem de programação C#, no entanto é possível recorrer à biblioteca *IronPython* para que o código escrito em *Python* possa ser interpretado pelo Revit. O API do Revit permite a criação de rotinas que automatizem tarefas, permite criar ferramentas personalizadas e estender as funcionalidades do Revit. Seguem-se alguns exemplos de uso do API do Revit (Sena, P.C.P.d., 2019):

- Criação e modificação de elementos: é possível criar, modificar e excluir elementos do modelo Revit, de forma automática através da API, tais como paredes, lajes, pilares, portas, janelas, entre outros elementos. É possível fazer alterações das suas propriedades tais como dimensões, materiais e parâmetros personalizados.
- Processamento de dados: pode-se consultar e manipular dados do modelo, como informações geométricas, propriedades dos elementos e informações de anotações. É possível criar e modificar tabelas com informações do modelo.
- Automação de tarefas: é possível automatizar tarefas repetitivas e morosas. Podem ser criadas rotinas para executar operações em massa, como gerar relatórios personalizados e exportar dados para outros formatos.
- Interoperabilidade: é possível a interoperabilidade do Revit com outras ferramentas e bibliotecas, tais como folhas de cálculo, bases de dados ou outros softwares como SAP2000 ou Autodesk Robot Structural Analysis.

3

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo será abordado o processo de dimensionamento e análise de estruturas industriais passivas de serem concebidas com recurso a elementos de betão pré-fabricado pré-esforçado. Será desenvolvido o estudo em torno de vigas de cobertura, de inércia variável, pela dificuldade acrescida que as mesmas representam não só no processo de dimensionamento estrutural, mas também na fase seguinte respeitante à preparação do fabrico. Embora o presente estudo tenha sido focado em vigas de inércia variável, o mesmo é transversal a vigas de inércia constante sujeitas a ações exclusivamente verticais.

As vigas de inércia variável são amplamente utilizadas em estruturas de coberturas, tais como edifícios industriais e pavilhões comerciais, onde se pretende que seja minimizada a obstrução de circulação no interior. A capacidade destas vigas de vencer vãos elevados reduz a quantidade de pilares internos, harmonizando a circulação e a utilidade dos edifícios. O facto destas vigas terem inércia variável ao longo do seu desenvolvimento permite que as mesmas tenham uma resposta estrutural mais eficiente que as vigas inteiramente maciças, resultando em soluções mais económicas devido ao menor consumo de material.

3.2. REGULAMENTAÇÃO

O desenvolvimento do presente estudo foi efetuado em concordância com as normas europeias em vigor, enunciadas nos Eurocódigos correspondentes. As normas europeias relevantes são as seguintes:

- NP EN 1990 2009: Bases para o projeto de estruturas
- NP EN 1991-1-1 2009: Ações em estruturas. Ações gerais. Pesos volúmicos, pesos próprios e sobrecargas em edifícios.
- NP EN 1992-1-1 2010: Projeto de estruturas de betão: Regras gerais e regras para edifícios.
- EN 10080: Aços para armaduras de betão
- prEN 10138-1: Aços de pré-esforço - Requisitos gerais.
- prEN 10138-3: Aços de pré-esforço - Cordões

3.3. AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Para vigas de cobertura as ações consideradas para dimensionamento são o peso próprio dos elementos, as restantes cargas permanentes, e as sobrecargas associadas à sua utilização. Neste estudo não foi considerada a ação da neve dada a sua pouca incidência no território nacional, embora a sua presença possa ser considerada sob forma de uma carga vertical. As análises dinâmicas associadas às ações do vento e de ocorrências sísmicas foram igualmente desprezadas, uma vez que estas podem ser desprezadas na análise de vigas de cobertura.

3.3.1. AÇÕES PERMANENTES

3.3.1.1. Peso próprio (PP)

A ação do peso próprio considerada é calculada através do produto do volume geométrico do elemento pelo peso volúmico do betão armado. Os valores recomendados pelo EC1 são apresentados na Tabela 1. O peso volúmico (kN/m^3) deve ser multiplicado pela secção transversal da peça de modo a obter a ação equivalente distribuída ao longo de todo o desenvolvimento longitudinal (kN/m).

Tabela 1 – Pesos volúmicos de materiais de construção segundo EC1

Materiais	Peso volúmico γ [kN/m^3]
betão (ver a EN 206)	
leve	
classe de massa volúmica LC 1,0	9,0 a 10,0 [1)2)]
classe de massa volúmica LC 1,2	10,0 a 12,0 [1)2)]
classe de massa volúmica LC 1,4	12,0 a 14,0 [1)2)]
classe de massa volúmica LC 1,6	14,0 a 16,0 [1)2)]
classe de massa volúmica LC 1,8	16,0 a 18,0 [1)2)]
classe de massa volúmica LC 2,0	18,0 a 20,0 [1)2)]
normal	24,0 [1)2)]
pesado	> [1)2)]
argamassa	
de cimento	19,0 a 23,0
de gesso	12,0 a 18,0
bastarda	18,0 a 20,0
de cal	12,0 a 18,0
[1)] Aumentar de 1 kN/m^3 para percentagem normal de aço em betão armado e pré-esforçado. *[2)] Aumentar de 1 kN/m^3 para betão fresco.*	
***NOTA:** Ver a secção 4.*	

O volume da peça pode ser determinado por diferentes abordagens.

- matematicamente a partir das dimensões da secção transversal, e do comprimento da peça
- a partir de software de modelação 3D
- estimativa a partir de simplificações geométricas

3.3.1.2. Restantes cargas permanentes (RCP)

As restantes cargas permanentes referem-se à ação relativa aos materiais não estruturais. Estas cargas atuam constantemente na estrutura ao longo do seu período de vida útil e podem ser de várias naturezas diferentes tais como revestimentos, paredes não estruturais, mobiliário fixo e equipamentos.

A evolutiva preocupação com a sustentabilidade energética tem uma influência significativa na conceção e dimensionamento de estruturas de edifícios. A legislação europeia RPBD reformulada em 2010 impõe a implementação de medidas sustentáveis que minimizem o impacto ambiental de novas construções, para um balanço energético quase nulo (Costa, R.J. [et al.], 2014). A busca por eficiência energética e sustentabilidade tem atraído uma maior atenção às propriedades térmicas e ao desempenho energético dos edifícios. Um edifício bem projetado pode desempenhar um papel fundamentar na redução do consumo energético de um edifício. A utilização de materiais que promovam o isolamento térmico reduz o consumo energético associado às correções térmicas, aquecimento e arrefecimento. A utilização de materiais com baixo impacto ambiental, como coberturas ou fachadas verdes representadas na Figura 8, pode contribuir para a redução do impacto ambiental dos edifícios, assim como a captação de energia solar (Hui, S.C. and Chan, S.-C., 2011).

Figura 8 - Cobertura de pavilhão industrial

Desta forma é possível perceber que as cargas associadas a estas ações podem tomar valores bastante dispares mediante escolhas feitas pela equipa responsável pela arquitetura e construção.

3.3.2. AÇÕES VARIÁVEIS

3.3.2.1. Sobrecargas (Sob)

A classificação quanto à acessibilidade da cobertura é apresentada na Tabela 2, referente ao Quadro 6.9 – Categorias de coberturas, do EC1. Para o corrente estudo considerou-se que as vigas em estudo se enquadram essencialmente na categoria H – Coberturas não acessíveis, exceto para operações de manutenção e reparação correntes.

Tabela 2 – Categorias de coberturas

Categoria	Utilização específica
H	Coberturas não acessíveis, excepto para operações de manutenção e reparação correntes
I	Coberturas acessíveis com utilizações definidas nas Categorias A a G
K	Coberturas acessíveis para utilizações especiais, tais como aterragem de helicópteros

A Tabela 3 refere-se ao Quadro 6.10 – Sobrecargas em coberturas da Categoria H, do EC2.

Tabela 3 - Sobrecargas em coberturas da Categoria H

Cobertura	q_k [kN/m^2]	Q_k [kN]
Categoria H	q_k	Q_k
NOTA 1: *Para a Categoria H, q_k poderá ser escolhido na gama 0,0 kN/m^2 a 1,0 kN/m^2 e Q_k na gama 0,9 kN a 1,5 kN. Quando se indica uma gama de valores, os valores a adoptar poderão ser definidos no Anexo Nacional. Os valores recomendados são: q_k = 0,4 kN/m^2, Q_k = 1,0 kN.*		
NOTA 2: *q_k poderá ser alterado pelo Anexo Nacional, em função da inclinação da cobertura.*		
NOTA 3: *Poderá admitir-se que q_k actua sobre uma área A, a qual poderá ser definida no Anexo Nacional. O valor recomendado para A é 10 m^2, numa gama entre zero e a área total da cobertura.*		
NOTA 4: *Ver também 3.3.2(1).*		

Os valores das sobrecargas recomendados são qk = 0,4 kN/m2 e Qk = 1,0kN, para regiões sem previsão de incidência de neve.

3.3.3. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

As combinações de ações a considerar no dimensionamento estrutural são estabelecidas no capítulo 6 do EC0. A Tabela 4 enuncia os valores dos coeficientes minorativos a utilizar para edifícios.

Tabela 4 - Valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios

Acção	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1)			
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	1,0	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN < peso dos veículos ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0

Combinação característica

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} \text{"+"} \; P \text{"+"} \; Q_{k,1} \text{"+"} \sum_{i>1} \psi_{0,i} \; Q_{k,i} \tag{3.1}$$

Combinação frequente

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} \text{"+"} \; P \text{"+"} \; \psi_{1,1} Q_{k,1} \text{"+"} \sum_{i>1} \psi_{2,i} \; Q_{k,i} \tag{3.2}$$

Combinação quase-permanente

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} \text{"+"} \; P \text{"+"} \sum_{i>1} \psi_{2,i} \; Q_{k,i} \tag{3.3}$$

3.4. MATERIAIS

3.4.1. BETÃO

As peças de betão pré-fabricado pré-esforçado são produzidas a partir da combinação de betão e outros elementos constituintes que garantam a resistência e estabilidade estrutural às ações e condições a que a peça será sujeita, tais como armadura ordinária e de pré-esforço. Nos elementos de betão em que é utilizado o pré-esforço para aumentar a capacidade resistente, o mesmo é materializado com cordões de aço pré-esforçados combinados com varões de aço que podem desempenhar uma função ativa ou passiva, cujo tema será devidamente desenvolvido neste capítulo. O betão é o material mais usado na construção civil, e o segundo material mais consumido a nível global, apenas superado pelo consumo de água (Gagg, C.R., 2014). Este material é composto principalmente por uma mistura de cimento, agregados (como areia, brita e cascalho) e água, aos quais podem ser adicionados aditivos e outros materiais, dependendo da finalidade e especificação técnica do betão requerido (Appleton, J., 2013).

3.4.2. Aço

O reforço do betão é materializado pela utilização de uma combinação de varões de aço de armadura passiva, com cordões de aço de pré-esforço. O aço de armadura passiva deve respeitar a norma EN 10080, enunciada pelo EC2 3.2.1. Atualmente apenas é utlizado pela Mota-Engil Prefabricados aço de classe A500 NR SD para armadura passiva. Este é um tipo de aço dentro das conformidades estabelecidas pela norma EN 10080.

Em relação às armaduras ativas de pré-esforço, a EN 10138 estabelece as normas a respeitar em relação às propriedades do aço. A Figura 9 representa o gráfico de tensões-extensões do aço típico de pré-esforço, de acordo com o EC2, sujeito a esforços de tração. O aço de pré-esforço utilizado atualmente pela Mota-Engil Prefabricados é composto por cordões de 7 fios de aço Y1860S. A Tabela 5 apresenta os valores característicos correspondentes aos varões de diâmetros 15,2mm e 15,7mm.

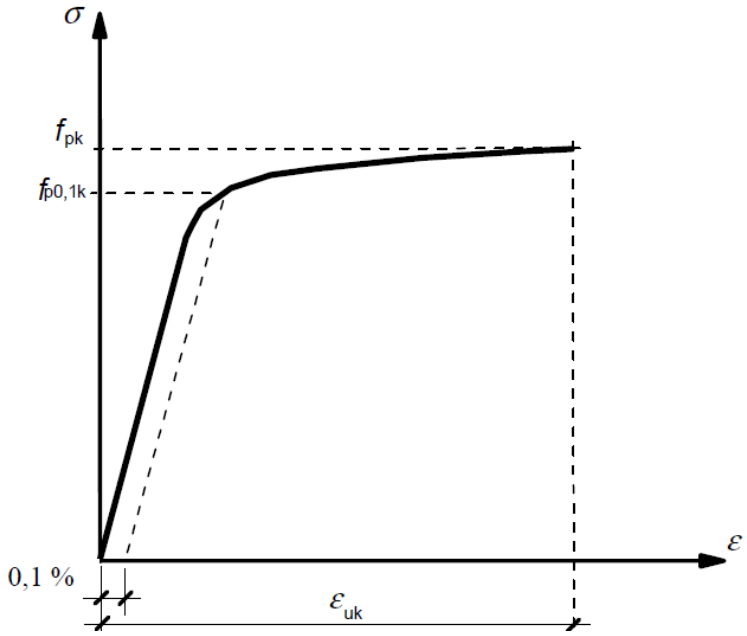


Figura 9 – Diagrama de tensões-extensões do aço típico de pré-esforço (EC2)

Tabela 5 - Valores característicos de cordões de pré-esforço de diâmetro 15,2mm e 15,7mm

Strand Type	Standard	F_{pk}	Nominal ø	Cross Section	Weight	Min. Breaking Load F_{pk}	Relaxation 1000h at 70% of F_{pk}	Yield strength 0,1% strain
			mm	mm²	g/m			
0,6" (15 mm)	EN 10138-3	1860 MPa	15,2	140	1.093	260	2,50%	224
	ASTM A416M-99	270 ksi	15,24	140	1.102	260,7	2,50%	234,6 (1%)
	BS 5896:1980	1770 MPa	15,7	150	1.180	265	2,50%	225
	EN 10138-3	1860 MPa	15,7	150	1.172	279	2,50%	240
0,5" (13 mm)	ASTM A416M-99	270 ksi	12,7	98,7	775	183,7	2,50%	165,3 (1%)
	BS 5896:1980	1860 MPa	12,9	100	785	186	2,50%	158
	prEN 10138-3	1860 MPa	13	100	781	186	2,50%	160

3.5. PRÉ-ESFORÇO

3.5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização de cordões pré-esforçados em vigas de betão armada é uma técnica que visa criar forças de compressão que neutralizam as tensões de tração que surgem durante o serviço da estrutura. A utilização de cordões pré-esforçados aumenta consideravelmente a capacidade de carga e a resistência das vigas de betão, permitindo a execução de estruturas mais eficientes e esbeltas. Outra vantagem da utilização de cordões pré-esforçados é o facto de estes reduzirem as deformações e as fissuras associadas às cargas de serviço, melhorando a durabilidade e o tempo de vida útil das estruturas. Existem essencialmente duas técnicas distintas de aplicar o pré-esforço nas estruturas: pré-tensão e pós-tensão.

Na pré-tensão, os cabos, ou cordões, são tensionados, aplicando uma força de tração nos mesmos, antes do betão ser colocado e ganhar resistência. Nesta fase os cordões são fixados entre dois apoios rígidos, de forma que não é transmitida qualquer força ou tensão ao betão. Com o evoluir do tempo, o betão ganha cura e os cordões ganham aderência ao betão. No momento de transferência das peças os cordões são libertados dos apoios, fazendo com que os mesmos passem a transmitir uma ação de força compressiva sobre as peças de betão, e as tensões correspondentes. Este método embora tenha a limitação de serem usados traçados de cabo retilíneos tem a vantagem de ser um método eficiente, económico e apropriado para utilização em ambiente industrial. Podem ser betonadas várias peças simultaneamente, conforme ilustrado na Figura 10, aproveitando a energia e recursos consumidos pelo tensionamento dos cordões, aumentando a eficiência do processo.

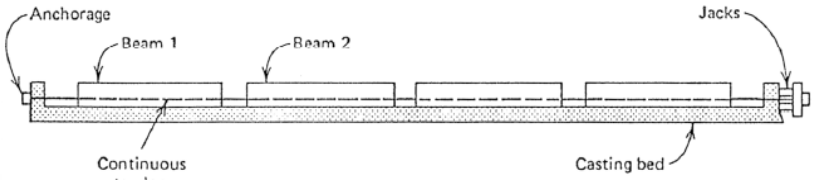


Figura 10 - Pista de pré-esforço

A pós-tensão é realizada após a betonagem da estrutura. Antes da betonagem são introduzidos no molde da viga bainhas de pré-esforço deixando espaço para a passagem dos cabos de aço. Após a cura do betão os cabos, ou cordões, são inseridos e tensionados utilizando macacos hidráulicos. De seguida os mesmos são fixados nas extremidades com recurso a cunhas de ancoragem, provocando a transferência de forças de compressão no betão. Esta técnica permite uma maior flexibilidade nas forças induzidas ao betão ao ser possível utilizar traçados curvilíneos, conforme representado na Figura 11, assim como haver a possibilidade de ajuste posterior das tensões aplicadas à peça para manutenção, ou haver a aplicação de forças em local de obra.

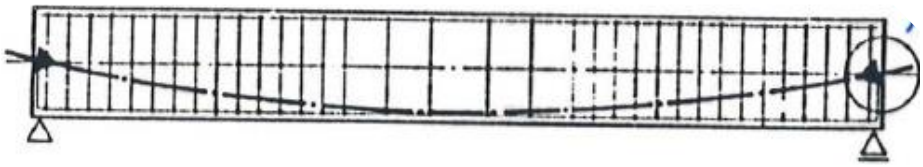


Figura 11 - Traçado de cordão de pré-esforço curvilíneo

A tecnologia de aplicação de forças de pré-esforço utilizada no fabrico de vigas pré-esforçadas na fábrica da Mota-Engil Prefabricados cinge-se exclusivamente ao método de pré-tensionamento das peças, de forma que apenas será abordado o processo de cálculo do mesmo.

3.5.2. FORÇA DE PRÉ-ESFORÇO

É estabelecido pelo EC2 no capítulo 5.10.2, referente a forças de pré-esforço, que o valor da força máxima aplicada à armadura de pré-esforço não deve exceder o valor de P_{max} dado pela expressão (3.4)

$$P_{max} = A_p \cdot \sigma_{p,max} \tag{3.4}$$

em que:

A_p área da secção transversal da armadura de pré-esforço

$\sigma_{p,max}$ tensão máxima aplicada à armadura de pré-esforço

$$\sigma_{p,max} = \min\{k_1 \cdot f_{pk};\ k_2 \cdot f_{p0,1k}\} \tag{3.5}$$

em que: $k_1 = 0{,}8$ e $k_2 = 0{,}9$, valores recomendados pelo Anexo Nacional.

A tensão na armadura de pré-esforço imediatamente após a transferência de pré-esforço não pode ser superior ao valor dado pela expressão (3.6):

$$\sigma_{pm0}(x) = \min\{k_7 \cdot f_{pk};\ k_8 \cdot f_{p0,1k}\} \tag{3.6}$$

em que: $k_7 = 0{,}75$ e $k_8 = 0{,}85$, valores recomendados pelo Anexo Nacional.

No dimensionamento de elementos de betão sujeitos a forças de pré-esforço devem ser tomadas em consideração as perdas de pré-esforço que estão devidamente previstas no EC2. As perdas de força de pré-esforço dividem-se em duas naturezas, perdas instantâneas e perdas diferidas.

As perdas instantâneas são perdas de tensão que ocorrem imediatamente após a aplicação do pré-esforço em elementos de betão pré-esforçado. A quantificação das referidas perdas resulta na combinação cumulativa das seguintes influências:

- perdas devidas à deformação instantânea do betão ΔP_{el};
- perdas devidas à relaxação do aço de pré-esforço a curto prazo ΔP_r;
- perdas devias ao atrito $\Delta P_\mu(x)$;
- perdas devidas ao deslocamento da armadura nos dispositivos de ancoragem ΔP_{sl}.

As perdas de tensão diferidas são calculadas considerando as seguintes causas:

- redução de extensão dos cordões, associado ao encurtamento que o betão sofre devido à retração e fluência;
- redução de tensão no aço de pré-esforço devido à relaxação do mesmo.

O valor da força de perda de tensão diferida pode ser estimado através de um método simplificado enunciado no EC2 presente no capítulo 5.10.6 que toma em consideração alguns dos seguintes parâmetros:

- módulos de elasticidade do aço de pré-esforço e do betão;
- extensão estimada de retração;
- coeficiente de fluência, a variar no tempo;
- áreas de todas as secções, de betão e das armaduras passivas e ativas;
- valor da variação de tensão nas armaduras, no instante t, devido à relaxação do aço de pré-esforço.

3.5.3. AMARRAÇÃO DOS CORDÕES DE PRÉ-ESFORÇO

A amarração dos cordões de pré-esforço em peças pré-tensionadas é atingida através da aderência dos cordões ao próprio betão. Desta forma as forças de pré-esforço resultantes variam ao longo do elemento (Figura 12).

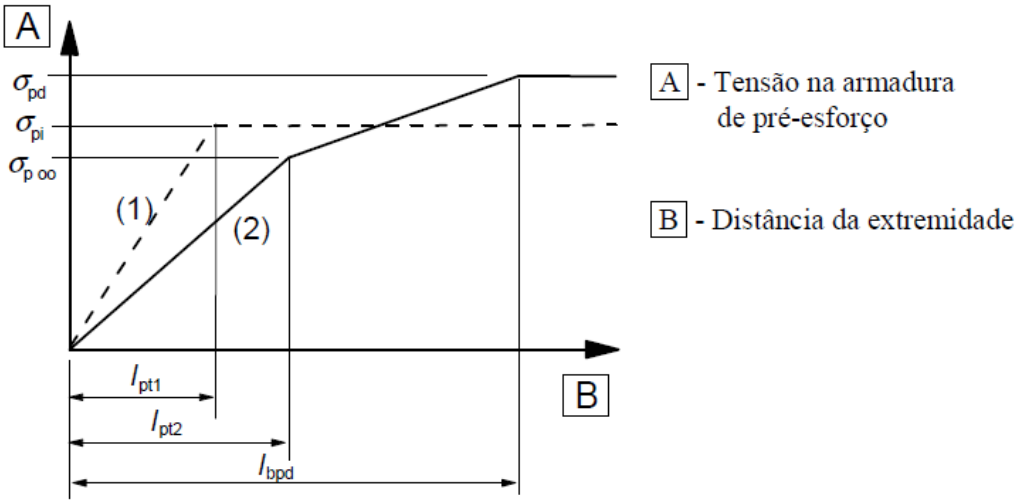


Figura 12 - Comprimento de amarração de varões de pré-esforço

Na Figura 12 a simbologia tem o seguinte significado:

σ_{pd} tensão máxima admissível na armadura de pré-esforço

σ_{pi} tensão de tração máxima aplicada nas armaduras de pré-esforço deduzidas as perdas instantâneas

$\sigma_{p\infty}$ tensão de tração nas armaduras de pré-esforço após todas as perdas

$l_{pt,i}$ valor de cálculo do comprimento de transmissão, em função da situação de projeto. $l_{pt1=0,8*l_{pt}}$; $l_{pt2} = 1,2\ l_{pt}$;

l_{bpd} comprimento de amarração total necessário à amarração de uma armadura de pré-esforço

A tensão de rotura da aderência da amarração no estado limite último é dada pela expressão (3.7):

$$f_{bpd} = \eta_{p2}\, \eta_1\, f_{ctd} \tag{3.7}$$

em que:

f_{bpd} tensão de rotura da aderência da amarração no estado limite último

η_{p2} coeficiente que tem em conta o tipo de armadura de pré-esforço e as condições de aderência na amarração.

η_1 coeficiente que tem em conta as condições de aderência na execução

f_{ctd} valor de cálculo da resistência do betão à tração no momento da libertação.

Poderá considerar-se que as tensões no betão têm uma distribuição linear a partir do comprimento de regularização, expressão (3.8):

$$l_{disp} = \sqrt{l_{pt}^2 + d^2} \tag{3.8}$$

3.6. VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES

3.6.1. ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

O capítulo 7 do EC2 estabelece as orientações a seguir no que diz respeito aos estados limites de utilização. Estas verificações visam garantir o bom funcionamento e desempenho das estruturas durante a sua vida útil, sobretudo no que diz respeito à deformação e durabilidade da mesma. O controlo de fendilhação e fissuração é preponderante para garantir o desempenho e durabilidade do betão armado. As tensões no betão variam ao longo do seu desenvolvimento longitudinal e são calculadas através da expressão (3.9):

$$\sigma_x(x) = \frac{M_x(x)}{I_x(x)} y(x) + \frac{N(x)}{A(x)} \tag{3.9}$$

em que:

σ_x tensão do betão

M_x momento fletor

I_x momento de inércia em XX

y cota da fibra ao eixo neutro

N esforço axial

A secção transversal

- Combinação característica: $\sigma_c \leq 0{,}6 f_{ck}$

As tensões de compressão no betão devem ser limitadas, para diferentes casos de combinações de ações, de forma a evitar a formação de fendas longitudinais, a microfendilhação ou níveis de fluência elevados. Desta forma são impostas as seguintes verificações:

Esta condição visa limitar a fendilhação do betão, de modo a proliferar a durabilidade do mesmo;

- Combinação quase-permanente: $\sigma_c \leq 0{,}45 f_{ck}$

Esta condição tem o propósito de certificar que a fluência do betão tem comportamento linear.

A Tabela 6 indica os limites para a fendilhação do betão, mediante a classe de exposição e da natureza da armadura usada para reforço.

Tabela 6 - Valores recomendados de w_{max} (mm)

Classe de Exposição	*Elementos de betão armado e elementos de betão pré-esforçado com armaduras não aderentes*	*Elementos de betão pré-esforçado com armaduras aderentes*
	Combinação de acções quase-permanente	*Combinação de acções frequente*
X0, XC1	*0,4*[1]	*0,2*
XC2, XC3, XC4	*0,3*	*0,2*[2]
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		*Descompressão*
NOTA 1: *Para as classes de exposição X0 e XC1, a largura de fendas não tem influência sobre a durabilidade e este limite é estabelecido para dar em geral um aspecto aceitável. Na ausência de especificações no que respeita ao aspecto, este limite poderá ser reduzido.* ***NOTA 2:*** *Para estas classes de exposição deverá verificar-se, ainda, a descompressão para a combinação quase-permanente de acções.*		

3.6.2. ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

3.6.2.1. Flexão composta

A determinação da resistência à flexão última de secções de betão pré-esforçado baseia-se nas seguintes hipóteses:

- As secções mantêm-se planas;
- A extensão nas armaduras aderentes, em tração ou em compressão, é a mesma da do betão que as envolve;
- A resistência do betão à tração é ignorada;
- As tensões no betão comprimido são obtidas do diagrama tensões-extensões de cálculo (Figura 13);
- As tensões nas armaduras de betão, armado ou pré-esforçado, são obtidas dos diagramas de cálculo (Figura 14 e Figura 15);
- A avaliação das tensões nas armaduras de pré-esforço tem em conta a extensão inicial dessas armaduras;
- O domínio admissível de distribuições de extensões é o representado na Figura 16,

em que:

n expoente, de acordo com o Quadro 3.1 do EC2;

ϵ_{c2} extensão ao ser atingida a resistência máxima, de acordo com o Quadro 3.1 do EC2;

ϵ_{cu2} extensão última, de acordo com o Quadro 3.1 do EC2.

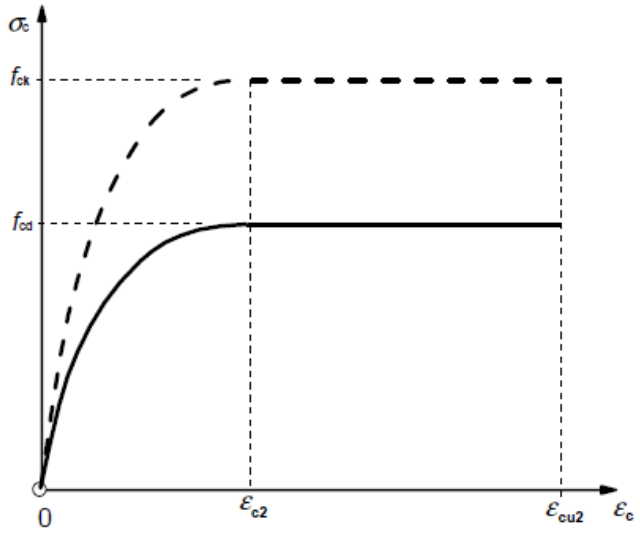


Figura 13 - Diagrama parábola-retângulo para o betão comprimido

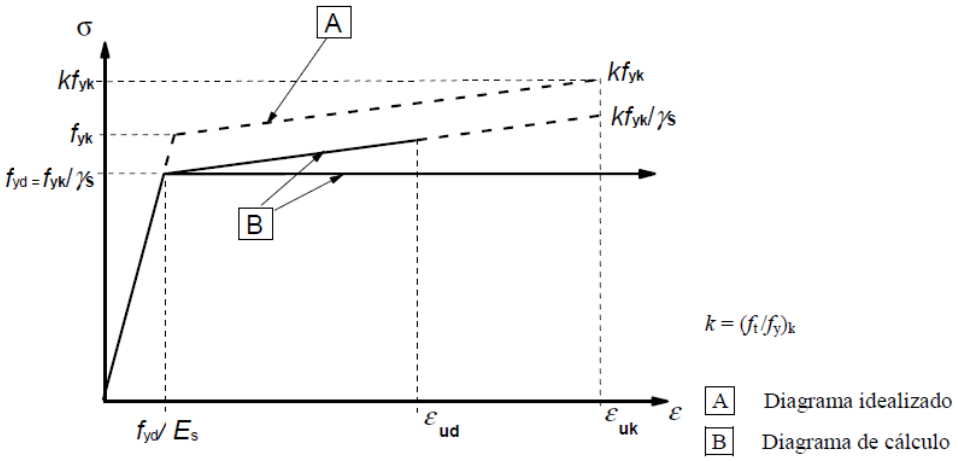


Figura 14 - Diagramas, idealizado e de cálculo, tensões-extensões do aço das armaduras para BA

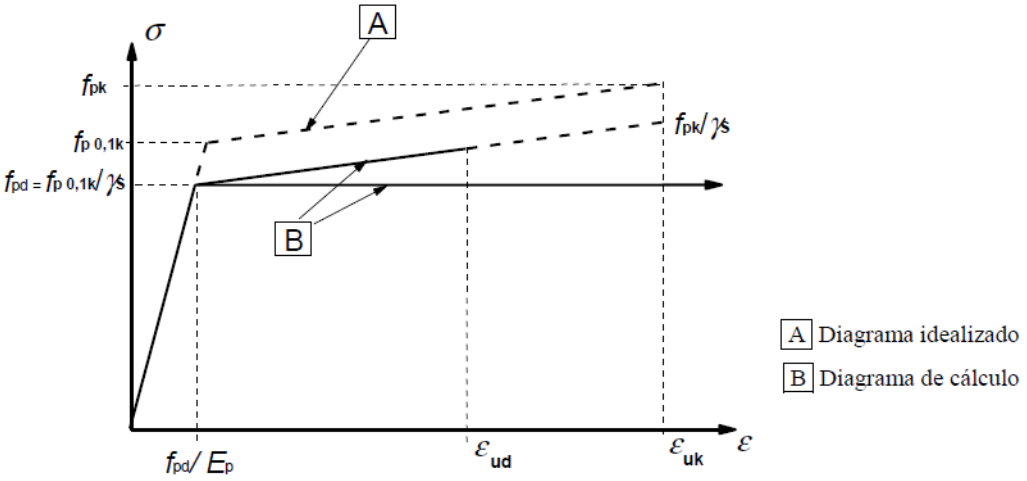


Figura 15 - Diagramas, idealizado e de cálculo, de tensões-extensões para aços de pré-esforço

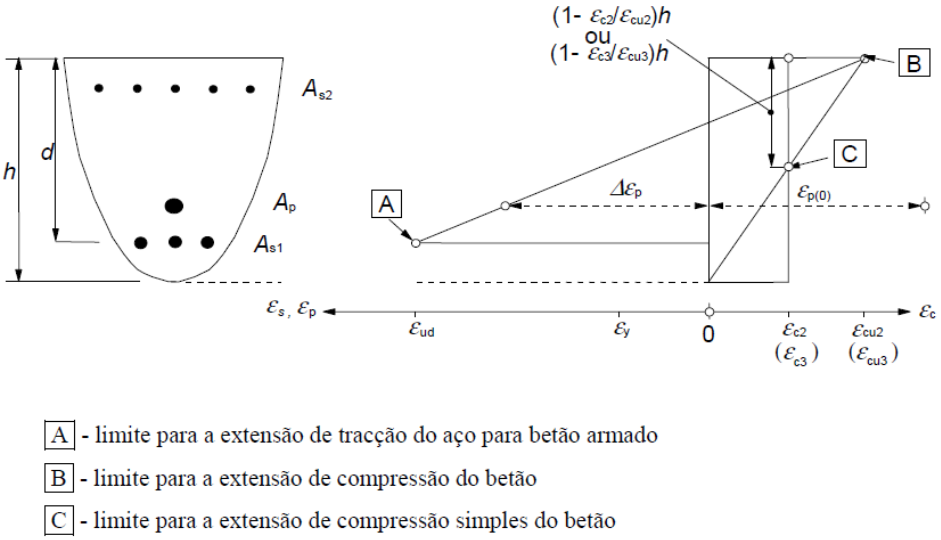


Figura 16 - Distribuições de extensões admissíveis no estado limite último

3.6.2.2. Esforço transverso

Para a verificação da resistência em relação ao esforço transverso, definem-se os seguintes valores:

V_{Ed} valor de cálculo do esforço transverso na seção considerada resultante das ações exteriores e do pré-esforço;

$V_{Rd,c}$ valor de cálculo do esforço transverso resistente do elemento sem armadura de esforço transverso; expressão (3.10);

$V_{Rd,s}$ valor de cálculo do esforço transverso equilibrado pela armadura de esforço transverso na tensão de cedência; expressão (3.11);

$V_{Rd,max}$ valor de cálculo do esforço transverso resistente máximo do elemento, limitado pelo esmagamento das escoras comprimidas. Expressão (3.12).

Em regiões do elemento em que $V_{Ed} < V_{Rd,c}$, não é necessário o cálculo da armadura de esforço transverso. Nas zonas em que $V_{Ed} > V_{Rd,c}$ deverá adotar-se uma armadura de esforço transverso suficiente de forma que $V_{Ed} \leq V_{Rd}$. Nas secções em que a verificação do esforço transverso dispensar o cálculo da armadura de esforço transverso, deverá prever-se um armadura mínima de esforço transverso, salvo em elementos de pequena importância.

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \tag{3.10}$$

em que:

$V_{Rd,c}$		(N)
$C_{Rd,c} =$	$0{,}18/\gamma_c$	( )
k =	$1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2{,}0, com\ d\ em\ mm;$	( )
$\rho_1 =$	$\frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0{,}02;$	( )
A_{sl}	área da armadura de tração prolongada de um comprimento $\geq (l_{bd} + d)$ para além da secção considerada (Figura 17);	(m^2)
$\sigma_{cp} =$	$\frac{N_{Ed}}{A_c} < 0{,}2\ f_{cd};$	(MPa)
A_c	área da secção transversal de betão;	(mm^2)
b_w	menor largura da secção transversal na área tracionada;	(mm)
$k_1 =$	0,15	( )

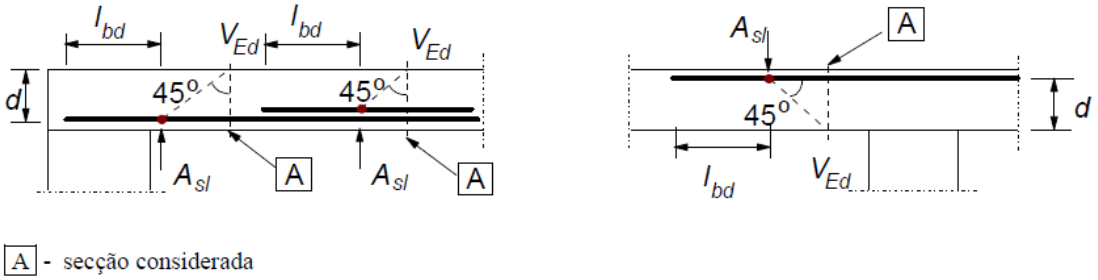


Figura 17 - Definição de A_{sl}

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot cot\theta \tag{3.11}$$

em que:

A_{sw}	área da secção transversal das armaduras de esforço transverso;	(m^2)
s	espaçamento dos estribos;	(m)
f_{ywd}	valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso;	(MPa)
θ	ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga. $1 \leq cot\theta \leq 2{,}5$, de acordo com EC2 AN, (Figura 17);	(rad)
z	Braço do binário das forças interiores, para um elemento de altura constante, correspondente ao momento fletor no estado considerado. $z = 0{,}9d$.	(m)

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}/(cot\theta + tan\theta) \tag{3.12}$$

em que:

α_{cw}	coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido;	( )
v_1	coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transverso.	( )

A Figura 18 exibe algumas hipóteses possíveis de disposição de armaduras de esforço transverso.

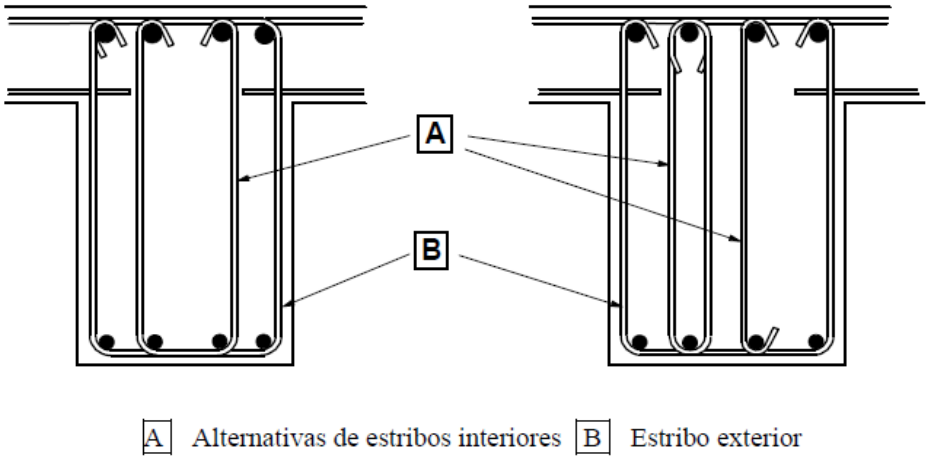


Figura 18 – Exemplos de armaduras de esforço transverso

A taxa de armadura de esforço transverso é obtida pela expressão (3.13):

$$\rho_w = A_{sw}/(s \cdot b_w \cdot sen\alpha) \tag{3.13}$$

em que α é o ângulo formado pelas armaduras de esforço transverso e o eixo longitudinal.

O valor de $\rho_{w,min}$ recomendado pelo EC2 AN é obtido pela expressão (3.14):

$$\rho_{w,min} = (0{,}8\sqrt{f_{ck}})/f_{yk} \tag{3.14}$$

O espaçamento longitudinal máximo entre armaduras de esforço transverso não deverá ser superior a $s_{l,max}$, cujo valor recomendado pelo EC2 AN é obtido pela expressão (3.15):

$$s_{l,max} = 0{,}75d(l + cot\alpha) \tag{3.15}$$

O espaçamento transversal entre os ramos de estribos não deverá ser superior a $s_{t,max}$, cujo valor recomendado pelo EC2 AN é obtido pela expressão (3.16)(3.15):

$$s_{t,max} = 0{,}75d \leq 600mm \tag{3.16}$$

4

Vigas pré-fabricadas pré-esforçadas de inércia variável

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As vigas de inércia variável, vulgarmente conhecidas como vigas delta, são amplamente utilizadas como vigas de coberturas em edifícios com vãos de elevada envergadura. Estas vigas são soluções bastante económicas quando compradas com vigas inteiramente maciças, ou de secção constante. Estas vigas têm valor muito competitivo para soluções industriais com larguras de influência das vigas para valores compreendidos entre 8m a 12m, sendo que para influências menores soluções baseadas em estruturas metálicas poderão manifestar-se mais económicas. A Figura 19 ilustra um edifício industrial onde são utilizadas vigas de inércia variável na cobertura.

Figura 19 - Interior da fábrica da Maprel

4.2. COMPOSIÇÃO GEOMÉTRICA

Através da pré-fabricação conseguem-se construir vigas com geometrias vulgarmente usadas em estruturas metálicas, tais como vigas de secção I. Estas secções são compostas por um elemento vertical, chamado de alma, e dois elementos horizontais, chamados banzos. A alma da viga contribui para a resistência ao corte, enquanto os banzos resistem essencialmente aos esforços axiais de tração e compressão provocados pelo momento fletor. Estas secções permitem tirar melhor proveito das capacidades dos materiais comparando com as vigas de secção retangular, resultando em elementos capazes de vencer vãos de envergadura superior.

As vigas de inércia variável, tal como o seu nome sugere, têm propriedades que variam no espaço. Ao longo do seu eixo longitudinal a mesma é composta por 3 tipos de secções diferentes, cuja representação é feita na Figura 20. A viga em análise tem simetria em alçado pelo que apenas está representada metade da viga.

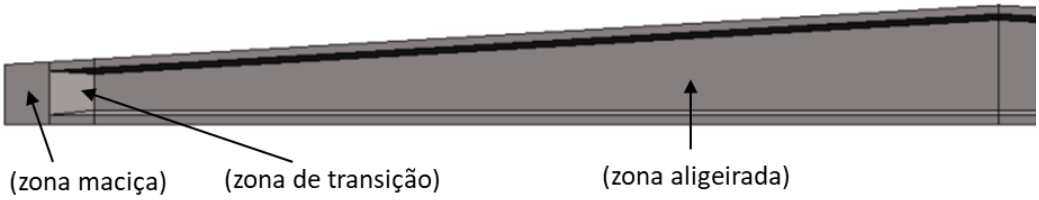


Figura 20 - Modelo BIM de viga de inércia variável

- Zona maciça: a zona maciça é composta por uma secção de forma retangular em todo o seu desenvolvimento, com altura variável ao longo do eixo longitudinal. Este tramo é localizado nas extremidades, onde ocorrem os valores máximos de esforço transverso. A Figura 21 ilustra a zona maciça numa vista 3D.

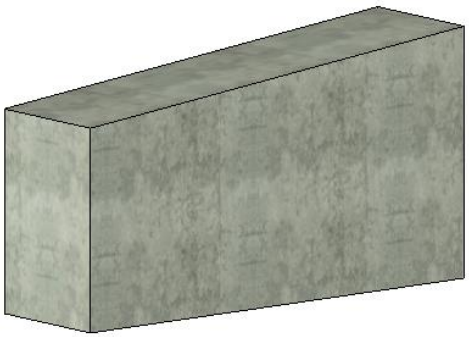


Figura 21 - Vista 3D de zona maciça de viga de inércia variável

- Zona de transição: a zona de transição é responsável pela transição de secção maciça para secção aligeirada. Ao longo deste tramo varia a espessura da alma da secção, que inicialmente toma o valor da largura total dos banzos, e vai adelgaçando até à espessura da alma da zona aligeirada. A Figura 22 ilustra a secção de transição, em vista 3D de orientações diferentes:

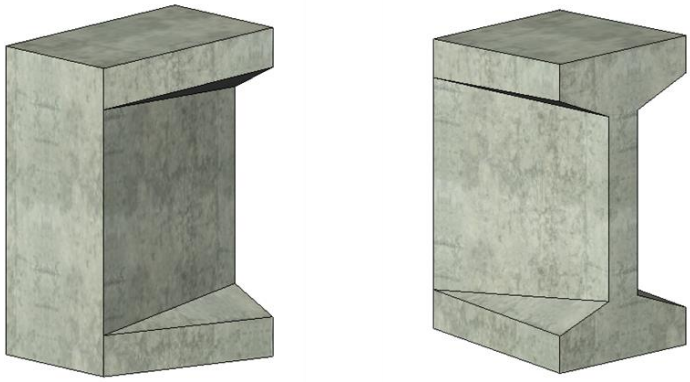


Figura 22 - Vistas 3D de zona de transição de viga de inércia variável

- Zona aligeirada: a zona aligeirada é composta pela alma e pelos banzos superior e inferior. As características dos banzos são constantes ao longo de todo o desenvolvimento, assim como a espessura da alma. O único parâmetro que varia longitudinalmente é a altura da alma. A Figura 23 ilustra a secção aligeirada em alçado frontal, acompanhada das secções transversais associadas às posições longitudinais nas extremidades da mesma.

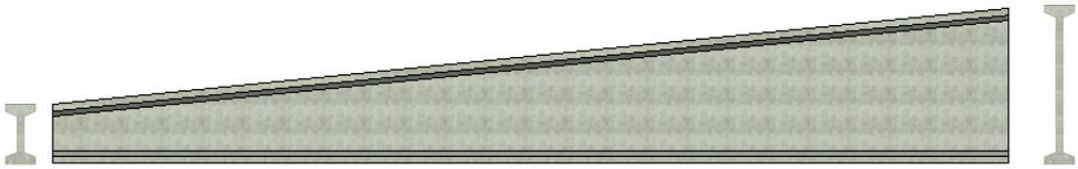


Figura 23 - Zona aligeirada de viga de inércia variável

4.3. PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO E PREPARAÇÃO

O processo construtivo destes elementos é desenvolvido multidisciplinarmente por diferentes equipas. Inicialmente é desenvolvido o processo de recolha de informação. Para além de ser necessário conhecer os vãos que se pretendem vencer, é importante levantar informação quanto a outras restrições e condicionantes que possam ser decisivas.

No dimensionamento de vigas de cobertura é necessário saber quais são as cargas atuantes sobre as mesmas. Para isso, é necessário averiguar quais os materiais usados nas coberturas, os equipamentos instalados sob as coberturas, e outros equipamentos que possam ser suspensos no interior da estrutura sob as vigas, tais como instalações elétricas, condutas de ar, ou até pontes rolantes.

O processo é iniciado com o levantamento de informação em relação a restrições impostas pela arquitetura externa, tais como inclinação das vigas ou cércea máxima permitida. Estas informações podem ser determinantes no processo de licenciamento de edifício, ou na usabilidade do mesmo. Segue-se o processo de dimensionamento e análise estrutural, onde é feita a escolha da solução a implementar. A etapa seguinte diz respeito ao desenvolvimento dos desenhos técnicos, e mapas de preparação para fabrico. Os desenhos técnicos são elaborados pela equipa de desenhadores de acordo com as indicações da equipa de dimensionamento e análise estrutural. Na Figura 24 é possível observar parte de um corte longitudinal, onde estão marcadas todas as coordenadas e cotas do posicionamento da armadura de resistência ao esforço de corte, estribos. É possível observar que esta viga foi segmentada em diferentes tramos, com afastamentos entre estribos diferentes, de modo a otimizar a utilização dos materiais.

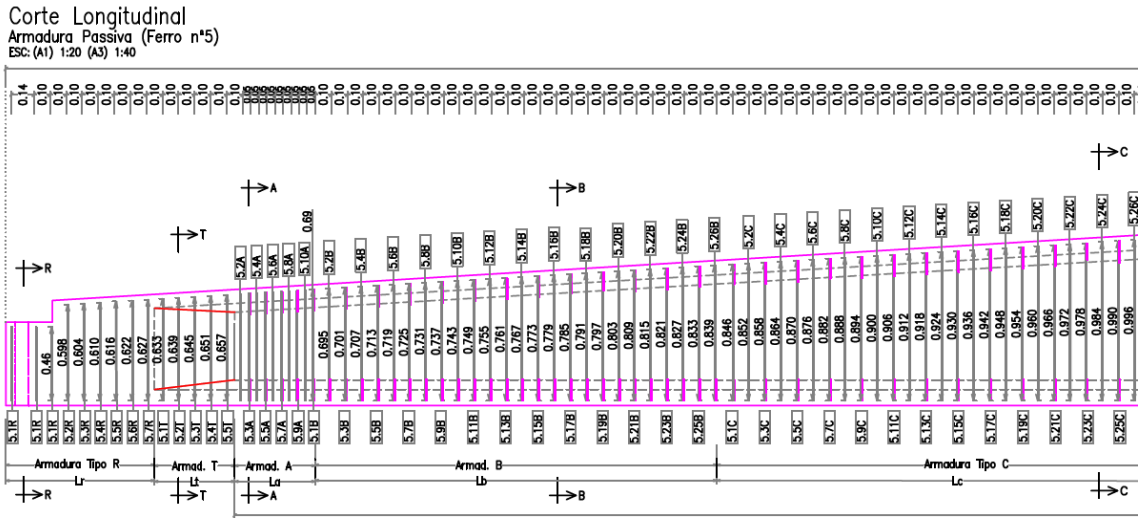
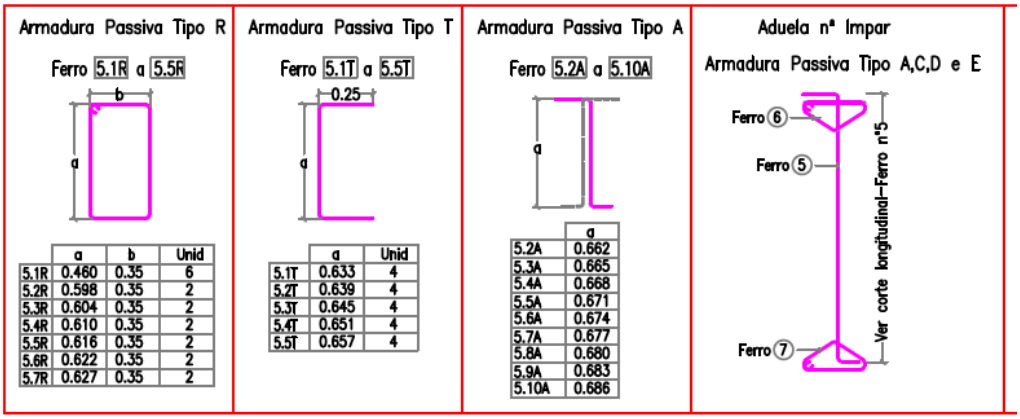


Figura 24 - Corte longitudinal de viga de inércia variável com identificação de estribos

A Figura 25 ilustra parte de um desenho técnico, onde é possível ver pormenores relativos à disposição da armadura passiva, tais como dimensões e número de unidades de varões. Nesta figura é possível constatar que foi adotada uma solução composta por estribos de dois ramos na secção maciça (Armadura Passiva Tipo R), e estribos de apenas um ramo ao longo das restantes zonas, uma vez que espessura da alma não permite a introdução de dois ramos de estribos, respeitando a espessura de recobrimento requerida. Neste caso o espaçamento entre estribos tem que ser menor (metade do espaçamento, comparando com uma solução composta por dois ramos de estribos), e os estribos são dispostos de forma intercalada longitudinalmente de forma simétrica.



	a	b	Unid
5.1R	0.460	0.35	6
5.2R	0.598	0.35	2
5.3R	0.604	0.35	2
5.4R	0.610	0.35	2
5.5R	0.616	0.35	2
5.6R	0.622	0.35	2
5.7R	0.627	0.35	2

	a	Unid
5.1T	0.633	4
5.2T	0.639	4
5.3T	0.645	4
5.4T	0.651	4
5.5T	0.657	4

	a
5.2A	0.662
5.3A	0.665
5.4A	0.668
5.5A	0.671
5.6A	0.674
5.7A	0.677
5.8A	0.680
5.9A	0.683
5.10A	0.686

Figura 25 - Desenhos técnicos com pormenorização de dimensões de estribos

Na Figura 26 é possível observar que alguns dos cordões de pré-esforço, nomeadamente os superiores, estão colocados dentro de bainhas, compostas por tubos de plástico. Estas bainhas têm comprimentos determinados em projeto e têm a finalidade de fazer com que as tensões de pré-esforço sejam faseadas longitudinalmente. Os cordões são embainhados de modo a permitir a validação de todas as verificações de segurança em estado limite de utilização. Geralmente as fibras condicionantes são as fibras superiores do betão, junto aos apoios provisórios utilizados durante o armazenamento e transporte da peça. É uma prática recomendável que sejam utilizados cordões no centro da secção, quando não são utilizados todos os cordões, uma vez que desta forma os mesmos beneficiam de melhor área de influência sob à alma da viga, distribuindo as tensões provocadas de forma mais homogénea.

Figura 26 - Topo de viga de inércia variável

São apresentadas de seguida as diferentes respostas estruturais observadas em duas vigas idênticas com a única diferença de que na hipótese (Anexo 3) A foram otimizados os embainhamentos dos cordões de pré-esforço, enquanto na hipótese B (Anexo 4) não houve qualquer embainhamento de cordões. Pode-se observar que a otimização do embainhamento de cordões de PE é determinante na fase jovem do betão, tais como nos instantes de transferência do pré-esforço (Figuras Figura 27 e Figura 28) e armazenamento e transporte da peça (Figuras Figura 29 e Figura 30), enquanto por exemplo para a avaliação da combinação característica não se verifica nenhuma diferença percetível (Figuras Figura 31 e Figura 32). Podem ser consultadas as restantes avaliações nos Anexos 3 e 4. Na hipótese B, não havendo qualquer embainhamento, as mudanças bruscas de tensão nas fibras inferior e superior devem-se à secção que separa a zona maciça da viga, para a zona aligeirada onde existe uma grande diferença de propriedades geométricas.

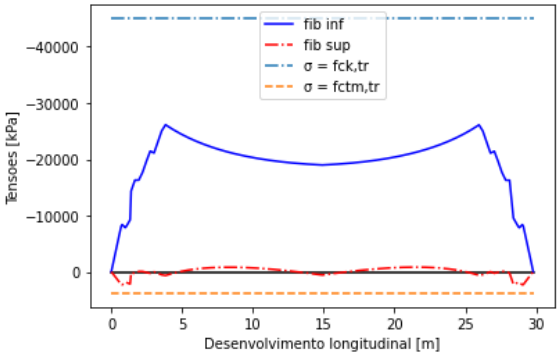


Figura 27- Diagrama de tensões no instante de transferência (hip. A)

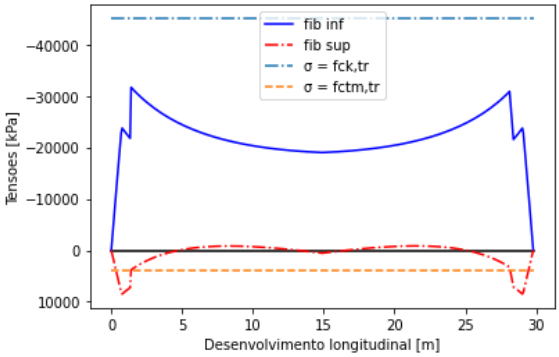


Figura 28 - Diagrama de tensões no instante de transferência (hip. B)

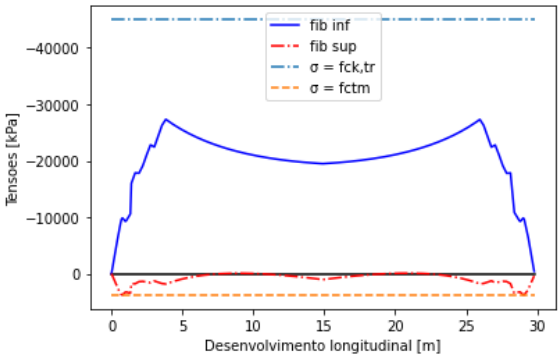


Figura 29 - Diagrama de tensões em armazenamento e transporte (hip. A)

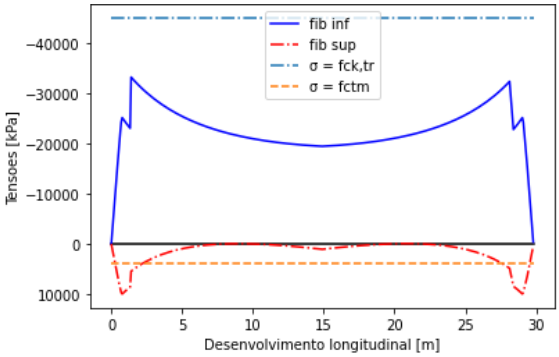


Figura 30 - Diagrama de tensões em armazenamento e transporte (hip. B)

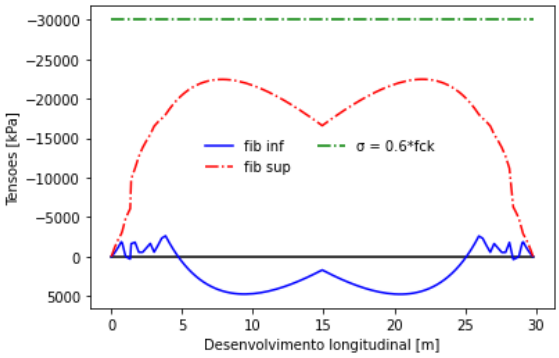


Figura 31 - Diagrama de tensões de combinação característica (hip. A)

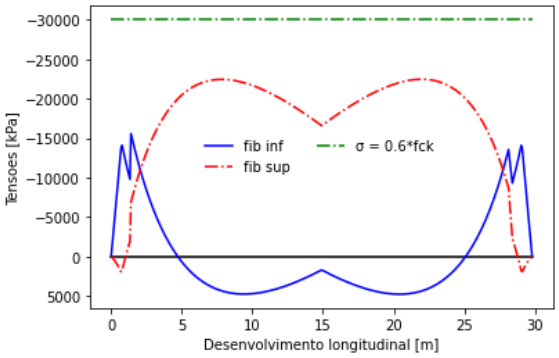


Figura 32 - Diagrama de tensões de combinação característica (hip. B)

A informação produzida pela equipa de dimensionamento estrutural segue para a equipa de preparação de obra, que elabora os mapas de apoio à produção. Após a conclusão dos elementos técnicos de preparação de fabrico, é lançada a ordem de produção à unidade fabril. O Anexo 1 representa um exemplo de um desenho de apoio às unidades de produção.

4.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO

O processo de produção é iniciado com a preparação das armaduras afetas à peça. Os estribos são cortados e dobrados numa máquina chamada estribadeira. Esta máquina é alimentada por bobines de aço, que podem ter diâmetros entre 6mm e 16mm. Para a montagem dos estribos são feitos esquemas no chão com giz, conforme é possível observar na Figura 33, de modo que sejam respeitados os afastamentos longitudinais dos estribos.

Figura 33 - Marcação no chão para afastamento de estribos

A estribadeira (Figura 34) é programada de modo a dobrar e cortar os estribos com a forma geométrica inserida, e quantidade pretendida, de forma autónoma.

Figura 34 - Máquina de dobrar e cortar varões de aço

Segue-se a fase de montar e preparar as formas de cofragem. As formas são colocadas nas pistas correspondentes e são preparadas adequadamente à viga a ser produzida. Após a colocação das formas no sítio são colocadas as armaduras previamente montadas. De seguida são posicionados os cordões de pré-esforço e alinhados com recurso a gabaritos, ilustrados na Figura 35, que garantem o correto posicionamento dos mesmos, em ambas as extremidades das vigas. As formas correspondentes ao

exemplo de aplicação têm 30m de comprimento, no entanto devem ser preenchidas internamente nas extremidades, de modo que sejam produzidas vigas com o comprimento pretendido, assim como outros pormenores geométricos tais como cortes ou entalhes. A Figura 36 ilustra o modelo computacional com a geometria do gabarito utilizado em fábrica.

Figura 35 – Gabarito de alinhamento de cordões de pré-esforço

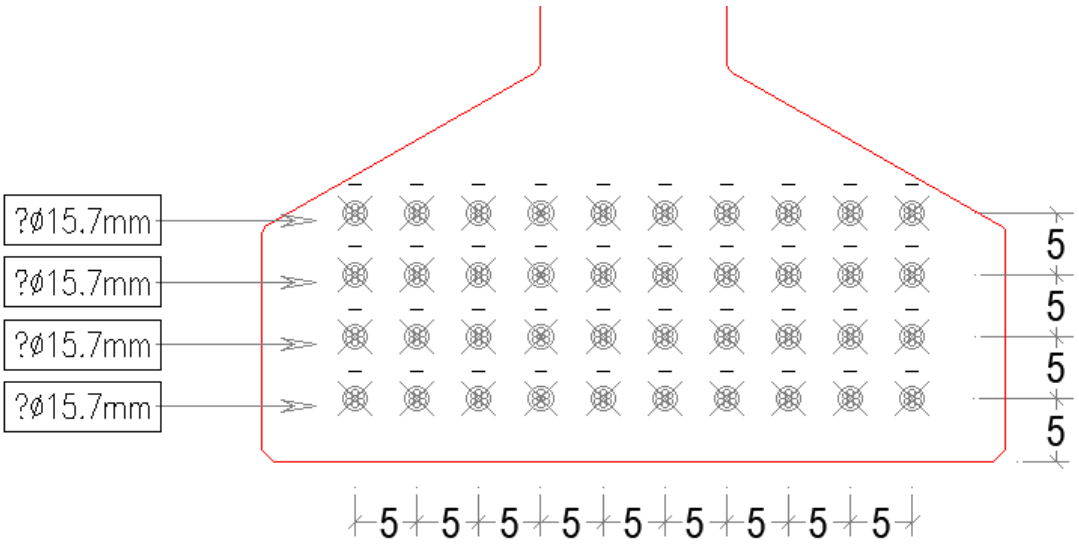


Figura 36 - Esquema de gabarito de cordões de pré-esforço

Os cordões de pré-esforço são tensionados através de macacos hidráulicos, e finalmente inicia-se o processo de betonagem. Nesta fase as vigas são preenchidas com betão através de uma autobetoneira que percorre longitudinalmente a viga, enquanto o betão é afagado manualmente por operários (Figura 37). Conforme a autobetoneira vai circulando, vão sendo acionados vibradores pneumáticos de modo a compactar o betão. Este processo é dispensado nos elementos em que é utilizado betão autocompactável (BAC), sendo que nestas vigas não é utilizado BAC.

Figura 37 – Betonagem de viga de inércia variável

O processo de betonagem geralmente ocorre no final do dia de trabalho, e a transferência de pré-esforço às peças habitualmente ocorrem na manhã do dia seguinte, após aprovação dos ensaios laboratoriais. A transferência de pré-esforço é composta pelo ato de cortar os cordões de pré-esforço, levando a que a tensão de pré-esforço seja transferida para o betão. No ato de betonagem das vigas são reservados provetes de betão de modo a poderem ser ensaiados posteriormente em laboratório para ser validado o instante de transferência de pré-esforço à viga, quando o betão atingir as características previstas em projeto.

4.5. TRANSPORTE E MONTAGEM

O transporte de vigas pré-fabricadas de grandes dimensões é uma operação que requer um planeamento meticuloso e equipamentos especializados. Caso as vigas sejam transportadas por vias terrestres, o transporte deverá ser assegurado por camiões dotados de reboques especiais. É necessário garantir que as vias de acesso ao local de construção sejam capazes de permitir o transporte das vigas, bem como devem ser escolhidas rotas livres de obstáculos, ou curvas acentuadas. A Figura 38 ilustra o momento em que uma viga de inércia variável é içada em fábrica para ser transportada para o local da obra.

Figura 38 - Içamento de vigas de inércia variável por pontes rolantes

A Figura 39 ilustra um camião de transportes especiais a fazer o transporte de uma viga de grandes dimensões, com recurso a um reboque de tipo *dolly*.

Figura 39 - Transporte de viga em veículo de transportes especiais

Devido ao seu elevado peso o içamento das mesmas deverá ser feito por gruas automóveis certificadas para satisfazer as necessidades de cada instalação. A Mota-Engil dispõe de uma vasta frota de gruas automóveis com diferentes capacidades de elevação e comprimento de lança. As mesmas estão publicitadas no website da empresa e são representadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Frota de gruas automóveis da Mota-Engil

Tonelagem (t)	**Comprimento de lança (m)**
25	27
30	28
35	31
40	35
45	30
50	38
55	43
60	44
70	40
80	51
100	60
120	49
250	80

A montagem das vigas é uma etapa crítica e deverá ser conduzida por equipas especializadas. O local de montagem deverá ser previamente preparado de modo que seja possível a instalação da viga diretamente a partir do veículo de transporte, sem necessidade de passar por entreposto. A Figura 40 ilustra uma etapa da montagem de uma viga.

Figura 40 - Montagem de viga de inércia variável com recurso a uma grua automóvel

A Figura 41 ilustra a montagem de uma viga de inércia variável, que devido à sua grande envergadura teve de ser içada por duas gruas-automóveis.

Figura 41 - Montagem de viga de inércia variável com recurso a duas gruas automóveis

A Figura 42 ilustra a montagem de uma viga num pilar, em que é possível observar o pormenor da ligação feita através dos orifícios das bainhas da viga, que são pousados sobre ferrolhos dos pilares. No caso representado a ligação será posteriormente selada com *grout*, sendo que alternativamente os ferrolhos poderiam ser materializados por varões roscados, onde a ligação mecânica seria terminada com roscas metálicas.

Figura 42 - Pormenor de ligação entre viga e pilar de elementos pré-fabricados

As zonas de por onde as vigas serão içadas são reforçadas de forma a resistirem aos esforços provocados por este apoio provisório, bem como têm que ser instaladas argolas devidamente dimensionadas (Figura 43).

Figura 43 - Argola de içamento da viga

5

MODELO DESENVOLVIDO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O modelo desenvolvido ao longo desta dissertação está divido em duas partes distintas. Inicialmente foi desenvolvido uma aplicação para fazer a análise e dimensionamento estrutural de uma viga de cobertura. Foi previsto que a mesma pudesse ter secções transversais parametrizáveis, assim como inércia variável ao longo do seu desenvolvimento longitudinal, sendo que a mesma possa ser também utilizada no processo de desenvolvimento de vigas de seção e inércia constantes. Foi previsto que as vigas respeitassem o modelo de viga simplesmente apoiada nas extremidades, embora possa ser feita alteração de forma expedita para diferentes condições de apoio.

O modelo desenvolvido foi utilizado no estudo de um exemplo de aplicação de uma viga de inércia variável, pré-fabricada e pré-esforçada. A escolha recaiu pelo facto deste tipo de viga reunir alguns fatores que constituem desafios acrescidos no processo tanto de dimensionamento, como de preparação de fabrico, nomeadamente pelo facto da viga ser pré-esforçada e ter inércia variável.

Foi proposto o desenvolvimento de uma viga capaz de vencer um vão de 29,80 m, sujeita a ações verticais de sobrecarga e restantes cargas permanentes de 0,4 kN/m^2 e 0,5 kN/m^2 respetivamente. Foi imposto que a viga não tivesse uma inclinação superior a 6%, de forma a respeitar restrições legais relacionadas com a arquitetura.

Para dar resposta ao referido vão a unidade de produção da Mota-Engil Prefabricados situada em Nelas dispõe de formas capazes de produzir vigas de inércia variável com comprimentos compreendidos entre 22 m e 30 m. As secções transversais das referidas formas estão caracterizadas na Figura 44. As formas consideradas no corrente estudo têm uma largura de banzos mínima de 0,40m e podem ser afastadas de forma a produzirem vigas com banzos de 0,42 m, sendo que nesta circunstância a alma da mesma também será acrescida de 0,02 m.

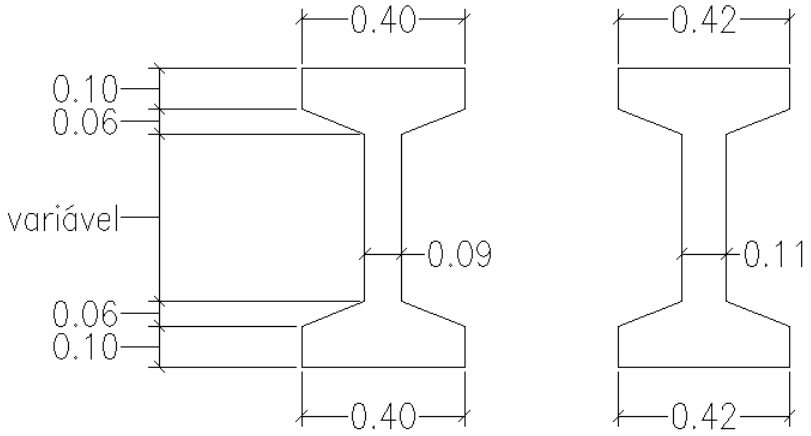


Figura 44 - Secção transversal de viga de inércia variável de banzos 0,40 m a 0,42 m

5.2. AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

5.2.1. AÇÕES PERMANENTES

5.2.1.1. Peso próprio (PP)

A ação relativa ao peso próprio resulta no efeito de uma carga distribuída variável ao longo da viga, calculada através da expressão (5.1), em que são tomadas em consideração a área das seções transversais assim como o peso volúmico do material.

$$q_{pp} = \gamma_{mat} \cdot A_{st} \text{ (kN/m)} \tag{5.1}$$

em que:

q_{pp}	carga distribuída do peso próprio	(kN/m)
γ_{mat}	peso volúmico do material	(kN/m^3)
A_{st}	área da seção transversal	(m^2)

A ação do peso próprio depende essencialmente de dois fatores, sendo eles o peso volúmico dos materiais e os respetivos volumes. O peso volúmico considerado foi de 25 kN/m^3 (Tabela 1), uma vez que o EC1 prevê o acrescento de 1 kN/m^3 no caso de peças com pré-esforço, entre outras situações.

O volume da viga considerado para efeito de determinação de ações foi estimado a admitindo que a zona de transição como zona aligeirada. Embora a redução de volume considerado resulte numa ação de peso próprio inferior à realmente atuante, as características resistentes também serão posteriormente menores, pelo que esta é uma simplificação admissível.

O diagrama de ação de peso próprio foi construído a partir a análise de determinadas secções transversais características, identificadas na Figura 45.

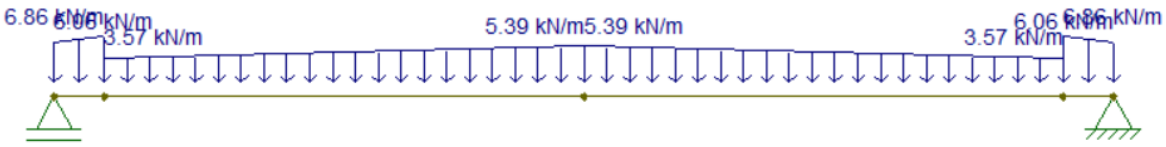


Figura 45 - Diagrama de ação de peso próprio

A Figura 46 ilustra a tabela de valores produzida através da aplicação desenvolvida em *Python*, com destaque para a linha correspondente ao valor de meio vão, em que o valor do momento fletor associado apenas à ação de peso próprio é de 527.82 kNm. A viga foi dividida em fatias, enumeradas na coluna "índice". Existe uma coluna que especifica o tipo de secção, de forma a poder calcular os parâmetros geométricos da área e momento de inércia, de acordo com o tipo de secção. Posteriormente é calculado o peso unitário (kN/m), resultante do produto da área pelo peso volúmico da secção. A coluna "Fres" diz respeito à força resultante do peso próprio de cada volume entre duas secções, de forma a poderem ser determinados os esforços transversos, e momentos fletores. As tensões provocadas pelo peso próprio, restantes cargas permanentes e sobrecargas são calculadas em colunas diferentes, apenas é mostrada a coluna referente às tensões causadas pelo peso próprio (na Figura 46).

A Figura 47 corresponde ao modelo matemático produzido na aplicação de livre acesso *Ftool*, utilizada para verificar alguns valores produzidos, de forma a validar a precisão da aplicação desenvolvida. O valor do momento fletor associado à ação de peso próprio no programa de validação é de 527.0 kN*m, valor muito idêntico ao alcançado através da aplicação desenvolvida (linha de índice 70 e coluna M_pp na Figura 46).

indice	tipo	xglob	hi	area	ix	pesom	Fres	Fres,tr	x_res	V_pp	V_tr	Vsd	M_pp	M_tr	sig_i_pp
67	alig1	14.09	1.4514	0.211226	0.0581176	5.28065	1.42796	1.42796	14.2251	4.44904	4.44904	19.6142	525.961	484.603	6567.54
68	alig1	14.36	1.4676	0.212684	0.0597605	5.3171	1.4378	1.4378	14.4951	3.02108	3.02108	13.1505	526.969	485.612	6470.67
69	alig1	14.63	1.4838	0.214142	0.0614313	5.35355	1.44765	1.44765	14.7651	1.58327	1.58327	6.67342	527.591	486.234	6371.67
70	alig2	14.9	1.5	0.2156	0.0631302	5.39	1.45749	1.45749	15.0351	0.135626	0.135626	0.183095	527.823	486.466	6270.65
71	alig2	15.17	1.4838	0.214142	0.0614313	5.35355	1.44765	1.44765	15.3051	-1.32186	-1.32186	-6.32051	527.663	486.306	6372.54
72	alig2	15.44	1.4676	0.212684	0.0597605	5.3171	1.4378	1.4378	15.5751	-2.76951	-2.76951	-12.8108	527.111	485.754	6472.4
73	alig2	15.71	1.4514	0.211226	0.0581176	5.28065	1.42796	1.42796	15.8451	-4.20731	-4.20731	-19.2879	526.169	484.812	6570.15
74	alig2	15.98	1.4352	0.209768	0.0565024	5.2442	1.41812	1.41812	16.1151	-5.63527	-5.63527	-25.7516	524.84	483.483	6665.66
75	alig2	16.25	1.419	0.20831	0.0549147	5.20775	1.40828	1.40828	16.3851	-7.05339	-7.05339	-32.2021	523.128	481.77	6758.83

Figura 46 - Valores produzidos pela aplicação em *Python*

Figura 47 - Diagrama de momentos fletores, PP (kNm)

5.2.1.2. Restantes cargas permanentes (RCP)

A Figura 48 apresenta gamas de valores mínimos e máximos para elementos habitualmente presentes em coberturas de pavilhões industriais. A experiência da Mota-Engil permite concluir que estes valores habitualmente se encontram entre 0,5 kN/m^2 e 1,0 kN/m^2, sendo que os mesmos resultam de opções tomadas pelas equipas de projeto de arquitetura, alheias ao projeto de dimensionamento estrutural. Ressalva-se que os valores destas ações fornecidos pelas equipas antecedentes ao projeto de dimensionamento estrutural podem resultar de estimativas considerando os materiais e equipamentos previstos de serem implementados na construção.

- Pesos próprios dos elementos estruturais
- Revestimentos **[0.10; 0.30]** kN/m^2
- Cargas suspensas **[0.10; 0.20]** kN/m^2
- Painéis fotovoltaicos **[0.15; 0.25]** kN/m^2
- Sprinklers **[0.10; 0.30]** kN/m^2
- Tetos falsos **[0.10; 0.20]** kN/m^2

Figura 48 - Valores de RCP extraídos de catálogo fornecedor de materiais de construção

5.2.2. AÇÕES VARIÁVEIS

5.2.2.1. Sobrecargas

Na Figura 49 são apresentados os diagramas comparativos de esforços transversos e momentos fletores para as duas possibilidades de carregamento de sobrecargas, distribuídas ou concentradas. O momento fletor a meio vão é resultante de uma relação entre a ação exercida e o comprimento do vão, sendo que o mesmo foi estudado de forma a perceber qual das situações seria a condicionante.

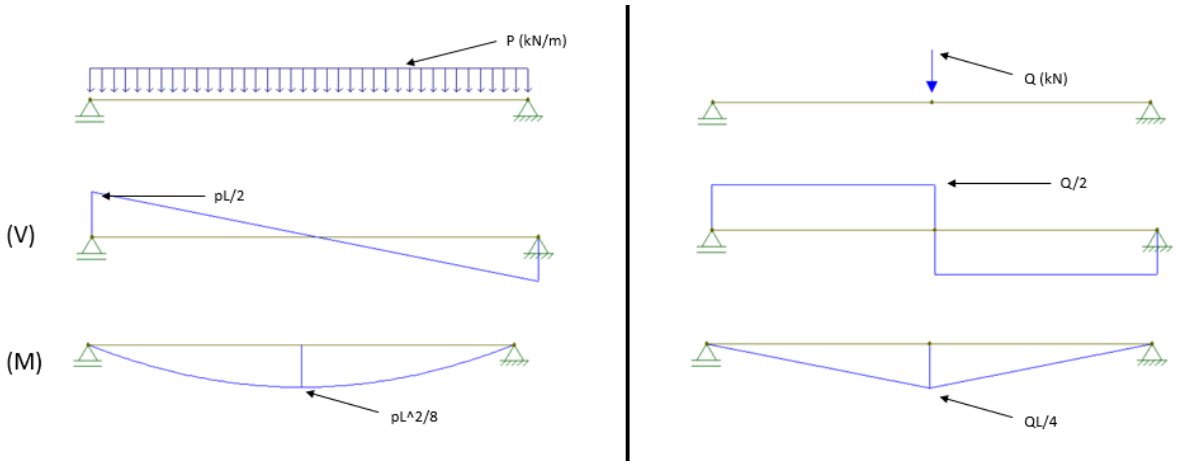


Figura 49 - Diagramas comparativos entre carregamento distribuído e pontual aplicado a meio vão

Uma vez que o momento fletor na secção mais desfavorável de uma viga simplesmente apoiada, meio vão de uma viga, com carregamento igualmente distribuído é de $M = pL^2/8$ e de uma viga sujeita a um carregamento pontual vertical a meio vão é de $M = QL/4$, deve ser estudada a relação entre ambas equações de forma a determinar qual será o valor do vão em acontece a inflexão. Resolvendo a expressão (5.2) é possível concluir que o valor de inflexão é de L = 5m, ou seja para qualquer viga delta a ação a

de sobrecarga distribuída, qk = 0,4 kN/m^2, será condicionante ao dimensionamento da estrutura, uma vez que estas vigas têm sempre vãos superiores a 5m.

$$\frac{0{,}4\,L^2}{8} \geq \frac{1{,}0\,L}{4} \tag{5.2}$$

5.2.3. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Estando presente a análise de vigas utilizadas em coberturas, devem ser considerados os valores de coeficientes relativos à categoria H, $\psi_0 = \psi_1 = \psi_2 = 0$.

5.3. MATERIAIS

5.3.1. BETÃO

Na pré-fabricação as peças são desenformadas em idades muito precoces, geralmente antes de possuírem 24 horas de cura, e logo de seguida é feita a transferência de tensões de pré-esforço ao betão e as peças são içadas para serem transportadas. Estes acontecimentos provocam tensões elevadas em determinadas secções das peças cujo betão ainda é muito jovem, sendo necessário que o betão resista sem sofrer fissurações. A rápida taxa crescimento de resistência mecânica é impreterível, e é alcançada com a adição de adjuvantes e aditivos químicos, que são ajustadas conforme as classes de exposição ambiental, classes de abaixamento, bem como as condições climatéricas uma vez que as condições de temperatura e humidade influenciam o processo de cura do betão.

A transferência de pré-esforço às peças só pode ocorrer após serem aprovados os ensaios feitos em provetes com amostras da betonagem correspondente, onde é verificada a resistência do betão e é comparada com a resistência imposta em projeto para a ação de transferência de pré-esforço, bem como a ação de içamento e transporte das peças. Estas ações provocam tensões elevadas, sendo necessário que o betão tenha resistência suficiente que permita validar todas as verificações de segurança impostas. Para otimizar o processo de fabrico continuo é fundamental minimizar o tempo de transferência de cada peça, utilizando aditivos e adjuvantes que, entre outras finalidades, aceleram o processo de cura do betão. As condições climatéricas de temperatura e humidade são fatores que interferem com o processo de cura, de modo que a formulação dos aditivos pode sofrer alterações, assim como a pista de betonagem poderá ter de ser aquecida de forma a ser possível efetuar a transferência das peças cumprindo as condições de segurança, sem prejudicar os prazos contratuais que possa haver com clientes.

Na Mota-Engil Prefabricados as classes de betão mais usadas em fabrico são C40/50 e C50/60, sendo que para vigas pré-esforçadas apenas é usado o betão de classe C50/60. A elevada presença de aditivos é assimilada de maneira diferente por classes diferentes de betão. O betão de classe C30/37 deixou de ser usado pela Mota-Engil no fabrico de vigas pré-fabricadas após ser verificado que as mesmas estariam passíveis de sofrer elevadas deformações, devido à idade jovem a que as mesmas são fortemente solicitadas. Na Tabela 8 é possível observar algumas composições de betão com igual resistência à compressão, mas de classes de abaixamento e exposição ambiental diferentes.

Tabela 8 - Formulações de betão C50/60 da Mota-Engil Prefabricados

Designação	Classe de Resistência á compressão	Classe de Abaixamento	Classe de exposição ambiental	CEM II / A_L 42,5 R	Cimento CEM I 52,5R	Filler Betocarb-OU	Areia Fina 0/2	Areia Grossa "tejo" 0/4	Brita 1 5/16	X-SEED 130	MasterEase 5025	Massa Volúmica Sêco (Kg/m3)	Massa Volúmica do Betão (Kg/m3)	Água Sêco (Lit/m3)	Result. á compressão 28 dias-Mpa
8-NL	C 50/60	S4	XC4	360		65	350	480	967	2,7	3,3	2228	2373	145	63-66
13-NL	C 50/60	BAC	XS3	390		260	370	417	737	3,1	4,4	2182	2339	157	60-63
21-NL	C50/60	BAC	XC4/ XS3		385	265	380	426	746	3,0	4,2	2209	2366	157	64-66
24-NL	C50/60	S4	XC4		345	80	335	480	970	2,6	3,1	2216	2361	145	65-70

5.3.2. Aço

No passado chegaram a ser utilizados na Mota-Engil Prefabricados cordões de 12,7mm que foram substituídos pelos cordões de 15,2mm, entretanto substituídos por cordões de 15,7mm uma vez que apresentam uma melhor relação entre custo e benefício. A Figura 50 corresponde ao relatório de um ensaio conduzido aos cordões de pré-esforço realizados pelo fornecedor de aço, a cordões especiais de 150mm^2

Nueva Montaña, s/n - 39011 Santander
Tfn: +34 942 200 300
Fax: +34 942 200 391
www.tycsapsc.com

GLOBAL SPECIAL STEEL PRODUCTS S.A.U.

CERTIFICADO DE ENSAYO DE CORDON (1x7+0) PARA PRE-POSTENSADO

Certificado de inspección EN 10204-3.1

CLIENTE	MOTA-ENGIL, SA	**PESO NETO**	24.826 KG
Nº ENTREGA	26658515	**DIÁMETRO NOM.**	15,70 MM
Nº PEDIDO	16539880	**ARROLLAM.**	Derecha
SECCIÓN NOM.	150,00 MM2	**SUPERFICIE**	Seco
DENOMINACIÓN	E453:2020 E453:2020/Y1860 S7 15,7		

Rollo Nº	Colada Nº	Sección mm2	Peso g/m	Carga Rotura kN	Carga 0,01%	Carga 0,1% kN	Carga 0,2% kN	Carga Min. 1% Alarg.	Módulo Elástico kN/mm2	Alargam. Carga Max %	Longit. M	Peso Neto KG
Mínimos		147,00	1148,56	279,0		246,00			190,00	3,50		
Máximos		153,00	1195,44	321,0					210,00			
35652606	GS14985401	148,46	1165,40	287,5		252,40	257,60		202,50	5,30	2.322	2.706
35652625	GS14985401	147,44	1157,40	286,6		251,40	256,70		203,90	5,90	2.482	2.892
35652440	GS14985401	148,92	1169,00	287,4		252,40	257,70		200,10	6,30	2.327	2.704
35652454	GS14985401	150,19	1179,00	287,3		251,20	256,50		203,40	4,80	2.327	2.704
35652571	GS14985401	147,77	1160,00	287,0		251,90	257,10		203,30	4,70	2.502	2.912
35652566	GS14985401	147,30	1156,30	287,3		252,30	256,50		202,30	5,60	2.503	2.914
35652466	GS14985401	149,78	1175,80	287,3		252,30	257,60		200,20	5,40	2.221	2.586
35652616	GS14985401	147,30	1156,30	287,1		252,20	256,40		202,30	5,00	2.322	2.706
35652591	GS14985401	147,97	1161,60	285,6		250,60	254,80		202,30	5,00	2.324	2.702

Figura 50 - Relatório de ensaio laboratorial a cordões de pré-esforço

Encontra-se no Anexo 2 o relatório técnico com o gráfico de força (kN)/extensão (%) referente a um dos cordões ensaiados em laboratório pelo fornecedor deste tipo de aço, da Mota-Engil.

5.4. Pré-esforço

5.4.1. Força de pré-esforço

Através da expressão (5.3) foi possível calcular a tensão máxima nas armaduras de pré-esforço imediatamente após a transferência do pré-esforço:

$$\sigma_{pm0}(x) = \min\{k_7 \cdot f_{pk};\ k_8 \cdot f_{p0,1k}\} = 1394 \text{ MPa} \tag{5.3}$$

em que: $k_7 = 0{,}75, k_8 = 0{,}85$ (valores pelo AN), $f_{pk} = 1860$ Mpa e $f_{p0,1k} = 1460$ MPa.

O conhecimento experimental da Mota-Engil Prefabricados permite usar com confiança e segurança valores relativos aos fatores de perdas instantâneos e de perdas diferidas. Desta forma foram considerados no desenvolvimento do presente trabalho as expressões (5.4) e (5.5) para o cálculo das tensões de tração nas armaduras considerando as perdas instantâneas e diferidas a tempo infinito, respetivamente.

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pm0} \cdot \delta_{pi} \tag{5.4}$$

$$\sigma_{pd} = \sigma_{pm0} \cdot \delta_{pd} \tag{5.5}$$

em que: $\delta_{pi} = 0.95$ e $\delta_{pd} = 0.767$

A tensão de rotura de aderência da amarração no estado limite último é calculada na expressão (5.6):

$$f_{bpd} = \eta_{p2}\, \eta_1\, f_{ctd} = 4{,}27\ Mpa \tag{5.6}$$

em que $\eta_{p2} = 3{,}0;\ \eta_1 = 1{,}0;\ f_{ctd} = \frac{2{,}0}{1{,}5} Mpa$

O comprimento de transmissão, l_{pt}, é calculado através da expressão (5.7):

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \emptyset \cdot \sigma_{pm0} = 0{,}734\ m \tag{5.7}$$

Em que $\alpha_1 = 1{,}0;\ \alpha_2 = 0{,}19;\ \emptyset = 15{,}7 \cdot 10^{-3}$m; σ_{pm0} =1394 MPa.

Segundo o EC2 o valor de l_{pt} deve ser majorado por um fator de 0,8 ou 1,2 consoante o caso que for mais penalizador para a análise que estiver a ser realizada. Habitualmente $l_{pt1} = 0{,}8\ l_{pt}$ é utilizado para as verificações das tensões locais no momento da libertação, enquanto $l_{pt2} = 1{,}2\ l_{pt}$ é utilizado para as verificações dos estados limites últimos.

5.5. VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITE

5.5.1. ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

Na Tabela 9 correspondente ao Quadro 7.1N do EC2 é possível consultar os limites dos valores da fendilhação admitidos consoante a classe de exposição, o tipo de armadura e a sua aderência. No presente exemplo de aplicação foi considerado o estado de descompressão, ou seja, que não existe qualquer abertura de fendas na peça em estado limite de utilização. Esta é uma prática realizada pela equipa de projeto da Mota-Engil Prefabricados, que tem a vantagem de aliviar o trabalho de cálculo deste parâmetro, aumentando o grau de segurança das peças a dimensionar.

O presente caso de aplicação foi iterado com várias hipóteses diferentes de combinações de comprimentos de embainhamento de cordões de pré-esforço, bem como diferentes valores de $f_{ck,tr}$. Foi possível validar as verificações de segurança em estado limite de utilização para as situações de transferência, e de armazenamento e transporte com $f_{ck,tr} = 45\ Mpa$, utilizando o máximo de cordões de pré-esforço possíveis com 4 diferentes combinações de geometria de embainhamento, representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Disposição de cordões de pré-esforço

Nº cordões	H (m)	Embainhamento (m)
4	0,05	0
2	0,05	1
2	0,10	2
2	0,10	3

As Figuras 51 e 52 ilustram os diagramas de forças de pré-esforço com perdas instantâneas e diferidas, respetivamente, ao longo do desenvolvimento longitudinal da viga. Estes diagramas compreendem a informação relativa à tensão máxima admissível de aplicar aos cordões de pré-esforço, o embainhamento dos cordões, bem como os comprimentos de amarração dos mesmos.

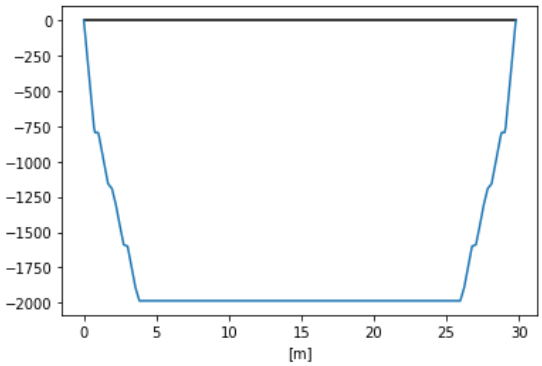


Figura 51 – Diagrama de força de pré-esforço instantâneo

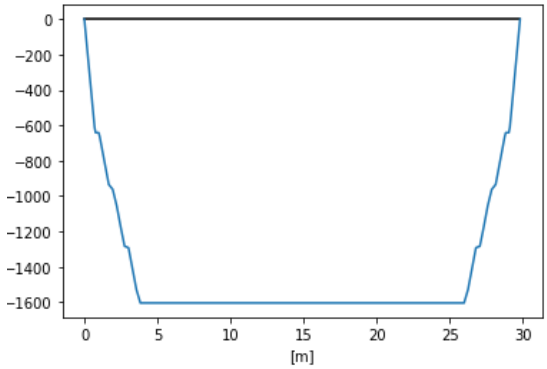


Figura 52 - Diagrama de força de pré-esforço a tempo infinito

5.5.1.1. Transferência de pré-esforço

A Figura 53 apresenta os valores das tensões expectáveis no momento de transferência da ação do pré-esforço. A ação considerada para a presente verificação é exclusivamente o peso próprio do betão, sem qualquer majoração. Neste diagrama é possível observar que todas as fibras têm tensões compreendidas entre $f_{ck,tr} = 45\ Mpa$ e $f_{ctm,tr} = 3{,}80\ Mpa$.

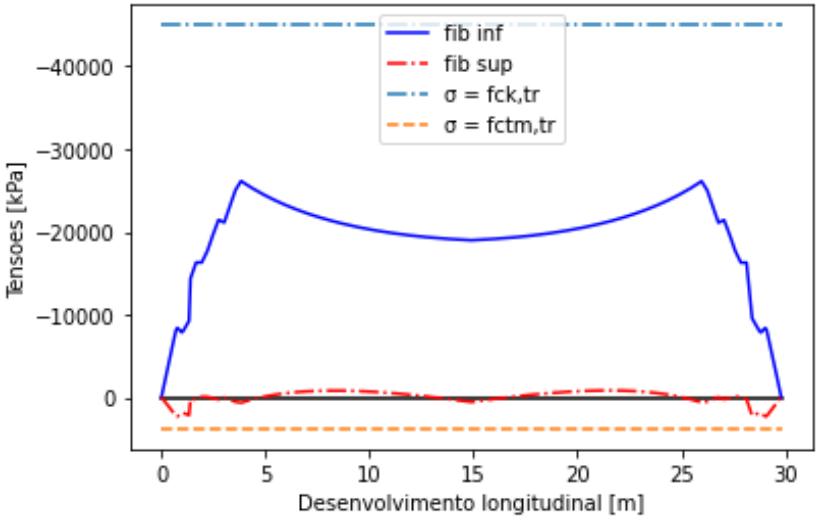


Figura 53 - Diagrama de tensões no instante de transferência

5.5.1.2. Armazenamento e transporte

A verificação de segurança para a situação de armazenamento e transporte é idêntica à de transferência em todos os aspetos, exceto nas condições de apoio da viga. Enquanto na situação de transferência a viga se encontra simplesmente apoiada nas extremidades, para a situação de armazenamento e transporte a viga será simplesmente apoiada sobre uns suportes localizados a, normalmente, 0,50m das extremidades. A aplicação desenvolvida permite ajustar este parâmetro no caso de se manifestar ser necessário. A Figura 54 ilustra as tensões respetivas.

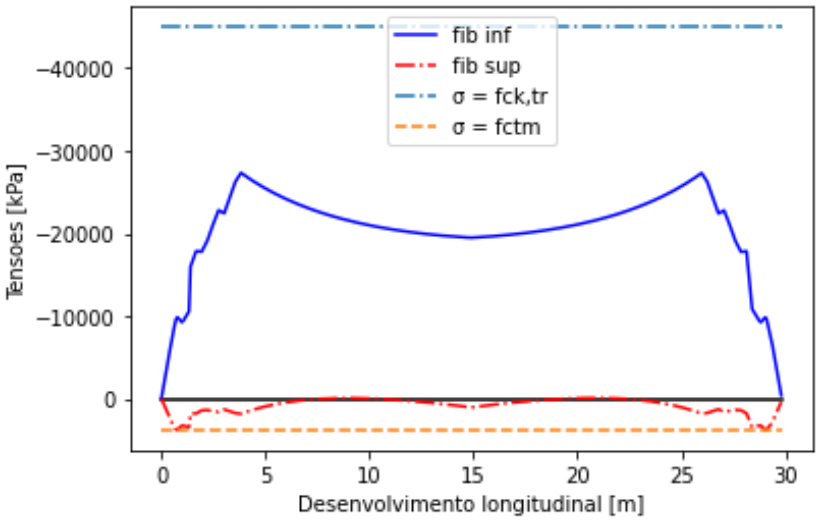


Figura 54 - Diagrama de tensões em armazenamento e transporte

5.5.1.3. Combinação característica

As tensões na viga resultantes da combinação característica podem ser calculadas através da expressão (5.8).

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j}(\mathrm{x})\text{"+"}\ P(x)\ \text{"+"}\ \mathrm{Q}_{\mathrm{k,1}}(\mathrm{x})\text{"+"}\ \sum_{i>1} \psi_{0,i}\ Q_{k,i}(x) \tag{5.8}$$

em que:

$G_{k,j}(\mathrm{x})$	tensão da ação das cargas permanentes: 1,0 pp + 1,0 rcp	(kPa)
$P(x)$	força de pré-esforço variável ao longo do vão	(kN)
$\mathrm{Q}_{\mathrm{k,1}}(\mathrm{x})$	tensão da ação das sobrecargas	(kPa)
$\psi_{0,i} = 0$	valor recomendado no Anexo Nacional	( )

As mesmas podem ser consultadas através da Figura 55, onde estão realçados os admissíveis para a validação desta verificação de segurança, $\sigma = 0{,}6\ f_{ck}$.

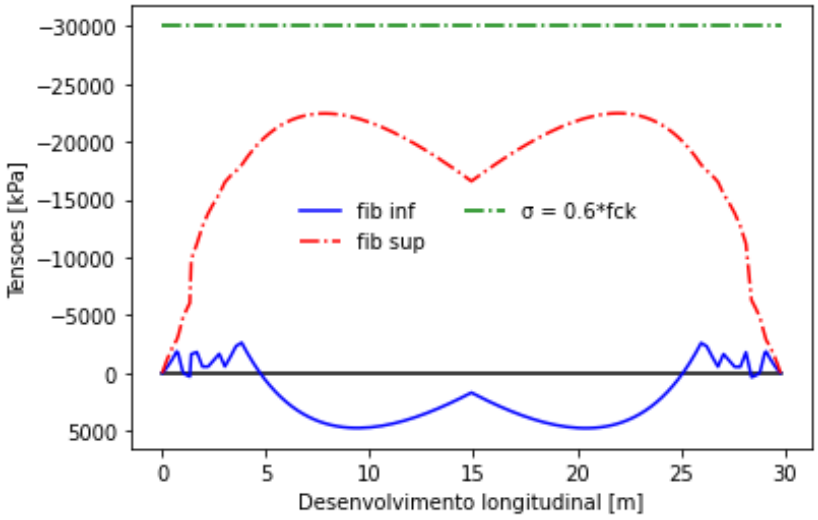


Figura 55 – Diagrama de tensões de combinação característica

5.5.1.4. Combinação frequente

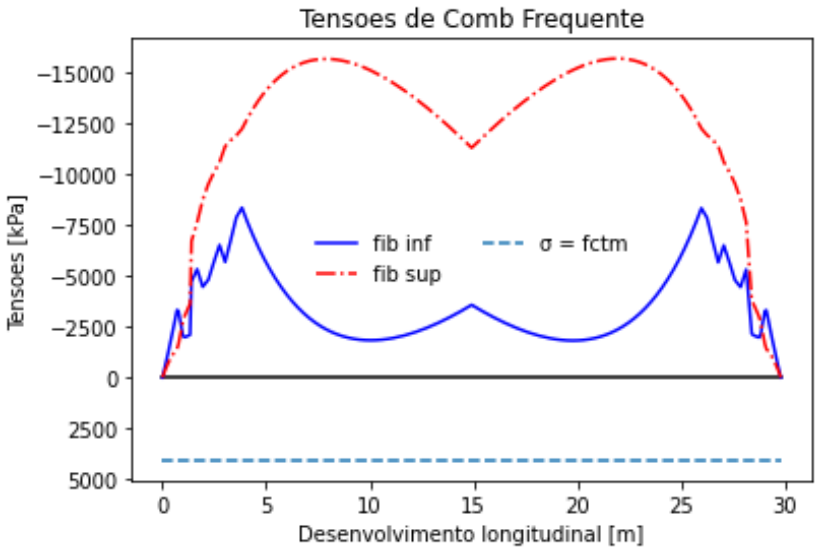


Figura 56 - Diagrama de tensões de combinação frequente

5.5.1.5. Combinação quase-permanente

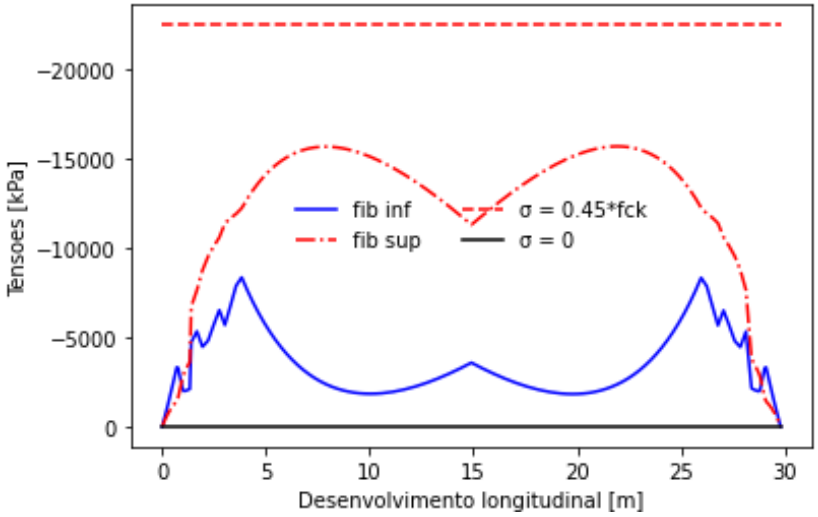


Figura 57 - Diagrama de tensões de combinação quase-permanente

5.5.2. ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

5.5.2.1. Flexão composta

Na análise de vigas de inércia variável simplesmente apoiadas nas extremidades não é prudente avaliar a segurança das mesmas à flexão composta apenas na secção de meio vão, uma vez que esta pode não ser a secção crítica. Conforme é possível observar (Figura 58) o menor fator de segurança encontra-se a $x \cong 10\ m$ (ou 20m, simetria da viga), registando um valor bastante maior a meio vão. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto do M_{Rd} seguir uma lei de polinómio de 1º grau, enquanto M_{sd} segue um polinómio de 2º grau. Foi implementado um algoritmo de cálculo do M_{Rd} que discretiza a secção transversal em análise em fibras de reduzida espessura, e iterativamente experimenta valores incrementais de rotações da secção até que estas entrem em patamar de cedência. Este algoritmo foi corrido em todas as seções consideradas ao longo do desenvolvimento da viga, de forma a ser possível dimensionar a viga comx rigor em torno da determinação do fator de segurança.

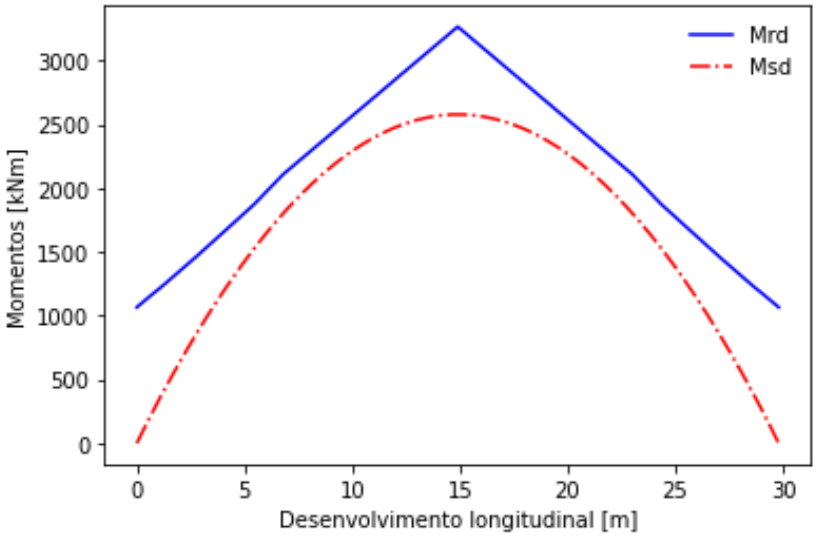


Figura 58 – Diagrama de momentos fletores ELU

A Tabela 10 é produzida automaticamente pela aplicação desenvolvida em *Python*, e é incluída no relatório que esta gera (Anexo 3). A aplicação não só identifica a secção com o fator de segurança mais baixo da viga como também faz a comparação com o fator de segurança na secção de meio vão. É possível observar que estas secções experimentam valores bastante diferentes para o fator de segurança (M_{Rd}/M_{Sd}).

Tabela 10 - Verificação de segurança à flexão composta

x [m]	Msd [kNm]	Mrd [kNm]	Mrd/Msd
20.3	2231.67	2363.48	1.06
14.9	2577.45	3134.93	1.22

A Figura 59 apresenta um excerto do algoritmo utilizado no cálculo do M_{Rd}.

```
for i in range(trapesios):
    aux.append(1)
    if binf[i] == bsup[i]:
        for j in range(ndiv):
            binf1[i, j] = binf[i]
            bsup1[i, j] = bsup[i]
            h1[i, j] = h[i] / ndiv
            area[i, j] = binf[i] * h1[i, j]
            cg[i, j] = h1[i, j] / 2
    else:
        aux[i] = 2
        if binf[i] > bsup[i]:
            bsup1[i, -1] = binf[i]
            for j in range(ndiv):
                x = ((binf[i] - bsup[i]) / 2) / h[i] * (h[i] - h[i] / ndiv * (j + 1))  # noqa
                bsup1[i, j] = bsup[i] + 2 * x
                binf1[i, j] = bsup1[i, j - 1]
                h1[i, j] = h[i] / ndiv
                area[i, j] = (binf1[i, j] + bsup1[i, j]) * h1[i, j] / 2
                cg[i, j] = (h1[i, j] * (2 * binf1[i, j] + bsup1[i, j]) / 3 / (binf1[i, j] + bsup1[i, j])) - h1[i, j]  # noqa
        else:
            bsup1[i, -1] = binf[i]
            for j in range(ndiv):
                x = ((binf[i] - bsup[i]) / 2) / h[i] * (h[i] / ndiv * (j + 1))  # noqa
                bsup1[i, j] = binf[i] - 2 * x
                binf1[i, j] = bsup1[i, j - 1]
                h1[i, j] = h[i] / ndiv
                area[i, j] = (binf1[i, j] + bsup1[i, j]) * h1[i, j] / 2
                cg[i, j] = (h1[i, j] * (binf1[i, j] + 2 * bsup1[i, j]) / 3 / (binf1[i, j] + bsup1[i, j]))  # noqa
    cont = cont + aux[i]
```

Figura 59 – Excerto de algoritmo de cálculo do M_{Rd}

5.5.2.2. Esforço transverso

Para a avaliação da segurança ao esforço transverso foi desenvolvido um algoritmo com o objetivo de dimensionar a necessidade de armadura de esforço transverso em determinadas secções de particular interesse. A secções consideradas podem variar consoante as dimensões das vigas, bem como as dimensões dos elementos constituintes da mesma, tais como zona maciça, zona de transição e zona aligeirada, são as seguintes:

- Início da viga (x = 0)
- Início da zona de transição (x =1,4 m)
- Início da zona aligeirada (x = 1,9 m)
- Secção de meio vão (x = 14,9 m)

No dimensionamento de vigas de inércia variável o ângulo que as armaduras de esforço transverso formam com o eixo longitudinal é $\alpha = 90°$, de forma a não dificultar a operação de montagem das armaduras. No que diz respeito ao espaçamento transversal entre os ramos de estribos, foi implementada uma solução composta por dois ramos de estribos de 6mm, otimizando os afastamentos, de forma a respeitar o recobrimento requerido de 30mm. No capítulo 4 foi apresentada uma solução com estribos de apenas um ramo na zona aligeirada, no entanto neste dimensionamento foi considerada uma solução composta por dois ramos, de modo a simplificar a modelação em BIM.

As larguras das secções consideradas serão sempre inferiores a $s_{t,max} = 0{,}75d \leq 600mm$, uma vez que as larguras dos banzos serão compreendidas entre 400 mm e 420 mm.

O algoritmo desenvolvido calcula o valor de V_{Rd} iterativamente de forma a determinar o valor mais elevado de $\cot\theta$ possível. Desta forma inicia a iteração tomando o valor de $\cot\theta = 2{,}5$, e no caso do valor de V_{Rd} ser inferior ao V_{Sd} na secção correspondente, é feita uma nova iteração com um valor de $\cot\theta$ inferior, respeitando o seu limite inferior de $\cot\theta = 1{,}0$.

Tabela 11 – Verificação de segurança ao esforço transverso

Vsd x Vrd					
x	Vsd	cotθ	Vrd	s (Φ6)	s (Φ8)
0 m	344.16 kN	2.5	1104.33 kN	0.05 m	0.15 m
1.4 m	308.42 kN	2.2	312.46 kN	0.1 m	0.15 m
1.9 m	296.73 kN	2.5	300.49 kN	0.1 m	0.2 m
14.9 m	0.18 kN	2.5	648.0 kN	0.3 m	0.3 m

```python
def calc_theta(x):
    global fyk, acw, v1, fcd
    indice = 0
    while vt_xi_glob[indice] < x:
        indice +=1
    vsd = vt_vsd[indice]
    cottheta = 2.5
    fywd = fyk/1.15
    z = vt_z[indice]
    bw = vt_bw[indice]
    vrd = acw*bw*z*v1*fcd/(cottheta + 1/cottheta)
    vt_cot = []
    while vrd < vsd and cottheta >= 1:
        # print(vrd, cottheta)
        cottheta -= 0.1
        vrd = acw*vt_bw[indice]*vt_z[indice]*v1*fcd/(cottheta + 1/cottheta)
    asws = vsd/(z*fywd*cottheta)
    s6 = min(200*as6/asws, 30)
    s8 = min(200*as8/asws, 30)
    vt_cot.append(cottheta)
    def round_down(num):
        return ((num - (num%5))/100)
    return round(vsd,2), round(vrd, 2), round_down(s6), round_down(s8), vt_cot
```

Figura 60 – Excerto de algoritmo de cálculo dos estribos

5.6. *PLUG-IN REVIT* DESENVOLVIDO

Foi desenvolvido um *plug-in* em *Python* para otimizar o processo de criação da presente viga em ambiente BIM. O plug-in desenvolvido está divido em duas partes, em que na primeira instância é feita a representação da geometria externa da viga, enquanto na segunda fase é criada a solução de armadura da mesma.

A Figura 61 ilustra o *plug-in* de criação da geometria externa da viga, em que inicialmente é solicitado ao utilizador que introduza o vão da viga, e em função deste valor são apresentados os possíveis valores para a cumeeira da viga. Note-se que para este molde de viga, apenas para os casos de vigas de 24m, 26m e 28m existem duas possibilidades de alturas de cumeeiras, havendo o ajuste do comprimento da zona maciça. O programa tem em consideração esta informação no momento de geração do modelo BIM. Finalmente cabe ao utilizador selecionar uma das possibilidades das larguras de banzos da viga. Este plug-in apenas permite a criação de vigas com vãos compreendidos entre 22m e 30m, e banzos de 0.40m ou 0.42m, uma vez que estas dimensões são impostas pelas formas utilizadas em fábrica.

A segunda fase do plug-in é apresentada na Figura 62, em que é possível ajustar os parâmetros relativos à armadura a ser criada para a viga. É possível ajustar parâmetros tais como o recobrimento do betão, o diâmetro dos varões de armadura passiva, bem como os diâmetros e afastamentos dos estribos, em que existe a possibilidade de dividir os mesmos em até 4 zonas diferentes. Embora esta informação já tenha sido introduzida na aplicação de dimensionamento, tem que ser introduzida novamente, prevendo que as diferentes aplicações sejam utilizadas em momentos diferentes pelas diferentes equipas responsáveis: dimensionamento e desenho.

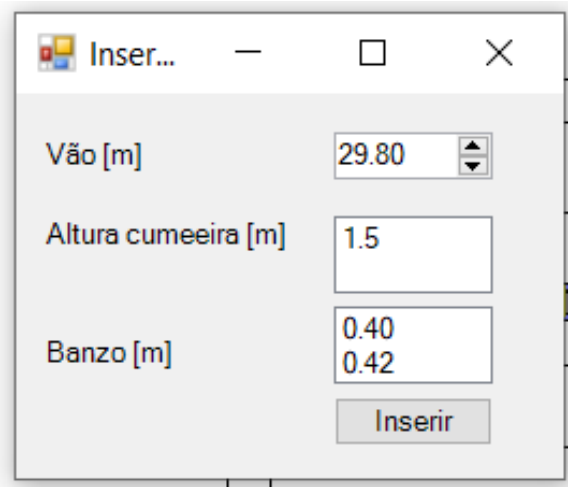


Figura 61 - Plug-in Revit - Criação de geometria externa

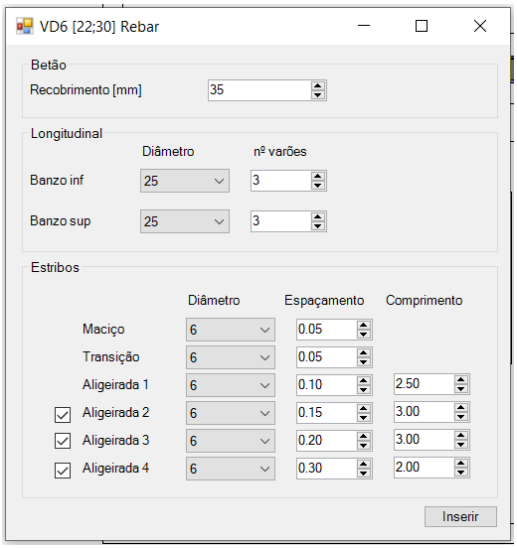


Figura 62 - Plug-in Revit – Criação de armadura

5.7. PROCESSAMENTO DE RESULTADOS

Para ser submetida uma ordem de fabrico às unidades de produção, de Nelas ou Rio Maior, é necessário produzir desenhos técnicos pormenorizados, bem como mapas de apoio à produção, com informação relativa às quantidades de materiais necessárias, dimensões, e disposições geométricas. Estas informações podem ser extraídas do modelo BIM de forma expedita, e a mesma pode ser ajustada de forma a corresponder aos modelos atualmente produzidos em AutoCAD, e Excel.

5.7.1. DESENHOS TÉCNICOS

A Figura 63 ilustra uma folha técnica produzida de forma automática pelo *Revit*. Esta folha inclui um alçado, e cortes das secções transversais em diferentes zonas de interesse, com informação relativa à armadura presente. Pretende-se que seja melhorada a informação produzida relativa à geometria das armaduras, e as respetivas dimensões, no entanto o Revit ainda não gera esses mapas automaticamente uma vez que se tratam de armaduras geradas a partir de uma aplicação em *Python*, com base em coordenadas de posicionamento das armaduras.

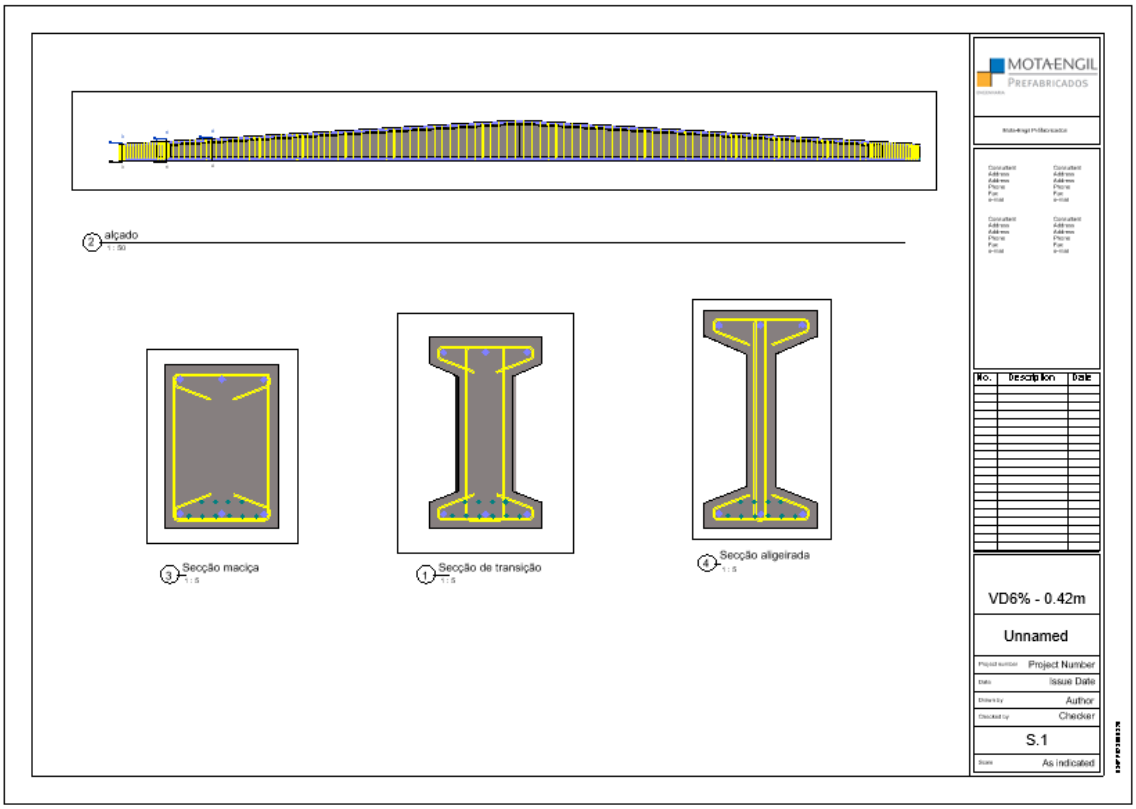


Figura 63 – Desenho técnico BIM

5.7.2. MAPAS DE PORMENORES CONSTRUTIVOS (ARMADURAS)

As figuras Figura 64, Figura 65 e Figura 66 ilustram as disposições das armaduras em diferentes zonas da viga de inércia variável.

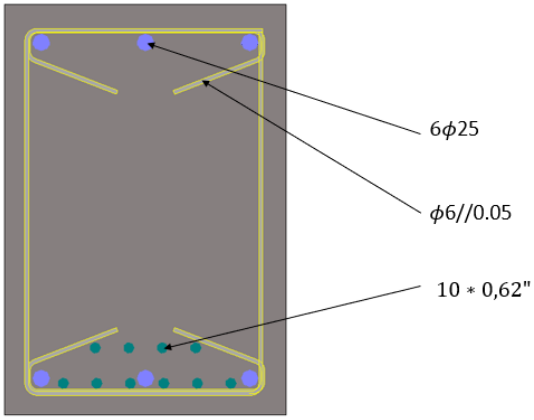


Figura 64 - Zona maciça

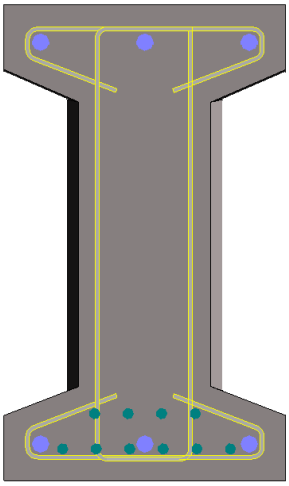


Figura 65 - Zona de transição

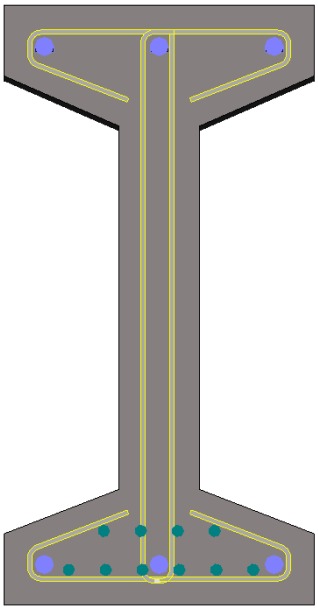


Figura 66 - Zona aligeirada

5.7.3. MAPAS DE QUANTIDADES

A Figura 67 ilustra o mapa de quantidades produzido pelo Revit, onde é possível consultar o volume da peça criada no modelo, assim como o seu peso considerando o peso volúmico de 2,5 ton/m^3.

<Structural Framing Schedule>	
A	B
Volume	Peso
6.22 m³	15.56 t

Figura 67 - Mapa de quantidade de betão em modelo BIM

A Tabela 12 exibe a informação relativa à armadura presente no modelo BIM. Esta informação está apresentada de forma crua, no entanto a mesma pode ser trabalhada em qualquer folha de cálculo de forma a sintetizar a informação da maneira que for mais pertinente.

Tabela 12 - Mapa de aço utilizado em modelo BIM

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Bar Mark	Type and si	Quantit	Length of each bar	Shape	A* mm	B* mm	C* mm	D* mm	E* mm
1	H25	3	29750	00	29740	0	0	0	0
1	H25	3	29800	15	14900	1785	14900	14790	0
1	H16	6	29800	00	29800	0	0	0	0
1	H16	4	29800	00	29800	0	0	0	0
1	H6	1	1750	51	355	545	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1750	51	355	555	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1775	51	355	560	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1775	51	355	565	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1800	51	355	570	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1800	51	355	575	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1825	51	355	585	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1825	51	355	590	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1850	51	355	595	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1850	51	355	600	0	0	0
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1		Rebar	145	45	355	45	145
1	H6	1	1875	51	355	605	0	0	0

5.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise e as verificações de segurança são realizadas de forma autónoma, podendo-se consultar o resultado das mesmas num relatório que é gerado em formato PDF (Anexo 3). Nesse relatório é possível consultar informação referente à análise tal como as dimensões da viga, as características dos materiais e as ações consideradas. Nas verificações aos ELU são calculados os momentos fletores resistentes ao longo de toda a viga de forma a identificar a secção critica da viga, comparando os esforços resistentes com os atuantes, previamente determinados. É feita a comparação com os valores da secção de meio vão da viga, podendo-se concluir que é bastante imprudente realizar a verificação apenas a meio vão. Em relação à verificação aos esforços transversos são apresentadas algumas soluções de diâmetros de estribos e afastamentos dos mesmos, identificando as secções críticas e os esforços atuantes e resistentes. Os resultados de todas as análises realizadas às verificações dos ELS são apresentados de forma organizada, em que pode ser consultado não só o parecer ("Verifica" / "Não Verifica"), mas também os diagramas de tensões produzidos, de maneira a auxiliar a equipa de dimensionamento estrutural no caso de não serem validadas todas as verificações.

Atualmente o desenvolvimento de peças para produção em ambiente de pré-fabricação tem inúmeras limitações concecionais. A Autodesk tem melhorado o Revit sucessivamente ano após ano, bem como têm sido desenvolvidas plug-ins por parte de empresas parceiras que têm elevado as potencialidades da utilização do Revit.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principal objetivo otimizar o processo de desenvolvimento de elementos estruturais pré-fabricados. Para o efeito foi desenvolvido um modelo de análise estrutural e dimensionamento de vigas pré-fabricadas pré-esforçadas de inércia variável e um plugin para Autodesk Revit capaz de criar modelos Building Information Modeling (BIM) das referidas vigas.

O modelo automático de análise estrutural e dimensionamento de vigas pré-fabricadas pré-esforçadas de inércia variável, desenvolvido em Python, mostrou-se bastante eficiente em toda a gama de análise que realiza, permitindo um aumento de eficiência e segurança durante o processo de conceção e dimensionamento.

O plug-in realizado prova que o desenvolvimento de novas ferramentas para o Revit está ao alcance de qualquer entusiasta com gosto pela programação. A criação de novos plug-ins Python podem não só otimizar processos que são ineficientes, mas também podem simplificar operações altamente complexas de realizar de forma manual. Com o plug-in desenvolvido passou a ser possível inserir num projeto Revit vigas de inércia variável com apenas alguns cliques no ecrã, e sem a necessidade de quaisquer operações adicionais, ou outras apreciações. É da mesma forma um processo altamente intuitivo a introdução da armadura principal na viga: armadura de pré-esforço, restante armadura longitudinal passiva, e armadura de esforço transverso. Utilizando os plug-ins Revit passa a ser expedito gerar desenhos técnicos e restantes elementos de preparação ao fabrico.

Assim sendo, conclui-se que no processo de desenvolvimento de vigas pré-esforçadas e pré-fabricadas de inércia variável foi feito um avanço significativo, embora ainda haja bastante matéria para ser desenvolvida neste tópico.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao longo do presente estudo foram alcançados vários objetivos, que abriram oportunidade para que possam ser futuramente desenvolvidos em maior profundidade alguns temas aqui propostos.

O dimensionamento estrutural da viga teve como base elementos de barras sujeitos a algumas simplificações, tais como considerar que propriedades simplificadas na zona de transição da viga. Havendo interoperabilidade entre a aplicação de dimensionamento estrutural em *Python* com o *Revit* deixa de haver lugar a simplificações geométricas, podendo-se utilizar modelos de cargas associadas ao peso próprio com graus de rigor ajustáveis ao nível do projeto a desenvolver. O dimensionamento do número de cordões de pré-esforço é atualmente conduzido de forma manual, num processo iterativo. Como esta análise envolve várias variáveis de decisão, é importante que o cálculo automático seja feito de forma eficiente, em vez de simplesmente correr todas as hipóteses matematicamente possíveis, possivelmente com recurso a algoritmos de inteligência artificial.

O modelo *Revit* atual está sujeito a que existam incompatibilidades geométricas entre diferentes armaduras. É pertinente que este tema seja estudado de forma a eliminar erros desta natureza. Neste momento a aplicação em *Revit* apenas produz uma forma de armadura de esforço transverso com dois ramos de estribos para a zona aligeirada, no entanto para vigas com almas delgadas pode haver a necessidade de serem utilizadas diferentes soluções de estribos intercalados, com apenas um ramo.

Os cordões de pré-esforço por pré-tensão não constam das bibliotecas *Revit*, de maneira que os mesmos foram simulados com recurso a varões M16, apenas para efeito de posicionamento geométrico, e extração de quantidades dos mesmos. É pertinente desenvolver este elemento, que é transversal a outras peças pré-fabricadas, tais como pilares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Appleton, Júlio - Estruturas de betão. *Edições Orion, Amadora*. (2013). ISSN:

Burchardt, Jørgen - Systems for standardized precast concrete elements: The case of the Larsen & Nielsen system. ISSN:

Costa, Rui JG; Bragança, Luís; Mateus, Ricardo; Bezerra, João Carlos - Reabilitação sustentável de edifícios antigos: contribuição para os edifícios de balanço energético nulo (nZEB) e otimização do nível de sustentabilidade. (2014). ISSN: 0873-1152

Elliott, Kim S - Precast concrete structures. Crc Press, 2019. ISBN: 100072588X

Gagg, Colin R. - Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 40. (2014). ISSN:

Guan, Xingquan; Burton, Henry; Sabol, Thomas - *Python*-based computational platform to automate seismic design, nonlinear structural model construction and analysis of steel moment resisting frames. *Engineering Structures*. Vol. 224. (2020). p. 111199. ISSN: 0141-0296

Hui, Sam CM; Chan, Sook-Chien - Integration of green roof and solar photovoltaic systems. 2011. ISBN/ISSN:

Jha, Shivam; Kaur, Amardeep - Real-time surface damage analysis of concrete structures using *Python*-based image analysis. SPIE, 2023. ISBN/ISSN:

Kurt, Atilla - Implementation of Ultra-High Performance Concrete in Long-Span Precast Pretensioned Structural Elements for Buildings. North Carolina State University, 2021. ISBN: 9798522973131

Liang, Nan; Yu, Mengxuan - Research on design optimization of prefabricated residential houses based on BIM technology. *Scientific Programming*. Vol. 2021. (2021). p. 1-10. ISSN: 1875-919X

Molin, Stefanie; Jee, Ken - Hands-On Data Analysis with Pandas: A *Python* data science handbook for data collection, wrangling, analysis, and visualization. Packt Publishing Ltd, 2021. ISBN: 1800565917

Quraishi, A; Dhapekar, N - Applicability of *python* in civil engineering. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Vol. 8. n.º 1 (2021). p. 554-556. ISSN:

Reichenbach, Sara; Kromoser, Benjamin - State of practice of automation in precast concrete production. *Journal of Building Engineering*. Vol. 43. (2021). p. 102527. ISSN: 2352-7102

Riyadh Raouf, Nareen - Roman Concrete History. (2020). ISSN:

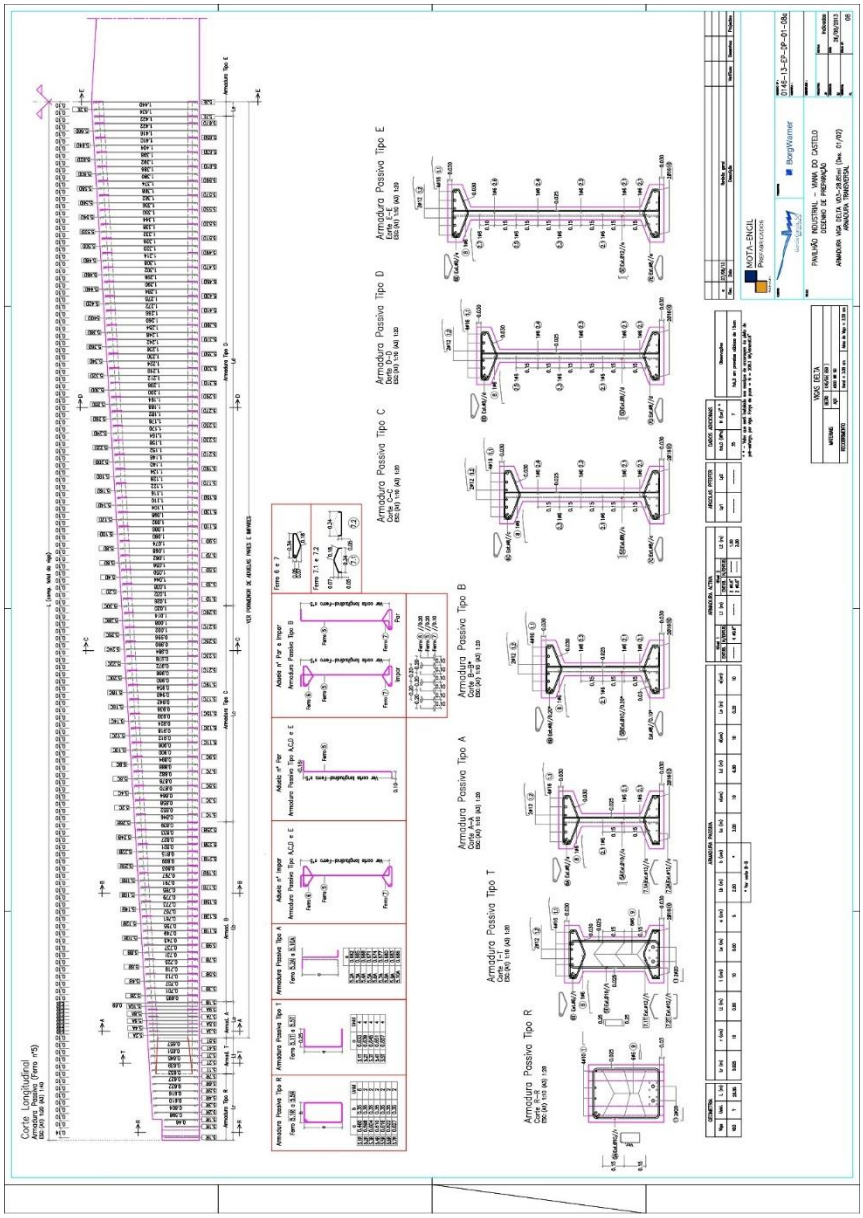
Sarvade, Shivaji M; Pore, Sachin M - Use of *python* programming for interactive design of reinforced concrete structures. 2019. ISBN/ISSN:

Sena, Paulo Cézar Peixoto de - Automação de processos de projeto e programação em BIM: Dynamo, *Python* e C. Universidade de São Paulo, 2019. ISBN/ISSN:

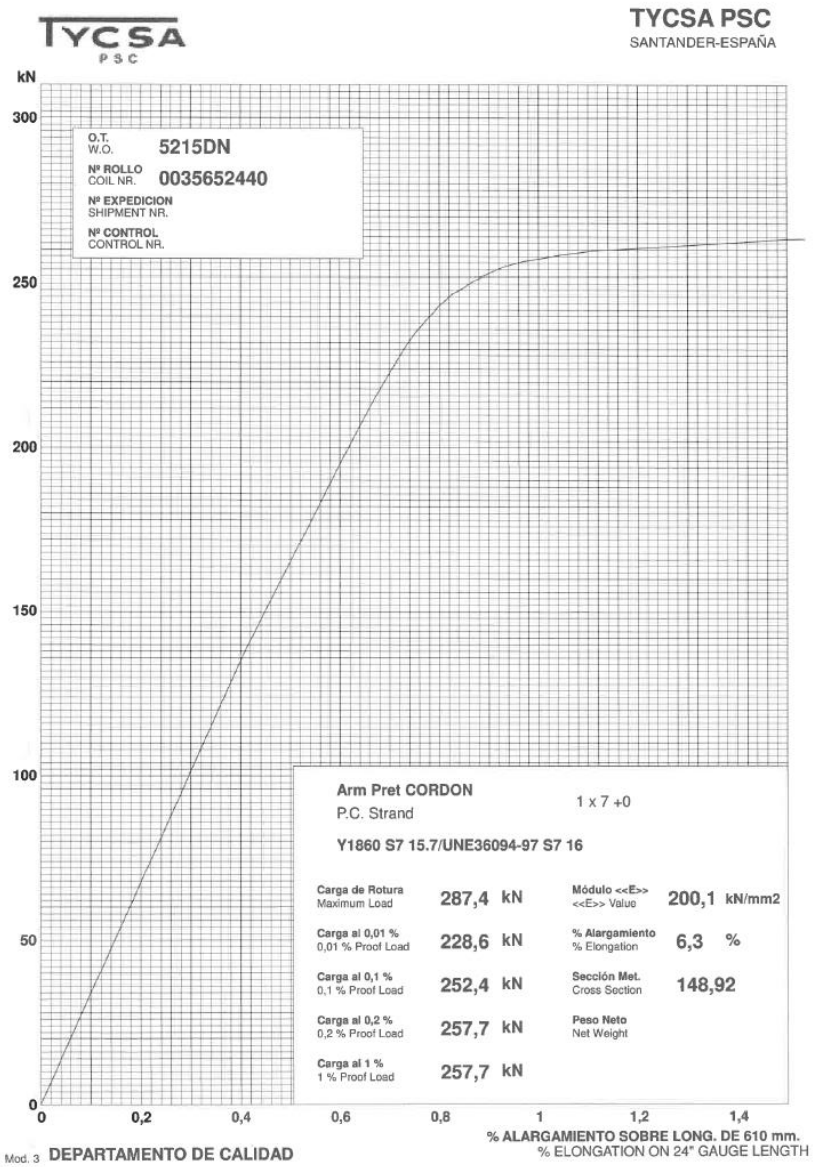
Sweigart, Al - Automate the boring stuff with *Python*: practical programming for total beginners. No Starch Press, 2019. ISBN: 1593279930

Vergara, Estéfana Castañeda; Aguirregabiria, Benito Lauret; Pérez, Juan Miguel Lirola; Vacarezza, Graciela Ovando - Innovative free-form glass fiber reinforced concrete (GRC) panel. *Revista de la Construccion*. Vol. 16. n.º 3 (2017). p. 479-488. ISSN: 0717-7925

Anexo 1


Corte Longitudinal
Armadura Passiva Tipo E
Armadura Passiva Tipo D
Armadura Passiva Tipo C
Armadura Passiva Tipo B
Armadura Passiva Tipo A
Armadura Passiva Tipo T
Armadura Passiva Tipo R
NOTA-BACIL
Procasacom
BoogWarner
PAVILHÃO INDUSTRIAL – MANA DO CASTELO
CENTRO DE PREPARAÇÃO
ARMADURA VIGA BETA
ARMADURA TRANSITÓRIA
VIGA BETA

Anexo 2


TYCSA
PSC
TYCSA PSC
SANTANDER-ESPAÑA
kN
300
250
200
150
100
50
0
O.T.
W.O.
5215DN
Nº ROLLO
COIL NR.
0035652440
Nº EXPEDICION
SHIPMENT NR.
Nº CONTROL
CONTROL NR.
Arm Pret CORDON
P.C. Strand
1 x 7 +0
Y1860 S7 15.7/UNE36094-97 S7 16
Carga de Rotura
Maximum Load
287,4 kN
Carga al 0,01 %
0,01 % Proof Load
228,6 kN
Carga al 0,1 %
0,1 % Proof Load
252,4 kN
Carga al 0,2 %
0,2 % Proof Load
257,7 kN
Carga al 1 %
1 % Proof Load
257,7 kN
Módulo <<E>>
<<E>> Value
200,1 kN/mm2
% Alargamiento
% Elongation
6,3 %
Sección Met.
Cross Section
148,92
Peso Neto
Net Weight
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
% ALARGAMIENTO SOBRE LONG. DE 610 mm.
% ELONGATION ON 24" GAUGE LENGTH
Mod. 3 DEPARTAMENTO DE CALIDAD

Anexo 3

MOTA-ENGIL PREFABRICADOS

Relatório de Viga Delta

Projeto de Estabilidade
Memória Descritiva e Justificativa

Secção tipo: VD_6%_29.8_0.4/0.4

Resumo das análises efetuadas

i) Transferência	Tracção:	Verifica
	Compressão:	Verifica
ii) Armazenamento e transporte	Tracção:	Verifica
	Compressão:	Verifica
iii) Fases de utilização	Descompressão (Comb.Q.P.):	Verifica
	Fendilhação (Comb.F.):	Verifica
	Compressão (Comb.Q.P.):	Verifica
	Compressão (Comb.Raras):	Verifica
iv) Estado Limite Último	Momentos:	Verifica

Características dos materiais

Betão:	fck = 50.0 MPa	fctm = 4.07 MPa
Betão transf:	fck = 45 MPa	fctm = 3.8 MPa
Aço:	fsyk = 500.0 MPa	
Aço pré-esforço:	fpk = 1860 MPa	

Ações consideradas

vão = 29.8 m	Coefs. E.L.Último	Armaz. & Transp.
linf = 10 m	pp = 1.35	Comp. em consola
rcp = 0.8 kN/m²	rcp = 1.35	Esquerda = 0.5 m
sob = 0.4 kN/m²; ψ_1 = 0; ψ_2 = 0	sob = 1.5	Direita = 0.5 m

Pré-esforço

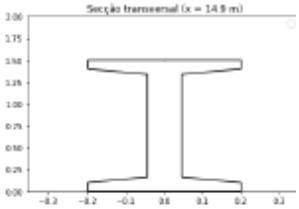
Pré-tensão
Nº de strands: 10
Diâmetro: 0.62"
$P_{1,util}$: 1603.8kN

Cabos de pré-tensão

nº	h [m]	emb e [m]	emb d [m]
4	0.05	0	0
2	0.05	1	1
2	0.1	2	2
2	0.1	3	3

Características mecânicas da secção transversal

A = 0.2156 m²
Ix = 0.0631 m⁴
h = 1.5 m
b,sup = 0.4 m
b,inf = 0.4 m
b,alma = 0.09 m



Estado Limite Último

x [m]	Msd [kNm]	Mrd [kNm]	Mrd/Msd
20.3	2231.67	2363.48	1.06
14.9	2577.45	3134.93	1.22

Vsd x Vrd

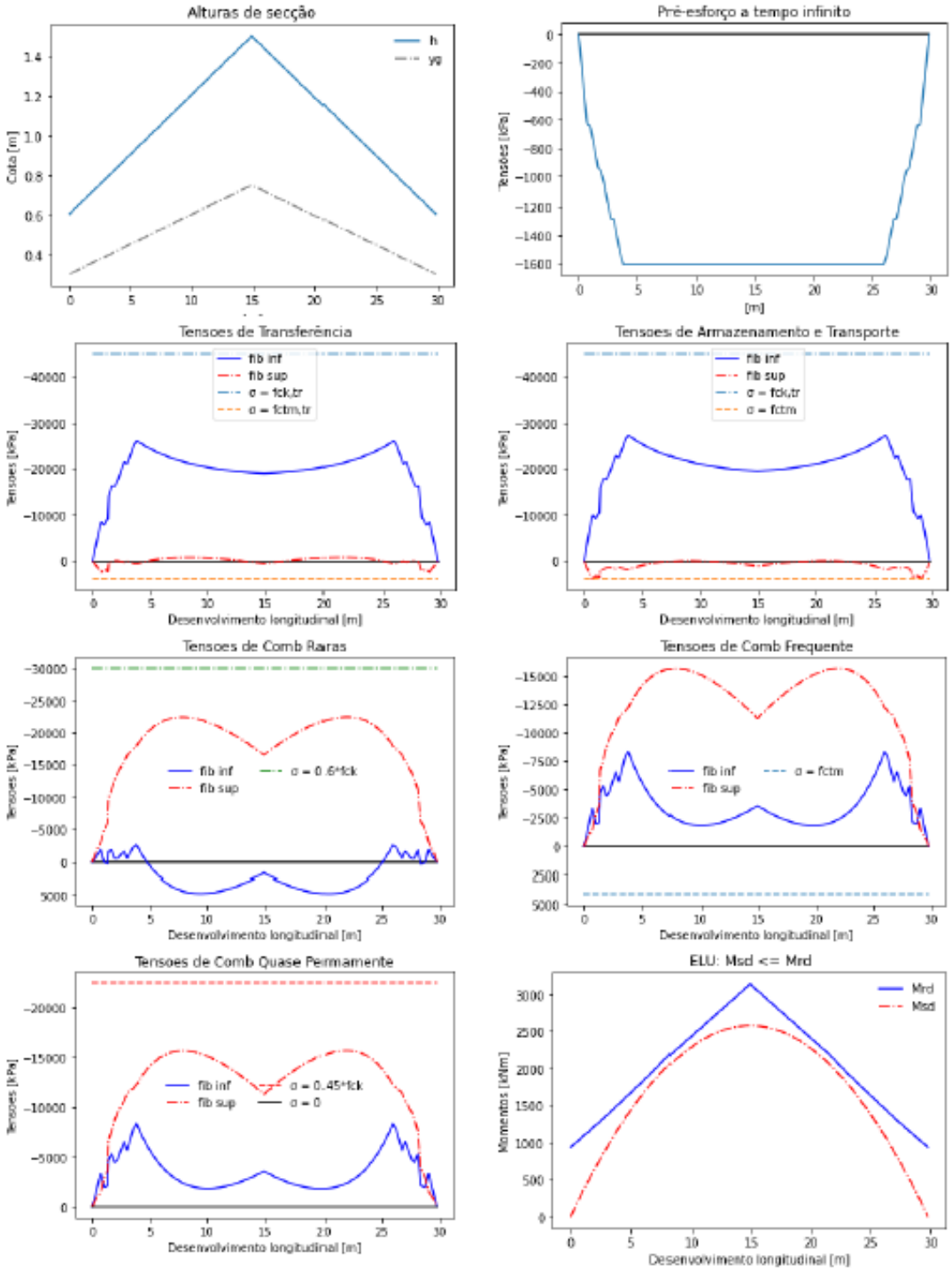
x	Vsd	cotθ	Vrd	s (Φ6)	s (Φ8)
0 m	344.16 kN	2.5	1104.33 kN	0.05 m	0.15 m
1.4 m	308.42 kN	2.2	312.46 kN	0.1 m	0.15 m
1.9 m	296.73 kN	2.5	300.49 kN	0.1 m	0.2 m
14.9 m	0.18 kN	2.5	648.0 kN	0.3 m	0.3 m

Page 1/2 *08:23 14/03/2023*

MOTAENGIL PREFABRICADOS

Relatório de Viga Delta

Projeto de Estabilidade
Memória Descritiva e Justificativa



Anexo 4

MOTAENGIL PREFABRICADOS

Relatório de Viga Delta

Projeto de Estabilidade
Memória Descritiva e Justificativa

Secção tipo: VD_6%_29.8_0.4/0.4

Resumo das análises efetuadas

i) Transferência	Tracção:	Não verifica
	Compressão:	Verifica
ii) Armazenamento e transporte	Tracção:	Não verifica
	Compressão:	Verifica
iii) Fases de utilização	Descompressão (Comb.Q.P.):	Verifica
	Fendilhação (Comb.F.):	Verifica
	Compressão (Comb.Q.P.):	Verifica
	Compressão (Comb.Raras):	Verifica
iv) Estado Limite Último	Momentos:	Verifica

Características dos materiais

Betão:	fck = 50.0 MPa	fctm = 4.07 MPa
Betão transf:	fck = 45 MPa	fctm = 3.8 MPa
Aço:	fsyk = 500.0 MPa	
Aço pré-esforço:	fpk = 1860 MPa	

Ações consideradas

vão = 29.8 m
linf = 10 m
rcp = 0.8 kN/m²
sob = 0.4 kN/m²; $\psi_1 = 0$; $\psi_2 = 0$

Coefs. E.L.Último
pp = 1.35
rcp = 1.35
sob = 1.5

Armaz. & Transp.
Comp. em consola
Esquerda = 0.5 m
Direita = 0.5 m

Pré-esforço

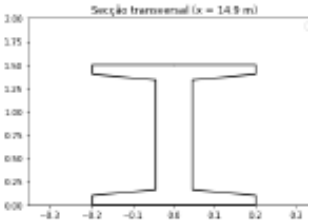
Pré-tensão
Nº de strands: 10
Diâmetro: 0.62"
$P_{1,util}$: 1603.8kN

Cabos de pré-tensão

nº	h [m]	emb e [m]	emb d [m]
6	0.05	0	0
4	0.1	0	0

Características mecânicas da secção transversal

A = 0.2156 m²
Ix = 0.0631 m⁴
h = 1.5 m
b,sup = 0.4 m
b,inf = 0.4 m
b,alma = 0.09 m



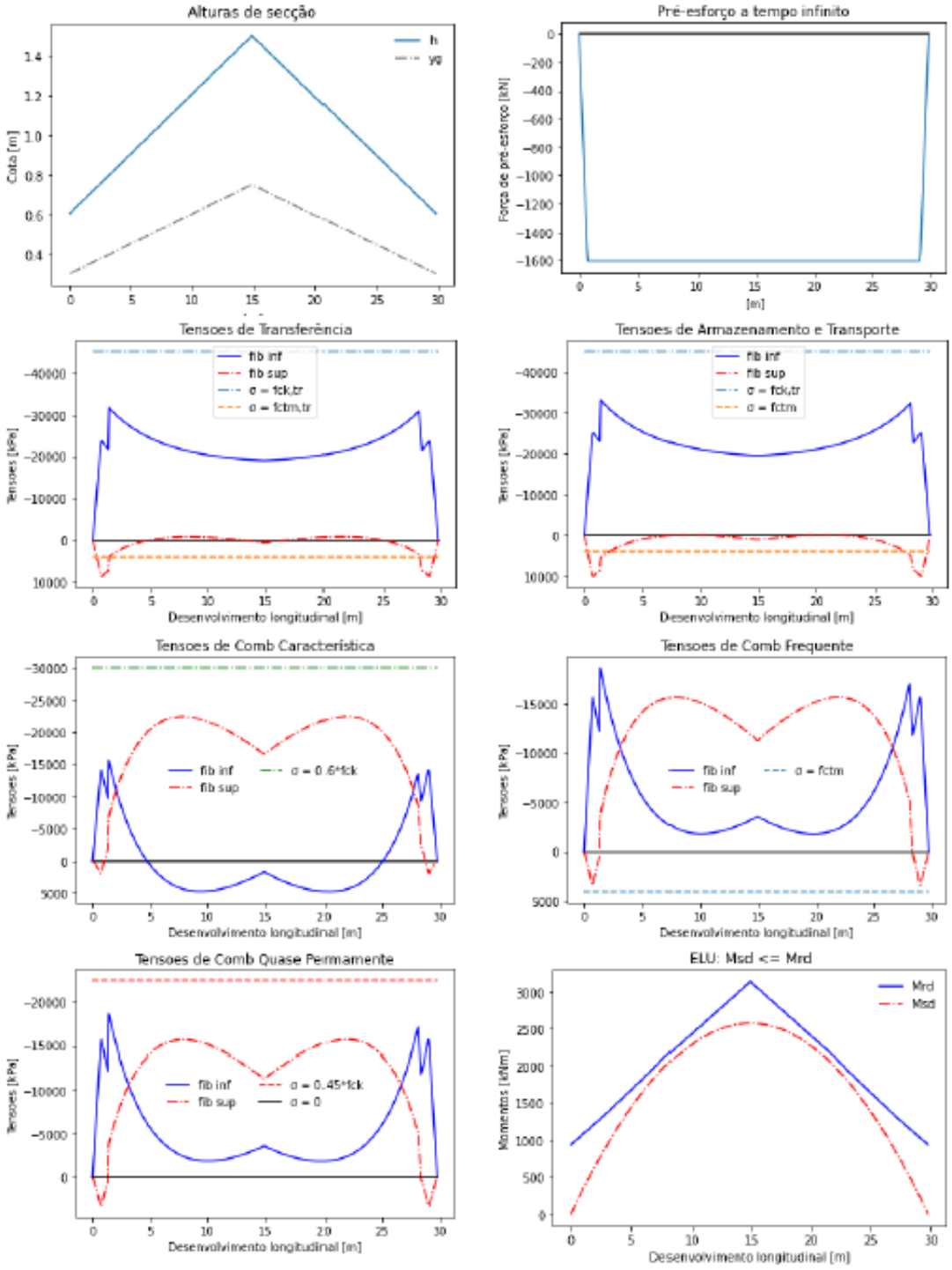
Estado Limite Último

x [m]	Msd [kNm]	Mrd [kNm]	Mrd/Msd
20.3	2231.67	2363.48	1.06
14.9	2577.45	3134.93	1.22

Vsd x Vrd

x	Vsd	cotθ	Vrd	s (Φ6)	s (Φ8)
0 m	344.16 kN	2.5	1104.33 kN	0.05 m	0.15 m
1.4 m	308.42 kN	2.2	312.46 kN	0.1 m	0.15 m
1.9 m	296.73 kN	2.5	300.49 kN	0.1 m	0.2 m
14.9 m	0.18 kN	2.5	648.0 kN	0.3 m	0.3 m

MOTAENGIL PREFABRICADOS

Relatório de Viga Delta

Projeto de Estabilidade
Memória Descritiva e Justificativa