



# **APLICAÇÃO DE UM SOFTWARE DE CÁLCULO AUTOMÁTICO NA VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO**

**RICARDO JORGE FERREIRA DE ANDRADE**

Junho de 2015

INSTITUTO POLITÉCNICO DO PORTO

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

**APLICAÇÃO DE UM SOFTWARE DE CÁLCULO AUTOMÁTICO  
NA VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO  
EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO**

**RICARDO JORGE FERREIRA DE ANDRADE**

Relatório de Estágio submetido ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para  
obtenção do grau de  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO ESTRUTURAS

**Orientador e Supervisor:** Rodrigo Esmeriz Falcão Moreira

JUNHO 2015



*“Success is a journey, not a destination...”*

Ben Sweetland



## AGRADECIMENTOS

Desejo exprimir os meus sinceros agradecimentos à *SOPSEC - Sociedade de Prestação de Serviços de Engenharia Civil, S.A.* pela oportunidade de realização do estágio realizado. Agradeço a todos os presentes da empresa, que de modo significativo, apoio, colaboração, troca de opiniões e domínio de software contribuíram para a elaboração deste relatório. Importa contudo, pela postura que assumiram, salientar aqueles que ocuparam lugar de destaque, ao meu orientador Eng.º Rodrigo Falcão Moreira e colega de curso Eng.º Emanuel Correia pela disponibilidade, compreensão e competência demonstrada durante o estágio e da realização do presente trabalho.

Quero agradecer a todos os meus amigos e colegas de curso nomeadamente, Nuno Monteiro, João Chin, André Tavares, Ricardo Ferreira, Liliana Marisa e André Santos pela ajuda, apoio e companheirismo.

Agradecimento especial à Isabel Correia que com o apoio, carinho e amizade sempre presente e incansável me ajudou em todos os momentos mesmo nos mais desalentos.

Por fim, à minha família, aos meus pais, à minha irmã e ao meu irmão por toda a força, valorização, compreensão e incentivo que sempre souberam demonstrar e que de forma decisiva, contribuíram para o trabalho final agora apresentado.

A todos o meu agradecimento.



**Palavras-chave:** Estados limites de Utilização; Robot Structural Analysis; Fendilhação; Deformação

## RESUMO

Actualmente e cada vez mais, são concebidos e utilizados programas de cálculo automático de Engenharia na realização de projectos de edifícios, que proporcionam aos engenheiros uma possibilidade avançada e rápida de execução, simulação e análise de edifícios para estruturas complexas e de elevada dimensão. Contudo, será necessário que os resultados deverão ser fiáveis de modo a não existirem consequências no comportamento real da estrutura a longo prazo.

O presente relatório de estágio, refere-se à verificação aos estados limites de utilização (tensões, fendilhação e deformação) segundo o *Eurocódigo 2*, de uma estrutura porticada em betão armado, nomeadamente de um pórtico central pertencente a essa mesma estrutura recorrendo ao programa de cálculo automático da *Autodesk* o *Robot Structural Analysis Professional 2014*.

O objectivo principal do presente trabalho consiste na comparação de resultados referente aos estados limites últimos e de utilização, pelos diferentes módulos de dimensionamento *Required* e *Provided Reinforcement* presentes no programa *Robot*. É destacado no final do relatório, considerando uma disposição de armadura optada analiticamente para o pórtico, uma análise comparativa de resultados referente aos estados limites de utilização entre o comando *Typical Reinforcement* do módulo *Provided Reinforcement* e por expressões analíticas. Refere-se contudo que, o procedimento do método analítico teve como base de cálculo uma aplicação desenvolvida para a verificação de elementos de betão armado aos estados limites de utilização segundo o *Eurocódigo 2*, com o nome de *XD-Conserv* tendo sido também comparado os resultados finais do mesmo.



**Keywords:** Service limited State; Robot Structural Analysis; Cracking; Deflection

## ABSTRACT

Nowadays and increasingly, are designed and used automatic calculation programs in Engineering to calculate projects of buildings that provide engineers an advanced and fast possibility of execution, simulation and analysis of buildings to complex structures and with high dimension. However, it is necessary that the results should be reliable so that wouldn't be no consequences in the real behavior of long-term structure.

The present internship report, refers the verification of the serviceability limit states (stress; cracking in the concrete and deformation) according to *Eurocode 2* a reinforced concrete structure, study in particular a central portic belong to the same structure using an automatic calculation program of *Autodesk*, the *Robot Structural Analysis Professional 2014*.

The main objective of this present work is the comparison of the results related to ultimate and service limit state, by using different design modules of dimension such as *Required Reinforcement* and *Provided Reinforcement* modules present in the automatic calculation program of Autodesk. At the end of the report, is detached a an analytically reinforcement disposition to the portic, which will be made a comparative analysis of the results, related to the service limit states, the *Typical Reinforcement* Command present in the module of Provided Reinforcement module and analytical expressions.

Refers, however that the procedure of analytical method, was based in an application developed for the verification of reinforced concrete elements to serviceability limit states according to Eurocode 2, named as *XD-Conserv* which the results of the program has been also compared.



# INDICE GERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	PLANEAMENTO DAS ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS .....	2
1.2	ESTRUTURA NO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	2
1.3	APRESENTAÇÃO DA ENTIDADE.....	3
1.3.1	Localização.....	3
1.3.2	Áreas de Negócio.....	5
<b>2</b>	<b>SEGURANÇA NO DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS.....</b>	<b>7</b>
2.1	ESTADOS LIMITES.....	8
2.2	ACÇÕES E SUAS COMBINAÇÕES DE ACÇÕES .....	9
2.3	MATERIAIS .....	14
2.3.1	Betão .....	15
2.3.2	Aço.....	33
<b>3</b>	<b>VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO SEGUNDO O</b>	
	<b><i>EUROCÓDIGO 2</i>.....</b>	<b>37</b>
3.1	LIMITAÇÃO DE TENSÕES.....	38
3.1.1	Limites para as tensões de tracção no betão .....	38
3.1.2	Limites para as tensões de compressão no betão.....	39
3.1.3	Limites para as tensões de tracção na armadura.....	39
3.2	CÁLCULO DAS TENSÕES .....	40
3.2.1	Cálculo das tensões em Estado não Fendilhado (Estado I) .....	43
3.2.1.1	Secção Rectangular.....	43
3.2.1.2	Secção em T .....	45
3.2.2	Cálculo das tensões em Estado Fendilhado (Estado II) .....	47
3.2.2.1	Secção Rectangular.....	48

3.2.2.2	Secção em T .....	51
3.3	ESTADO LIMITE DE FENDILHAÇÃO .....	54
3.3.1	Comportamento do Elemento .....	55
3.3.2	Armaduras Mínimas.....	59
3.3.3	Cálculo da abertura de fendas.....	62
3.3.4	Controlo da Fendilhação .....	68
3.4	ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÃO .....	71
3.4.1	Factores que afectam a deformação.....	71
3.4.2	Controlo da Deformação .....	74
3.4.2.1	Controlo Indirecto .....	75
3.4.2.2	Controlo Directo .....	78
<b>4</b>	<b>CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>85</b>
4.1	DESCRIÇÃO E CONSTITUIÇÃO DA ESTRUTURA.....	85
4.2	ANÁLISE AOS ESTADOS LIMITES .....	87
4.2.1	Métodos utilizados .....	87
4.2.2	Parâmetros gerais utilizados no cálculo dos métodos propostos .....	88
4.2.3	Secções em estudo .....	89
4.2.4	Modelação Estrutural.....	90
4.2.5	Acções de projecto.....	90
4.2.5.1	Estado limite último .....	92
4.2.5.2	Estados limites de utilização.....	93
4.3	MÉTODO ANALÍTICO.....	99
4.3.1	Verificação ao estado limite último .....	99
4.3.2	Verificação aos estados limites de utilização .....	101
4.3.2.1	Metodologia para o cálculo de cada um dos estados limites de utilização .....	102

4.4	PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO - <i>ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL 2014</i> .....	106
4.4.1	Módulo <i>Required Reinforcement</i> .....	107
4.4.1.1	Parâmetros utilizados no cálculo .....	107
4.4.2	Módulo <i>Provided Reinforcement</i> .....	109
4.4.2.1	Modelação Estrutural .....	109
4.4.2.2	Comando <i>Typical Reinforcement</i> .....	112
4.5	PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO <i>XD – CONSERV</i> .....	113
4.5.1	Parâmetros utilizados no cálculo.....	113
<b>5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>115</b>
5.1	SOLUÇÃO DE DISPOSIÇÃO DE ARMADURAS .....	115
5.1.1	Método Analítico .....	115
5.1.2	<i>Robot Structural Analysis Professional 2014</i> .....	116
5.2	ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO .....	117
5.2.1	<i>Robot Structural Analysis Professional 2014</i> .....	117
5.2.1.1	Módulo <i>Required Reinforcement</i> .....	117
5.2.1.2	Módulo <i>Provided Reinforcement</i> .....	119
5.2.1.3	Módulo <i>Provided Reinforcement</i> (comando <i>Typical Reinforcement</i> ) .....	123
5.2.2	Método Analítico .....	127
5.2.3	Programa de cálculo <i>XD-Conserv</i> .....	129
5.3	RESUMO DOS RESULTADOS.....	131
5.3.1	Tensões .....	131
5.3.2	Fendilhação.....	139
5.3.3	Deformação .....	142
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>147</b>

<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>157</b>
ANEXO A – SOLUÇÃO ESTRUTURAL DO PÓRTICO CENTRAL.....	159
ANEXO B – PROCEDIMENTO E OPÇÕES DE CÁLCULO .....	161
ANEXO C – CÁLCULOS E RESULTADOS REFERENTES AO CAPÍTULO 5 .....	195

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Logótipo da entidade [14]-----	3
Figura 2 - Localização da sede da <i>SOPSEC</i> em Vila Nova de Gaia [15]-----	4
Figura 3 - Localização da sede e delegações da <i>SOPSEC</i> em Portugal Continental [15]-----	4
Figura 4 - Imagens ilustrativas das áreas produtivas da entidade [15]-----	5
Figura 5 - Deformações devido a acções indirectas [5]-----	10
Figura 6 - Valores recomendados dos coeficientes $\psi$ para edifícios [1]-----	13
Figura 7 - Características de resistência e de deformação do betão [2]-----	15
Figura 8 - Relação Tensões – Extensões [2]-----	17
Figura 9 - Evolução dos módulos de elasticidade <i>Ecmt</i> consoante os diferente tipos de agregados-18	18
Figura 10 - Diagrama parábola-rectângulo para betão comprimido [2]-----	18
Figura 11 - Deformação do betão a longo prazo em diferentes instantes de aplicação de carga [4]--	20
Figura 12 - Deformação do betão com o módulo de elasticidade efectivo <i>Ec, eff</i> [4]-----	21
Figura 13 - Evolução do módulo de elasticidade efectivo <i>Ec, eff</i> ao longo do tempo, aplicando uma carga ao instante $t_0 = 21$ dias com um betão de classe C30/37-----	22
Figura 14 - Relação entre os módulos de elasticidade ao longo do tempo <i>Ec, effEcm</i> -----	22
Figura 15 - Método para determinação do coeficiente de fluência $\varphi_{\infty, t0}$ para um betão em condições ambientes normais [2]-----	27
Figura 16 - Variação do coeficiente <i>βds</i> ao longo do tempo para várias espessuras nominais -----	30
Figura 17 - Retracção do betão por secagem <i>εcd</i> ao longo do tempo-----	31
Figura 18 - Variação de <i>εca∞</i> em função de <i>fck</i> -----	32
Figura 19 - Variação da retracção autogénea ao longo do tempo <i>βast</i> -----	32
Figura 20 - Evolução da retracção autogénea ao longo do tempo <i>εcat</i> -----	33
Figura 21 - Curvas tensões-extensões para o aço laminado a quentes (gráfico esquerdo) e aço endurecido a frio (gráfico direito) [2]-----	35
Figura 22 - Diagrama tensões-extensões idealizado e de cálculo [2]-----	36
Figura 23 - Elementos sujeitos a tensões de tracção superiores à tensão resistente do betão à tracção $\sigma_c > fctm$ originando fendas [4]-----	38
Figura 24 - Fenda originada devido a excesso de tensão à compressão [4]-----	39
Figura 25 - Comportamento das tensões num elemento de betão armado sujeito à flexão [4]-----	40
Figura 26 - Evolução do coeficiente de homogeneização ao longo do tempo, aplicando uma carga ao instante $t_0 = 21$ dias com um betão de classe C30/37-----	41
Figura 27 - Modelo de cálculo em secção rectangular em estado não fendilhado-----	43
Figura 28 - Modelo de cálculo em secção em T em estado não fendilhado-----	45
Figura 29 - Representação do momento de transformado-----	47

Figura 30 - Modelo de cálculo de secção rectangular em estado fendilhado -----	48
Figura 31 - Modelo de cálculo de secção em T em estado fendilhado -----	51
Figura 32 - Tipos de fendilhação [4] e [16] -----	54
Figura 33 - Comportamento de um elemento traccionado e suas respectivas fases [3] -----	56
Figura 34 - Comportamento do elemento sujeito a cargas aplicadas [7] -----	56
Figura 35 - Comportamento do elemento sujeito a deformação imposta (retracção) [7] -----	57
Figura 36 - Comportamento num elemento de betão armado sujeito à tracção no após ocorrências da primeira fenda [3] -----	57
Figura 37 - Comportamento de um elemento de betão armado sujeito à flexão após ocorrência de fendas [4] -----	58
Figura 38 - Aumento da extensão de um tirante de betão armado [4] -----	58
Figura 39 - Abertura de fenda num elemento de betão armado [4] -----	58
Figura 40 - Efeito das tensões auto-equilibradas [5] -----	61
Figura 41 - Variação do parâmetro $k$ com a espessura do elemento [7] -----	61
Figura 42 - Distribuição de tensões e extensões da armadura e do betão num elemento fendilhado estabilizado [4] -----	63
Figura 43 - Relação entre o esforço axial e a deformação de um tirante de betão armado [4] -----	63
Figura 44 - Secções efectivas de betão traccionado (casos típicos) [2] -----	65
Figura 45 - Largura de fendas $wk$ , na superfície de betão em função da distância às armaduras [4] -----	66
Figura 46 - Deformação excessiva da estrutura causando fendilhação em elementos não estruturais [4] -----	71
Figura 47 - Variação das tensões e extensões no betão e na armadura devido à fluência [3] -----	72
Figura 48 - Distribuições de extensões simétricas e assimétricas em função da quantidade de armadura causada pela retracção do betão [4] -----	73
Figura 49 - Elemento simplesmente apoiado com uma deformação $\delta$ [7] -----	74
Figura 50 - Comportamento idealizado num elemento traccionado [3] -----	78
Figura 51 - Flecha de uma viga simplesmente apoiada por integração numérica [4] -----	79
Figura 52 - Relações dos momentos - curvatura para o instante de $t = 0$ e $t > 0$ [4] -----	82
Figura 53 - Planta Estrutural -----	86
Figura 54 - Corte Estrutural -----	86
Figura 55 - Representação do Excel -----	87
Figura 56 - Representação do programa de cálculo automático -----	87
Figura 57 - Representação do programa XD-Conserv -----	88
Figura 58 - Secções críticas no pórtico e piso em estudo para a verificação relativamente ao estado limite de último -----	89

Figura 59 - Secções críticas no pórtico e piso em estudo para a verificação aos estados limites de utilização -----	89
Figura 60 - Modelo Estrutural em 2D no <i>Robot Structural Analysis Professional 2014</i> -----	90
Figura 61 - Área de influência do peso próprio da laje piso 1 actuar no pórtico central-----	91
Figura 62 - Acções em estado limite último actuar no pórtico e piso em estudo -----	92
Figura 63 - Diagramas de momentos flectores para o estado limite último -----	93
Figura 64 - Acções respectivas para cada combinação de acções (características, frequentes e quase permanentes)-----	94
Figura 65 - Diagramas dos momentos flectores no pórtico e piso em estudo para a cada combinação de acções (características, frequentes e quase permanentes) -----	95
Figura 66 - Diagramas dos momentos flectores correspondentes às combinações de acções quase-permanente e característica para o tramo de extremidade-----	96
Figura 67 - Valores dos momentos flectores das combinações de acção característica (esquerda) e quase-permanente (direita) correspondentes ao tramo de extremidade-----	96
Figura 68 - Diagramas dos momentos flectores correspondentes às combinações de acções quase-permanente e característica no tramo intermédio -----	97
Figura 69 - Valores dos momentos flectores das combinações de acção característica (esquerda) e quase-permanente (direita) correspondentes ao tramo intermédio-----	97
Figura 70 - Diagramas dos momentos flectores correspondentes às combinações de acções quase-permanente e característica no tramo em consola-----	98
Figura 71 - Valores dos momentos flectores das combinações de acção característica (esquerda) e quase-permanente (direita) correspondentes ao tramo em consola -----	98
Figura 72 – Módulos de dimensionamento estrutural-----	106
Figura 73 – Opções de cálculo de acordo com o <i>Eurocódigo 2</i> -----	107
Figura 74 – Definição do tipo de membros -----	108
Figura 75 – Definição dos parâmetros adicionais relativamente ao cálculo da flecha -----	108
Figura 76 – Selecção dos elementos estruturais para proceder ao cálculo módulo <i>Provided Reinforcement</i> -----	109
Figura 77 – Parâmetros para o cálculo das vigas, referente às combinações escolhidas -----	110
Figura 78 – Opções Avançadas -----	111
Figura 79 – Comando <i>Typical Reinforcement</i> -----	112
Figura 80 – Interface principal do programa -----	113
Figura 81 – Disposição da armadura adoptada analiticamente com as respectivas secções críticas	115
Figura 82 - Disposição das armaduras obtidas em cada módulo de dimensionamento do <i>Robot</i> atendendo o número de pontos no cálculo e respectivas secções críticas em cada tramo -----	116

Figura 83 - Resultados da flecha e largura de fendas máxima de acordo com a selecção da combinação-----	122
Figura 84 - Resultados da flecha e largura de fendas máxima de acordo com a selecção da combinação-----	126
Figura 85 - Comparação dos valores das tensões de compressão no betão, em todas as secções e atendendo ao número de pontos de divisão realizados no cálculo, nos módulos realizados no <i>Robot</i> -----	133
Figura 86 - Comparação dos valores das tensões de compressão em todas as secções e atendendo apenas ao cálculo do elemento com 21 pontos, nos módulos realizados no <i>Robot</i> -----	133
Figura 87 - Comparação dos valores das tensões de compressão no betão, em todas as secções, pelos três métodos realizados no cálculo -----	134
Figura 88 - Comparação dos valores das tensões de tracção na armadura, em todas as secções e atendendo ao número de pontos de divisão realizados no cálculo, nos módulos realizados no <i>Robot</i> -----	137
Figura 89 - Comparação dos valores das tensões de tracção na armadura, em todas as secções e atendendo apenas ao cálculo do elemento com 21 pontos, nos módulos realizados no <i>Robot</i> -----	137
Figura 90 - Comparação dos valores das tensões de tracção na armadura, em todas as secções, pelos três métodos realizados no cálculo -----	138
Figura 91 - Comparação dos valores de largura de fendas no betão nas secções fendilhadas, atendendo ao número de pontos de divisão realizados no cálculo, nos módulos realizados no <i>Robot</i> -----	140
Figura 92 - Comparação dos valores da largura de fendas no betão nas secções fendilhadas, atendendo apenas ao cálculo do elemento com 21 pontos, nos módulos realizados no <i>Robot</i> -----	141
Figura 93 - Comparação dos valores da largura de fendas no betão nas secções fendilhadas, pelos três métodos realizados no cálculo -----	142
Figura 94 - Comparação dos valores das flechas a longo prazo nas secções críticas em cada tramo, atendendo ao número de pontos de divisão realizados no cálculo, nos módulos realizados no <i>Robot</i> -----	144
Figura 95 - Comparação dos valores das flechas a longo prazo nas secções críticas em cada tramo, atendendo apenas ao cálculo do elemento com 21 pontos, nos módulos realizados no <i>Robot</i> -----	144
Figura 96 - Comparação dos valores das flechas a longo prazo nas secções críticas em cada tramo, atendendo à presença e a ausência da retracção no betão, pelos três métodos realizados no cálculo -----	146

# ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das acções .....	9
Quadro 2 - Valores de coeficientes parciais de segurança $\gamma$ .....	12
Quadro 3 - Valores do factor $s$ .....	16
Quadro 4 - Valores de $\alpha$ .....	25
Quadro 5 - Valores de coeficientes de fluência $\varphi t, t_0$ aos 10.000 dias em função dos parâmetros que influenciam o seu valor.....	26
Quadro 6 - Valores do coeficiente $kh$ .....	29
Quadro 7 - Valores dos coeficientes $\alpha_{ds1}$ e $\alpha_{ds2}$ .....	29
Quadro 8 - Variação da retracção de secagem nominal $\epsilon_{cd,0}$ em função da classe de betão e da humidade relativa ( $RH$ ).....	30
Quadro 9 - Propriedades das armaduras.....	34
Quadro 10 - Classes de aço comercializados em Portugal.....	34
Quadro 11 - Valores de cálculo das tensões de acordo com a situação de projecto .....	35
Quadro 12 - Limites para as tensões no betão e no aço.....	39
Quadro 13 - Expressões para o cálculo das tensões e extensões no betão e na armadura para o estado não fendilhado.....	44
Quadro 14 - Expressões para o cálculo das tensões e extensões no betão e na armadura para o estado fendilhado .....	50
Quadro 15 - Valores e respectivas expressões de $kc$ atendendo o tipo de esforço e secção.....	60
Quadro 16 - Valores recomendados de $w_{máx}$ (mm).....	68
Quadro 17 - Diâmetros e espaçamentos máximos de varões $S_l, max$ , para o controlo da fendilhação .....	69
Quadro 18 - Valores básicos da relação vão/altura útil $ld$ em elementos de betão armado sem esforço normal de compressão obtidos para uma classe de betão C30/37 [2].....	76
Quadro 19 - Valores básicos da relação vão/altura útil $ld$ , obtidos para várias classes de betão para elementos de betão armado sem esforço normal de compressão.....	76
Quadro 20 - Coeficiente $\lambda$ em função dos diagramas de momentos flectores [3] .....	83



# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das acções presentes na estrutura.....	90
Tabela 2 - Valores das acções no pórtico central atendendo a largura de influência.....	91
Tabela 3 - Valores das acções referente aos estados limites últimos .....	92
Tabela 4 - Acções para cada combinação de acções referente aos estados limites de utilização .....	93
Tabela 5 - Valores das características geométricas e dos momentos flectores reduzidos em função dos momentos flectores retirados do programa de cálculo automático .....	99
Tabela 6 - Valores das armaduras mínimas e necessárias para a verificação dos estados limites últimos.....	100
Tabela 7 - Armaduras longitudinais adoptadas.....	100
Tabela 8 - Propriedades do betão para os instantes <b><math>t_0</math> e <math>t_\infty</math></b> .....	101
Tabela 9 – Parâmetros necessários para o cálculo dos módulos de elasticidade efectiva, coeficientes de fluência e homogeneização .....	101
Tabela 10 - Valores do coeficiente de fluência, módulo de elasticidade efectiva e coeficiente de homogeneização nos instantes <b><math>t_0</math> e <math>t_\infty</math></b> .....	102
Tabela 11 - Valores da retracção por secagem, autogénea e total no instante <b><math>t_\infty</math></b> .....	102
Tabela 12 - Valores de recobrimento e altura útil em função das armaduras longitudinais adoptadas .....	102
Tabela 13 - Valores de largura de fenda nas secções em estudo e a respectiva verificação.....	117
Tabela 14 – Valores das flechas nas secções em estudo atendendo ao número de pontos que o elemento foi calculado e a rigidez seleccionada.....	118
Tabela 15 - Valores das tensões nas secções em estudo e a respectiva verificação.....	119
Tabela 16 - Valores de largura de fenda nas secções em estudo e a respectiva verificação.....	120
Tabela 17 - Valores de largura de fenda nas secções em estudo e a respectiva verificação.....	121
Tabela 18 – Valores das tensões nas secções em estudo e a respectiva verificação .....	123
Tabela 19 - Valores de largura de fenda nas secções em estudo e a respectiva verificação.....	124
Tabela 20 - Valores das flechas nas secções em estudo e de acordo com o número de pontos que o elemento foi calculado .....	125
Tabela 21 – Valores de tensões e extensões no betão e na armadura nas respectivas combinações	127
Tabela 22 – Valores de largura de fendas e respectiva verificação .....	127
Tabela 23 – Valores da flecha a longo prazo pelo método simplificado e respectiva verificação.....	128
Tabela 24 – Valores da flecha a longo prazo pelo método Exacto e respectiva verificação .....	128
Tabela 25 - Valores de tensões e extensões no betão e na armadura nas respectivas combinações	129
Tabela 26 - Valores de largura de fendas e respectiva verificação.....	129
Tabela 27 - Valores da flecha a longo prazo e respectiva verificação.....	130

Tabela 28 – Valores das tensões de compressão no betão nas secções críticas referente à combinação de acções quase permanente e aos métodos de cálculo executados .....	131
Tabela 29 – Valores das tensões de tracção na armadura nas secções críticas referente à combinação de acções característica e aos métodos de cálculo executados.....	135
Tabela 30 – Valores da largura de fendas no betão, nas secções fendilhadas, referente à combinação de acções quase permanente e aos métodos de cálculo executados .....	139
Tabela 31 – Valores das flechas nas secções críticas referente à combinação de acções quase permanente e aos métodos de cálculo executados.....	142

## INTRODUÇÃO

O presente relatório de estágio surge no âmbito do trabalho final de Mestrado em Engenharia Civil na área de especialização de Estruturas, realizada em ambiente empresarial na *SOPSEC – Sociedade Prestação de serviços de Engenharia Civil, S.A.*

O tema do relatório a desenvolver no estágio tem como objectivo a verificação e análise comparativa de resultados de uma estrutura de betão armado relativamente aos estados limites de utilização (tensões, fendilhação e deformação), segundo o *Eurocódigo 2* utilizando um programa de cálculo automático da *Autodesk* o *Robot Structural Analysis Professional 2014* e por aplicação de conceitos teóricos realizados analiticamente.

A avaliação da qualidade e fiabilidade dos resultados obtidos com a ferramenta de cálculo automático da *Autodesk*, constitui o objectivo fundamental a atingir no final do estágio, sendo este um programa prestigiado no mercado, com bastante utilização. Os métodos que irão ser executados, de forma a comparar os resultados obtidos referentes aos estados limites de utilização (tensões, aberturas de fendas e deformação) e atendendo aos mesmos parâmetros de cálculo serão:

- Método analítico – calculado pelas equações referidas no capítulo 3, sendo apresentadas em tabelas realizadas no Excel;
- Programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis 2014* utilizando os diversos módulos de dimensionamento *Required Reinforcement* e *Provided Reinforcement*.

Será utilizado uma aplicação de cálculo automática *XD-Conserv* (podendo ser obtido gratuitamente no site <http://civilxd.web.ua.pt>) na comparação dos resultados obtidos analiticamente e da respectiva aplicação.

## 1.1 PLANEAMENTO DAS ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS

As actividades desenvolvidas no decorrer do estágio foram as seguintes:

1. Revisão bibliográfica sobre o tema;
2. Definição das características da estrutura exemplo a estudar;
3. Verificação através de métodos analíticos aos estados limites de utilização em estudo e sistematização dos resultados obtidos;
4. Desenvolvimento do modelo numérico no *Robot Structural Analysis Professional 2014* a respectiva geometria, aplicação de acções, cálculo de esforços, cálculo de armaduras, verificação aos estados limites de utilização;
5. Análise dos resultados obtidos pelo programa da *Autodesk*, teóricos e pela aplicação *XD-Conserv*;
6. Comparação dos resultados do *Robot*, teóricos e da aplicação *XD-Conserv* procurando uma explicação para as diferenças observadas;
7. Escrita do relatório de estágio.

## 1.2 ESTRUTURA NO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A estrutura do presente relatório encontra-se dividido em sete capítulos com o desenvolvimento que a seguir se descreve:

- Capítulo 1 – Introdução elucidando de uma forma geral o objectivo e desenvolvimento do estágio bem como apresentação da entidade de acolhimento;
- Capítulo 2 – Conceito da segurança e dimensionamento estrutural dos edifícios, atendendo aos estados limites, acções e materiais;

- Capítulo 3 – Abordagem do tema e detalhe dos vários conceitos teóricos sobre os diversos estados limites de utilização;
- Capítulo 4 – Resolução de um caso de estudo corrente mencionando os métodos de cálculo a serem utilizados;
- Capítulo 5 – Resultados obtidos e respectiva comparação pelos métodos utilizados;
- Capítulo 6 – Conclusão do relatório;
- Capítulo 7 – Bibliografia consultada no decorrer da elaboração do estágio.

Além dos capítulos mencionados constam anexos divididos em 3 partes relativamente à solução de armaduras do pórtico; procedimentos, opções para o cálculo e os respectivos resultados para cada método utilizado.

### 1.3 APRESENTAÇÃO DA ENTIDADE

A entidade na qual o decorreu o período de estágio foi na *SOPSEC – Sociedade de Prestação de Serviços de Engenharia Civil SA*.



Figura 1 - Logótipo da entidade [14]

#### 1.3.1 Localização

O estágio foi realizado na sede da *SOPSEC*, que se encontra sediada na região norte em Vila Nova de Gaia, na Rua do Emissor nº110. Além da sede, a *SOPSEC* possui também delegações nacionais localizadas em Lisboa, no Parque das Nações e nos Açores nomeadamente na ilha de S. Miguel em Ponta Delgada.

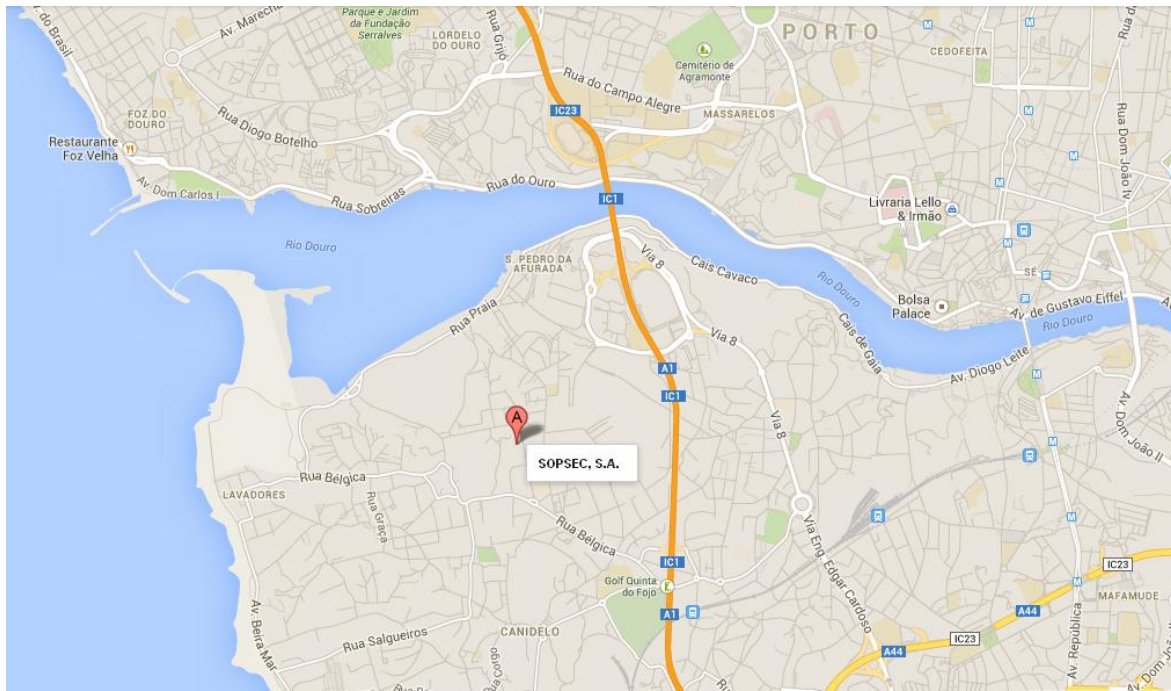


Figura 2 - Localização da sede da *SOPSEC* em Vila Nova de Gaia [15]



Figura 3 - Localização da sede e delegações da *SOPSEC* em Portugal Continental [15]

### 1.3.2 Áreas de Negócio

A sociedade tem por objecto a prestação de serviços no domínio da consultoria, elaboração de projectos e gestão de obras, de forma exclusiva e independente, directa ou indirectamente.



Figura 4 - Imagens ilustrativas das áreas produtivas da entidade [15]



## SEGURANÇA NO DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS

Na verificação da segurança de uma estrutura, é necessário que haja uma avaliação de todos os aspectos relativos ao seu funcionamento estrutural bem como as possibilidades de deficiência comportamental podendo chegar até ao ponto de colapso.

De tal forma para evitar os danos estruturais, devem ser adoptadas diversas medidas, tais como:

- Evitar, eliminar ou reduzir os riscos que a estrutura esteja sujeita;
- Adoptar boas soluções estruturais;
- Dimensionar adequadamente todos os elementos estruturais em função das suas propriedades de resistência de modo a desempenharem um bom comportamento estrutural;
- Evitar sistemas estruturais frágeis, ou seja, procurar que as estruturas sejam susceptíveis a deformações na rotura, isto é, estruturas dúcteis;
- Assegurar a interligação dos elementos estruturais.

De modo a que a verificação da segurança da estrutura seja assegurada em termos regulamentares, permitindo que as estruturas sejam capazes de desempenhar os objectivos para os quais foram projectados, é fulcral que as situações críticas passam pela identificação dos chamados “*Estados Limites*”.

## 2.1 ESTADOS LIMITES

Entende-se por estado limite uma situação que caso seja este alcançado ou superado, a estrutura deixará de satisfazer os objectivos que inicialmente estavam projectados. Com esta situação, o *Eurocódigo 2* menciona que é necessário realizar uma distinção entre estados limites que ocorrem no dimensionamento da estrutura.

Salienta-se assim dois estados limites fundamentais:

- **Estado limite último** – tem como finalidade a verificação da capacidade resistente, seja ela local ou global, de modo garantir um nível de segurança para determinadas situações de rotura, comprometendo a segurança da estrutura e dos utilizadores.
- **Estado limite utilização** – tem como finalidade garantir um bom comportamento em serviço da estrutura, de modo a relacionar os requisitos necessários, relativamente à durabilidade, utilização, aparência e conforto aos utilizadores.

De acordo com os estados limites referidos, o dimensionamento estrutural baseia-se na utilização de modelos estruturais e acções adequadas, de modo a incluir todas as condições que possam ocorrer durante a execução e a utilização da estrutura.<sup>[3]</sup>

Os valores de cálculo a serem utilizados no modelo estrutural referente às acções, propriedades dos materiais, grandezas geométricas e atendendo às situações de projecto e casos de carga que possam ocorrer, devem ser de tal forma para que nenhum estado limite seja excedido.

## 2.2 ACÇÕES E SUAS COMBINAÇÕES DE ACÇÕES

### I. ACÇÕES

As acções podem ser classificadas por diversos critérios, consoante a situação mais pertinente em que insere a estrutura.

Encontra-se no seguinte quadro os diversos critérios de classificação das acções.

Quadro 1 - Classificação das acções

Origem	Variação no tempo	Variação no espaço	Natureza
Directas Indirectas	Permanentes Variáveis Acidentais	Fixas Livres	Estáticas Dinâmicas

Tendo em conta o quadro anterior, as acções relativamente à sua origem, sendo este grupo principal de classificação de acções, podem ser designadas como:

- **Acções Directas** – são acções provenientes de cargas aplicadas à estrutura, que como exemplo e em função da sua variação no tempo, temos como acções:
  - **Permanentes**
    - Peso próprio da estrutura;
    - Alvenarias;
    - Revestimentos;
    - Equipamentos.
  - **Variáveis**
    - Sobrecargas;
    - Neve;
    - Vento.

- **Acções Indirectas** – são acções provenientes das deformações ou acelerações impostas à estrutura, que como exemplo e em função da sua variação no tempo, temos como acções:
  - **Permanentes**
    - Retracção do betão;
    - Assentamento de apoios;
    - Fluência do betão;
    - Imperfeições geométricas;
    - Pós – Tensão (No caso de elementos pré-esforçados).
  - **Variáveis**
    - Variação da temperatura.

Contudo, estas acções indirectas são predominantes quando a estrutura apresenta um grau de rigidez  $EI$  bastante elevado, ou seja, possuindo uma deformabilidade dos seus elementos muito reduzida ou até praticamente nula originando solicitações internas (esforços) mais elevados.

Caso contrário, quando a estrutura e seus elementos se apresentam com um grau de rigidez  $EI$  reduzido, ou seja, proporcionando uma maior deformabilidade da estrutura, originando rotações das duas ligações, como é o caso na vizinhança de um mecanismo de rotura dúctil, as acções indirectas poderão ser totalmente desprezadas.<sup>[5]</sup>

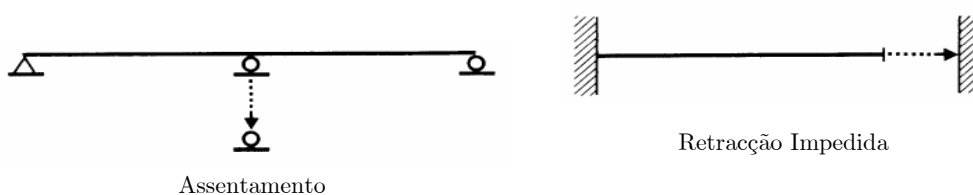


Figura 5 - Deformações devido a acções indirectas [5]

Em função da variação das acções no espaço, estas são designadas por:

- **Acções fixas** - são acções que possuem uma distribuição e posição fixa na estrutura ou no elemento estrutural;
- **Acções livres** - são acções que possuem uma distribuição e posição variáveis na estrutura ou no elemento estrutural.

Em função da sua natureza da natureza ou resposta estrutural:

- **Acções Estáticas** - são acções que não causam acelerações significativas na estrutura ou elemento estrutural;
- **Acções Dinâmicas** - são acções que provocam acelerações significativas na estrutura ou elemento estrutural.

## II. COMBINAÇÕES DE ACÇÕES

De forma a verificar a segurança relativamente aos diferentes estados limites devem ser consideradas as combinações de acções de forma a actuação ser coerente, produzindo na estrutura os efeitos mais desfavoráveis.

Assim as combinações a ter em conta para os estados limites últimos e de utilização, atendendo às várias situações de projecto, são as seguintes:

### i. Estados Limites Últimos

- **Combinação Fundamental** – combinação com variável base, a sobrecarga, tem como expressão:

$$E_{d,ck} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.1)$$

Os valores de coeficientes parciais de segurança  $\gamma$  que podem ser adoptados para a verificação dos estados limites últimos encontram-se no seguinte quadro:

Quadro 2 - Valores de coeficientes parciais de segurança  $\gamma$

Situações de Projecto	Acções					
	<i>Permanente</i>				<i>Variável</i>	<i>Acidental</i>
	Equilíbrio Estático		Rotura/ Deformação			
	Desfavorável	Favorável	Desfavorável	Favorável	Desfavorável	Desfavorável
	$\gamma$					
Persistente e Transitória	1,10	0,90	<b>1,35</b>	1,00	<b>1,50</b>	-
Acidental	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

**Nota:** Os valores assinalados a negrito, são os valores usuais na verificação segurança para o estado limite último em edifícios e que irão ser utilizados no caso de estudo presente no capítulo 4.

## ii. Estados Limites Utilização

- **Combinação Característica** – combinação associada atendendo a um estado de muita curta duração, correspondendo a durações de poucas horas no seu período de vida, tem como expressão:

$$E_{d,ck} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.2)$$

- **Combinação Frequente** – combinação associada atendendo a um estado de curta duração, correspondendo a durações da ordem de 5% do seu período de vida, tem como expressão:

$$E_{d,Fq} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2.3)$$

- **Combinação Quase-Permanente** – combinação associada atendendo a um estado de longa duração, correspondendo a durações de metade do seu período de vida, tem como expressão:

$$E_{d,Qp} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2.4)$$

Os valores dos coeficientes  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  e  $\psi_2$  referente às diferentes combinações de acções para os estados limites últimos e de utilização anteriormente mencionadas, encontram-se definidos na seguinte figura, presente no *Eurocódigo 0*.

Acção	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
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 $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, $30$ kN < peso dos veículos $\leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0
Acção da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) <sup>*)</sup>			
– Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20	0
Acção do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
<b>NOTA:</b> Os valores de $\psi$ poderão ser definidos no Anexo Nacional. <sup>*)</sup> Para os países não mencionados, considerar as condições locais relevantes.			

Figura 6 - Valores recomendados dos coeficientes  $\psi$  para edifícios [1]

## 2.3 MATERIAIS

As propriedades dos materiais têm uma elevada importância de tal forma a que seja possível inferir sobre as capacidades resistentes referentes a cada estado limite a ser considerado, nos elementos de betão armado. Assim, para cada estado limite, as propriedades dos materiais têm as seguintes finalidades:

### Estado Limite Último

- Aproveita as capacidades máximas resistentes do betão e aço;
- Considerar comportamentos elásticos e plásticos;
- Considera-se coeficientes de segurança:
  - Betão:  $\gamma_c = 1,50$
  - Aço:  $\gamma_s = 1,15$

### Estado Limite Utilização

- Considerar comportamento elástico e linear;
- Considera-se coeficientes de segurança:
  - Betão:  $\gamma_c = 1,00$
  - Aço:  $\gamma_s = 1,00$

Como tal as propriedades com elevada importância são:

- Resistência do betão à compressão  $f_{ck}$
- Resistência do betão à tracção  $f_{ctm}$
- Módulo de elasticidade betão  $E_c$
- Módulo de elasticidade do aço  $E_s$
- Coeficiente de fluência  $\varphi_0$
- Extensão de retracção do betão  $\varepsilon_{cs}$

**Nota:** Serão abordadas de seguida e de forma sucinta as propriedades do betão e aço.

### 2.3.1 Betão

O betão é um material composto, constituído por agregados grossos, finos e um ligante (cimento), é necessário conhecer os parâmetros que estão relacionados com a resistência e deformação. É apresentado na seguinte figura, os respectivos valores de resistência e deformação, conforme a classe de betão pretendida.

Classes de resistência do betão														Expressão analítica /Comentários	
$f_{tk}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{tk,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{tk} + 8$ (MPa)
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{tk}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0.05} = 0,7 \times f_{ctm}$ quantilho de 5 %
$f_{ctk,0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0.95} = 1,3 \times f_{ctm}$ quantilho de 95 %
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0.3}$ ( $f_{cm}$ em MPa)
$\epsilon_{c1}$ (%)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	ver a Figura 3.2 $\epsilon_{c1}^{(t/100)} = 0,7 \cdot f_{cm}^{0.31} \leq 2,8$
$\epsilon_{cu1}$ (%)	3,5								3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	ver a Figura 3.2 para $f_{tk} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu1}^{(t/100)} = 2,8 + 2,7[(98 - f_{cm})/100]^4$	
$\epsilon_{c2}$ (%)	2,0								2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	ver a Figura 3.3 para $f_{tk} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c2}^{(t/100)} = 2,0 + 0,085(f_{tk} - 50)^{0.53}$	
$\epsilon_{cu2}$ (%)	3,5								3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ver a Figura 3.3 para $f_{tk} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu2}^{(t/100)} = 2,6 + 3,5[(90 - f_{tk})/100]^4$	
$n$	2,0								1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	para $f_{tk} \geq 50$ MPa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{tk})/100]^4$	
$\epsilon_{c3}$ (%)	1,75								1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	ver a Figura 3.4 para $f_{tk} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c3}^{(t/100)} = 1,75 + 0,55[(f_{tk} - 50)/40]$	
$\epsilon_{cu3}$ (%)	3,5								3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ver a Figura 3.4 para $f_{tk} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu3}^{(t/100)} = 2,6 + 3,5[(90 - f_{tk})/100]^4$	

Figura 7 - Características de resistência e de deformação do betão [2]

**Nota:** Os valores referidos na figura anterior, são valores de referência correspondendo a um prazo de 28 dias de cura do betão e uma temperatura média ambiente de 20°C. Na última estão mencionadas as expressões analíticas referentes aos parâmetros da primeira coluna, para um instante  $t$  nesse período de tempo.

Destaca-se de seguida os parâmetros mais relevantes:

## I. RESISTÊNCIA DO BETÃO À COMPRESSÃO

A tensão de rotura à compressão do betão tem a seguinte expressão:

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \quad (2.5)$$

Em que:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (2.6)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{s\left(1-\left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right)} \quad (2.7)$$

$f_{cm}(t)$  – Tensão média de rotura do betão à compressão à idade  $t$  (MPa)

$f_{cm}$  – Tensão média de rotura do betão aos 28 dias de idade (MPa)

$\beta_{cc}(t)$  – Coeficiente que depende da idade do betão  $t$  em dias

$s$  – Factor que depende do tipo de cimento, obtido a partir do quadro seguinte:

Quadro 3 - Valores do factor  $s$

Tipo de Cimento	Classe	s
CEM 42,5 R CEM 52,5 N CEM 52,5 R	R	0,20
CEM 32,5 R CEM 42,5 N	N	0,25
CEM 32,5 R	S	0,38

## II. RESISTÊNCIA DO BETÃO À TRACÇÃO

A tensão média de rotura à tracção do betão  $f_{ctm}$  tem a seguinte expressão:

$$f_{ctm}(t) = [\beta_{cc}(t)]^\alpha f_{ctm} \quad (2.8)$$

Em que:

- $\alpha = 1$ , para  $t < 28$  dias
- $\alpha = 2/3$ , para  $t \geq 28$  dias

### III. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO

Considera-se, em geral o módulo de elasticidade secante do betão  $E_{cm}$  aos 28 dias de idade, que é definido pela rigidez secante para uma tensão de 40% do valor resistente para a curva média do comportamento do betão, como demonstra a seguinte figura.

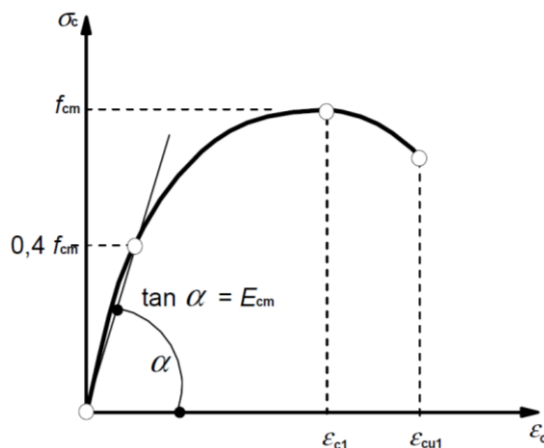


Figura 8 - Relação Tensões – Extensões [2]

A tensão média do módulo de elasticidade do betão em função do tempo, tem a seguinte expressão:

$$E_{cm}(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0,3} E_{cm} \quad (2.9)$$

O valor do módulo de elasticidade de um betão depende dos módulos de elasticidades dos seus componentes, especialmente dos seus agregados. Apresentam-se de seguida, os tipos de agregados a utilizar num betão bem como as expressões respectivas para o cálculo do módulo de elasticidade de cada agregado.

- Agregados Quartzíticos  $\rightarrow E_{cm}(t) = 22,0 \left( \frac{f_{cm}(t)}{10} \right)^{0,3} \quad (2.10)$

- Agregados Calcários  $\rightarrow E_{cm}(t) = 19,8 \left( \frac{f_{cm}(t)}{10} \right)^{0,3} \quad (2.11)$

- Agregados de Grés  $\rightarrow E_{cm}(t) = 15,4 \left( \frac{f_{cm}(t)}{10} \right)^{0,3} \quad (2.12)$

- Agregados Basálticos  $\rightarrow E_{cm}(t) = 26,4 \left( \frac{f_{cm}(t)}{10} \right)^{0,3} \quad (2.13)$

**Nota:** O valor de referência para o cálculo do módulo de elasticidade atendendo a figura 8, o agregado utilizado é o agregado de *Quartzito*.

Na figura que se segue encontra-se a representação da evolução de resistência do módulo de elasticidade, atendendo aos diferentes tipos de agregados anteriormente mencionados.

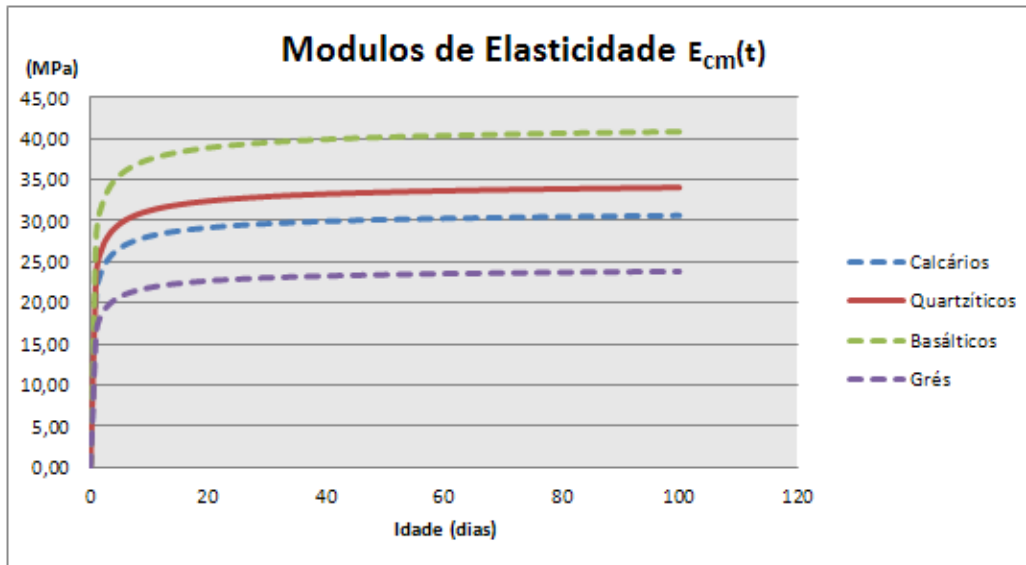


Figura 9 - Evolução dos módulos de elasticidade  $E_{cm}(t)$  consoante os diferente tipos de agregados

#### IV. RELAÇÕES TENSÕES-EXTENSÕES

O comportamento da relação tensão - extensão do betão é definido pelo diagrama parábola-rectângulo, representado na seguinte figura, presente no *Eurocódigo 2*.

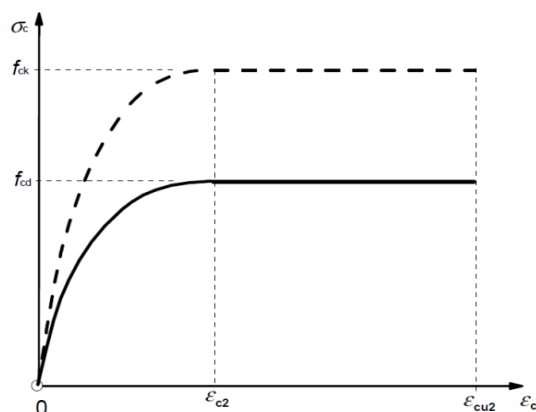


Figura 10 - Diagrama parábola-rectângulo para betão comprimido [2]

## V. EFEITOS DIFERIDOS

O *Eurocódigo 2* refere os efeitos diferidos nos elementos de betão armado, a **fluência** e a **retracção**. Estes efeitos são fenómenos complexos e propriedades reológicas do betão, cujos efeitos são considerados na verificação aos estados limites de utilização, que dependem de vários factores tais como:

- Humidade relativa ambiente;
- Temperatura ambiente;
- Dimensões do elemento;
- Composição do betão;

### a) FLUÊNCIA

A fluência é expressa pelo aumento das deformações sob tensão constante, devido à variação de volume da pasta de cimento que envolve os agregados. Quando um elemento é sujeito sob a acção de um estado tensão num instante  $t_0$ , este sofre uma deformação instantânea  $\varepsilon_{c0}$  e se este estado de tensão se mantiver aplicado nesse mesmo elemento, haverá um aumento da deformação ao longo tempo  $\varepsilon_{cc}$ , designado por deformação de fluência.

A deformação por fluência pode ser dividida em:

- Deformação elástica, sendo recuperável após a descarga;
- Deformação plástica, não recuperável.

A fluência depende de alguns factores anteriormente mencionados, mas irá depender essencialmente:

- Idade do betão no primeiro carregamento  $t_0$ ;
- Duração da carga  $[t, t_0]$ ;
- Intensidade da carga.

Apresenta-se na seguinte figura a relação tempo – deformação provocada pela fluência, com uma tensão constante em diferentes instantes de aplicação da carga.

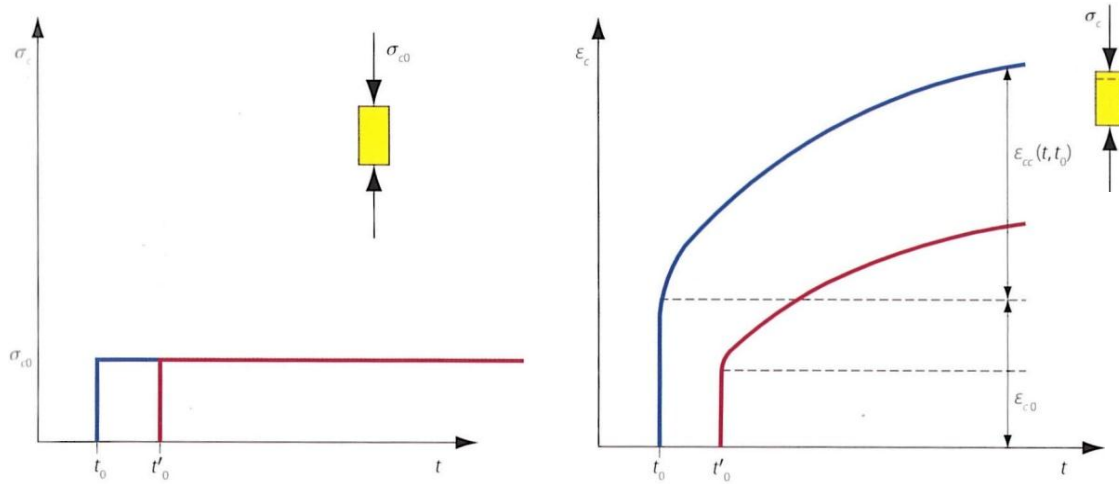


Figura 11 - Deformação do betão a longo prazo em diferentes instantes de aplicação de carga [4]

Na formulação apresentada pelo *Eurocódigo 2*, admite-se a existência de proporcionalidade das extensões entre as tensões aplicadas devida à fluência, desde que o betão não esteja submetido a uma tensão de compressão superior a  $0,45f_{ck}$ , ou seja  $\sigma_c \leq 0,45f_{ck}$  para a **combinação de acções quase permanentes**.

A deformação do betão por fluência tem como expressão:

$$\varepsilon_{cc} = \varphi(t, t_0)\varepsilon_{c0} \quad (2.14)$$

Em que:

$$\varepsilon_{c0} = \frac{\sigma_{c0}}{E_{c0}} \quad (2.15)$$

De acordo com a figura 11, as siglas têm a seguinte denominação:

$\varepsilon_{c0}$  – Deformação instantânea  $t_0$

$\varepsilon_{cc}(t, t_0)$  – Deformação num instante  $t$

$\varphi(t, t_0)$  – Coeficiente de fluência entre um intervalo  $t_0$  e  $t$ , em que  $\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cc}(t, t_0)}{\varepsilon_{c0}(t_0)}$

$t_0$  – Primeiro instante que é aplicado a tensão  $\sigma_{c,0}$

$t'_0$  – Um outro instante qualquer, sendo  $t > t_0$

O coeficiente de fluência  $\varphi(t, t_0)$  é em função do módulo de elasticidade do betão  $E_c$ , uma vez que o *Eurocódigo 2* admite que este possa ser considerado igual a  $1,05E_{cm}$ , ou seja

$$E_c = 1,05E_{cm} \quad (2.16)$$

A utilização do módulo de elasticidade efectivo  $E_{c,eff}$ , permite considerar directamente o efeito da fluência, que está demonstrado na figura que se segue e tem a seguinte expressão:

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi} \quad (2.17)$$

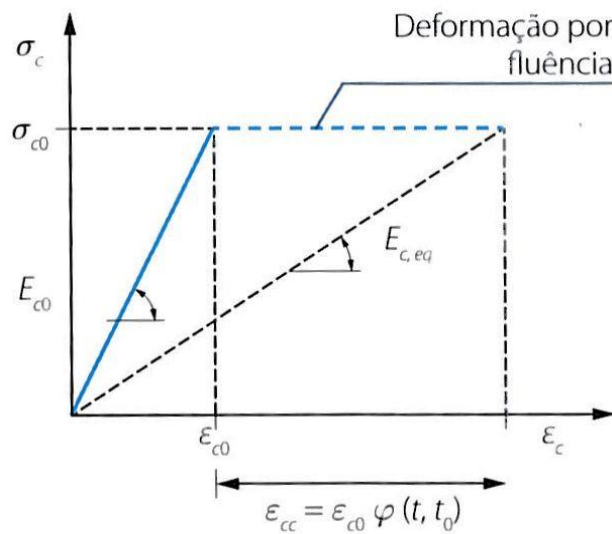


Figura 12 - Deformação do betão com o módulo de elasticidade efectivo  $E_{c,eff}$  [4]

Considerando a deformação do betão por fluência, na idade  $t = \infty$ , a expressão que traduz a deformação do betão por fluência a longo prazo é a seguinte:

$$\varepsilon_c(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0)\varepsilon_{c0} \quad (2.18)$$

Exemplificando os passos de forma a chegar à equação do módulo de elasticidade, teremos:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c(\infty, t_0) &= \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_{cc}(\infty, t_0) \rightarrow \varepsilon_c(\infty, t_0) = \frac{\sigma_{c0}}{E_{c0}} + \varphi(\infty, t_0) \frac{\sigma_{c0}}{E_{c0}} \\ &\downarrow \\ \varepsilon_c(\infty, t_0) &= \frac{\sigma_{c0}}{E_{c0}} (1 + \varphi(\infty, t_0)) \rightarrow \varepsilon_c(\infty, t_0) = \frac{\sigma_{c0}}{\frac{E_{c0}}{(1 + \varphi(\infty, t_0))}} \rightarrow \varepsilon_c(\infty, t_0) = \frac{\sigma_{c0}}{E_{c,eff}} \\ &\downarrow \\ E_{c,eff} &= \frac{E_{c0}}{1 + \varphi(\infty, t_0)} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Na figura que se segue, demonstra a evolução do módulo de elasticidade efectivo ao longo do tempo, aplicando a carga a um determinado instante,  $t_0$ .

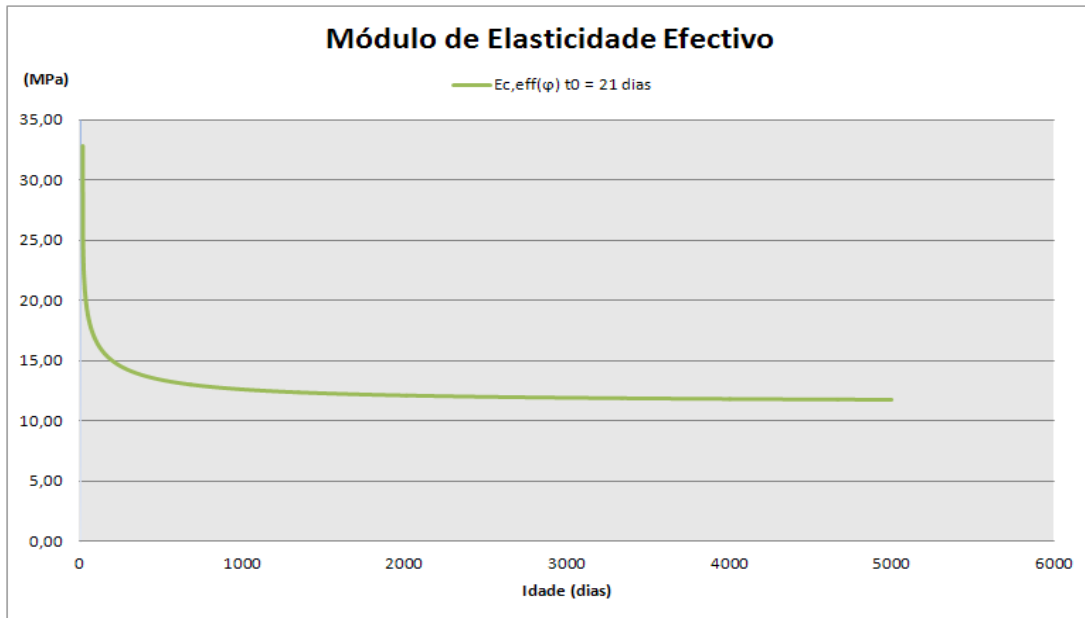


Figura 13 - Evolução do módulo de elasticidade efectivo  $E_{c,eff}$  ao longo do tempo, aplicando uma carga ao instante  $t_0 = 21$  dias com um betão de classe C30/37

Na figura seguinte está apresentado a relação entre os módulos de elasticidade efectivo e normal ao longo do tempo, tendo em conta a evolução do coeficiente de fluência.

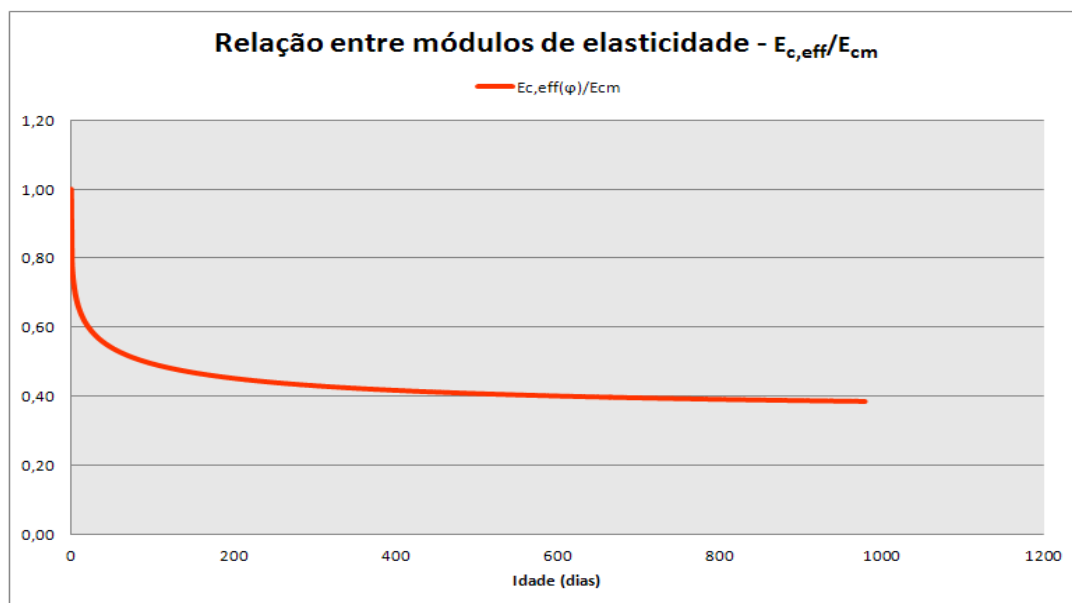


Figura 14 - Relação entre os módulos de elasticidade ao longo do tempo  $E_{c,eff}/E_{cm}$

No seguimento da determinação do módulo de elasticidade, proceder-se-á a determinação do coeficiente de fluência analiticamente para qualquer idade, estando presente no Anexo B do *Eurocódigo 2*.

O coeficiente de fluência é dado pela seguinte expressão:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (2.20)$$

Em que:

$\varphi_0$  – Coeficiente de fluência, é dado pela seguinte expressão:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (2.21)$$

$\varphi_{RH}$  – Coeficiente que tem em conta a influência da humidade relativa e é dado como:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/100}{0,1^3 \sqrt{h_0}} \quad \rightarrow \quad \text{para } f_{cm} \leq 35MPa \quad (2.22)$$

$$\varphi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1-RH/100}{0,1^3 \sqrt{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2 \quad \rightarrow \quad \text{para } f_{cm} > 35MPa \quad (2.23)$$

$RH$  – Humidade relativa do meio ambiente (%)

$h_0$  – Espessura equivalente do elemento (mm), tem como expressão:

$$h_0 = \frac{2A_c}{\mu} \quad (2.24)$$

$A_c$  – Área da secção transversal (m<sup>2</sup>)

$\mu$  – Parte do perímetro do elemento em contacto com o ambiente(m)

$\alpha_1$  e  $\alpha_2$  – Coeficiente que tem em conta a influência da resistência do betão, têm como expressões:

$$\alpha_1 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad \alpha_2 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad (2.25) \text{ e } (2.26)$$

$\beta(f_{cm})$  – Factor que tem em conta a influência da resistência do betão, do valor médio da tensão de rotura do betão  $f_{cm}$  em MPa, aos 28 dias e é dado como:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (2.27)$$

$\beta(t_0)$  – Factor que tem em conta a influência da idade do betão à data do carregamento, tem como expressão:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,20})} \quad (2.28)$$

$\beta_c(t, t_0)$  – Coeficiente de representa a evolução da fluência no tempo e que pode ser expresso por:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0,3} \quad (2.29)$$

Em que:

$t$  – Idade do betão na data considerada (dias)

$t_0$  – Idade do betão, à data do carregamento (dias)

$(t - t_0)$  – Duração não corrigida do carregamento (dias)

$\beta_H$  – Coeficiente que depende da humidade relativa,  $RH$  (%) e da espessura equivalente do elemento  $h_0$  (mm), pode ser estimado como:

$$\beta_H = 1,5 \times [1 + (0,012RH)^{18}] \times h_0 + 250 \leq 1500 \quad \rightarrow \quad \text{para } f_{cm} < 35MPa \quad (2.30)$$

$$\beta_H = 1,5 \times [1 + (0,012RH)^{18}] \times h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \alpha_3 \quad \rightarrow \quad \text{para } f_{cm} \geq 35MPa \quad (2.31)$$

$\alpha_3$  – Coeficiente que tem em conta a influência da resistência do betão, têm como expressão:

$$\alpha_3 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} \quad (2.32)$$

A influência da temperatura é um factor condicionante na maturidade do betão, principalmente em intervalos de temperatura na ordem de 0°C a 80°C. Como tal a idade do betão deverá ser corrigida pela seguinte expressão:

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-(-4000/[273+T(\Delta t_i)]-13,65)\Delta t_i} \quad (2.33)$$

Em que:

$t_T$  – Idade do betão corrigida em função da temperatura, que deve ser substituída nas expressões anteriormente citadas (dias)

$T(\Delta t_i)$  – Temperatura durante o intervalo de tempo  $\Delta t_i$  (°C)

$\Delta t_i$  – Número de dias em que a temperatura é  $T$  (dias)

Por fim, é necessário ter em conta que o tipo de cimento irá influenciar o coeficiente de fluência do betão, corrigindo o coeficiente  $\beta(t_o)$  por modificação do valor de  $t_o$ , e tem como expressão:

$$t_o = t_{0,T} \left[ \frac{9}{(2 + t_{0,T}^{1,2})} + 1 \right]^\alpha \geq 0,5 \quad (2.34)$$

Em que:

$t_{0,T}$  – Idade do betão na altura do carregamento corrigida em função da temperatura (dias)

$\alpha$  – Factor que corresponde ao tipo de cimento, conforme se encontra no quadro seguinte:

Quadro 4 – Valores de  $\alpha$

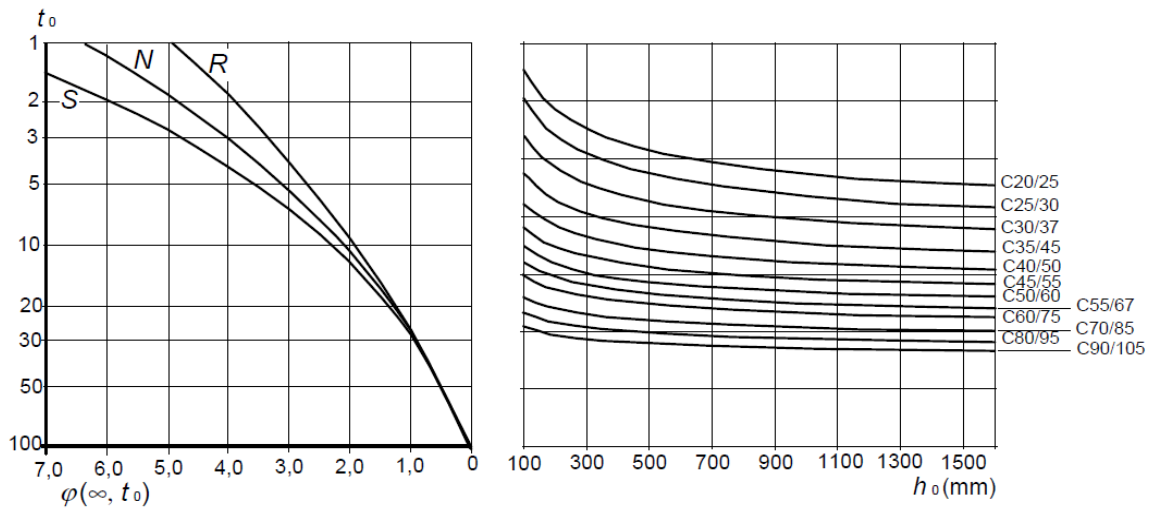
Tipo de Cimento	Classe	Presença	$\alpha$
CEM 42,5 R	R	Lenta	-1
CEM 52,5 N			
CEM 52,5 R			
CEM 32,5 R	N	Normal	0
CEM 42,5 N			
CEM 32,5 R	S	Rápida	1

É apresentado na seguinte tabela, valores de coeficiente de fluência  $\varphi(t, t_o)$  para uma idade  $t = 10.000$  dias, tendo em conta várias espessuras equivalentes  $h_o$ , e duas condições higrométricas de RH=50% e RH=80% em função da idade de carregamento  $t_o$ .

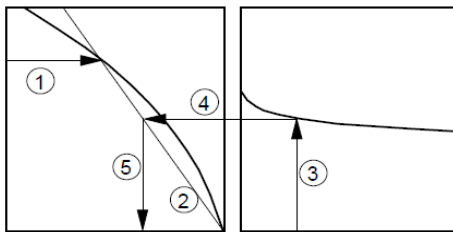
Quadro 5 - Valores de coeficientes de fluência  $\varphi(t, t_0)$  aos 10.000 dias em função dos parâmetros que influenciam o seu valor

Idade de Carregamento $t_0$ (dias)	Espessura equivalente $h_0=2A_c/\mu$									
	50	100	200	500	1000	50	100	200	500	1000
	Atmosfera Seca (Interior) RH =50%					Atmosfera Húmida (Exterior) RH =80%				
1	5,50	4,90	4,40	3,90	3,60	3,70	3,40	3,20	3,00	2,90
3	4,50	4,00	3,60	3,20	2,90	3,00	2,80	2,60	2,50	2,40
5	4,10	3,60	3,30	2,90	2,70	2,70	<b>2,50</b>	2,40	2,20	2,20
7	3,90	3,40	3,10	2,70	2,50	2,60	2,40	2,20	2,10	2,00
14	3,40	3,00	2,70	2,40	2,20	2,30	2,10	2,00	1,80	1,80
21	3,20	2,80	<b>2,50</b>	2,20	2,00	2,10	2,00	1,80	1,70	1,60
28	3,00	2,60	2,40	2,10	1,90	2,00	1,80	1,70	1,60	1,60
60	2,60	2,30	2,10	1,80	1,70	1,70	1,60	1,50	1,40	1,40
90	2,40	2,10	1,90	1,70	1,50	1,60	1,50	1,40	1,30	1,30
120	2,30	2,00	1,80	1,60	1,50	1,50	1,40	1,30	1,30	1,20
180	2,10	1,80	1,60	1,50	1,40	1,40	1,30	1,20	1,10	1,10
365	1,80	1,60	1,40	1,30	1,20	1,20	1,10	1,10	1,00	1,00

Um método simplificado de obter o valor do coeficiente de fluência, e que não seja necessário grande precisão, é através de ábacos presentes no *Eurocódigo 2*, que se encontram na figura e página seguinte.

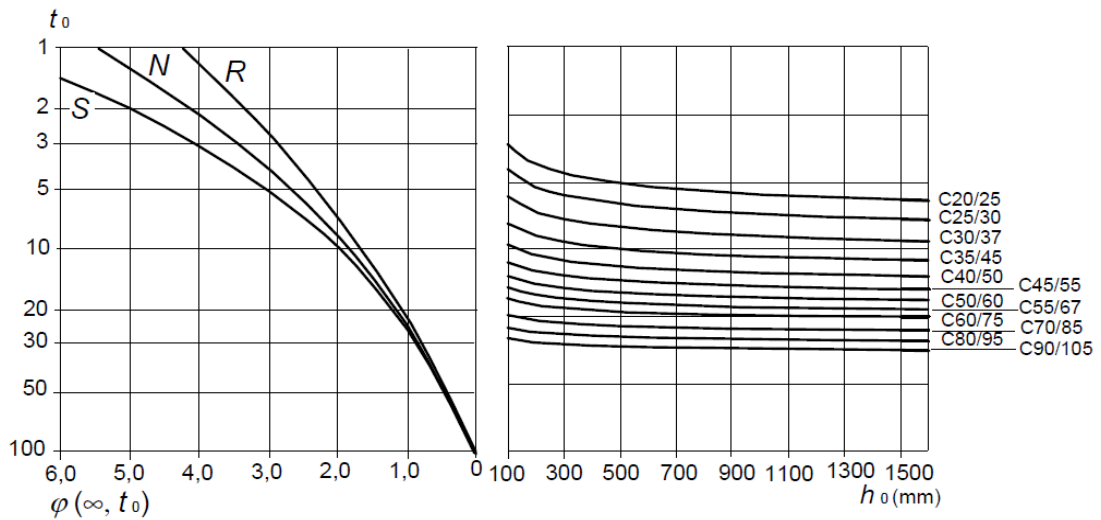


a) ambiente interior - RH = 50 %



Nota:

- o ponto de intersecção entre as linhas 4 e 5 também pode estar acima do ponto 1
- para  $t_0 > 100$  é suficientemente rigoroso considerar  $t_0 = 100$  (e utilizar a linha tangente)



b) ambiente exterior - RH = 80 %

Figura 15 - Método para determinação do coeficiente de fluência  $\varphi(\infty, t_0)$  para um betão em condições ambientais normais [2]

## b) RETRACÇÃO

A retracção do betão é expressa pela redução do volume do betão devido aos efeitos de secagem e de reacções de hidratação. A extensão total retracção é constituída por dois componentes:

- Extensão de retracção de Secagem;
- Extensão de retracção Autogénea.

O valor total da extensão por retracção, tem a seguinte expressão:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (2.35)$$

Em que:

$\varepsilon_{cd}$  – Extensão de retracção por secagem

$\varepsilon_{ca}$  – Extensão de retracção autogénea

### b.1) RETRACÇÃO DE SECAGEM

A retracção de secagem evolui lentamente, uma vez que é em função da migração da água do betão endurecido. A retracção por secagem é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_{cd} = \beta_{ds}(t, t_s) k_h \varepsilon_{cd,0} \quad (2.36)$$

Em que:

$\beta_{ds}(t, t_s)$  – Representa a evolução no tempo da retracção de secagem, e tem como expressão:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{h_0^3}} \quad (2.37)$$

E que:

$t$  – Idade do betão na data considerada (dias)

$t_s$  – Idade do betão no início da retracção de secagem, corresponde ao fim do período de cura (dias)

$h_0$  – Espessura equivalente do elemento (mm)

$k_h$  – Coeficiente que depende da espessura equivalente do elemento  $h_0$  conforme se encontra no seguinte quadro:

Quadro 6 – Valores do coeficiente  $k_h$

$h_0$	$k_h$
100	1,00
200	0,85
300	0,75
$\geq 500$	0,70

$\varepsilon_{cd,0}$  – Retracção de secagem nominal, sendo esta estimada conforme o anexo B do *Eurocódigo 2*, que tem como expressão:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[ (220 + 110 \alpha_{ds1}) e^{\left( -\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)} \right] 10^{-6} \beta_{RH} \quad (2.38)$$

Em que:

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (2.39)$$

Sendo:

$f_{cm}$  – Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão (MPa)

$f_{cm0}$  – Valor igual a 10 MPa

$RH$  – Humidade relativa ambiente (%)

$RH_0$  – Humidade relativa ambiente, considerando o valor igual a 100%

$\alpha_{ds1}$  e  $\alpha_{ds2}$  – Coeficientes que dependem do tipo de cimento, estando os valores representados no seguinte quadro:

Quadro 7 - Valores dos coeficientes  $\alpha_{ds1}$  e  $\alpha_{ds2}$

Tipo de Cimento	$\alpha_{ds1}$	$\alpha_{ds2}$
Classe R	6	0,11
Classe N	4	0,12
Classe S	3	0,13

De acordo com as expressões anteriormente referidas, encontra-se nas seguintes figuras e quadros as variações do coeficiente  $\beta_{ds}$ , retracção se secagem nominal  $\epsilon_{cd,0}$ , bem como a evolução da retracção por secagem ao longo do tempo  $\epsilon_{cd}$ , considerando:

- Classe de betão C30/37
- Cimento da classe *N*
- Várias espessuras equivalentes  $h_0$
- Início de retracção de secagem  $t_s=7$  dias
- Humidade relativa RH=80%

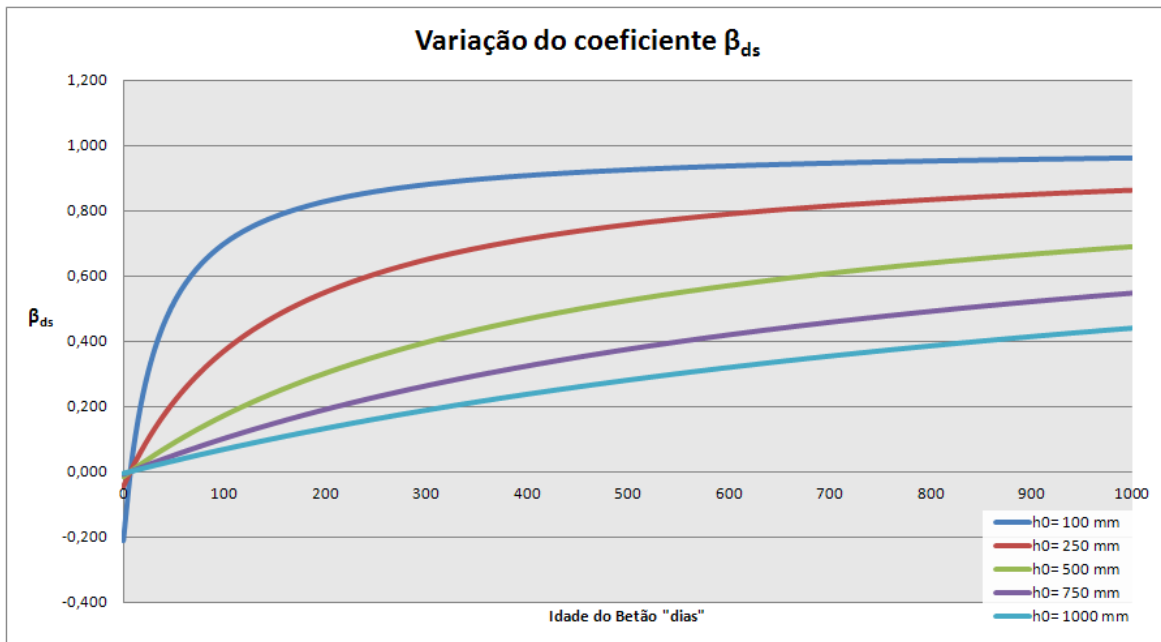


Figura 16 - Variação do coeficiente  $\beta_{ds}$  ao longo do tempo para várias espessuras nominais

Quadro 8 - Variação da retracção de secagem nominal  $\epsilon_{cd,0}$  em função da classe de betão e da humidade relativa (*RH*)

$\epsilon_{cd} \times 10^{-6}$ (m)	Humidade relativa RH (%)		
	50	80	100
Classe do betão			
C 20/25	544	303	0
C 25/30	512	286	0
C 30/37	482	269	0
C 40/50	428	239	0
C 50/60	380	212	0

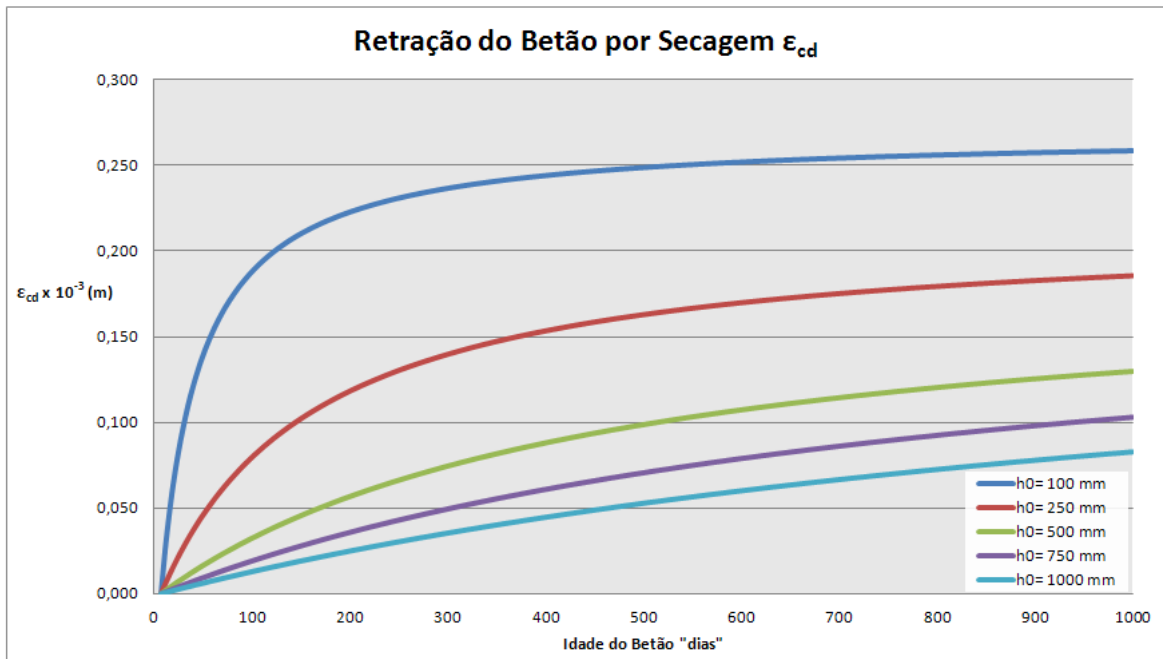


Figura 17 - Retracção do betão por secagem  $\epsilon_{cd}$  ao longo do tempo

### b.2) Retracção Autogénea

A retracção autogénea evolui rapidamente nos primeiros dias após a betonagem, associado às reacções de hidratação do cimento e é dada pela seguinte expressão:

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t)\epsilon_{ca}(\infty) \quad (2.40)$$

Em que:

$\epsilon_{ca}(\infty)$  – Valor da retracção autogénea para tempo infinito tem como expressão:

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10)10^{-6} \quad (2.41)$$

$f_{ck}$  – Valor característico da resistência do betão à compressão (MPa)

De acordo com as expressões anteriormente mencionadas, apresenta-se na seguinte figura, a variação da retracção autogénea em função da classe de betão, sendo esta retracção uma função linear da resistência do betão.

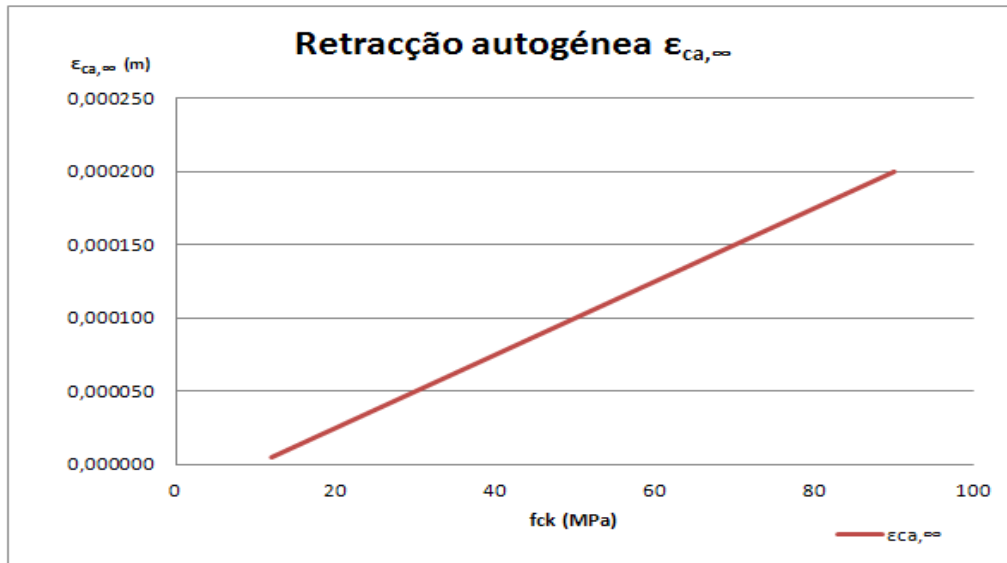


Figura 18 - Variação de  $\epsilon_{ca}(\infty)$  em função de  $f_{ck}$

De acordo com a figura anterior, evidencia-se que a retração é tanto maior quanto maior for a resistência do betão.

$\beta_{as}(t)$  – Evolução no tempo da retração autogénea, tem como expressão:

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2\sqrt{t}} \quad (2.42)$$

De acordo com a expressão anterior, é apresentado na seguinte figura a evolução no tempo da retração autogénea.

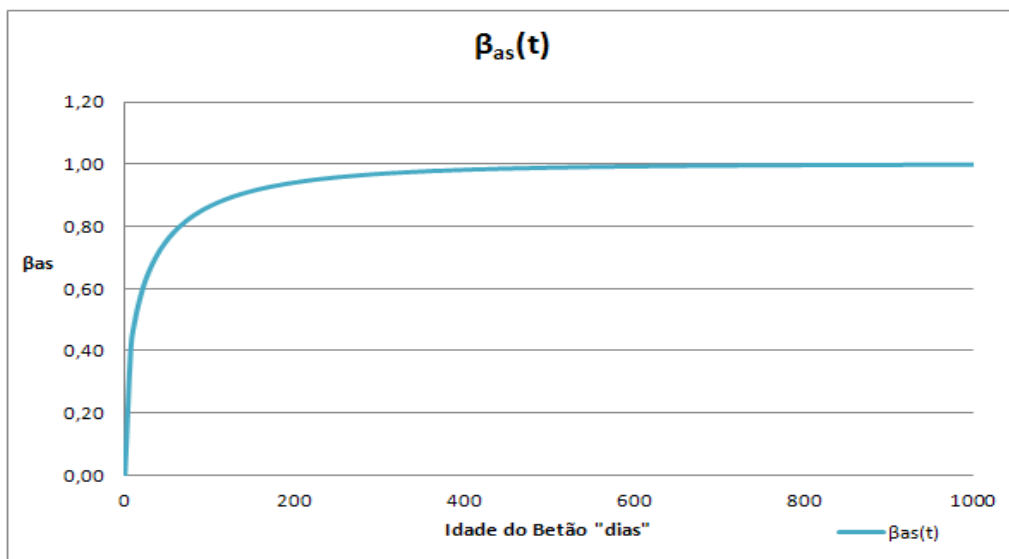


Figura 19 - Variação da retração autogénea ao longo do tempo  $\beta_{as}(t)$

Atendendo às figuras apresentadas anteriormente, na seguinte figura apresenta-se a evolução da retracção autogénea, admitindo uma classe de betão C30/37.

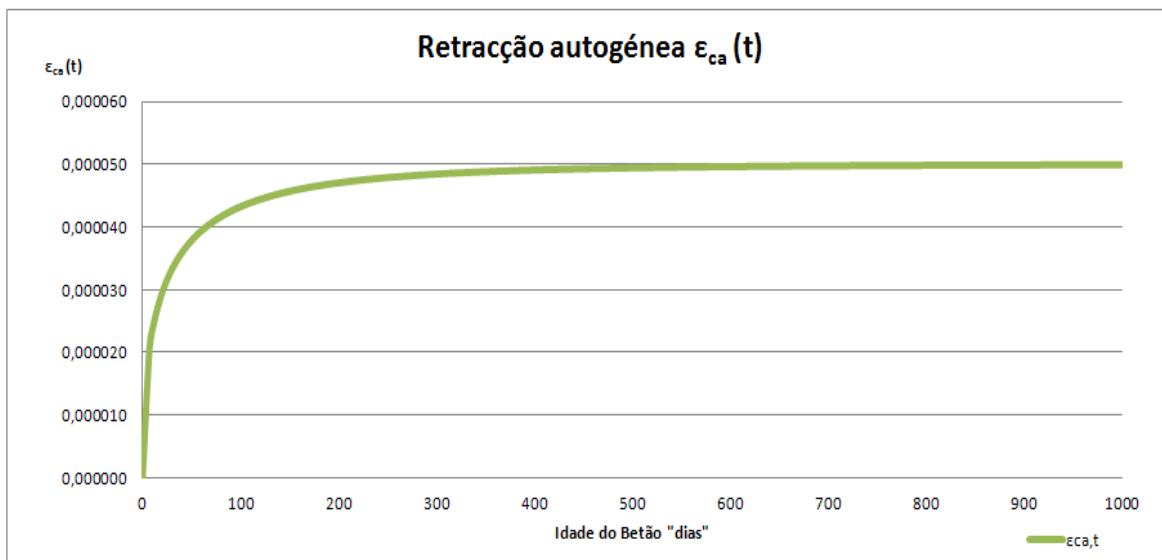


Figura 20 - Evolução da retracção autogénea ao longo do tempo  $\epsilon_{ca}(t)$

### 2.3.2 Aço

O *Eurocódigo 2* menciona várias propriedades do aço, sendo este material de elevada resistência à tracção. Salienta-se as propriedades mais relevantes:

- Tensão de cedência  $f_{yk}$  ou  $f_{0,2k}$
- Ductilidade  $k$
- Módulo de Elasticidade  $E_s$

#### a. PROPRIEDADES

O *Eurocódigo 2* considera 3 classes de aço, A, B e C com características de ductilidade. No quadro seguinte apresentam-se as propriedades referentes a cada uma das classes, bem como os tipos de aço comercializados em Portugal.

Quadro 9 – Propriedades das armaduras

Classe	A	B	C
$f_{yk}$ ou $f_{0,2k}$	400 a 600		
$k = \left(\frac{f_t}{f_y}\right)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$
$\varepsilon_{uk}(\%)$	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$

Em que:

$f_{yk}$  – Valor característico da tensão de cedência do aço (MPa)

$f_{0,2k}$  – Valor característico do limite convencional de proporcionalidade a 0,2% da tensão de cedência do aço (MPa)

$k$  – Relação em valor característico da tensão máxima pela tensão de cedência do aço

$\varepsilon_{uk}$  – Extensão do aço associada à tensão máxima  $f_t$

Quadro 10 – Classes de aço comercializados em Portugal

Classe	Especificação	$f_{yk}$ (MPa)
A400 NR	LNEC E449	400
A400 NR SD	LNEC E455	
A500 NR	LNEC E450	500
A500 NR SD	LNEC E460	
A500 ER	LNEC E456	

Em que:

$f_{yk}$  – Valor característico da tensão de cedência do aço (MPa)

$f_{yd}$  – Valor de cálculo da tensão de cedência do aço (MPa)

$\varepsilon_{yd}$  – Extensão de cálculo do aço associada à tensão de cedência  $f_{yd}$

A figura seguinte, representa graficamente as curvas tensões-extensões do aço e do respectivo tratamento que foi sujeito durante o seu processo de fabrico.

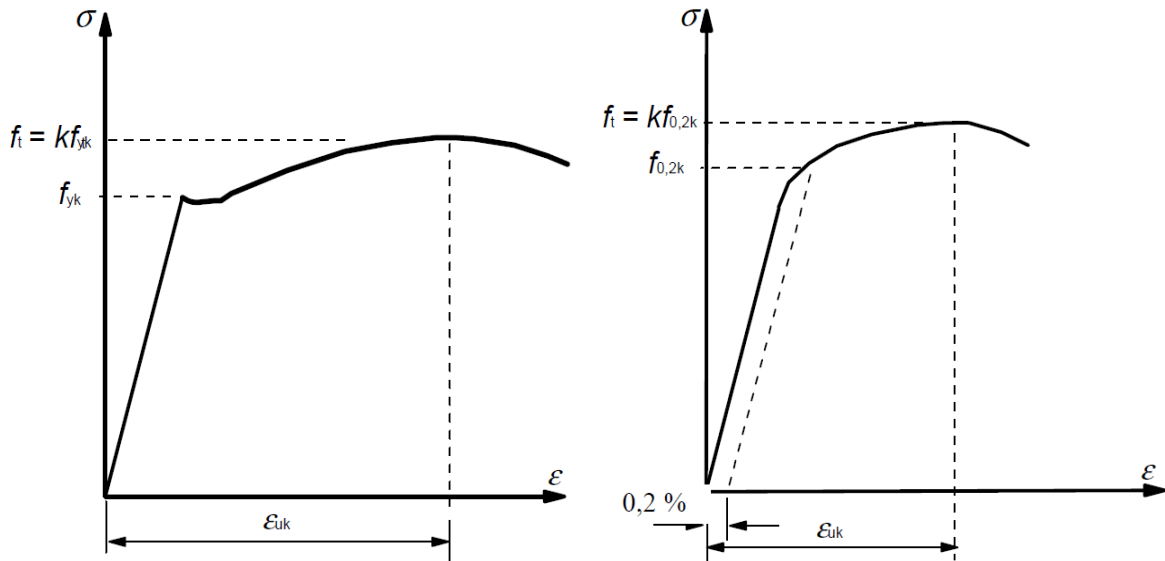


Figura 21 - Curvas tensões-extensões para o aço laminado a quentes (gráfico esquerdo) e aço endurecido a frio (gráfico direito) [2]

### b. HIPÓTESES DE CÁLCULO

No seguinte quadro, são visualizados os valores de cálculo das tensões e extensões de acordo com as situações de projecto em cada estado, sendo estes determinados com base nos valores característicos.

Quadro 11 - Valores de cálculo das tensões de acordo com a situação de projecto

Classe	$f_{yk}$ (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)		$\epsilon_{yd} \times 10^{-3}$		$E_s$ (GPa)
		E.L.Utilização	E.L.Últimos	E.L.Utilização	E.L.Últimos	
A400	400	400	348	2,00	1,75	200
A500	500	500	435	2,50	2,175	

Em que:

$f_{yk}$  – Valor característico da tensão de cedência do aço (MPa)

$f_{yd}$  – Valor de cálculo da tensão de cedência do aço (MPa)

$\epsilon_{yd}$  – Extensão de cálculo do aço associada à tensão de cedência  $f_{yd}$

$E_s$  – Módulo de elasticidade do aço (GPa)

Com os valores do quadro anterior, o *Eurocódigo 2* admite qualquer uma das hipóteses para o cálculo tensão-deformação conforme a configuração da figura seguinte.

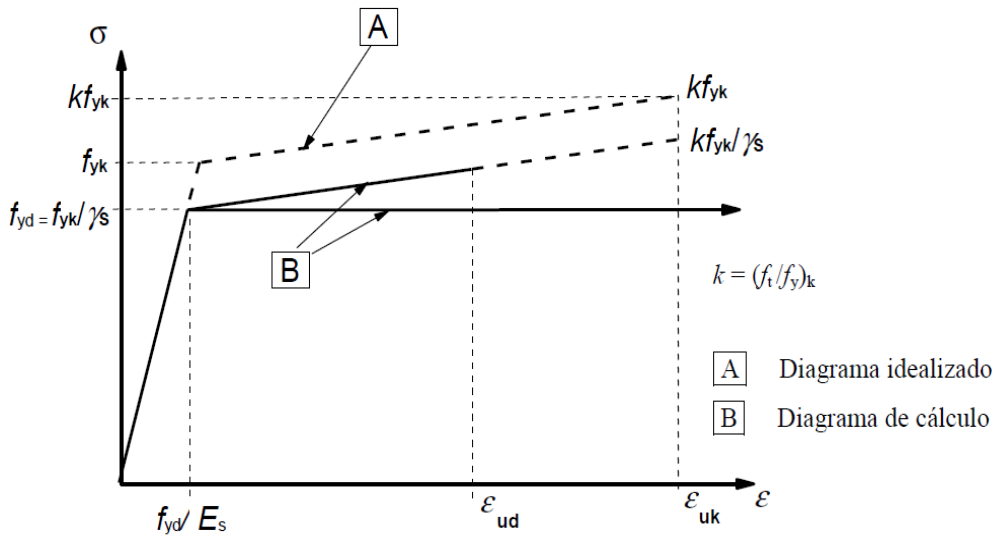


Figura 22 - Diagrama tensões-extensões idealizado e de cálculo [2]

## VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO SEGUNDO O *EUROCÓDIGO 2*

Os estados limites de utilização têm um factor condicionante no dimensionamento das estruturas de betão armado.

A verificação de segurança para qualquer estado limite requer a definição de:

- Acções e combinações apropriadas e os métodos de análise estrutural, de modo que os efeitos das acções (esforços, tensões, deformações) possam ser calculados;
- Propriedades dos materiais a serem consideradas na verificação;
- Critérios que definam os limites de comportamento adequado;
- Métodos de cálculo e de verificação dos parâmetros de controlo.

O estado limite de utilização, tem como finalidade garantir um bom desempenho comportamental da estrutura em situações de serviço, levando a ter em consideração os seguintes aspectos mencionados no *Eurocódigo 2*, sendo eles:

- Limitar o nível de tensões máximas no betão e aço;
- Controlar as aberturas de fendas;
- Limitar a deformação a valores aceitáveis de forma a não provocar danos estruturais e desconforto dos utilizadores;
- Garantir um adequado comportamento dinâmico.

### 3.1 LIMITAÇÃO DE TENSÕES

As tensões excessivas no betão ou na armadura são originadas em certos casos pelos estados limites últimos, afectando o aspecto, desempenho e durabilidade das estruturas.

Assim, é necessário verificar as seguintes limitações de tensões, sendo:

- Tensões de tracção no betão;
- Tensões de compressão no betão;
- Tensões de tracção na armadura.

#### 3.1.1 Limites para as tensões de tracção no betão

A limitação de tensão de tracção é uma medida adequada para minimizar o risco de fendilhação, o que para uma determinada secção de um elemento, as tensões na fibra mais traccionada, não devem transpor a resistência característica do betão à tracção.<sup>[5]</sup>

É necessário ter em conta que a limitação de tensões de tracção no betão em condições de serviço, devem ser iguais ou inferiores a  $f_{ctm}$ , ou seja

$$\sigma_{ct} \leq f_{ctm} \quad (3.1)$$

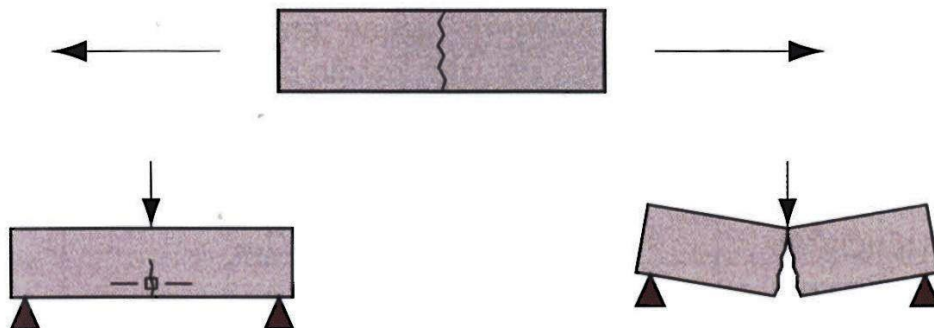


Figura 23 - Elementos sujeitos a tensões de tracção superiores à tensão resistente do betão à tracção  $\sigma_c > f_{ctm}$  originando fendas [4]

### 3.1.2 Limites para as tensões de compressão no betão

A tensão de compressão no betão deve ser limitada, de modo a evitar a formação de fendas, de tal modo que possam causar efeitos inaceitáveis para o funcionamento da estrutura nos elementos de betão armado.

- Para a combinação de acções características, podem formar-se fendas longitudinais quando o nível das tensões no betão for superior a  $0,6f_{ck}$ , isto é  $\sigma_c \geq 0,6f_{ck}$ ;
- Para a combinação de acções quase-permanente, a fluência pode-se considerar linear, quando a tensão no betão for inferior a  $0,45f_{ck}$ , isto é  $\sigma_c \leq 0,45f_{ck}$ .



Figura 24 - Fenda originada devido a excesso de tensão à compressão [4]

### 3.1.3 Limites para as tensões de tracção na armadura

Relativamente às armaduras ordinárias, as tensões de tracção devem ser limitadas a  $0,8f_{ck}$ , ou seja,  $\sigma_s \leq 0,8f_{syk}$  a fim de evitar as deformações não elásticas em serviço, assim como níveis de fendilhação ou de deformação inaceitáveis. Nos casos em que a tensão é devido a uma deformação imposta a tensão de tracção não deve exceder  $f_{syk}$ , isto é  $\sigma_s \leq f_{syk}$ . Apresenta-se no seguinte quadro um resumo das disposições regulamentares referidas anteriormente.

Quadro 12 - Limites para as tensões no betão e no aço

Material	Descrição	Limites	Combinação
Betão	Compressão máxima para betão nas classes de exposição XD, XF e XS	$\sigma_c \leq 0,6f_{ck}$	Característica
	Limitação da Fluência	$\sigma_c \leq 0,45f_{ck}$	Quase - Permanente
Aço	Deformações não elásticas	$\sigma_s \leq 0,8f_{ck}$	Característica
	Deformação imposta	$\sigma_s \leq f_{ck}$	

### 3.2 CÁLCULO DAS TENSÕES

O cálculo das tensões em secções de betão armado em condições de serviço é baseado nas seguintes conjecturas:

- As secções mantêm-se planas;
- Os materiais possuem um comportamento linear elástico mesmo o betão à tracção até este atingir sua tensão de rotura  $f_{ctm}$ ;
- A extensão de tracção ou compressão da armadura aderente, é idêntica à do betão envolvente;
- Admite-se que a secção não se encontra fendilhada caso  $\sigma_{ctm} \leq f_{ctm}$ , e fendilhada para caso  $\sigma_{ctm} > f_{ctm}$ , desprezando a zona de betão traccionado para resistência.
- Sendo as características mecânicas do aço e do betão diferentes, por simplificação considera-se para o cálculo das tensões em secções de betão armado, secções homogeneizadas.

Para ter a perceptibilidade do comportamento das tensões num elemento de betão armado, é apresentado na seguinte figura um elemento sujeito à flexão, indicando a distribuição de tensões no betão e na armadura.

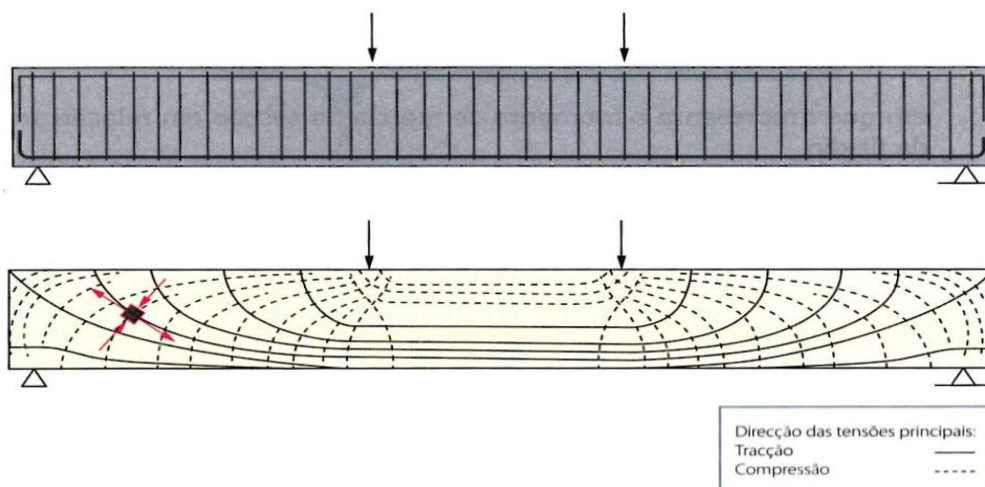


Figura 25 - Comportamento das tensões num elemento de betão armado sujeito à flexão [4]

A homogeneização é considerada a relação entre os módulos de elasticidade do aço e betão, apresentando pela seguinte expressão:

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.2)$$

Este valor do coeficiente de homogeneização  $\alpha_E$ , pode variar substancialmente, atendendo à natureza das acções, a sua duração bem como a fluência em causa. Poderá considerar-se os seguintes valores:

- $\alpha_E = 6$  a  $\alpha_E = 7$  → acções de curta duração;
- $\alpha_E = 12$  a  $\alpha_E = 22$  → acções de longa duração utilizando o módulo de elasticidade efectiva.

**Nota:** Como simplificação pode-se tomar o coeficiente de homogeneização de  $\alpha_E = 15$  e até inferior, para as acções de longa duração, caso se menos de 50% das tensões instaladas forem devidas às acções quase permanentes.<sup>[5]</sup>

Na figura seguinte demonstra a evolução do módulo de elasticidade efectivo ao longo do tempo aplicando a carga a um determinado instante,  $t_0$ .

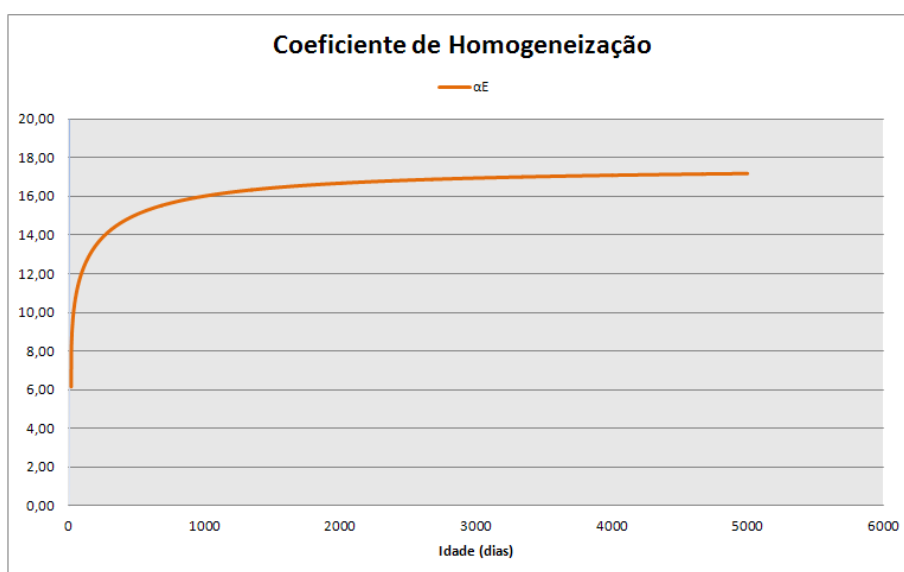


Figura 26 - Evolução do coeficiente de homogeneização ao longo do tempo, aplicando uma carga ao instante  $t_0 = 21$  dias com um betão de classe C30/37

As expressões que determinam as tensões no betão e no aço, aplicadas para as secções em estado fendilhado e não fendilhado provenientes da resistência dos materiais, são as seguintes:

- Tensão no betão

$$\sigma_c = \pm \frac{N}{A_{hom}} \pm \frac{M}{I} y \quad (3.3)$$

- Tensão na armadura

$$\sigma_s = \alpha_E \sigma_c \quad (3.4)$$

Em que:

$N$  – Esforço axial (kN), considerando as tracções positivas e negativas as compressões

$A_{hom}$  – Área homogeneizada da secção (m<sup>2</sup>)

$M$  – Momento flector (kN.m)

$I$  – Inércia da secção (m<sup>4</sup>)

$y$  – Distância da fibra em causa ao centro de gravidade da secção (m)

### 3.2.1 Cálculo das tensões em Estado não Fendilhado (Estado I)

Para proceder ao cálculo das tensões nas secções de betão armado em estado não fendilhado, ou seja quando  $\sigma_{ctm} \leq f_{ctm}$ , serão mencionados as expressões conforme o modelo de cálculo e tipo de secção a considerar.

#### 3.2.1.1 Secção Rectangular

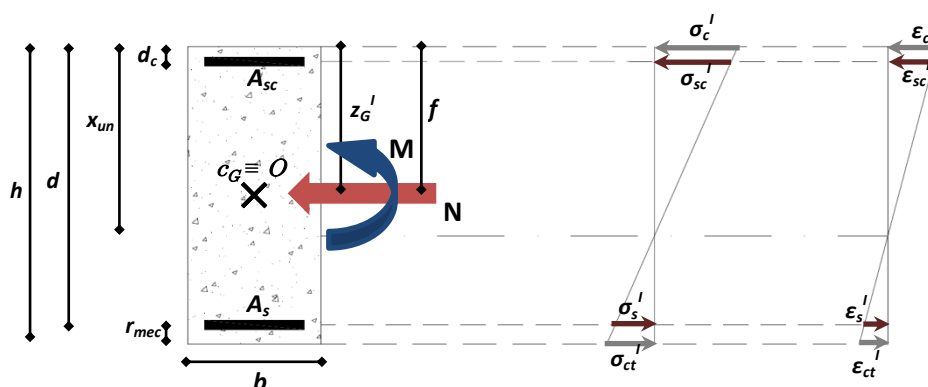


Figura 27 - Modelo de cálculo em secção rectangular em estado não fendilhado

Em que:

$h$  – Altura da secção (m)

$b$  – Largura da secção (m)

$d$  – Altura útil da secção (m)

$x_{un}$  – Profundidade do eixo neutro não fendilhado (m)

$d_c$  – Recobrimento comprimido (m)

$r_{mec}$  – Recobrimento mecânico até ao centro de gravidade da armadura (m)

$f$  – Profundidade do ponto da aplicação do esforço axial N (quando existe) (m)

$Z_G^I$  – Profundidade do centro de gravidade da secção não fendilhada (m)

$O$  – Ponto de referência das equações

$A_s$  – Armadura de tracção (cm<sup>2</sup>)

$A_{sc}$  – Armadura de compressão (cm<sup>2</sup>)

**Nota:** Em estado não fendilhado (Estado I) e na presença de flexão composta, a posição do centro de gravidade  $C_G$  é coincidente com ponto de referência das equações  $O$  bem como aplicação do esforço axial  $N$ .

A posição do eixo neutro em estado não fendilhado  $x_{un}$ , tem a seguinte expressão:

$$x_{un} = \frac{0,5bh^2 + (\alpha_E - 1)(A_s d + A_s d_c)}{A_{un}} \quad (3.5)$$

O cálculo da área homogeneizada não fendilhada,  $A_{un}$  tem a seguinte expressão:

$$A_{un} = bh + (\alpha_E - 1)(A_s + A_{sc}) \quad (3.6)$$

O cálculo da inércia em estado não fendilhado  $I_{un}$ , tem a seguinte expressão:

$$I_{un} = \frac{1}{3}bx_{un}^3 + \frac{1}{3}b(h - x_{un})^3 + (\alpha_E - 1)(x_{un} - d_c)^2 A_{sc} + (d - x_{un})^2 A_s (\alpha_E - 1) \quad (3.7)$$

No seguinte quadro estão mencionadas as expressões para o cálculo das tensões e extensões no betão e na armadura, para o estado não fendilhado.

Quadro 13 – Expressões para o cálculo das tensões e extensões no betão e na armadura para o estado não fendilhado

	Tensões	Extensões
Betão	$\sigma_c^I = \frac{N}{A_{un}} - \frac{M}{I_{un}} x_{un}$ $\sigma_{ct}^I = \frac{N}{A_{un}} + \frac{M}{I_{un}} (h - x_{un})$	$\varepsilon_c^I = \frac{\sigma_c^I}{E_{c,eff}}$ $\varepsilon_{ct}^I = \frac{\sigma_{ct}^I}{E_{c,eff}}$
Armadura	$\sigma_s^I = \alpha_E \frac{N}{A_{un}} + \alpha_E \frac{M}{I_{un}} (d - x_{un})$ $\sigma_{sc}^I = \alpha_E \frac{N}{A_{un}} - \alpha_E \frac{M}{I_{un}} (x_{un} - d_c)$	$\varepsilon_s^I = \frac{\sigma_s^I}{E_s}$ $\varepsilon_{sc}^I = \frac{\sigma_{sc}^I}{E_s}$

**Nota:** As siglas elevadas a (...<sup>I</sup>) são referentes às tensões e extensões no betão e na armadura em estado não fendilhado.

### 3.2.1.2 Secção em T

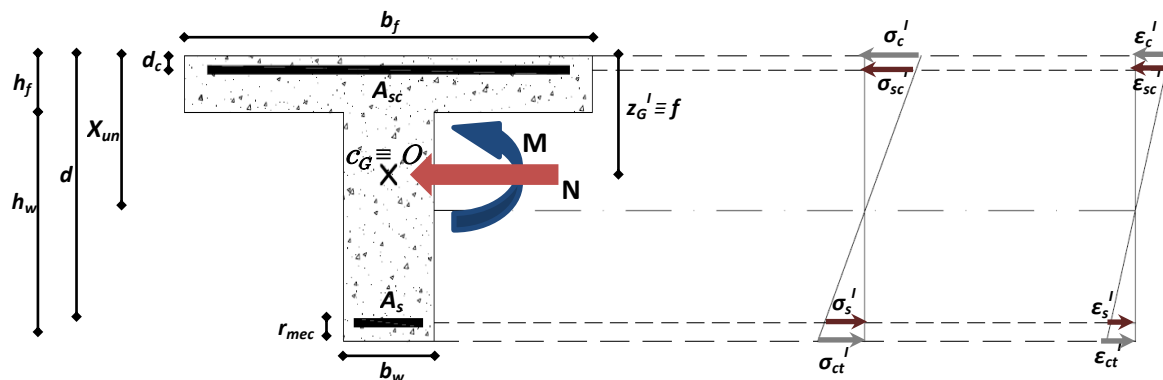


Figura 28 - Modelo de cálculo em secção em T em estado não fendilhado

Em que:

$h_f$  – Altura do banzo (m)

$h_w$  – Altura da alma (m)

$b_f$  – Largura do banzo (m)

$b_w$  – Largura da alma (m)

$d$  – Altura útil da secção (m)

$x_{un}$  – Profundidade do eixo neutro não fendilhado (m)

$d_c$  – Recobrimento comprimido (m)

$Z_G^I$  – Profundidade do centro de gravidade da secção não fendilhada (m)

$r_{mec}$  – Recobrimento mecânico até ao centro de gravidade da armadura (m)

$f$  – Profundidade do ponto da aplicação do esforço axial N (m)

$O$  – Ponto de referência das equações

$A_s$  – Armadura de tracção (cm<sup>2</sup>)

$A_{sc}$  – Armadura de compressão (cm<sup>2</sup>)

A posição do eixo neutro em estado não fendilhado  $x_{un}$ , tem a seguinte expressão:

$$x_{un} = \frac{0,5h^2b_f + (b_w h_w) \left( h_f + \frac{h_w}{2} \right) + (\alpha_E - 1)(A_s d + A_{sc} d_c)}{A_{un}} \quad (3.8)$$

O cálculo da área homogeneizada  $A_{hom}$ , tem a seguinte expressão:

$$A_{un} = (b_w h_w) + (b_f h_f) + (\alpha_E - 1)(A_s + A_{sc}) \quad (3.9)$$

O cálculo da inércia em estado não fendilhado  $I_{un}$ , tem a seguinte expressão:

$$I_{un} = \frac{b_f h_f^3}{12} + h_f b_f \left( x_{un} - \frac{h_f}{2} \right)^2 + \frac{b_w h_w^3}{12} + b_w h_w \left( h_f + \frac{h_w}{2} - x_{un} \right)^2 + [A_s (d - x_{un})^2 + A_{sc} (x_{un} - d_c)^2] (\alpha_E - 1) \quad (3.10)$$

Para o cálculo das tensões e extensões no betão e na armadura, utilizam-se as expressões mencionadas no quadro 13, substituindo a altura total da secção  $h = h_w + h_f$ .

De acordo com as expressões anteriormente mencionadas, é possível realizar o cálculo do valor máximo resistente a ser aplicado à secção antes de fendilhar, nos seguintes casos:

- Existência de apenas esforço axial de tracção, o esforço axial de fendilhação, denominado pela sigla  $N_{cr}$ , tem com a seguinte expressão:

$$N_{cr} = f_{ctm} A_{un} \quad (3.11)$$

- Caso contrário, quando exista também a presença de momento flector, o momento de fendilhação, denominado pela sigla  $M_{cr}$ , tem a seguinte expressão:

$$M_{cr} = \left( f_{ctm} - \frac{N}{A_{un}} \right) \frac{I_{un}}{(h - x_{un})} \quad (3.12)$$

### 3.2.2 Cálculo das tensões em Estado Fendilhado (Estado II)

O procedimento para realização do cálculo das tensões (referente à combinação característica de acções) nas secções de betão armado em estado fendilhado (estado II), quando  $\sigma_{ct} > f_{ctm}$ , irão ser mencionados as expressões necessárias conforme o modelo de cálculo e tipo de secção a considerar.

É necessário salientar que no **estado fendilhado** (Estado II):

- Na presença de flexão composta, o ponto de aplicação do esforço axial  $N$ , continua a coincidir na posição do centro de gravidade  $C_G$ , tal como em estado não fendilhado;
- Irá existir um novo centro de gravidade  $C_G'$ , que será coincidente com um novo ponto de referência das equações  $O$ , simplificando as equações;
- O ponto de referência das equações  $O$  deixa de coincidir com o ponto de aplicação do esforço axial  $N$ , que irá provocar um momento transformado  $M_s$ , diferente do momento flector actuante  $M$ .

Encontra-se na figura seguinte as equivalências dos esforços (para flexão composta) à secção de forma a proporcionar um momento transformado  $M_s$ , no centro de gravidade das armaduras traccionadas.

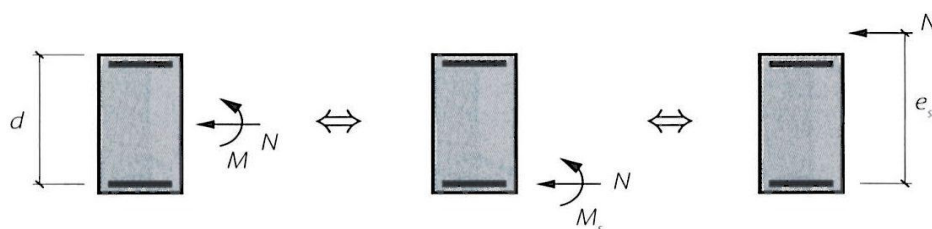


Figura 29 - Representação do momento de transformado

Em que:

$e_s$  – Excentricidade resultante quando o ponto de aplicação do esforço axial  $N$ , não coincide com  $O$ .

### 3.2.2.1 Secção Rectangular

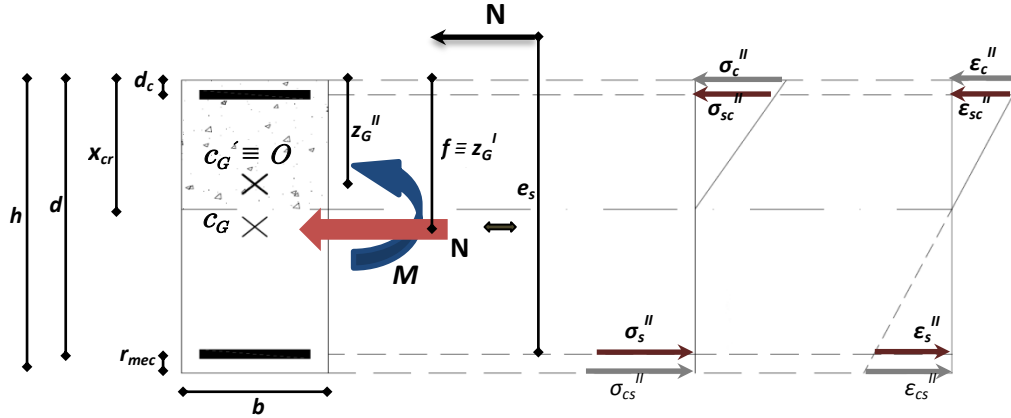


Figura 30 - Modelo de cálculo de secção rectangular em estado fendilhado

As expressões que traduzem a posição do eixo neutro em estado fendilhado  $x_{cr}$ , com o tipo de solitação de esforços a que o elemento está sujeito são as seguintes:

#### a) Flexão Simples

$$x_{cr} = \frac{-[A_s \alpha_E + A_{sc}(\alpha_E - 1)] + \sqrt{[A_s \alpha_E + A_{sc}(\alpha_E - 1)]^2 + 2b [A_s d \alpha_E + A_{sc} d_c (\alpha_E - 1)]}}{b} \quad (3.13)$$

#### b) Flexão Composta

Neste caso a resolução irá ser um pouco mais complicada, implicando a resolução de uma equação do terceiro grau.

$$a\zeta^3 + b\zeta^2 + c\zeta + d = 0 \quad (3.14)$$

Em que:

$\zeta$  - Profundidade relativa do eixo neutro, tem como expressão:

$$\zeta = \frac{x_{cr}}{d} \quad (3.15)$$

E que:

$$a = 1 \quad (3.16)$$

$$b = -3 \left(1 - \frac{e_s}{d}\right) \quad (3.17)$$

$$c = 6 \left[ (\alpha_E - 1) \left( \frac{d_c}{d} + \frac{e_s}{d} - 1 \right) \rho_c + \frac{e_s}{d} \alpha_E \rho \right] \quad (3.18)$$

$$d = -6 \left[ (\alpha_E - 1) \left( \frac{d_c}{d} + \frac{e_s}{d} - 1 \right) \frac{d_c}{d} \rho_c + \frac{e_s}{d} \alpha_E \rho \right] \quad (3.19)$$

A quantidade de armadura de tracção  $\rho$  e compressão  $\rho_c$ , têm as seguintes expressões:

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad \rho_c = \frac{A_{sc}}{bd} \quad (3.20) \text{ e } (3.21)$$

De acordo com as convenções indicadas na figura 21, o momento de transformação  $M_s$ , tem como equações:

$$e = (d - z_G^I) \quad (3.22)$$

$$M_s = M + Ne \quad (3.23)$$

⇓

$$M_s = Ne_s \quad (3.24)$$

Em ordem à excentricidade  $e_s$ , ficará:

$$e_s = \frac{M}{N} + e \quad (3.25)$$

**Nota:** Considera-se a excentricidade  $e_s$ :

- Positiva (+) e situada abaixo da armadura de tracção  $A_s$ , quando  $\mathbf{N}$  for de tracção
- Negativa (-) e situada acima da armadura de tracção  $A_s$ , quando  $\mathbf{N}$  for de compressão

A equação que traduz centro de gravidade em estado fendilhado  $z_G^{II}$ , tem como seguinte expressão:

$$z_G^{II} = \frac{b \frac{x_{cr}^2}{2} + \alpha_E d A_s + (\alpha_E - 1) d_c A_{sc}}{A_{cr}} \quad (3.26)$$

O cálculo da área homogeneizada em estado fendilhado  $A_{cr}$ , tem a seguinte expressão:

$$A_{cr} = bx_{cr} + \alpha_E A_s + (\alpha_E - 1) A_{sc} \quad (3.27)$$

O cálculo da inércia em estado fendilhado  $I_{cr}$ , tem a seguinte expressão:

$$I_{cr} = \frac{1}{3} bx_{cr}^3 + (\alpha_E - 1)(x_{cr} - d_c)^2 A_{sc} + \alpha_E (d - x_{cr})^2 A_s \quad (3.28)$$

No seguinte quadro, apresentam-se as expressões para o cálculo das tensões e extensões no betão e na armadura, conforme o tipo de solicitação para o estado fendilhado.

Quadro 14 - Expressões para o cálculo das tensões e extensões no betão e na armadura para o estado fendilhado

	Tensões		Extensões
	Flexão Simples	Flexão Composta	
Betão	$\sigma_c^{II} = -\frac{M}{I_{cr}} x_{cr}$ $\sigma_{ct}^{II} = \frac{M}{I_{cr}} (h - x_{cr})$	$\sigma_c^{II} = -C_c \frac{M_s}{bd^2}$ $\sigma_{ct}^{II} = 0$	$\varepsilon_c^{II} = \frac{\sigma_c^{II}}{E_{c,eff}}$ $\varepsilon_{ct}^{II} = \frac{\sigma_{ct}^{II}}{E_{c,eff}}$
Armadura	$\sigma_s^{II} = \alpha_E \frac{M}{I_{cr}} (d - x_{cr})$ $\sigma_{sc}^{II} = -\alpha_E \frac{M}{I_{cr}} (x_{cr} - d_c)$	$\sigma_s^{II} = C_s \frac{M_s}{bd^2}$ $\sigma_{sc}^{II} = -C_{sc} \frac{M_s}{bd^2}$	$\varepsilon_s^{II} = \frac{\sigma_s^{II}}{E_s}$ $\varepsilon_{sc}^{II} = \frac{\sigma_{sc}^{II}}{E_s}$

De acordo com as expressões referentes à flexão composta, é de salientar:

- Como a peça já se encontra fissurada, despreza-se o valor da tensão no betão à tracção  $\sigma_{ct}^{II} = 0$ .
- De modo a obter as tensões no betão e armadura, os coeficientes  $C_c, C_{sc}$  e  $C_s$  têm as seguintes expressões:

$$C_c = \frac{-\zeta}{\frac{\zeta^2}{2} \left(1 - \frac{\zeta}{3}\right) + \rho_c (\alpha_E - 1) \left(1 - \frac{d_c}{d}\right) \left(\zeta - \frac{d_c}{d}\right)} \quad (3.29)$$

$$C_{sc} = \alpha_E \frac{\left(\zeta - \frac{d_c}{d}\right)}{\zeta} C_c \quad (3.30)$$

$$C_s = \alpha_E \frac{\zeta - 1}{\zeta} C_c \quad (3.31)$$

**Nota:** A profundidade relativa do eixo neutro denominado pela sigla  $\zeta$ , está mencionado na expressão 3.15.

### 3.2.2.2 Secção em T

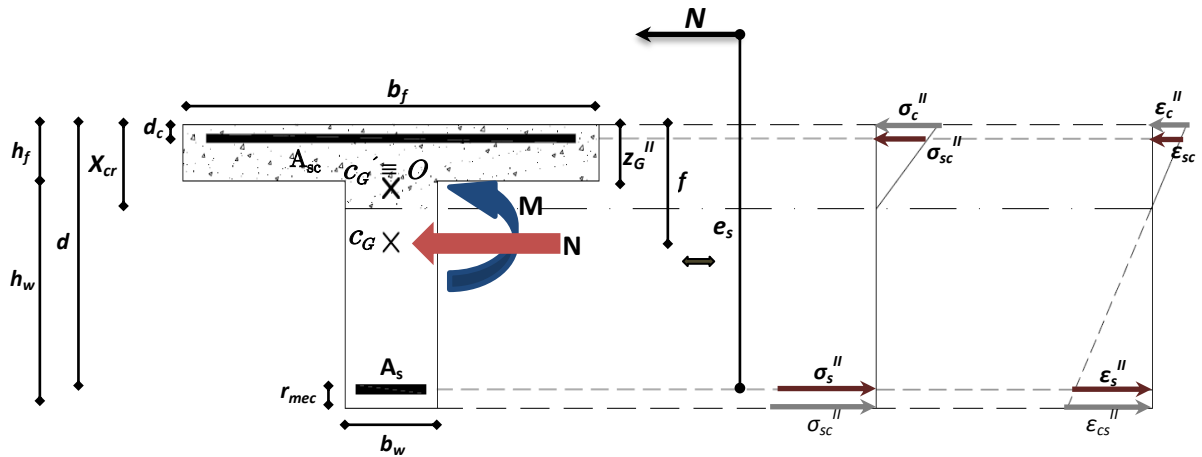


Figura 31 - Modelo de cálculo de secção em T em estado fendilhado

A posição do eixo neutro em estado fendilhado  $x_{cr}$ , atendendo ao tipo de secção e de solitação a que o elemento está sujeito, poderá se situar no banzo ou na alma. Assim sendo, as expressões que traduzem a posição do eixo neutro  $x_{cr}$  para cada tipo de situação são as seguintes:

#### a) Flexão Simples

##### i. Para $x_{cr} < h_f$

$$x_{cr} = \frac{- \left[ A_s \alpha_E + A_{sc} (\alpha_E - 1) \right] + \sqrt{\left[ \left( A_s \alpha_E + A_{sc} (\alpha_E - 1) \right)^2 + 2 \alpha_E \left( b_f d + A_{sc} (\alpha_E - 1) \right) A_s + 2 \left( b_f d_c + \frac{1}{2} A_{sc} (\alpha_E - 1) \right) A_{sc} (\alpha_E - 1) \right]}}{b_f} \quad (3.32)$$

##### ii. Para $x_{cr} \geq h_f$

$$x_{cr} = \frac{- \left[ h_f (b_f - b_w) + A_s \alpha_E + A_{sc} (\alpha_E - 1) \right] + \sqrt{\left[ \left( h_f (b_f - b_w) + A_s \alpha_E + A_{sc} (\alpha_E - 1) \right)^2 - 4 \frac{b_w}{2} \left( -\frac{1}{2} h_f^2 (b_f - b_w) - \alpha_E A_{sd} + (\alpha_E - 1) A_{sc} d_c \right) \right]}}{b_w} \quad (3.33)$$

**b) Flexão Composta**

Tal como na secção rectangular, a determinação do eixo neutro fendilhado para a secção em T, será idêntica e irá implicar a resolução de uma equação do terceiro grau.

$$ax_{cr}^3 + bx_{cr}^2 + cx_{cr} + d = 0 \quad (3.34)$$

**i.** Para  $x_{cr} < h_f$

$$a = b_f \quad (3.35)$$

$$b = -[3[b_f(d + e_s)]] \quad (3.36)$$

$$c = -6[e_s(\alpha_E A_s + A_{sc}(\alpha_E - 1)) - (d_c - d)A_{sc}(\alpha_E - 1)] \quad (3.37)$$

$$d = 6[e_s(\alpha_E A_s d + (\alpha_E - 1)A_{sc}d_c) - d_c(d_c - d)A_{sc}(\alpha_E - 1)] \quad (3.38)$$

**ii.** Para  $x_{cr} \geq h_f$

$$a = 1 \quad (3.39)$$

$$b = -3(d + e_s) \quad (3.40)$$

$$c = -\frac{6}{b_w} \left[ h_f(b - b_w) \left( d + e_s - \frac{1}{2}h_f \right) + A_{sc}(\alpha_E - 1)(d + e_s - d_c) + \alpha_E A_s e_s \right] \quad (3.41)$$

$$d = \frac{6}{b_w} \left[ \frac{1}{2}h_f^2(b - b_w) \left( d + e_s - \frac{2}{3}h_f \right) + A_{sc}d_c(\alpha_E - 1)(d + e_s - d_c) + \alpha_E A_s e_s \right] \quad (3.42)$$

As equações que traduzem o centro de gravidade  $z_G^II$ , conforme a posição do eixo neutro são as seguintes:

**i.** Para  $x_{cr} < h_f$

$$z_G^II = \frac{b_f \frac{x_{cr}^2}{2} + d_c(\alpha_E - 1)A_{sc} + \alpha_E dA_s}{A_{cr}} \quad (3.43)$$

**ii.** Para  $x_{cr} \geq h_f$

$$z_G^II = \frac{\frac{h_f}{2} [h_f(b_f - b_w)] + \frac{x_{cr}}{2} (b_w x_{cr}) + d_c(\alpha_E - 1)A_{sc} + \alpha_E dA_s}{A_{cr}} \quad (3.44)$$

As equações que traduzem o cálculo da área homogeneizada em estado fendilhado  $A_{cr}$  conforme a posição do eixo neutro, são as seguintes:

i. Para  $x_{cr} < h_f$

$$A_{cr} = b_f x_{cr} + (\alpha_E - 1)A_{sc} + \alpha_E A_s \quad (3.45)$$

ii. Para  $x_{cr} \geq h_f$

$$A_{cr} = h_f(b_f - b_w) + b_w x_{cr} + (\alpha_E - 1)A_{sc} + \alpha_E A_s \quad (3.46)$$

O cálculo da inércia em estado fendilhado  $I_{cr}$ , conforme a posição do eixo neutro têm as seguintes expressões:

i. Para  $x_{cr} < h_f$

$$I_{cr} = \frac{b_f x_{cr}^3}{12} + b_f x_{cr} \left( z_G^{II} - \frac{x_{cr}}{2} \right)^2 + (\alpha_E - 1)(z_G^{II} - d_c)^2 A_{sc} + \alpha_E (d - z_G^{II})^2 A_s \quad (3.47)$$

ii. Para  $x_{cr} \geq h_f$

$$I_{cr} = \frac{(b_f - b_w)x_{cr}^3}{12} + (b_f - b_w)h_f \left( z_G^{II} - \frac{h_f}{2} \right)^2 + \frac{b_w x_{cr}^3}{12} + b_w x_{cr} \left( z_G^{II} - \frac{x_{cr}}{2} \right)^2 + (\alpha_E - 1)(z_G^{II} - d_c)^2 A_{sc} + \alpha_E (d - z_G^{II})^2 A_s \quad (3.48)$$

O cálculo das tensões no betão e na armadura, são utilizadas as seguintes expressões:

$$\sigma_c^{II} = \frac{M}{I_{cr}} x_{cr} \quad (3.49)$$

$$\sigma_{ct}^{II} = \frac{M}{I_{cr}} (h_w + h_f - x_{cr}) \quad (3.50)$$

$$\sigma_s^{II} = \alpha_E \frac{M}{I_{cr}} (d - x_{cr}) \quad (3.51)$$

$$\sigma_{sc}^{II} = \alpha_E \frac{M}{I_{cr}} (x_{cr} - d_c) \quad (3.52)$$

**Nota:** Para o cálculo das extensões no betão e na armadura são usadas as expressões mencionadas no quadro 14.

### 3.3 ESTADO LIMITE DE FENDILHAÇÃO

A fendilhação está praticamente presente nas estruturas de betão armado, mesmo que esta não seja perceptível, ocorre sempre quando as tensões de tracção do betão ultrapassarem a sua resistência máxima de tracção.

Contudo a fendilhação pode ser provocada por várias causas, salientando algumas delas:

- **Ações directas** – resultam de esforços individuais sejam eles de tracção, flexão, esforço transversal, torção ou até mesmo pelas suas combinações.
- **Ações indirectas** – resultam de deformações impostas, devido a assentamentos diferenciais, retrações do betão e variações de temperatura

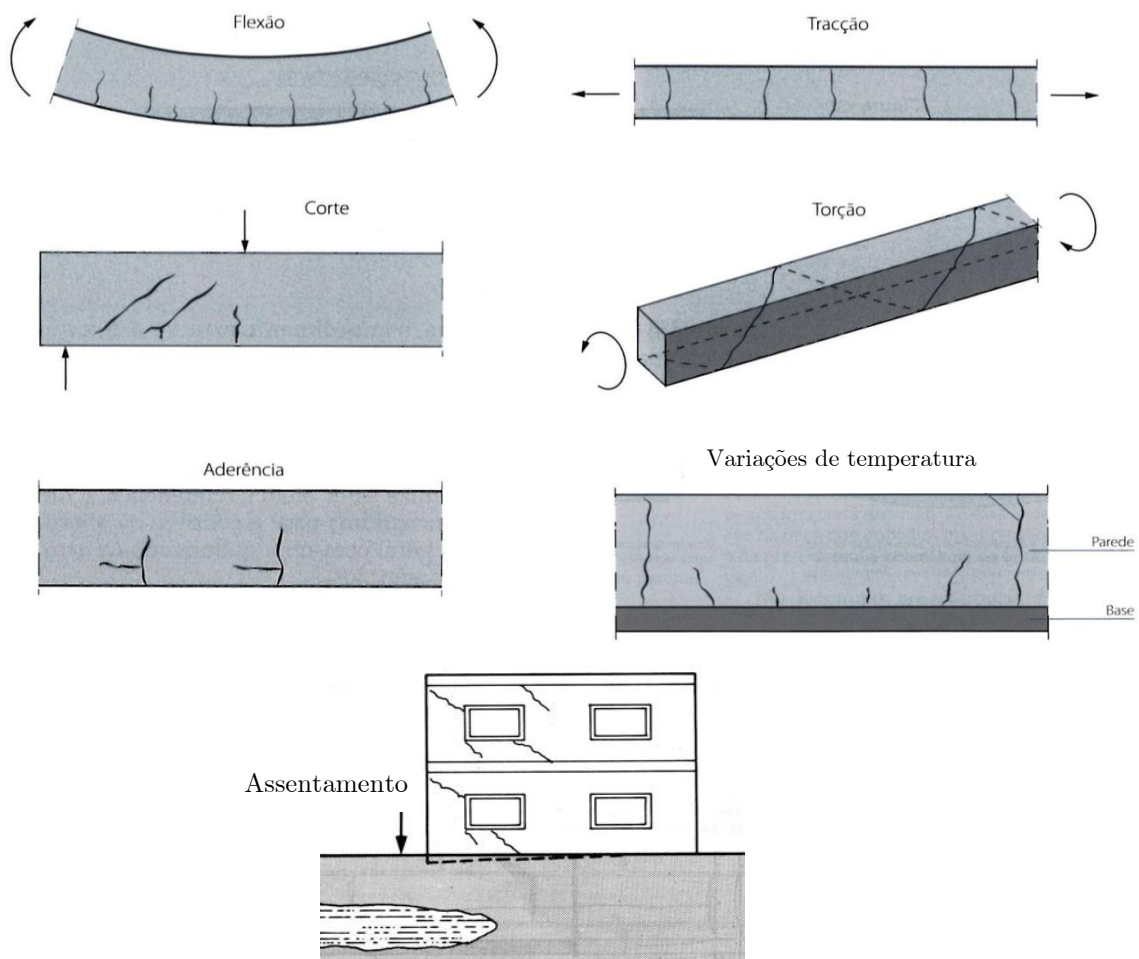


Figura 32 - Tipos de fendilhação [4] e [16]

### 3.3.1 Comportamento do Elemento

O comportamento do elemento de betão armado, traccionado até à rotura é constituído por três grandes fases distintas, sendo elas:

- Fase não fendilhada (Estado I) – estado em que a secção não se encontra fendilhada  $\sigma_{ctm} \leq f_{ctm}$ , admitindo aderência perfeita entre o aço e betão, obtendo-se uma extensão idêntica  $\varepsilon_s = \varepsilon_c$ .
- Fase fendilhada (Estado II) - estado em que a secção se encontra fendilhada, no qual se origina a primeira fenda, com uma extensão média da ordem de 0,1‰, quando o esforço seja axial  $N$  ou até de flexão  $M$  é superior ao seu valor crítico, ou seja,  $N > N_{cr}$  ou até  $M > M_{cr}$ , considerando sempre que o betão apenas resiste à compressão e o aço à tracção. Esta fase é dividida em 2 fases:
  - Fase de formação de fendas – fase em que o elemento perde progressivamente a sua rigidez à medida que novas fendas se vão formando.
  - Fase de fendilhação estabilizada – fase em que não há formação de novas fendas no elemento, no qual se obtém um comportamento quase linear com uma rigidez semelhante ao estado II.
- Fase de rotura (Estado de Rotura) – fase que o comportamento do elemento se torna não linear, ou seja, quando as armaduras atingem o seu limite de elasticidade e entram em regime plástico acabando por não suportar mais nenhuma acção.

**Nota:** Salienta-se que o comportamento real da secção, é determinado por interpolação entre os **Estado I** e **Estado II** para as acções de serviço.

Na figura seguinte encontra-se ilustrada as diversas fases de um elemento de betão armado solicitado a um esforço axial de tracção sucessivamente crescente.

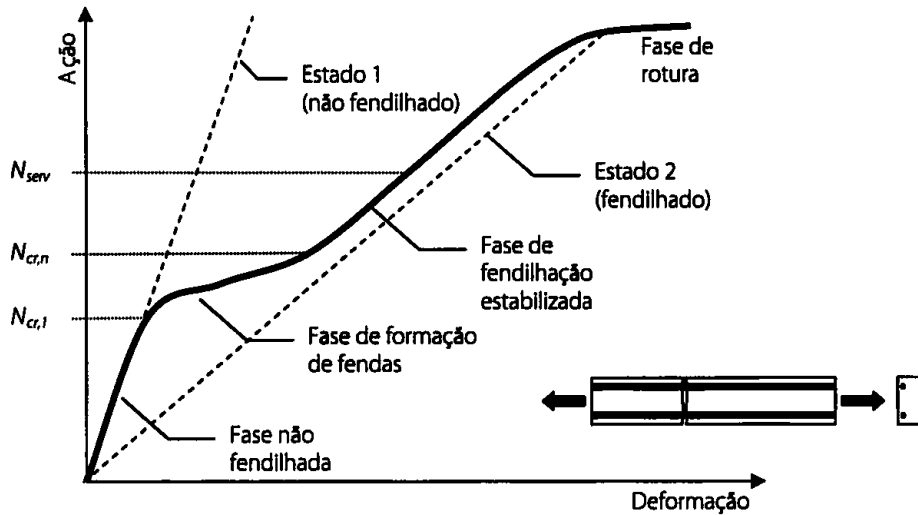


Figura 33 - Comportamento de um elemento traccionado e suas respectivas fases [3]

De acordo com a figura anterior e a partir da fase de formação de fendas, o comportamento do elemento varia quando é provocado por efeitos de cargas aplicadas ou até de deformação imposta (retracção e variações de temperatura), podendo ser visualizado nas figuras seguintes.

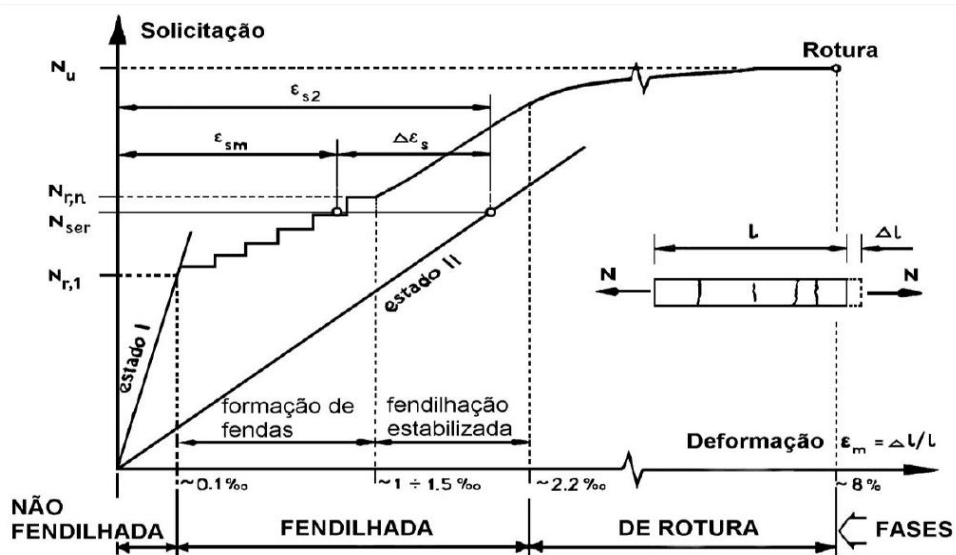


Figura 34 - Comportamento do elemento sujeito a cargas aplicadas [7]

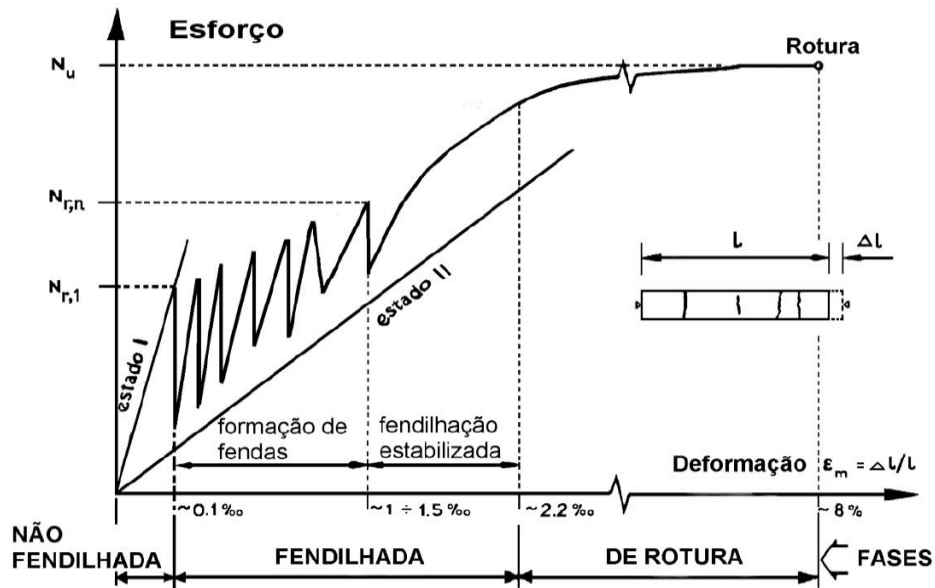


Figura 35 - Comportamento do elemento sujeito a deformação imposta (retração) [7]

Na secção do elemento onde o esforço solicitado é superior ao esforço de fendilhação,  $N_{cr}$  ou até  $M_{cr}$  originando:

- Alteração do seu estado de tensão - A força localizada nesse ponto passa a ser suportada pela armadura provocando uma diminuição de tensão no betão até ser nulo.
- Perda de aderência entre a armadura e betão - Em que para uma determinada distância em relação à fenda, denominada pela sigla  $s_0$ , as tensões voltarão ao valor do estado I.

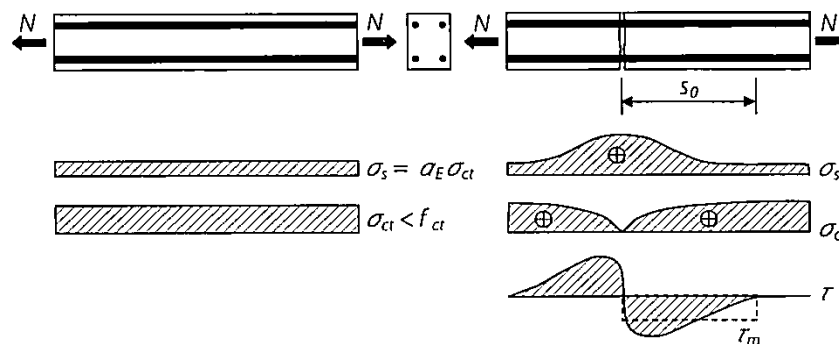


Figura 36 - Comportamento num elemento de betão armado sujeito à tracção no após ocorrências da primeira fenda [3]

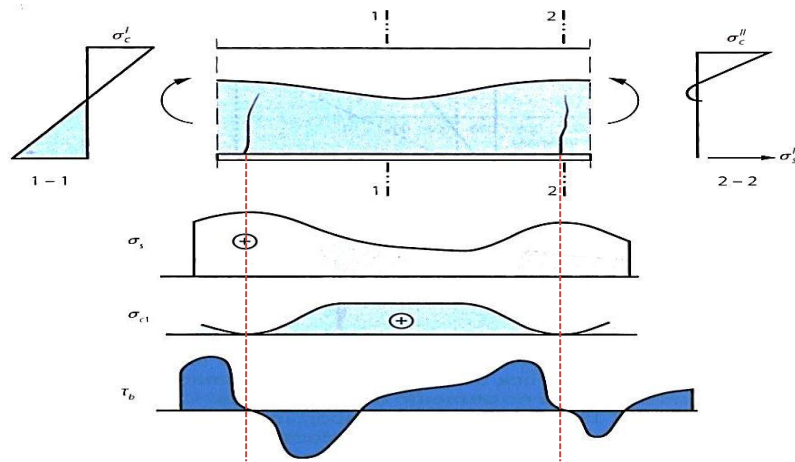


Figura 37 - Comportamento de um elemento de betão armado sujeito à flexão após ocorrência de fendas [4]

- Aumento de deformação no elemento – Devido à redistribuição de tensões no elemento (aumentos da tensão na armadura e diminuição de tensão no betão)

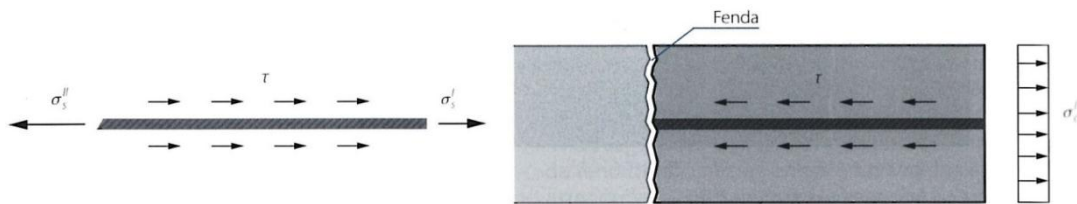


Figura 38 - Aumento da extensão de um tirante de betão armado [4]

- Redução de rigidez  $EI_{II} < EI_I$  – Devido ao decréscimo do valor da inércia da secção no estado fendilhado ser inferior ao estado não fendilhado.
- Abertura de fenda de valor  $w_k$

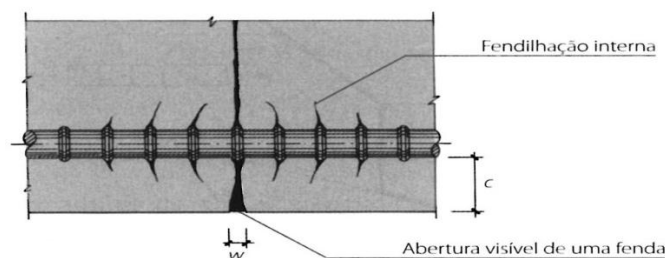


Figura 39 - Abertura de fenda num elemento de betão armado [4]

### 3.3.2 Armaduras Mínimas

De forma a satisfazer uma área de armadura mínima, seja qual o esforço solicitado, esta deve estar assegurada dentro dos limites considerados.

A armadura mínima estipulada pelo *Eurocódigo 2*, para os elementos sujeitos à tracção e flexão, quer devido a cargas aplicadas, quer devido às deformações impostas, tem como seguinte expressão:

$$A_{s,min} = k_c k_{f_{ct,eff}} \frac{A_{ct}}{\sigma_s^{II}} \quad (3.53)$$

Em que:

$A_{s,min}$  – Área mínima de armadura à tracção (m<sup>2</sup>)

$A_{ct}$  – Área da secção de betão à tracção, imediatamente antes da 1<sup>a</sup> fenda (m<sup>2</sup>)

$\sigma_s^{II}$  – Tensão máxima admissível na armadura em valor absoluto, imediatamente depois da formação da fenda (Estado II) (MPa).

**Nota:** A tensão poderá ser considerada igual à tensão de cedência da armadura  $\sigma_s^{II} = f_{syk}$ , ou até de valor inferior, de modo a satisfazer a largura máxima de fendas, em função do diâmetro máximo ou do espaçamento máximo entre varões. (MPa)

$f_{ct,eff}$  – Valor médio da resistência à tracção do betão na idade que se espera ocorrer as primeiras fendas (MPa).

**Nota:** Pode-se considerar  $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ , ou até inferior  $f_{ctm}(t)$ , quando se prevê uma fendilhação antes dos 28 dias.

$k_c$  – Coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões imediatamente antes da fendilhação e da variação do braço do binário, diferindo o seu valor consoante o tipo de esforço e secção, como se pode visualizar no seguinte quadro.

Quadro 15 - Valores e respectivas expressões de  $k_c$  atendendo o tipo de esforço e secção

Esforço	Tipo de Secção	$k_c$
Tracção Simples	Rectangular ou em T	1,0
Flexão Simples ou Flexão Composta	Rectangular e almas de secção em caixão e de secções em T	$k_c = \min \left[ 0,4 \left( 1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \frac{h}{h^*} f_{ct,eff}} \right); 1,0 \right]$
	Banzos de secções em caixão e de secções em T	$k_c = \max \left( 0,9 \frac{N_{rd}}{A_{ct} f_{ct,eff}}; 0,5 \right)$

Em que:

$\sigma_c$  – Tensão média do betão (MPa) existente na parte da secção considerada, que tem como expressão:

$$\sigma_c = \frac{N_{ed}}{bh} \quad (3.54)$$

$N_{ed}$  – Esforço normal (kN) no estado limite de utilização, para a combinação de acções apropriada, que actua na parte da secção considerada, considerando valor positivo para esforço à compressão.

$k_1$  – Coeficiente que considera os efeitos dos esforços normais na distribuição de tensões, tomando os seguintes valores:

$k_1 = 1,5$  → Se  $N_{ed}$  for um esforço de compressão

$k_1 = 2h^*/3h$  → Se  $N_{ed}$  for um esforço de tracção

$h^* = \min (h; 1,0)$

$N_{rd}$  – Valor absoluto da força de tracção no banzo imediatamente antes da fendilhação, de acordo com o momento de fendilhação  $M_{rd}$ , anteriormente calculado com  $f_{ct,eff}$

$k$  – Coeficiente que considera o efeito das tensões não uniformes auto-equilibradas (por exemplo devido à retracção ou variação da temperatura), resultando de uma redução de esforços de coacção, como está demonstrado na seguinte figura.

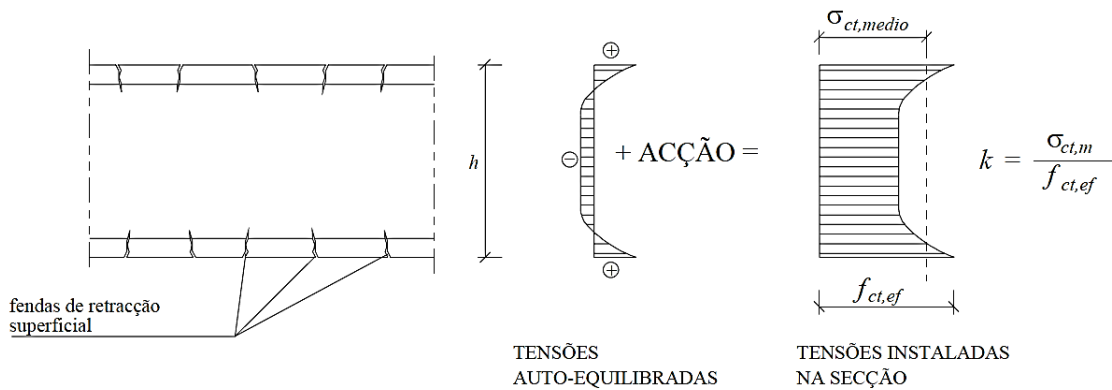


Figura 40 - Efeito das tensões auto-equilibradas [5]

O valor do coeficiente  $k$  varia de acordo com a espessura do elemento, que se encontra representado na figura seguinte.

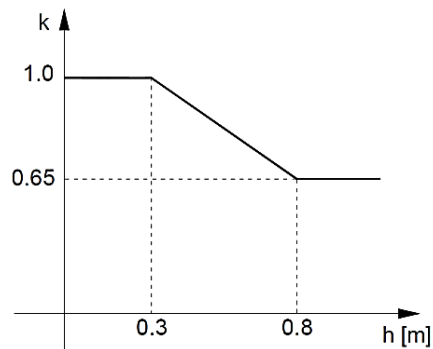


Figura 41 - Variação do parâmetro  $k$  com a espessura do elemento [7]

**Nota:** Toma valor igual à unidade, ou seja  $k = 1$ , quando o elemento é apenas solicitado cargas aplicadas.

### 3.3.3 Cálculo da abertura de fendas

A avaliação do valor característico das aberturas das fendas  $w_k$ , depende de diversos factores bem como a variação destes mesmos, implicando a não possibilidade do seu cálculo exacto. Adoptando um método de cálculo mencionado no *Eurocódigo 2*, o valor de cálculo da abertura de fendas, é definido pela seguinte expressão:

$$w_k = S_{r,max} \varepsilon_{crm} \quad (3.55)$$

Em que:

$S_{r,max}$  – Distância máxima entre fendas (m)

$\varepsilon_{crm}$  – Extensão média relativa entre a armadura e o betão (m/m)

Nos pontos seguintes estão discriminados os dois parâmetros mencionados para o cálculo de abertura de fendas.

#### I. EXTENSÃO MÉDIA RELATIVA ENTRE ARMADURA E O BETÃO

A extensão média relativa entre a armadura e o betão  $\varepsilon_{crm}$ , é determinada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_{crm} = \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} \quad (3.56)$$

Em que:

$\varepsilon_{sm}$  – Extensão média da armadura para a combinação considerada, incluindo o efeito das deformações impostas considerando também a contribuição do betão traccionado. Considera-se apenas a extensão de tracção que ocorre para além do estado de extensão nula do betão no mesmo nível.(m/m)

$\varepsilon_{cm}$  – Extensão média do betão entre fendas (m/m)

Nas figuras que se seguem, estão representados em termos médios, a distribuição de tensões e extensões na armadura e betão ao longo do elemento de betão armado fendilhado com fendilhação estabilizada (figura 34) e a relação entre o esforço axial e sua deformação representados nas seguintes figuras. (figura 35).

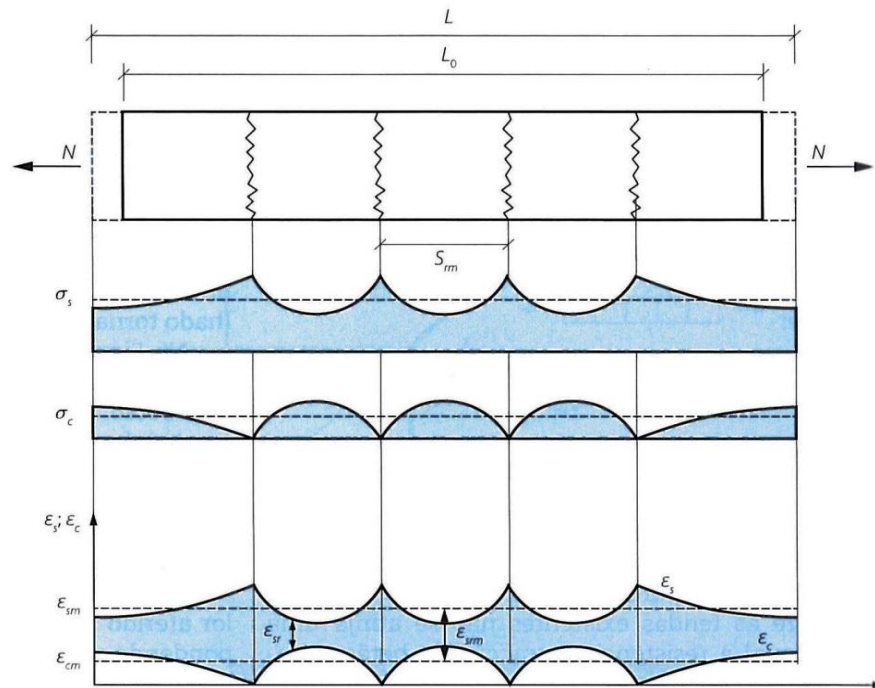


Figura 42 - Distribuição de tensões e extensões da armadura e do betão num elemento fendilhado estabilizado [4]

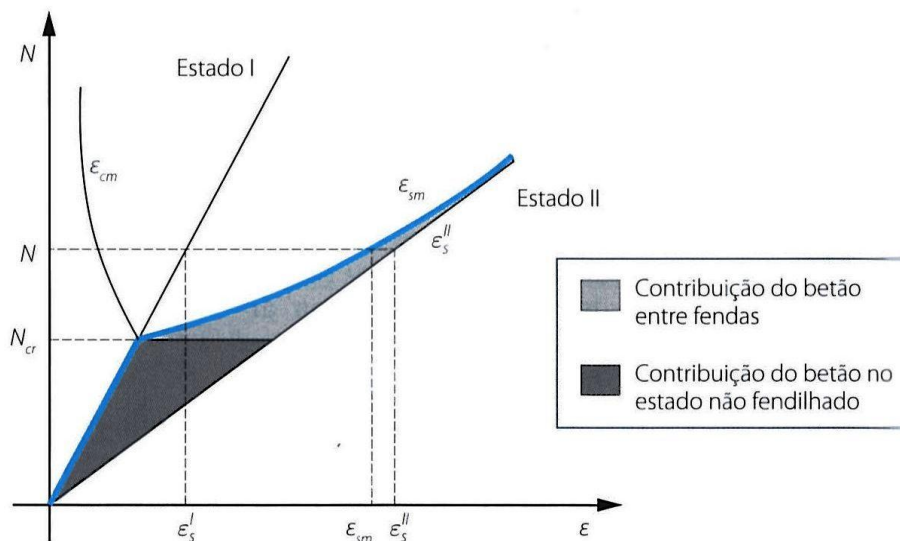


Figura 43 - Relação entre o esforço axial e a deformação de um tirante de betão armado [4]

A diferença entre a extensão média da armadura e do betão, podem ser calculados pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s^{II} - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_E \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s^{II}}{E_s} \quad (3.57)$$

Em que:

$\sigma_s^{II}$  – Tensão na armadura de tracção admitindo a secção fendilhada (MPa)

$k_t$  – Coeficiente em função da duração do carregamento:

$k_t = 0,6$  Acções de CURTA duração

$k_t = 0,4$  Acções de LONGA duração

$\rho_{p,eff}$  – Quantidade de armadura na área efectiva de betão traccionado, tem como expressão:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (3.58)$$

Em que:

$A_{c,eff}$  – Área da secção efectiva de betão traccionado (que envolve as armaduras para betão armado ou de betão pré-esforçado, com uma altura  $h_{c,ef}$ , com o menor dos seguintes valores:

$$h_{c,ef} = \min \left[ 2,5(h - d); \frac{(h - x_{cr})}{3}; \frac{h}{2} \right] \text{ (m)} \quad (3.59)$$

Em que:

$h$  – Altura da secção (m)

$d$  – Altura útil da secção (m)

$x_{cr}$  – Profundidade do eixo neutro na secção fendilhada (Estado II) (m)

**Nota:** As três expressões referentes ao valor mínimo a obter para  $h_{c,ef}$ , encontram-se figuradas na seguinte figura.

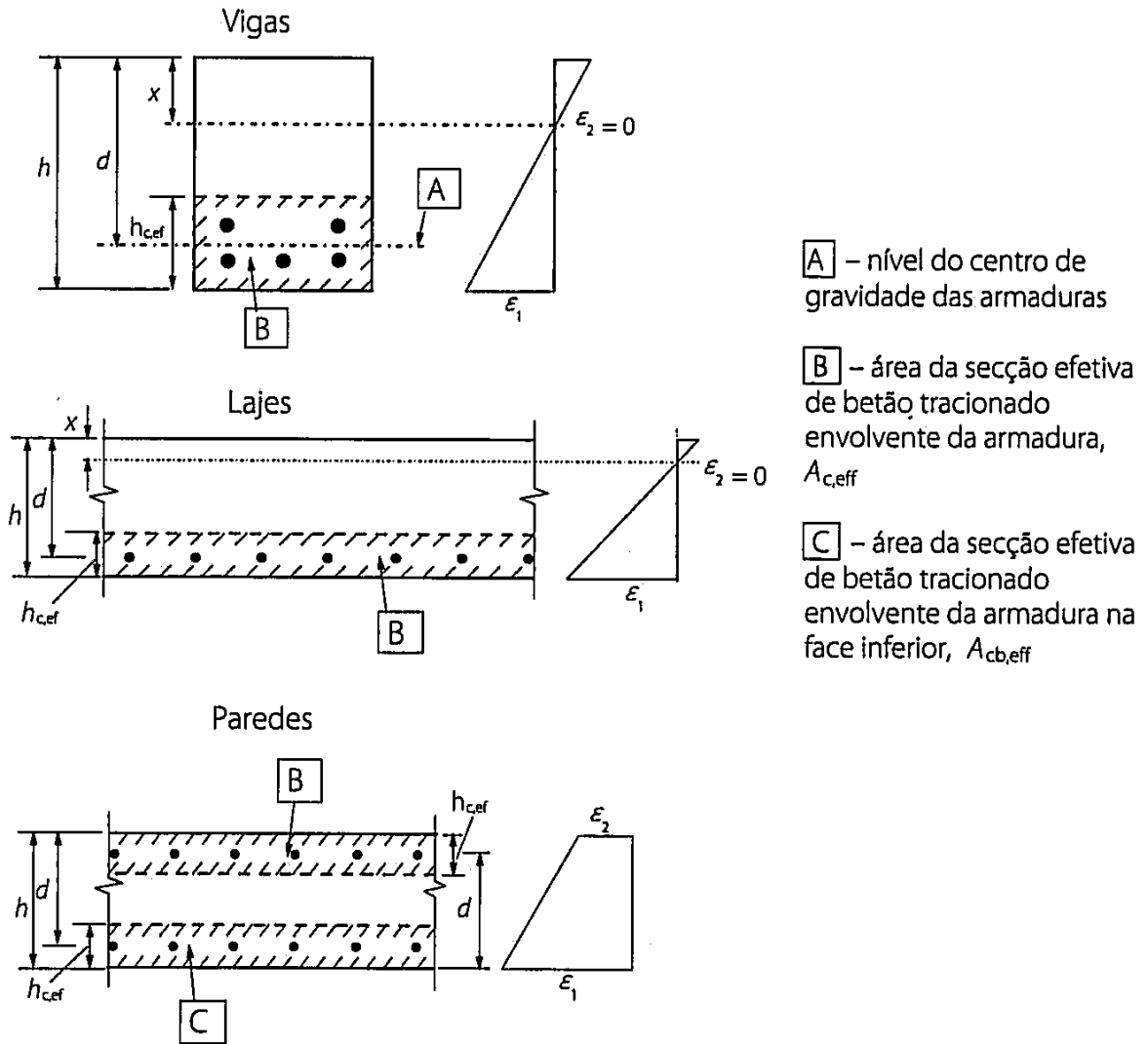


Figura 44 - Secções efectivas de betão tracionado (casos típicos) [2]

## II. DISTÂNCIA MÁXIMA ENTRE FENDAS

Para o cálculo da distância máxima entre fendas  $S_{r,max}$ , devem ser consideradas duas situações distintas:

- Espaçamento pequeno entre armaduras
- Espaçamento grande entre armaduras

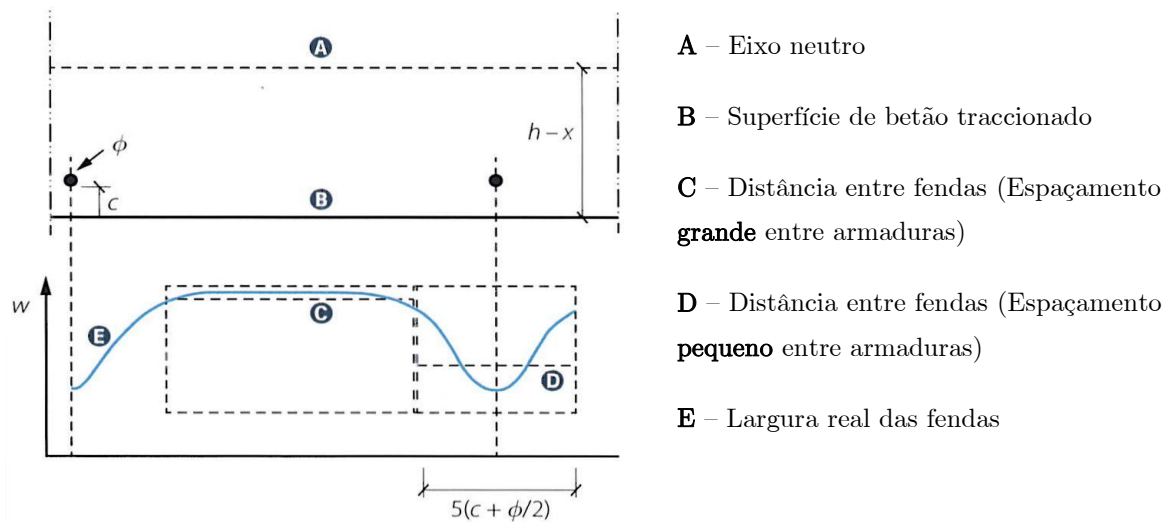


Figura 45 - Largura de fendas  $w_k$ , na superfície de betão em função da distância às armaduras [4]

### II.1) ESPAÇAMENTO PEQUENO ENTRE ARMADURAS

Nas zonas do elemento de betão armado onde haja tracção e quando a distância entre os eixos das armaduras aderentes for relativamente pequena, ou seja espaçamentos menores que  $s_l \leq 5(c + \phi/2)$ , a distância máxima final entre fendas, tem a seguinte expressão:

$$S_{r,max} = 3,4c + 0,425k_1k_2 \phi / \rho_{p,eff} \quad (3.60)$$

Em que:

$c$  – Recobrimento das armaduras longitudinais (m)

$k_1$  – Coeficiente que tem em conta as propriedades de aderência das armaduras aderentes, podendo tomar os seguintes valores:

$k_1 = 0,8$  → Armaduras de alta aderência

$k_1 = 1,6$  → Armaduras de superfície lisa (normalmente armaduras de pré-esforço)

$k_2$  – Coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões, podendo tomar os seguintes valores:

$k_2 = 0,5$  → Flexão

$k_2 = 1,0$  → Tracção Simples

$k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2\varepsilon_1$  → Nos casos onde a tracção é excêntrica ou para zonas localizadas, sendo a extensão  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2$ , nas fibras extremas da secção calculadas para a secção fendilhada (Estado II).

$\emptyset$  – Diâmetro dos varões (m)

**Nota:** No caso de existirem varões de diâmetros diferentes numa secção, deve-se utilizar um diâmetro equivalente  $\emptyset_{eq}$ . Para uma secção com  $n_1$  varões de diâmetro  $\emptyset_1$  e  $n_2$  varões de diâmetro  $\emptyset_2$ , deverá ser utilizada a seguinte expressão:

$$\emptyset_{eq} = \frac{n_1 \emptyset_1^2 + n_2 \emptyset_2^2}{n_1 \emptyset_1 + n_2 \emptyset_2} \quad (3.61)$$

Pode-se constatar da análise da expressão para o cálculo da distância entre fendas  $S_{r,max}$ , que:

! Quanto maior a percentagem de armadura e quanto menor forem os seus diâmetros, irão implicar uma menor distância entre fendas, isto é,

$$\rho_{p,eff}(\uparrow) \wedge \emptyset (\downarrow) \Rightarrow S_r(\downarrow)$$

Proporcionando assim uma transmissão mais eficiente de tensões para o betão, tendo em conta que com diâmetros menores a relação entre a superfície dos varões e a área de aço é maior.

## II.2) ESPAÇAMENTO GRANDE ENTRE ARMADURAS

Ao contrário que anteriormente foi mencionado, caso se nas zonas do elemento de betão armado onde haja tracção e quando a distância entre os eixos das armaduras aderentes for grande, ou seja espaçamentos maiores que  $s_l > 5(c + \phi/2)$ , a distância máxima final entre fendas, tem a seguinte expressão:

$$S_{r,max} = 1,3(h - x_{cr}) \quad (3.62)$$

### 3.3.4 Controlo da Fendilhação

O controlo da fendilhação é de elevada importância, tendo em conta o comportamento de um peça de betão armado. A fendilhação deve ser limitada, de forma a não prejudicar o funcionamento ou a durabilidade da estrutura.

O *Eurocódigo 2*, estabelece valores limite para a largura de fendas  $w_{m\acute{a}x}$ , que se encontra no seguinte quadro.

Quadro 16 - Valores recomendados de  $w_{m\acute{a}x}$  (mm)

Classe de Exposição	Elementos de betão armado e pré-esforçado com armaduras não aderentes
	Combinação de acções Quase-Permanente
<i>X0, XC1</i>	0,40*
<i>XC2, XC3, XC4</i>	0,30
<i>XD1, XD2, XS1, XS2, XS3</i>	

**Nota:** \* Este valor não tem influência sobre a durabilidade, sendo este limite estabelecido para garantir um aspecto aceitável. Na ausência de especificações no que respeita ao aspecto, este limite pode ser reduzido.

Podem ser aceites fendas de largura superiores ao admissível, ou seja  $w > w_{m\acute{a}x}$ , desde que não prejudiquem o bom funcionamento estrutural.

Um processo simplificado para o controlo da fendilhação é basear-nos na expressão (3.55)

em que para o cálculo da abertura de fendas, depende essencialmente:

- Tensão na amadura em estado fendilhado  $\sigma_s^{II}$
- Diâmetro dos varões  $\emptyset$
- Percentagem de armadura  $\rho$ , sendo esta dependente do espaçamento dos varões  $s_l$

Conforme os parâmetros anteriores e de acordo pelo *Eurocódigo 2*, o controlo da fendilhação num elemento de betão armado é provocado por:

- **Deformações impedidas**, deverá ser limitado pelo diâmetro dos varões  $\emptyset$
- **Aplicação de cargas**, deverá ser limitado pelo afastamento dos varões  $s_l$

É apresentado no seguinte quadro uma agregação dos quadros mencionados no *Eurocódigo 2*, referente aos valores máximos dos diâmetros e espaçamentos das armaduras, conforme a tensão na armadura em estado fendilhado e pela largura máxima de fendas.

Quadro 17 - Diâmetros e espaçamentos máximos de varões  $S_{l,max}$ , para o controlo da fendilhação

$\sigma_s^{II} (MPa)$	$w_k = 0,4 (mm)$		$w_k = 0,3 (mm)$		$w_k = 0,2 (mm)$	
	$\emptyset_{m\acute{a}x} (mm)$	$S_{l,max} (mm)$	$\emptyset_{m\acute{a}x} (mm)$	$S_{l,max} (mm)$	$\emptyset_{m\acute{a}x} (mm)$	$S_{l,max} (mm)$
160	40	300	32	300	25	200
200	32	300	25	250	16	150
240	20	250	16	200	12	100
280	16	200	12	150	8	50
320	12	150	10	100	6	–
360	10	100	8	50	5	–
400	8	–	6	–	4	–
450	6	–	5	–	–	–

**Nota:** Os valores indicados no quadro baseiam-se nas seguintes hipóteses:

$$c = 25mm; f_{ct,eff} = 2,9 MPa$$

$$h_{cr} = 0,5h; (h - d) = 0,1h; k_1 = 0,8; k_2 = 0,5; k_c = 0,4; k = 1,0; k_t = 0,4$$

Os valores dos diâmetros máximos, associados à tensão  $\sigma_s^{II}$  e à abertura de fendas admissível  $w_k$ , devem ser corrigidos de acordo com o tipo de esforço solicitado, como se indica a seguir:

- **Flexão** (com pelo menos parte da secção em compressão)

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)} \quad (3.63)$$

- **Tracção** (Tracção Simples)

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \frac{h_{cr}}{8(h-d)} \quad (3.64)$$

Em que:

$\phi_s$  – Diâmetro modificado máximo dos varões

$\phi_s^*$  – Diâmetro máximo dos varões indicado no Quadro 13

$h$  – Altura total da secção (m)

$h_{cr}$  – Altura da zona traccionada imediatamente antes da fendilhação, considerando os valores característicos do pré-esforço e os esforços normais para a **combinação quase-permanente de acções**. (m)

$d$  – Altura útil ao centro de gravidade da camada exterior das armaduras (m)

É de ter em conta que quando toda a secção está à tracção,  $(h-d)$  é a distância mínima do centro de gravidade das armaduras à face do betão (no caso em que a disposição das armaduras não seja simétrica, deve ser considerado as duas faces)

**Nota:** No caso de estudo que se encontra no capítulo 4, foi verificado o controlo da fendilhação apenas pela sua largura de fendas.

### 3.4 ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÃO

Actualmente existe uma grande tendência em aumentar os vãos dos elementos estruturais, proporcionando uma maior flexibilidade na ocupação dos espaços. Assim é de elevada importância o controlo da deformação dos elementos de tal forma a que não prejudique o conforto dos seus utilizadores, aspecto e seu funcionamento, não excedendo valores compatíveis com deformações de outros elementos não estruturais (envidraçados, revestimentos, alvenarias).

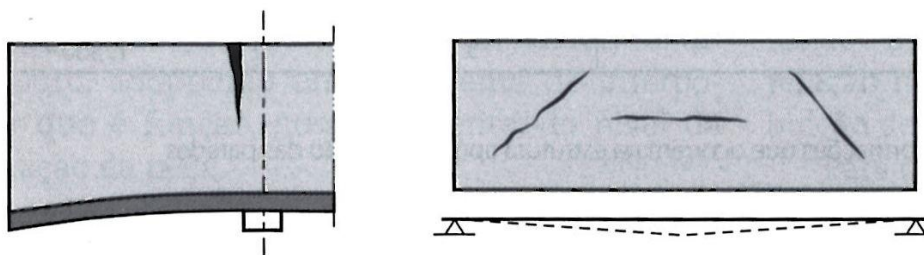


Figura 46 - Deformação excessiva da estrutura causando fendilhação em elementos não estruturais [4]

#### 3.4.1 Factores que afectam a deformação

A deformação está interagida por diversos factores e muitos dependentes do tempo e é importante relembrar alguns dos factores condicionantes, sendo eles:

##### A. Idade de carregamento das cargas - $t_0$

Quanto mais cedo forem aplicadas as cargas na estrutura, maiores serão as extensões e tensões no betão e na armadura conduzindo uma maior deformação nos elementos estruturais (Figura 11).

##### B. Fluência - $\phi$

Este factor irá ser tanto maior quanto mais precoce for a idade de carregamento das cargas na estrutura (Quadro 5), provocando maiores variações das extensões e tensões no

betão e na armadura conduzindo a uma maior deformação. É de salientar que a fluência no betão provoca um aumento da profundidade do eixo neutro, reduzindo o braço do binário das forças interiores, independentemente se a peça esteja ou não fendilhada.

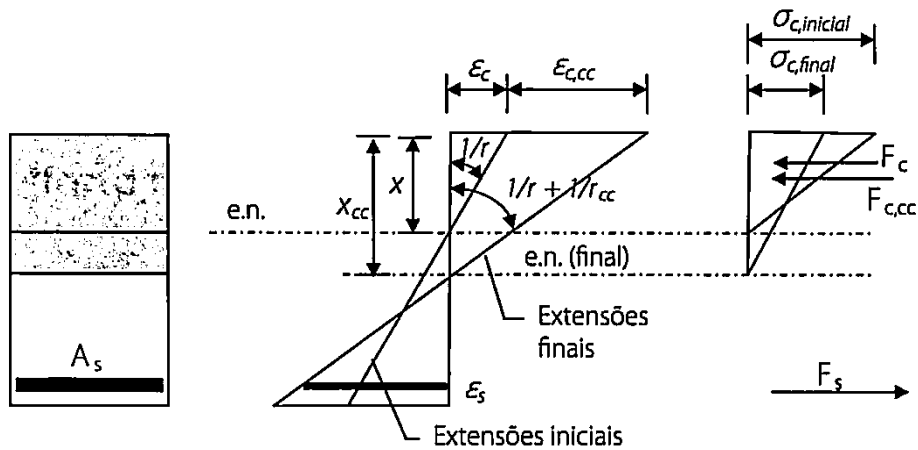


Figura 47 - Variação das tensões e extensões no betão e na armadura devido à fluência [3]

### C. Módulo de elasticidade efectivo - $E_{c,eff}$

Permite considerar directamente o efeito da fluência, mencionada pela expressão (2.16). Refere-se que o cálculo exacto da deformação nos elementos é bastante difícil, uma vez que o módulo de elasticidade do betão possui uma dependência real de factores, tais como o tipo de agregado e condições de cura, conseguindo-se apenas uma estimativa do valor das deformações.<sup>[3]</sup>

### D. Coeficiente de homogeneização - $\alpha_E$

Considera directamente o módulo de elasticidade do betão, atendendo à natureza das acções, a sua duração bem como a fluência em causa pela expressão (3.2). O valor do coeficiente de homogeneização a longo prazo, utilizando o módulo de elasticidade efectivo  $E_{c,eff}$ , é em geral superior ao dobro do valor instantâneo.

### E. Retracção – $\epsilon_{cs}$

Sabendo que a retracção no betão é praticamente inevitável devido à sua cura do betão, e dependendo de inúmeros factores tal como a fluência, que além de provocar alterações no estado de tensão na secção contribui para um incremento de deformação ao longo do tempo.

Há que ter conta que numa secção com distribuição da armadura não simétrica, por efeito da restrição à deformação provocada pela armadura, corresponde uma distribuição assimétrica de extensões provocando uma curvatura, como é ilustrado na seguinte figura.

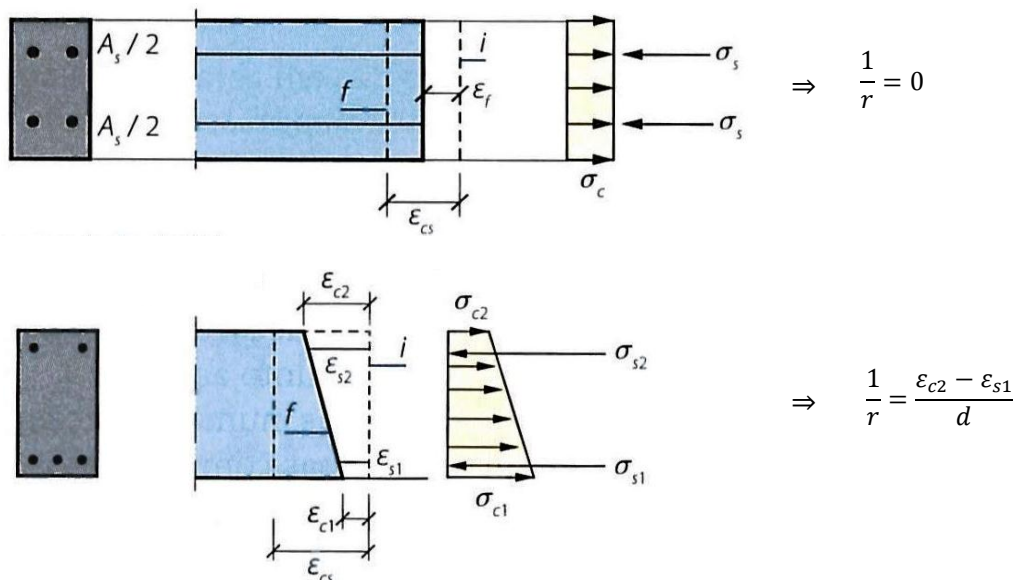


Figura 48 - Distribuições de extensões simétricas e assimétricas em função da quantidade de armadura causada pela retracção do betão [4]

**Nota:** A curvatura toma como positiva na zona do vão e negativa na zona dos apoios, contribuindo para ambas as situações o aumento da flecha.

### 3.4.2 Controlo da Deformação

O controlo da deformação de um elemento consiste na limitação sua flecha, designada pela sigla  $\delta$ . Esta flecha deverá ser limitada a uma flecha máxima admissível e tem como seguinte condição:

$$\delta \leq \delta_{adm}$$

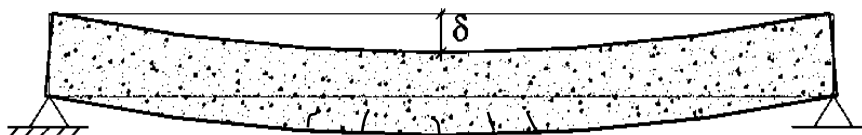


Figura 49 - Elemento simplesmente apoiado com uma deformação  $\delta$  [7]

De forma a condicionar os valores admissíveis da deformação dos elementos estruturais o *Eurocódigo 2*, com base nos valores indicados na norma *ISO 4356*, limita para a **combinação de acções quase permanente** uma flecha máxima de:

- $\delta_{adm} \leq \frac{l}{250}$  → Em relação aos apoios
- $\delta_{adm} \leq \begin{cases} \frac{l}{500} \\ 1 \text{ cm} \end{cases}$  → Que ocorrem após a construção

Refere-se que para vãos de alguma dimensão, superiores a 8 e 9 metros, teríamos flechas em relação aos apoios da ordem dos 3 a 4cm e a ocorrer após a construção da ordem dos 2cm. Deve-se evitar tais valores do ponto de vista aparente, podendo causar fendilhação bem como desconforto para os utilizadores.

Os valores das flechas máximas admissíveis o *Eurocódigo 2* estabelece dois processos, de forma a controlar a deformação, sendo eles:

- Controlo indirecto → Consiste na limitação da relação vão/altura  $\frac{l}{d}$
- Controlo directo → Consiste no cálculo da flecha

### 3.4.2.1 Controlo Indirecto

É um método simplificado de forma a dispensar o cálculo da flecha, de tal modo que um pré-dimensionamento dos elementos de betão armado nomeadamente as vigas e lajes, que satisfaçam os limites da relação vão/altura  $\frac{l}{d}$ .

Como tal é necessário que sejam cumpridas as seguintes condições:

$$\frac{l}{d} \leq KK_T K_L K_\sigma \left[ 11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{se } \rho \leq \rho_0 \quad (3.65)$$

$$\frac{l}{d} \leq KK_T K_L K_\sigma \left[ 11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho_c} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_0}} \right] \quad \text{se } \rho > \rho_0 \quad (3.66)$$

Em que:

$\frac{l}{d}$  – Valor limite da relação vão/altura

$\rho_0$  – Taxa de armaduras de referência, com expressão  $\rho_0 = 10^{-3} \sqrt{f_{ck}}$  (3.67)

$\rho$  – Taxa de armadura de tracção necessária a meio vão para equilibrar o momento devido às acções de cálculo

$\rho_c$  – Taxa de armadura de compressão necessária a meio vão para equilibrar o momento devido às acções de cálculo

$f_{ck}$  – Tensão característica do betão à compressão (MPa)

$K$  – Coeficiente que tem em conta os diferentes sistemas estruturais

Nos quadros que se seguem, estão apresentados em função do sistema estrutural os valores do coeficiente  $K$  como também os valores básicos da relação vão/altura  $\frac{l}{d}$  para diferentes percentagens de armaduras  $\rho$ .

**Nota:** Os valores apresentados nos quadros seguintes foram obtidos para uma classe de armadura *A500*.

Quadro 18 - Valores básicos da relação vão/altura útil  $\frac{l}{d}$  em elementos de betão armado sem esforço normal de compressão obtidos para uma classe de betão C30/37 [2]

Sistema estrutural	K	Betão fortemente solicitado $\rho = 1,5 \%$	Betão levemente solicitado $\rho = 0,5 \%$
Viga simplesmente apoiada, laje simplesmente apoiada armada numa ou em duas direcções	1,0	14	20
Vão extremo de uma viga contínua ou de uma laje contínua armada numa direcção ou de uma laje armada em duas direcções contínua ao longo do lado maior	1,3	18	26
Vão interior de uma viga ou de uma laje armada numa ou em duas direcções	1,5	20	30
Laje sem vigas apoiada sobre pilares (laje fungiforme) (em relação ao maior vão)	1,2	17	24
Consola	0,4	6	8

**NOTA 1:** Em geral, os valores indicados são conservativos, e o cálculo poderá frequentemente revelar que é possível utilizar elementos mais esbeltos.

**NOTA 2:** Para lajes armadas em duas direcções, a verificação deverá ser efectuada em relação ao menor vão. Para lajes fungiformes deverá considerar-se o maior vão.

**NOTA 3:** Os limites indicados para lajes fungiformes correspondem, para a flecha a meio vão, a uma limitação menos exigente do que a de vão/250. A experiência demonstrou que estes limites são satisfatórios.

Quadro 19 - Valores básicos da relação vão/altura útil  $\frac{l}{d}$ , obtidos para várias classes de betão para elementos de betão armado sem esforço normal de compressão

k	Lajes ( $\rho = 0,5\%$ )								Vigas ( $\rho = 1,5\%$ )							
	$f_{ck}$								$f_{ck}$							
	16	20	25	30	35	40	45	50	16	20	25	30	35	40	45	50
0,4	6	7	7	8	9	10	12	13	5	5	5	6	6	6	6	6
1,0	16	17	19	21	23	26	29	32	13	13	14	14	15	15	16	16
1,2	19	20	22	25	28	31	35	38	15	16	16	17	17	18	19	19
1,3	21	22	24	27	30	33	37	42	16	17	18	18	19	20	20	21
1,5	24	26	28	31	34	39	43	48	19	20	20	21	22	23	23	24

$K_T$  – Coeficiente que tem em conta o efeito do banzo no caso vigas em T e podem tomar o valor de:

- $\frac{b_f}{b_w} > 3 \rightarrow K_T = 0,8$
- $\frac{b_f}{b_w} \leq 3 \rightarrow K_T = 1,0$

$K_L$  – Coeficiente que tem em conta vãos superiores a 7m, que suportam divisórias e podem tomar o valor de:

- $K_L = \frac{7,0}{l}$  → Lajes e vigas
- $K_L = \frac{8,5}{l}$  → Lajes fungiformes

$K_\sigma$  – Coeficiente que tem em conta a tensão na armadura que tem como expressão:

$$K_\sigma = \frac{310}{\sigma_s} \approx \frac{500}{f_{syk}} \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} \quad (3.68)$$

E que:

$\sigma_s$  – Tensão de tracção na armadura a meio vão ou no apoio (no caso de consolas) para as acções de cálculo no estado limite de utilização (MPa)

$A_{s,prov}$  – Área da secção de armaduras existentes na secção (cm<sup>2</sup>)

$A_{s,req}$  – Área da secção de armaduras necessária na secção no estado limite último (cm<sup>2</sup>)

**Nota:** As expressões referidas para satisfazer a relação vão/altura  $\frac{l}{d}$ , foram obtidas para uma tensão na armadura em estado limite de utilização igual a 310MPa.

### 3.4.2.2 Controlo Directo

O controlo directo para o cálculo da flecha, é bastante mais credível, uma vez que este controlo da deformação, além de ter em conta os factores mencionados no ponto 3.4.1. do presente trabalho, considera o comportamento intermédio da fendilhação do elemento nos respectivos estados não fendilhado e fendilhado. Observa-se na seguinte figura, um comportamento idealizado da deformação (designado por parâmetro “ $a$ ”), tendo sido este calculado através de uma ponderação entre as curvaturas no Estado I (parâmetro “ $a_I$ ”) e Estado II (parâmetro “ $a_{II}$ ”) através de um coeficiente de repartição (parâmetro  $\zeta$ ).

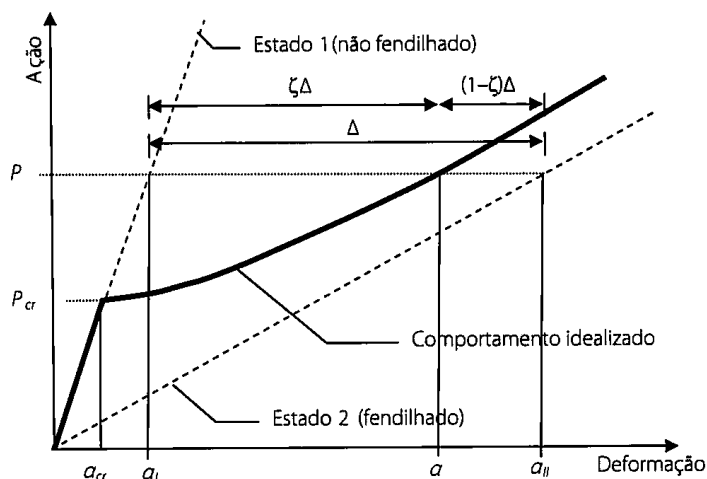


Figura 50 – Comportamento idealizado num elemento traccionado [3]

O *Eurocódigo 2* salienta-se dois tipos de métodos para a determinação das flechas:

- **Cálculo Exacto**
- **Cálculo Aproximado**, englobando os seguintes métodos:
  - Método Bilinear
  - Método dos Coeficientes Globais
  - Método Simplificado

**Nota:** Para a determinação das flechas no caso de estudo do presente trabalho, será utilizado o **cálculo exacto** e o *método simplificado* do **cálculo aproximado**.

## A. CÁLCULO EXACTO

Em elementos fendilhados de betão armado, o método exacto consiste em calcular as curvaturas em várias secções ao longo do elemento associadas à acção do momento flector e seguidamente calcular as flechas por integração numérica, como se pode observar pelas seguintes equações:

$$\delta = f\left(\frac{1}{r}\right) \Leftrightarrow \delta = f\left(\frac{M}{EI}\right)$$

$$\downarrow$$

$$\delta = \int \frac{1}{r_m} \bar{M} dx \Leftrightarrow \delta = \int_0^L \frac{M}{EI} \bar{M} dx$$

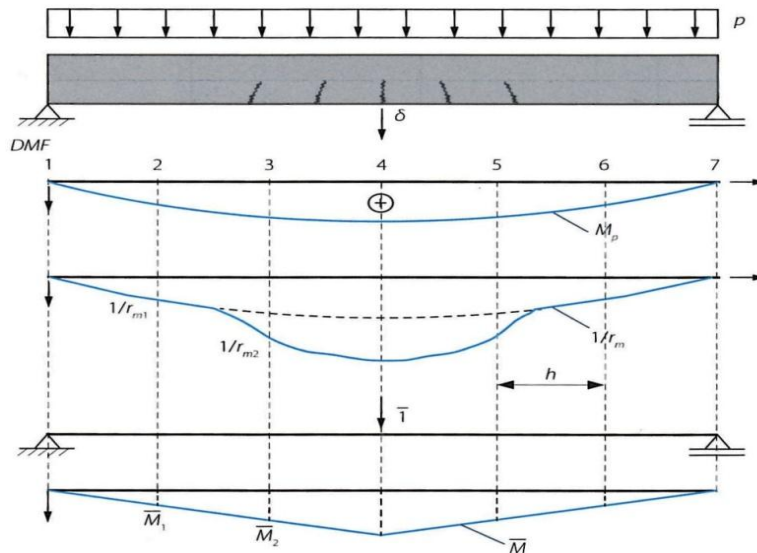


Figura 51 – Flecha de uma viga simplesmente apoiada por integração numérica [4]

De acordo com o *Eurocódigo 2* a expressão que melhor define o comportamento idealizado sollicitado à flexão é a seguinte:

$$\frac{1}{r_m} = (1 - \zeta) \frac{1}{r_I} + \zeta \frac{1}{r_{II}} \quad (3.69)$$

Em que:

$\frac{1}{r_m}$  – Curvatura média entre os estados não fendilhado e fendilhado

$\frac{1}{r_I}$  – Curvatura do elemento no estado não fendilhado (Estado I)

$\frac{1}{r_{II}}$  – Curvatura do elemento no estado fendilhado (Estado II)

$\zeta$  – Coeficiente de repartição, que tem em conta a contribuição do betão traccionado entre fendas e tem como expressão:

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \Leftrightarrow \zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^2 \quad (3.70)$$

Em que:

$\beta_1$  – Coeficiente que tem em conta as propriedades de aderência das armaduras, podendo tomar os seguintes valores:

- $\beta_1 = 1,0$  → Varões de alta aderência
- $\beta_1 = 0,5$  → Varões de aderência normal

$\beta_2$  – Coeficiente que tem em conta a influência na extensão média da duração do carregamento ou da repetição do carregamento, podendo tomar os seguintes valores:

- $\beta_2 = 1,0$  → Único carregamento de curta duração
- $\beta_2 = 0,5$  → Um carregamento de longa duração ou para vários ciclos de carregamento

$\sigma_{sr}$  – Tensão nas armaduras de tracção calculada em estado fendilhado, sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação (MPa)

$\sigma_s$  – Tensão nas armaduras de tracção calculado em estado fendilhado para qual se pretende calcular a flecha (MPa)

#### Notas:

- A relação  $\sigma_{sr}/\sigma_s$  pode ser substituído por  $M_{cr}/M$  para a flexão ou  $N_{cr}/N$  para a tracção simples.
- Caso o momento actuante  $M$  for inferior ao momento de fendilhação  $M_{cr}$ , a curvatura média será igual à curvatura em estado não fendilhado (Estado I), ou seja

$$M < M_{cr} \Rightarrow \zeta = 0 \Rightarrow \frac{1}{r_m} = \frac{1}{r_I}$$

Relativamente à retracção, a curvatura devido a esta, possui o procedimento idêntico às cargas aplicadas obtendo-se no final a curvatura média da retracção. De acordo com o *Eurocódigo 2*, a expressão que define a curvatura devido à retracção é a seguinte:

$$\frac{1}{r_{cs}} = \varepsilon_{cs} \alpha_E \frac{S}{I} \quad (3.71)$$

Em que:

$1/r_{cs}$  – Curvatura devido à retracção

$\varepsilon_{cs}$  – Extensão de retracção livre (mencionado no ponto 2.3.1)

$I$  – Momento de inércia da secção, calculado para os estados não fendilhado  $I_{un}$  e fendilhado  $I_{cr}$ .

$S$  – Momento estático da secção de armaduras em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade da secção, calculado em secção não fendilhada e fendilhada pelas seguintes expressões:

▪ Estado não fendilhado:  $S_{un} = A_s(d - x_{un}) - A_{sc}(x_{un} - d_c)$  (3.72)

▪ Estado fendilhado:  $S_{cr} = A_s(d - x_{cr}) - A_{sc}(x_{cr} - d_c)$  (3.73)

A curvatura média devido à retracção tem a seguinte expressão:

$$\frac{1}{r_{cs_m}} = (1 - \zeta) \frac{1}{r_{cs}^I} + \zeta \frac{1}{r_{cs}^{II}} \quad (3.74)$$

A curvatura total a longo prazo incluindo a retracção tem como expressão:

$$\frac{1}{r_m} = (1 - \zeta) \left( \frac{1}{r_{fl}^I} + \frac{1}{r_{cs}^I} \right) + \zeta \left( \frac{1}{r_{fl}^{II}} + \frac{1}{r_{cs}^{II}} \right) \quad (3.75)$$

Na figura seguinte demonstra a evolução da curvatura média de um elemento de betão armado, para o instante  $t = 0$ , ou seja para uma deformação instantânea e a sua deformação ao longo do tempo  $t > 0$ .

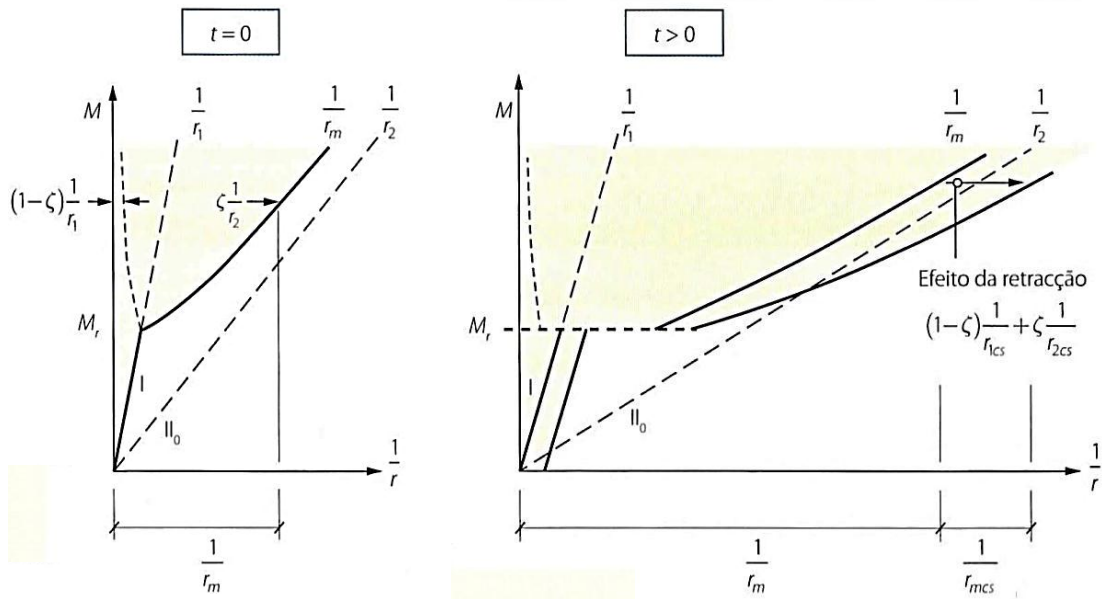


Figura 52 - Relações dos momentos – curvatura para o instante de  $t = 0$  e  $t > 0$  [4]

## B. MÉTODO APROXIMADO

O método aproximado para determinação da flecha máxima em elementos de betão armado é um método relativamente simples de ser executado. Este método consiste, tal como no método anterior, no cálculo da curvatura intermédia máxima entre os estados não fendilhado (Estado I) e fendilhado (Estado II).

O cálculo da flecha tem a seguinte expressão:

$$\delta = \lambda L^2 \frac{1}{r_{m\acute{a}x}} \quad (3.76)$$



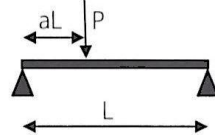

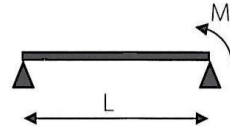

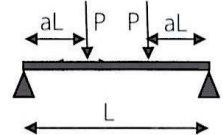

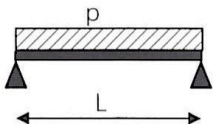

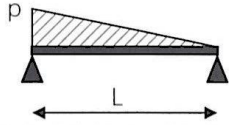
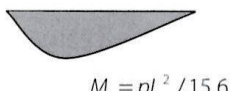
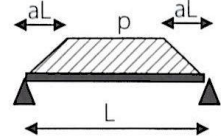
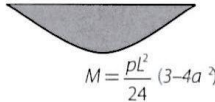
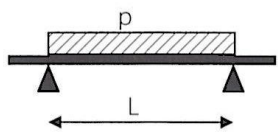
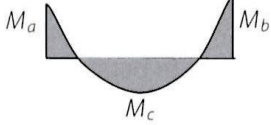
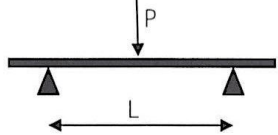
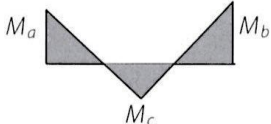
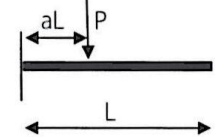
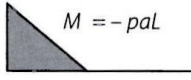
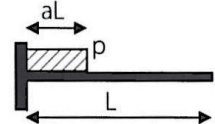
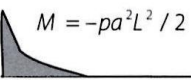
Em que:

$\frac{1}{r_{m\acute{a}x}}$  – Curvatura máxima intermédia na secção do momento máximo (1/m)

$L$  – Vão do elemento (m)

$\lambda$  – Coeficiente relacionado de acordo com o tipo de carregamento e condições de apoio que se encontram presentes no seguinte quadro.

Quadro 20 - Coeficiente  $\lambda$  em função dos diagramas de momentos flectores [3]

Carregamento	Diagrama de momentos	$\lambda$
	 $M$	0,125
	 $M = a(1 - a) PL$	$\frac{3 - 4a^2}{48(1 - a)}$ $a = 0,5 \Rightarrow \lambda = 1/12$
	 $M$	0,0625
	 $M = 0,5 a PL$	$0,125 - \frac{a^2}{6}$
	 $M = pL^2 / 8$	0,104
	 $M = pL^2 / 15,6$	0,102
	 $M = \frac{pL^2}{24} (3 - 4a^2)$	$\frac{1}{80} \frac{(5 - 4a^2)^2}{3 - 4a^2}$
	 $M_a$ , $M_b$ , $M_c$	$0,104(1 - 0,1\beta)$ $\beta = \frac{M_a + M_b}{M_c}$
	 $M_a$ , $M_b$ , $M_c$	$0,083(1 - 0,25\beta)$ $\beta = \frac{M_a + M_b}{M_c}$
	 $M = -paL$	$a(3-a)/6$ $a = 1 \Rightarrow \lambda = 0,333$
	 $M = -pa^2L^2 / 2$	$a(4-a)/12$ $a = 1 \Rightarrow \lambda = 0,25$



## CASO DE ESTUDO

O presente caso de estudo tem como objectivo a análise de uma estrutura de betão armado e a respectiva verificação de segurança aos estados limites de utilização (tensões, fendilhação e deformação) a longo prazo ( $t_{\infty}$ ).

A verificação da segurança aos estados limites de utilização da estrutura será realizada através de diversos métodos, em que na finalização do presente trabalho irá ser realizada uma análise comparativa de resultados relativos de cada um dos métodos utilizados (a partir de uma disposição de armadura em todos os casos).

### 4.1 DESCRIÇÃO E CONSTITUIÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura em estudo tem a seguinte constituição:

- Estrutura porticada em betão armado;
- Lajes maciças unidireccionais com espessura de 0,20m;
- Pilares com dimensões de 0,25x0,25m<sup>2</sup>;
- Vigas com dimensões de 0,25x0,55m<sup>2</sup>;

Relativamente aos materiais utilizados:

- Armaduras ordinárias de classe **A500NR**
- Betão da classe **C30/37**

Nas figuras que se seguem encontra-se contornado de cor azul na estrutura em análise, o pórtico central em estudo bem como as dimensões dos respectivos elementos estruturais.

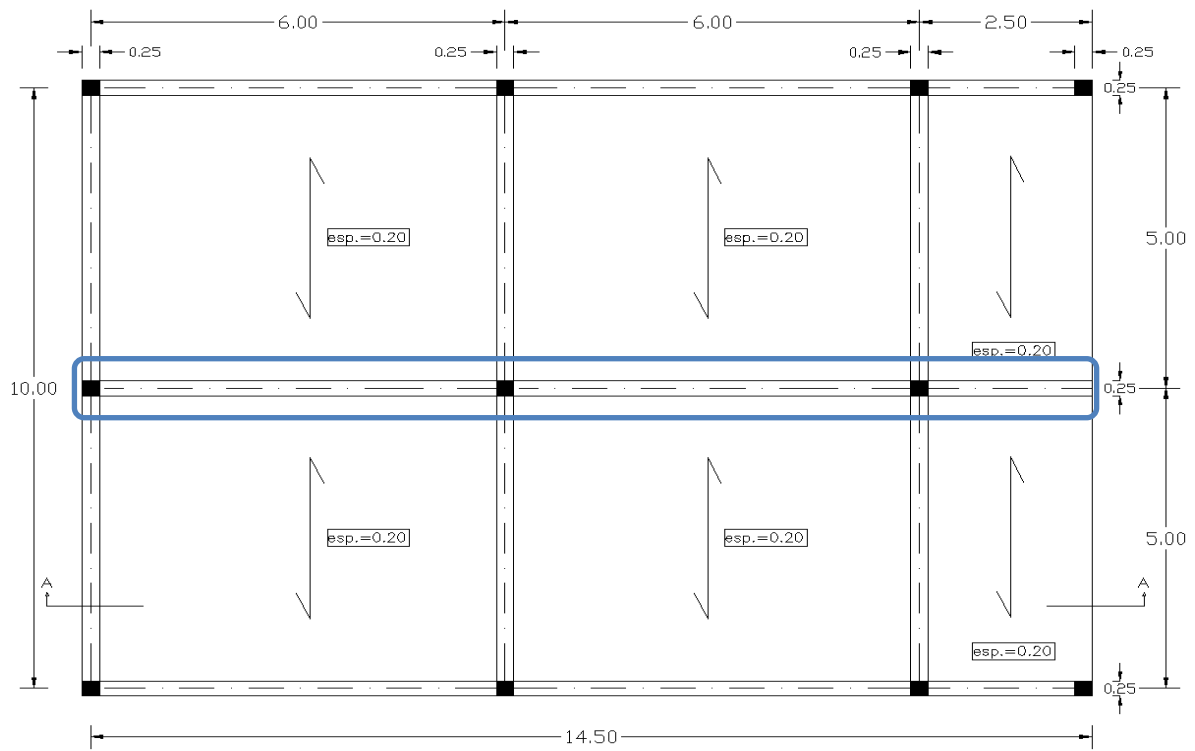


Figura 53 – Planta Estrutural

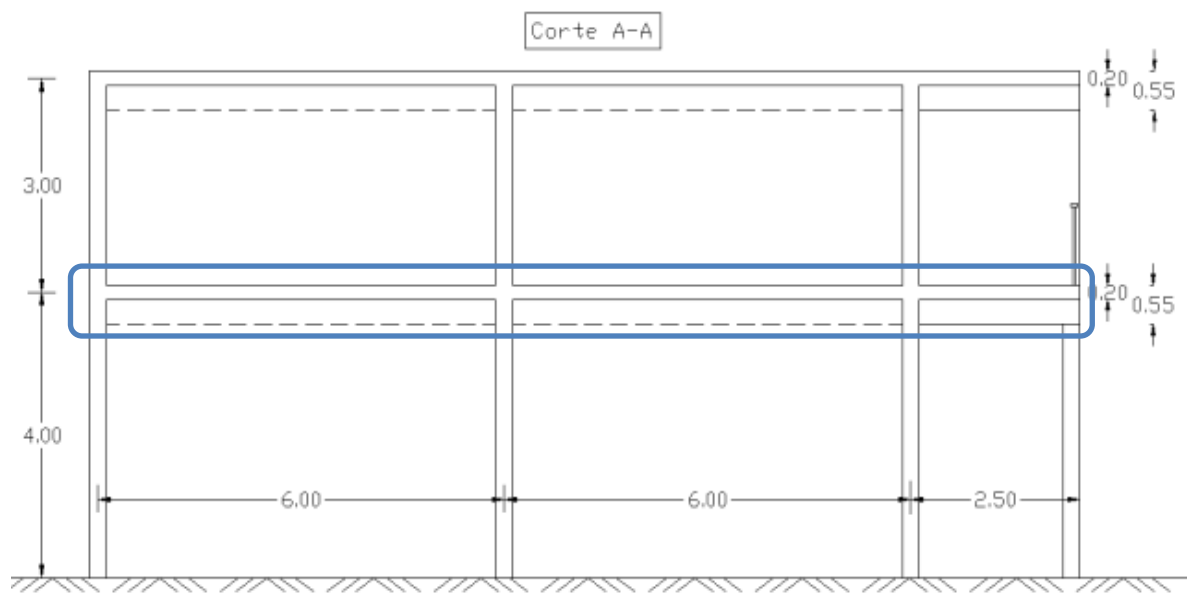


Figura 54 – Corte Estrutural

## 4.2 ANÁLISE AOS ESTADOS LIMITES

A análise e verificação aos estados limites últimos e de utilização no pórtico e piso em estudo, será executada por diversos métodos de cálculo, utilizando para todos os métodos parâmetros gerais no seu cálculo de modo a verificar os respectivos estados limites.

### 4.2.1 Métodos utilizados

Os métodos de análise a serem utilizados para a verificação aos estados limites no pórtico em estudo serão os seguintes:

- Analiticamente elaborando folha de cálculo em Excel, a partir das expressões analíticas mencionadas no *capítulo 3* do presente trabalho.



Figura 55 – Representação do Excel

- Programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis Professional 2014* da Autodesk.

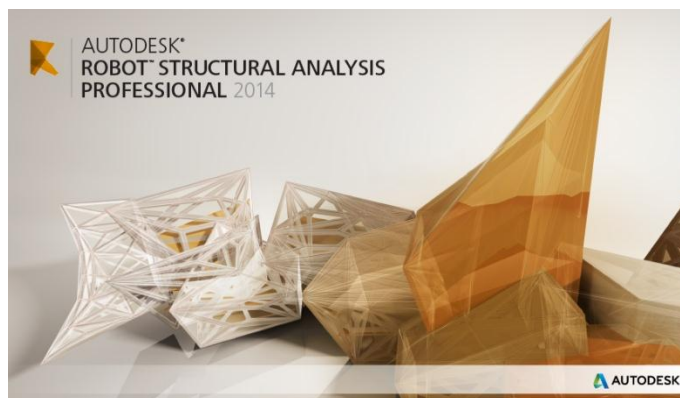


Figura 56 – Representação do programa de cálculo automático

- Programa de cálculo *XD-Conserv*, que será utilizado na verificação aos estados limites de utilização, tendo o programa sido desenvolvido por aluno no âmbito da dissertação do mestrado do curso de engenharia Civil da Faculdade de Aveiro.



Figura 57 – Representação do programa XD-Conserv

#### 4.2.2 Parâmetros gerais utilizados no cálculo dos métodos propostos

Os parâmetros gerais considerados em todos os métodos para o cálculo e verificação aos estados limites de utilização, foram os seguintes:

- Foi considerado uma análise linear da estrutura a longo prazo ( $t_{\infty}$ );
- Foram desprezados esforços axiais na estrutura, predominando apenas a flexão simples;
- Retirada da cofragem e escoramento da estrutura ao fim de 21 dias ( $t_0 = 21$  dias);
- Classe de cimento do tipo N ( $s=0,25$ );
- Humidade Relativa do ambiente de 80% ( $RH=80\%$ );
- Classe de exposição da estrutura de XC1, tomando como valor máximo admissível de abertura de fendas ( $w_{k,m\acute{a}x} = 0,4$  mm);
- Deformação máxima admissível ( $\delta_{adm}$ ) nos tramos de extremidade e intermédio é de 24 mm e no tramo em consola de 10 mm (valores referentes à expressão  $\delta_{adm} \leq \frac{l}{250}$ );
- Recobrimento à face da armadura transversal de 2,5cm.

### 4.2.3 Secções em estudo

As secções críticas que serão verificação referente aos estados limites últimos e de utilização que se encontram em cada tramo do pórtico central e piso em estudo, referente aos estados limites de últimos e de utilização, encontram-se definidas nas seguintes figuras.

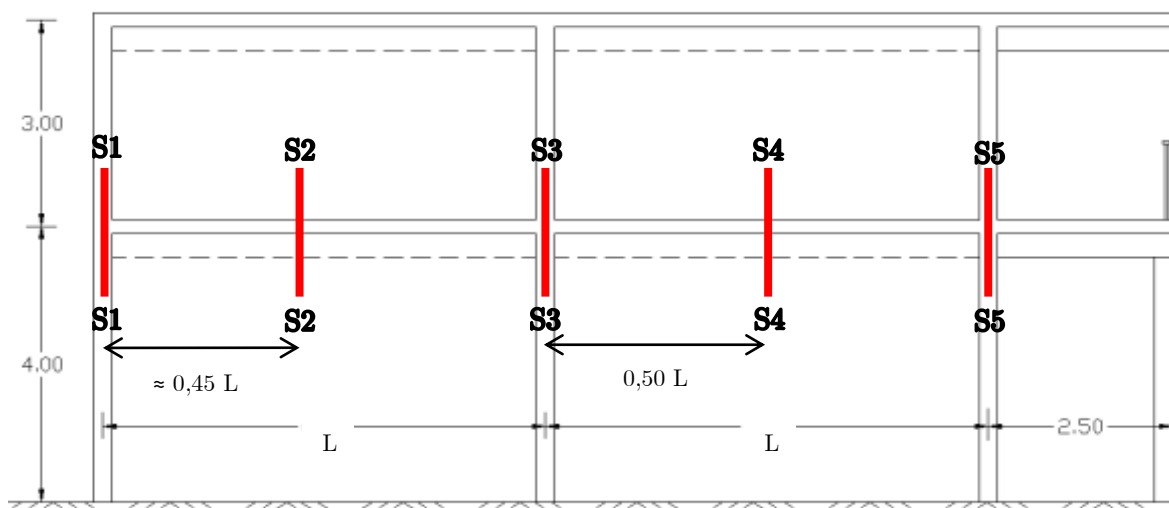


Figura 58 - Secções críticas no pórtico e piso em estudo para a verificação relativamente ao estado limite de último

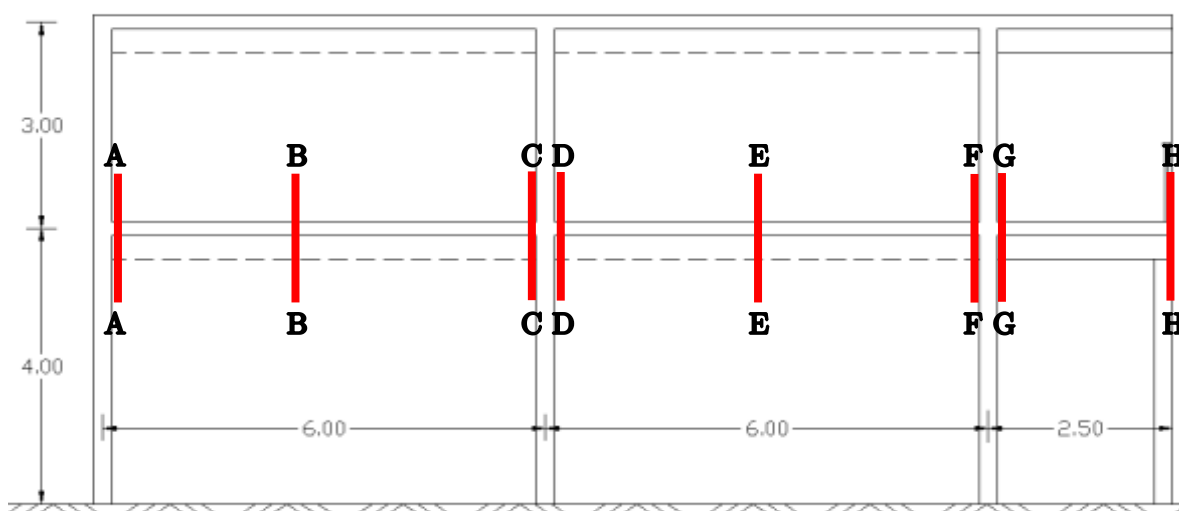


Figura 59 - Secções críticas no pórtico e piso em estudo para a verificação aos estados limites de utilização

**Nota:** Na verificação ao estado de deformação apenas foi realizado nas secções B-B, E-E e H-H.

#### 4.2.4 Modelação Estrutural

O modelo estrutural do pórtico em estudo foi realizado com recurso ao programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis Professional 2014*, como se pode visualizar na seguinte figura.

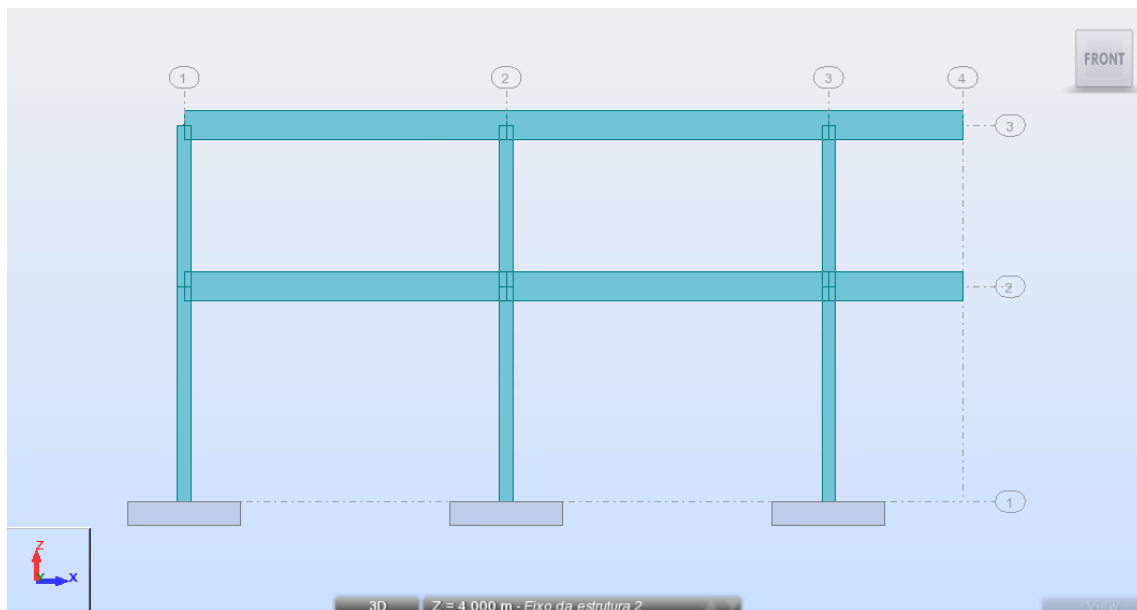


Figura 60 - Modelo Estrutural em 2D no *Robot Structural Analysis Professional 2014*

#### 4.2.5 Acções de projecto

As acções de projecto a serem consideradas na estrutura e no pórtico em estudo, têm os valores que estão mencionados nas seguintes tabelas.

Tabela 1 – Valores das acções presentes na estrutura

		Acções
Peso Proprio	Viga	3,44 kN/m
	Laje	5,00 kN/m <sup>2</sup>
R.C.P.		3,00 kN/m <sup>2</sup>
Sobrecarga		2,00 kN/m <sup>2</sup>

As acções de base que irão ser estabelecidas para o cálculo dos esforços referentes aos estados limites serão os que estão presentes na seguinte tabela.

Tabela 2 - Valores das acções no pórtico central atendendo a largura de influência

		Largura de influência = 5,00m
Peso Proprio	Viga	3,44 kN/m <sup>2</sup>
	Laje	25,00 kN/m
R.C.P.		15,00 kN/m
Sobrecarga		10,00 kN/m

**Nota:** Foi considerado um peso específico do betão de  $\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$  para o cálculo do peso próprio.

Uma vez que a análise do pórtico é independente do resto da estrutura, os valores das acções anteriormente referidas irão ter um acréscimo de valores (excepto o próprio elementos (vigas) em análise), assumindo uma largura de influência na laje de 2,5m para cada lado do pórtico, com um total de 5m se se pode visualizar na figura que se segue.

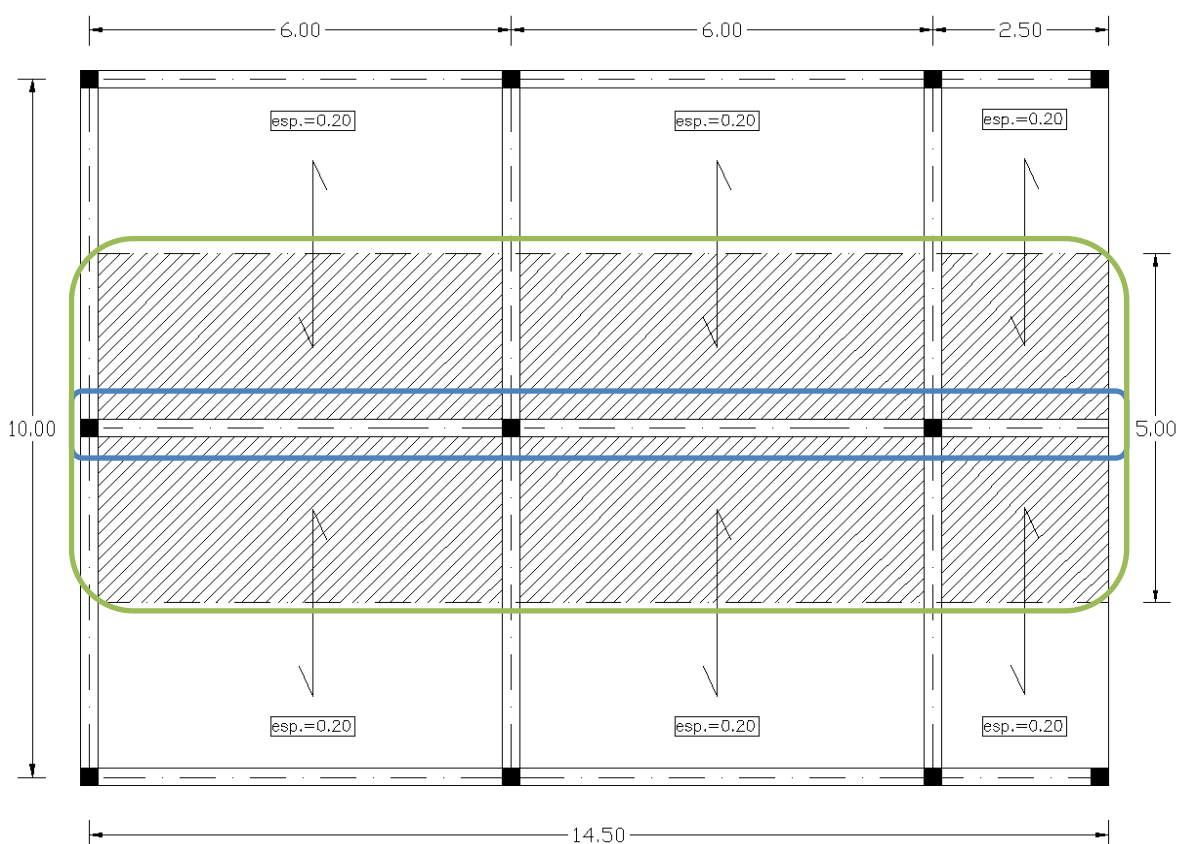


Figura 61 - Área de influência do peso próprio da laje piso 1 actuar no pórtico central

#### 4.2.5.1 Estado limite último

As acções referentes aos estados limites últimos, estão mencionados na seguinte tabela.

Tabela 3 - Valores das acções referente aos estados limites últimos

		Estados Limites Últimos
Peso Proprio	Viga	4,64 kN/m
	Laje	33,75 kN/m
R.C.P.		20,25 kN/m
Sobrecarga		15,00 kN/m
<b>TOTAL</b>		<b>73,64 kN/m</b>

**Nota:** Por simplificação não se realizou alternância de sobrecarga na estrutura.

Nas figuras que seguem são visualizadas as acções no piso em estudo a actuar no pórtico central no piso, bem como os esforços do momento flector utilizando o programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis Professional 2014*.

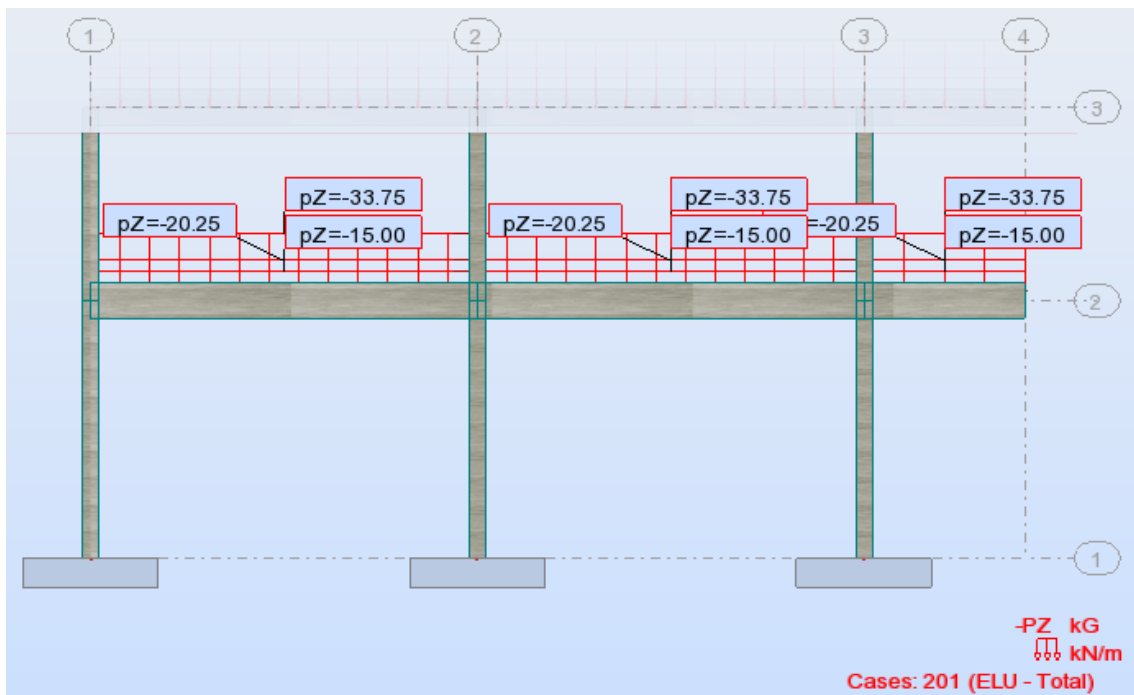


Figura 62 - Acções em estado limite último actuar no pórtico e piso em estudo

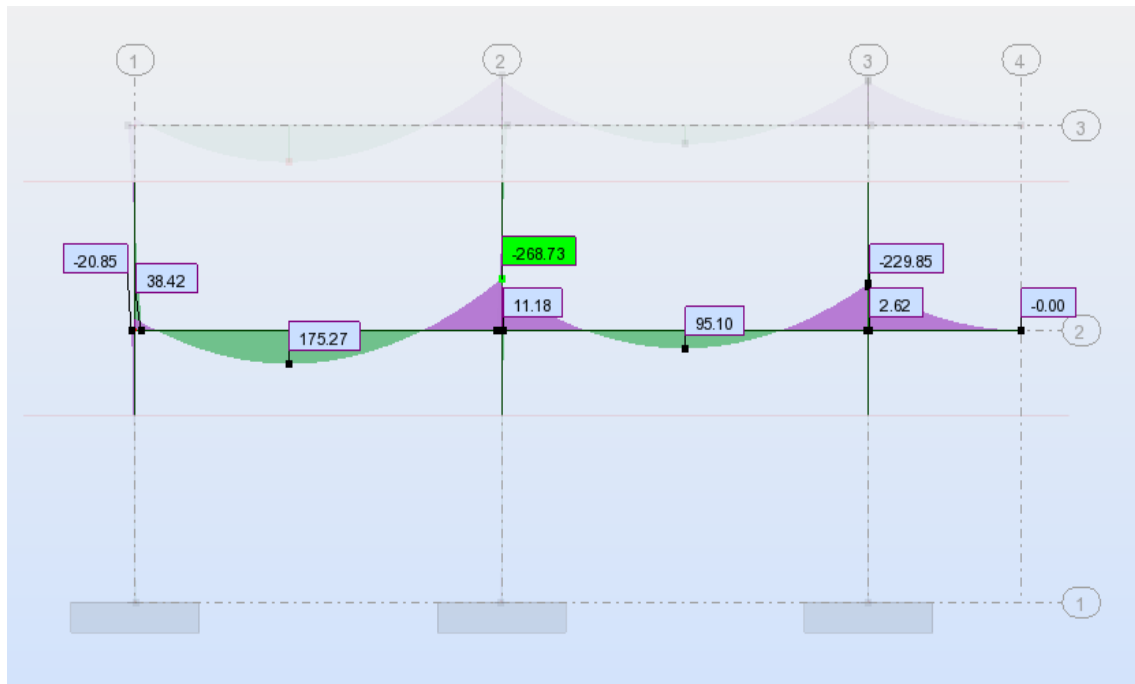


Figura 63 - Diagramas de momentos flectores para o estado limite último

#### 4.2.5.2 Estados limites de utilização

As acções referente aos estados limites de utilização, de forma serem posteriormente verificadas as tensões, a fendilhação e deformação estão mencionados na seguinte tabela.

Tabela 4 - Acções para cada combinação de acções referente aos estados limites de utilização

		Estados Limites Utilização		
		Combinação de Acções		
		Característica	Frequente	Quase-Permanente
Peso Proprio	Viga	3,44 kN/m	3,44 kN/m	3,44 kN/m
	Laje	25,00 kN/m	25,00 kN/m	25,00 kN/m
R.C.P.		15,00 kN/m	15,00 kN/m	15,00 kN/m
Sobrecarga		10,00 kN/m	5,00 kN/m	3,00 kN/m
<b>TOTAL</b>		<b>53,44 kN/m</b>	<b>48,44 kN/m</b>	<b>46,44 kN/m</b>

**Notas:** Os coeficientes  $\psi_1$  e  $\psi_2$  utilizados para a obter os valores referente para cada combinação de acções, foram:

- $\psi_1 = 0,5$
- $\psi_2 = 0,3$

Na figura que se encontra de seguida, estão apresentados as acções actuantes no pórtico e no piso em estudo para cada uma das combinações de acções.

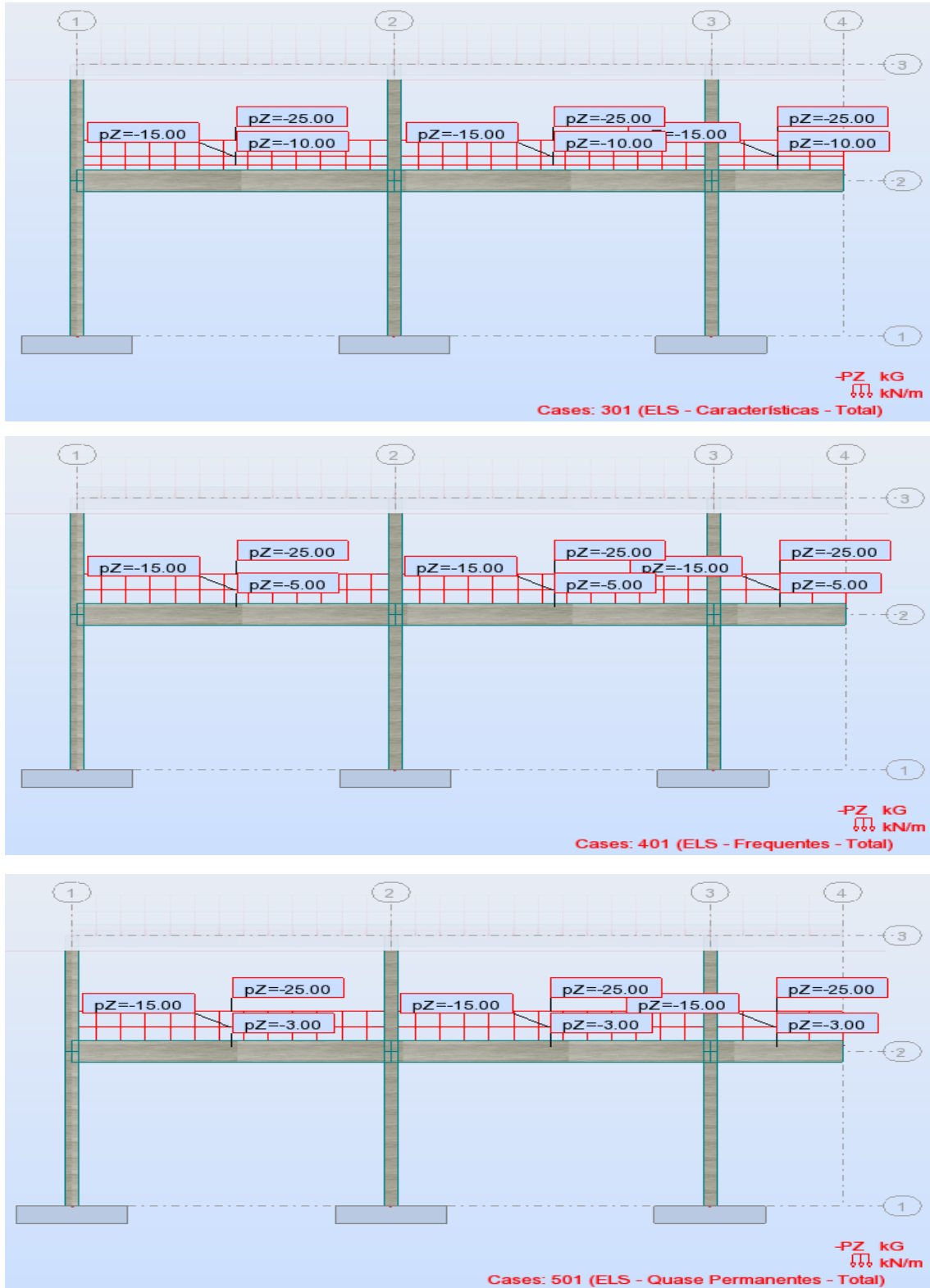


Figura 64 - Acções respectivas para cada combinação de acções (características, frequentes e quase permanentes)

De acordo com as acções actuantes referentes de cada combinação, apresentam-se na seguinte figura e de uma forma geral, os diagramas dos momentos flectores referente às respectivas combinações de acções (características, frequentes e quase permanentes).

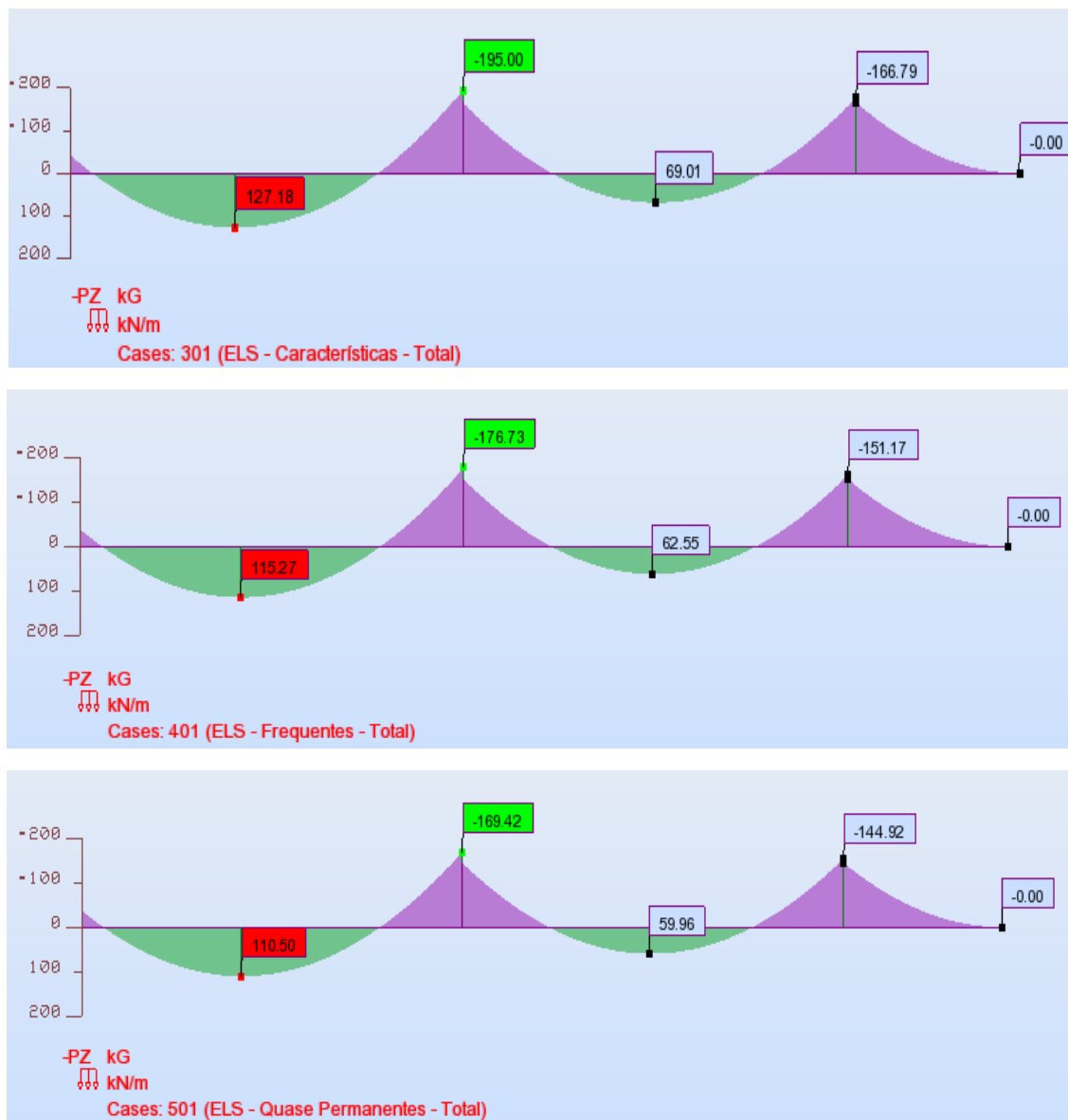


Figura 65 - Diagramas dos momentos flectores no pórtico e piso em estudo para a cada combinação de acções (características, frequentes e quase permanentes)

**Nota:** Na análise e verificação aos estados limites de utilização, serão apenas necessários os esforços relativos às combinações das acções quase permanentes e características.

Estão apresentados nas seguintes figuras, para cada tramo do pórtico e piso em estudo, os diagramas dos momentos flectores para as respectivas combinações, bem como os seus valores máximos, mínimos e respectivas distâncias desses mesmos valores.

• Tramo de Extremidade

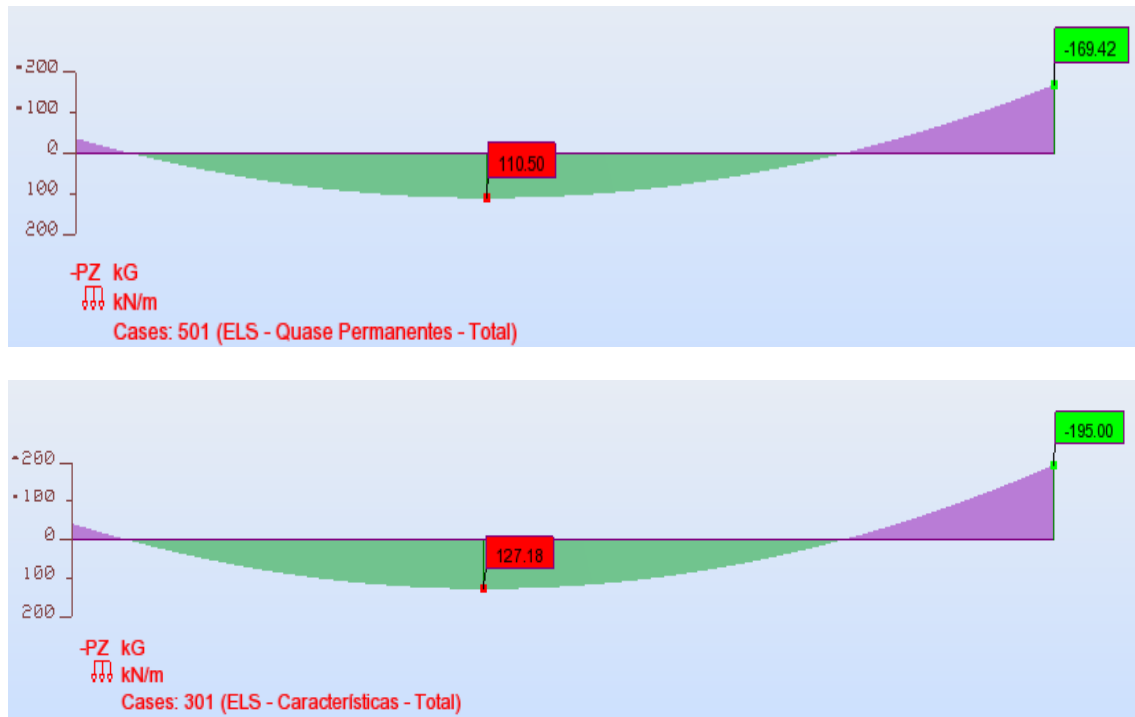


Figura 66 - Diagramas dos momentos flectores correspondentes às combinações de acções quase-permanente e característica para o tramo de extremidade

Bar / Point (m)	MY (kNm)	Bar / Point (m)	MY (kNm)
4 / origin	-43,01	4 / origin	-37,37
4 / user x=0,125	-26,58	4 / user x=0,125	-23,09
4 / MAX MY x=2,520	127,18	4 / MAX MY x=2,520	110,50
4 / user x=5,875	-172,23	4 / user x=5,875	-149,65
4 / end	-195,00	4 / end	-169,42

Figura 67 - Valores dos momentos flectores das combinações de acção característica (esquerda) e quase-permanente (direita) correspondentes ao tramo de extremidade

• Tramo Intermédio

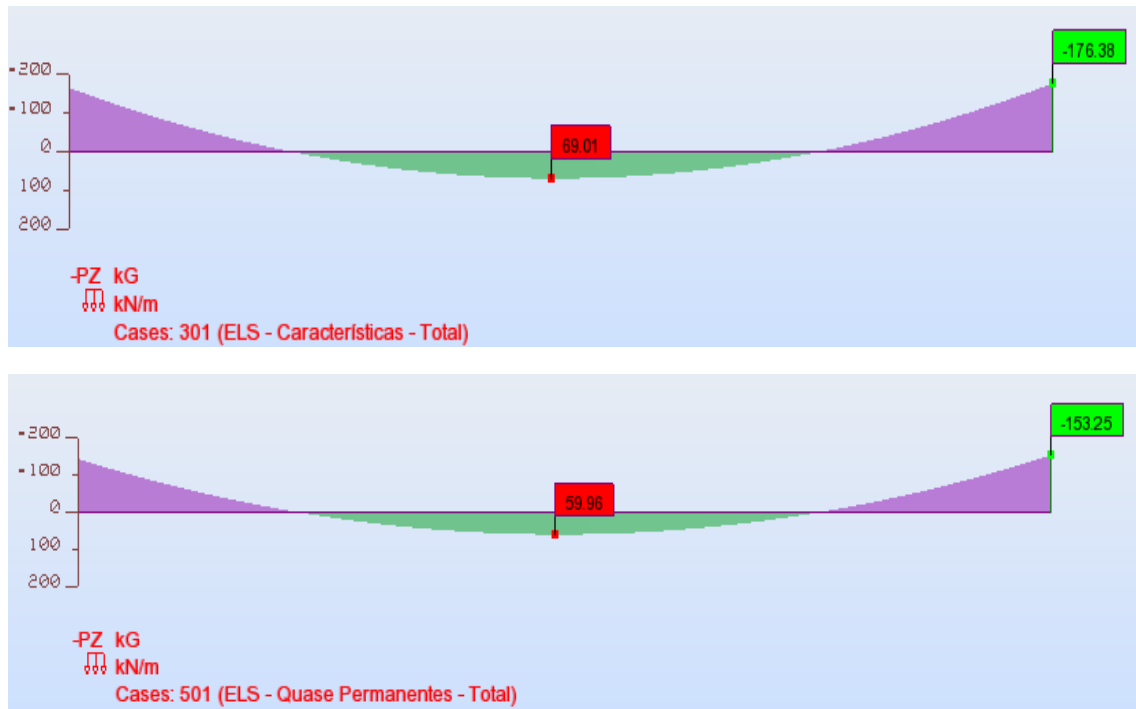


Figura 68 - Diagramas dos momentos flectores correspondentes às combinações de acções quase-permanente e característica no tramo intermédio

Bar / Point (m)	MY (kNm)	Bar / Point (m)	MY (kNm)
5 / origin	-165,96	5 / origin	-144,20
5 / user x=0,125	-146,58	5 / user x=0,125	-127,36
5 / MAX MY x=3,000	69,00	5 / MAX MY x=3,000	59,95
5 / user x=5,875	-156,57	5 / user x=5,875	-136,03
5 / end	-176,38	5 / end	-153,25

Figura 69 - Valores dos momentos flectores das combinações de acção característica (esquerda) e quase-permanente (direita) correspondentes ao tramo intermédio

• Tramo em Consola

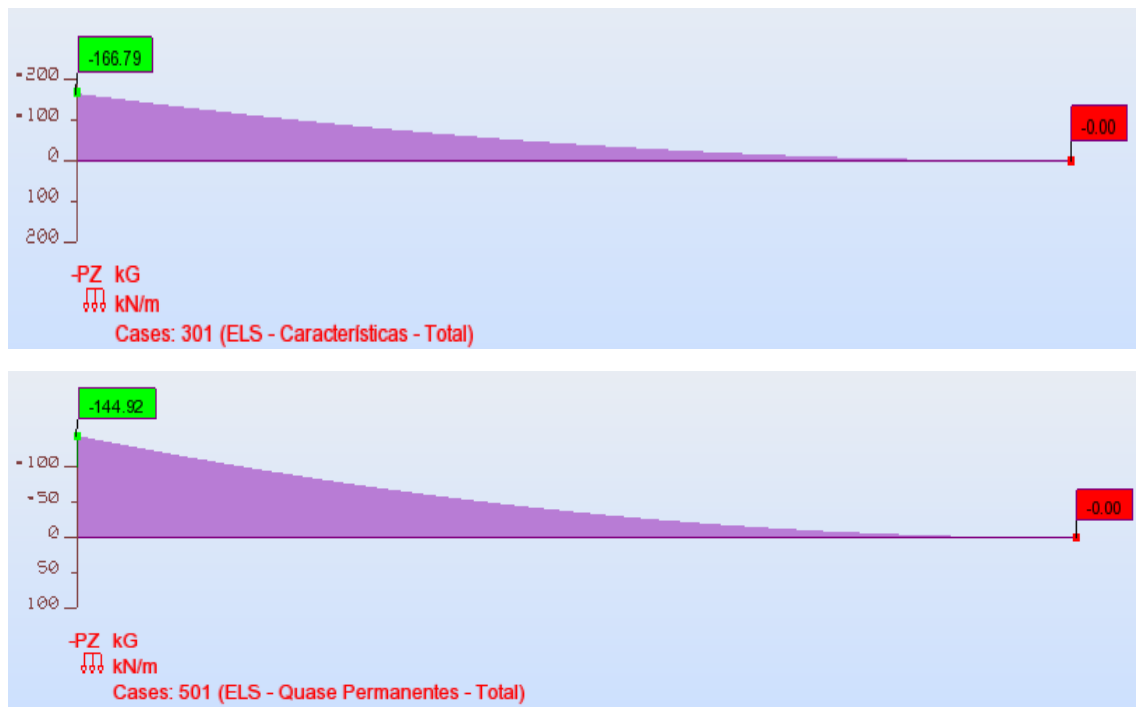


Figura 70 - Diagramas dos momentos flectores correspondentes às combinações de acções quase-permanente e característica no tramo em consola

Bar / Point (m)	MY (kNm)	Bar / Point (m)	MY (kNm)
6 / origin	-166,79	6 / origin	-144,92
6 / user x=0,125	-150,53	6 / user x=0,125	-130,79
6 / end	-0,00	6 / end	-0,00

Figura 71 - Valores dos momentos flectores das combinações de acção característica (esquerda) e quase-permanente (direita) correspondentes ao tramo em consola

### 4.3 MÉTODO ANALÍTICO

A partir de expressões analíticas, será realizado o dimensionamento da armadura de flexão de modo a cumprir os estados limites últimos e posteriormente nas secções em estudo a verificação dos estados correntes presentes no estado limite de utilização (tensões, fendilhação e deformação).

#### 4.3.1 Verificação ao estado limite último

No dimensionamento analítico das armaduras longitudinais de modo a verificar a resistência à flexão, teve-se em consideração os seguintes factores:

- Relação económica entre a percentagem e armadura e da secção adoptada, o momento flector reduzido deverá estar compreendido no intervalo  $0.20 \leq \mu \leq 0.30$ .
- As áreas mínimas e máximas das armaduras de acordo com o *Eurocódigo 2* têm as seguintes expressões:
  - Área mínima:  $A_{s,min} = 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_w d$  (4.1)
  - Área máxima:  $A_{s,máx} = 0.04 A_c$  (4.2)
- Recobrimento mecânico (até ao eixo da armadura longitudinal) de 4cm.

Na tabela seguinte, encontram-se os valores dos momentos de cálculo de modo a obter os momentos flectores reduzidos ( $\mu$ ).

Tabela 5 - Valores das características geométricas e dos momentos flectores reduzidos em função dos momentos flectores retirados do programa de cálculo automático

Portico	Vão	Características Geométricas		Robot	
		Dimensões da Secção (m)		$M_{SD, ult}$ (kN.m)	$0,20 < \mu < 0,30$
		Altura - h	Largura - b		
Central	Extremo	0,55	0,25	268,73	0,21
	Intermédio	0,55	0,25	243,07	0,19
	Consola	0,55	0,25	229,85	0,18

O passo seguinte será calcular as áreas das armaduras a serem adoptadas de modo a estarem compreendidas nos valores mínimos e máximos regulamentares. Na tabela seguinte apresentam-se os valores das áreas das armaduras mínimas e necessárias de modo a verificar os estados limites últimos.

Tabela 6 - Valores das armaduras mínimas e necessárias para a verificação dos estados limites últimos

Portico	Vão	Robot		$\mu$		Tabelas		Armadura Mínima (cm <sup>2</sup> )	Armadura Necessária (cm <sup>2</sup> )	
		Momentos (kN.m)				$\varpi$			As,min	As,p (+)
		(+)	(-)	(+)	(-)					
Central	Extremo	175,27	59,28	0,140	0,047	0,152	0,048	1,89	8,54	2,76
			268,73		0,215		0,246			14,14
	Intermédio	95,10	228,71	0,076	0,183	0,079	0,205		4,54	11,78
			243,07		0,194		0,212			12,18
	Consola	0,00	229,85	0,000	0,184	0,000	0,206		1,89	11,84

De acordo com os valores da tabela anterior, estão apresentadas na seguinte tabela as armaduras longitudinais adoptadas, para cada tramo.

Tabela 7 - Armaduras longitudinais adoptadas

Armadura Longitudinal					
Porticos	Tramo	Vão		Apoio	
		As,l (cm <sup>2</sup> )	As,l (+)	As,l (cm <sup>2</sup> )	As,l (-)
Central	Extremo	10,05	5Ø16	6,28	2Ø20
	Intermédio	6,03	3Ø16	15,71	5Ø20
	Consola	4,02	2Ø16	12,57	4Ø20

**Nota:** No ANEXO A, encontra-se a solução estrutural bem como a respectiva disposição de armaduras no pórtico em estudo nas secções consideradas para o estado limite último.

### 4.3.2 Verificação aos estados limites de utilização

Para o cálculo e verificação aos estados limites de utilização pelo método analítico, foram considerados os seguintes factores:

- As propriedades do betão a longo prazo ( $t_{\infty}$ ), referem-se na cura do betão aos 28 dias;
- No cálculo do módulo de elasticidade foi utilizado a equação 2.16;
- Retracção de secagem do betão com início ao fim de 7 dias ( $t_s = 7$  dias);
- Foram desprezados no cálculo esforços axiais (compressão);
- Agregados utilizados no betão são do tipo *Quartzíticos*;
- Perímetro da secção transversal em contacto com o ambiente é de 1,60m ( $\mu = 1,60m$ );
- Recobrimento mecânico (até ao eixo da armadura longitudinal) de 4cm.

Encontram-se nas seguintes tabelas os valores e respectivos cálculos, com base nos parâmetros anteriormente referidos para os coeficientes de fluência e homogeneização, bem como o módulo de elasticidade efectivo e retracção.

Tabela 8 - Propriedades do betão para os instantes  $t_0$  e  $t_{\infty}$

Propriedades do Betão										
s	$\beta_{cc}(t_0)$	$f_{cm}(t_0)$	$f_{ck}(t_0)$	$f_{ctm}(t_0)$	$E_{cm}(t_0)$	$\beta_{cc}(28)$	$f_{cm}(28)$	$f_{ck}(28)$	$f_{ctm}(28)$	$E_{cm}(28)$
0,25	0,962	36,56	28,56	2,79	32,46	1,00	38,00	30,00	2,90	32,84

Tabela 9 – Parâmetros necessários para o cálculo dos módulos de elasticidade efectiva, coeficientes de fluência e homogeneização

	Secção	Altura (m)	Largura	Área (m <sup>2</sup> )	$\mu$ (m)	$h_0$ (mm)					
	Rectangular	0,55	0,25	0,138	1,600	171,88					
Humidade relativa "RH"	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\Phi_{RH, t_0}$	$\beta_{H,0}$	$\beta(t_0)$	$\beta(t_{em})$	$\Phi_0$	$\beta_C(t_0)$	$\beta_C(t_{\infty}, t_0)$	
80%	0,944	0,984	0,960	1,318	621,39	0,516	2,725	1,85	0,000	1,000	

Tabela 10 - Valores do coeficiente de fluência, módulo de elasticidade efectiva e coeficiente de homogeneização nos instantes  $t_0$  e  $t_\infty$

Coeficiente de Fluência		Módulos de Elasticidade		Coeficiente de Homogeneização	
$\phi(t_0)$	$\phi(t_\infty, t_0)$	$E_{c,eff}(t_0)$	$E_{c,eff}(t_\infty)$	$\alpha_E(t_0)$	$\alpha_E(t_\infty)$
0,00	<b>1,85</b>	32,46	<b>12,09</b>	6,16	<b>16,55</b>

Tabela 11 - Valores da retracção por secagem, autógena e total no instante  $t_\infty$ .

Secagem $\epsilon_{cd,0}$				Autógena $\epsilon_{ca,\infty}$			Retracção Total $\epsilon_{cs}$	
$\beta_{RH}$	$\epsilon_{cd,0}$ (m/m)	$T_\infty$			$\epsilon_{ca,\infty}$ (m)	$T_\infty$		$T_\infty$
		$t_s$	$\beta_{ds}(t_0, t_\infty)$	$\epsilon_{cd,t_\infty}$ (m/m)		$\beta_{as}(t_\infty)$	$\epsilon_{ca,t_\infty}$ (m)	
0,7564	0,00026895	7	1,000	<b>-0,000240</b>	0,000050	1,000	<b>-0,000050</b>	<b>-0,000290</b>

Tabela 12 - Valores de recobrimento e altura útil em função das armaduras longitudinais adoptadas

Armaduras Longitudinais		Recobrimento				Altura Útil "d" (m)	
		Face da Armadura "c" (m)		Ao eixo da Armadura "a" (m)			
Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	M (+)	M (-)
$\phi 20$	$\phi 16$	0,025	0,025	0,041	0,039	0,511	0,509

**Nota:** Foram demonstrados os valores nos instantes  $t_0$  e  $t_\infty$  das tabelas 8 e 10 de forma a comparar as diferenças dos valores ao longo do tempo, com a excepção da retracção. Pode-se visualizar a evolução dos valores pela figura 13, figura 26 e quadro 5 do presente trabalho.

#### 4.3.2.1 Metodologia para o cálculo de cada um dos estados limites de utilização

A partir da solução e disposição de armaduras obtidas analiticamente para o pórtico em estudo, a verificação para cada um dos estados limites de utilização a longo prazo ( $t_\infty$ ) nas secções críticas presentes em cada tramo, será realizado da seguinte forma:

##### I. Tensões

- Cálculo dos parâmetros área homogeneizada, eixo neutro e inércia nos estados não fendilhado (Estado I) e fendilhado (Estado II);

- b. Cálculo do momento de fendilhação em cada secção e verificar se o momento actuante referente á combinação de **acções quase-permanentes** é inferior ou superior ao momento de fendilhação.
- c. Cálculo das tensões no betão e na armadura utilizando as equações dos quadros 13 e 14, que se encontram no presente trabalho, conforme as secções críticas estejam em estado não fendilhado (Estado I) ou fendilhado (Estado II);
- d. Verificação da linearidade da fluência do betão, a partir das tensões de compressão do betão obtidas pela combinação de **acções quase-permanentes**;
- e. Verificação da deformabilidade elástica da armadura a partir das tensões de tracção nas armaduras, obtidas pela combinação de **acções características**.

## II. Fendilhação

- a. Cálculo das extensões no betão e na armadura bem como o cálculo da extensão média relativa entre a armadura e o betão em todas as secções;
- b. Cálculo da largura de fenda nas secções que se encontram fendilhadas para a combinação de **acções quase permanente**.

## III. Deformação

No cálculo da deformação teve-se em conta os seguintes factores:

- A deformação máxima em cada tramo está presente nas secções B-B, E-E e H-H;
- O valores dos momentos flectores actuantes a serem considerados no cálculo da deformação são referentes à combinação de **acções quase-permanente**;
- O cálculo da deformação foi executado por dois tipos de procedimento, pelo método simplificado e pelo método exacto.

O procedimento de cálculo para cada um dos métodos procede-se da seguinte forma:

### **Método Exacto**

- a. Divisão de cada tramo em 21 pontos (secções), considerando as distâncias de cada tramo até ao eixo dos pilares, obtendo-se afastamentos nos tramos de extremidade e intermédio de 0,30m e no tramo em consola afastamentos mais pequenos de 0,125m;
- b. Em todos os pontos de divisão de cada tramo:
  - i. Obter o momento flector actuante referente à combinação de **acções quase permanente**;
  - ii. Calcular a área homogeneizada, eixo neutro e inércia e momento estático nos estados não fendilhado (Estado I) e fendilhado (Estado II);
  - iii. Calcular o momento flector de fendilhação;
  - iv. Verificar o estado de secção de cada ponto de divisão;
  - v. Calcular a curvatura à flexão e retracção nos estados não fendilhado (Estado I) e fendilhado (Estado II);
  - vi. Calcular o coeficiente de repartição;
  - vii. Obter a curvatura intermédia entre os estados não fendilhado (Estado I) e fendilhado (Estado II) para a deformação referente à flexão e retracção;
- c. Integrar numericamente duas vezes as curvaturas referente à flexão e retracção, usando a regra do trapézio de modo a obter a flecha máxima;
- d. A flecha total será o somatório das flechas devido aos esforços de flexão e da retracção.

**Nota:** A flecha ser negativa ou positiva, de acordo com a sua curvatura. Considera-se curvatura positiva quando a flecha está no sentido da acção gravítica e negativo o inverso.

### Método Simplificado

- a. Apenas para as secções B-B;E-E e H-H de cada tramo:
  - i. Obter o momento flector actuante máximo referente à combinação de **acções quase permanente**;
  - ii. Calcular a área homogeneizada, eixo neutro e inércia e momento estático nos estados não fendilhado (Estado I) e fendilhado (Estado II)
  - iii. Calcular o momento flector de fendilhação;
  - iv. Calcular a curvatura à flexão e retracção nos estados não fendilhado (Estado I) e fendilhado (Estado II);
  - v. Calcular o coeficiente de repartição;
  - vi. Obter a curvatura intermédia entre os estados não fendilhado (Estado I) e fendilhado (Estado II) para a deformação referente à flexão e retracção;
  - vii. Calcular o coeficiente de carregamento, atendendo às condições de apoio e carregamento;
  - viii. A flecha total será o somatório das flechas devido aos esforços de flexão e da retracção, podendo esta flecha ser negativa ou positiva, de acordo com a sua curvatura.

**Nota:** A flecha ser negativa ou positiva, de acordo com a sua curvatura. Considera-se curvatura positiva quando a flecha está no sentido da acção gravítica e negativo o inverso.

#### 4.4 PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO - *ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL 2014*

O programa de cálculo automático dispõe de dois módulos de dimensionamento estrutural, que são os seguintes:

- *Required Reinforcement*
- *Provided Reinforcement*

Na figura que se segue encontra-se assinalado de cor vermelha os módulos de dimensionamento anteriormente referidos.

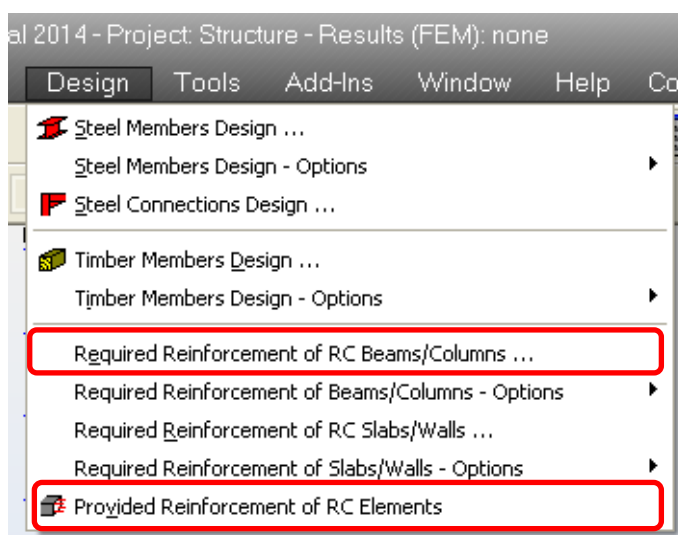


Figura 72 – Módulos de dimensionamento estrutural

Dos módulos anteriormente referidos, as fases de cálculo a serem realizadas são as seguintes:

1. Cálculo de área da armadura necessária, face aos esforços instalados e suas verificações da capacidade resistente, das secções de betão;
2. Gerar a distribuição de armaduras nos diferentes elementos estruturais e de acordo com as disposições construtivas regulamentares.

#### 4.4.1 Módulo *Required Reinforcement*

O procedimento e as respectivas configurações para o cálculo do pórtico e piso em estudo a realizar pelo módulo *Required Reinforcement*, está representado sequencialmente pelas figuras presentes no ponto B.1 do ANEXO B.

##### 4.4.1.1 Parâmetros utilizados no cálculo

A partir dos parâmetros mencionados no ponto 4.2.2 do presente trabalho referente aos estados limites de utilização, foram consideradas várias situações de cálculo tendo em conta os parâmetros que se encontram contornados de cor verde nas seguintes figuras.

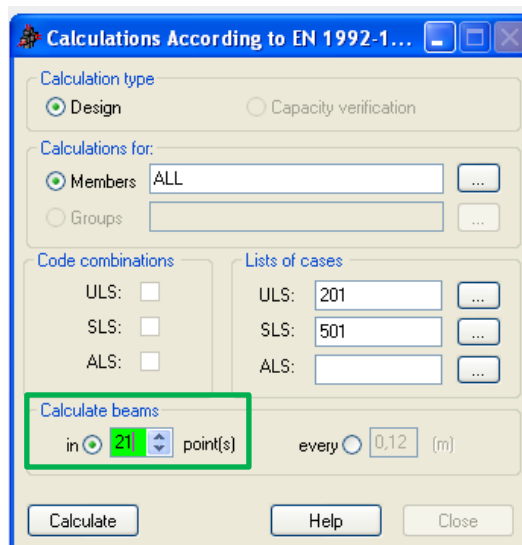


Figura 73 – Opções de cálculo de acordo com o *Eurocódigo 2*

No parâmetro que define o número de pontos a serem considerados no cálculo dos elementos (*Calculate Beams in x points*), foram optados os seguintes valores:

- 5 pontos, sendo o valor que o programa neste módulo atribui por defeito;
- 11 pontos;
- 21 pontos (conforme foi utilizado no cálculo da deformação pelo método analítico).

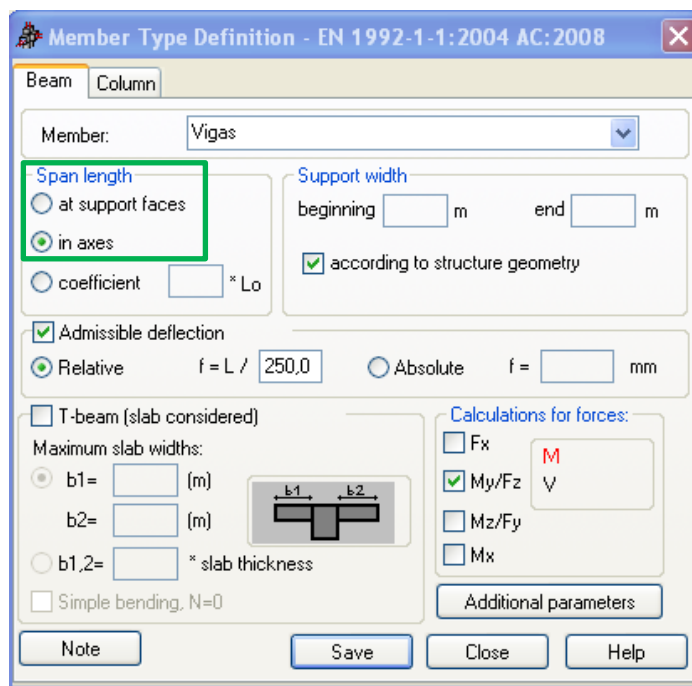


Figura 74 – Definição do tipo de membros

No parâmetro que define o comprimento efectivo das vigas (*span length*), foi apenas optado para o cálculo, o comprimento efectivo da viga entre eixos de pilares.

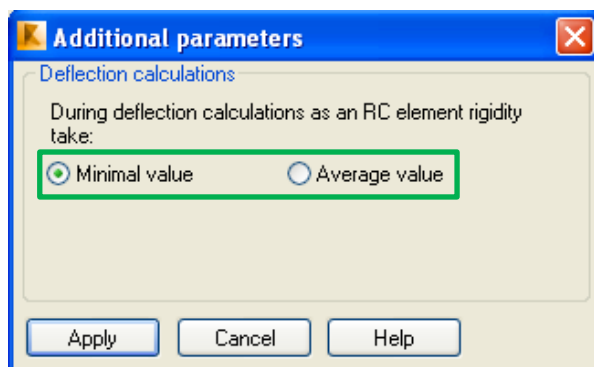


Figura 75 – Definição dos parâmetros adicionais relativamente ao cálculo da flecha

No parâmetro que define a rigidez para o cálculo referente à flecha, foram optados para o cálculo as seguintes situações:

- Valor mínimo (*Minimal value*)
- Valor médio (*Average value*)

#### 4.4.2 Módulo *Provided Reinforcement*

Este módulo de cálculo estrutural pode ser executado de três formas, sendo:

- Forma independente, ou seja, *Stand alone module*;
- Pelo seguimento da modelação da estrutura;
- Pela utilização do comando *Typical Reinforcement*.

**Nota:** Na análise do caso em estudo serão executadas as formas de cálculo b) e c).

##### 4.4.2.1 Modelação Estrutural

Esta forma de cálculo por modelação estrutural consiste na selecção dos elementos a que se pretendam dimensionar e fazer a sua verificação. Na figura que se segue, encontram-se seleccionados de cor vermelha os elementos em análise de forma a proceder o respectivo cálculo e verificação aos respectivos estados limites.

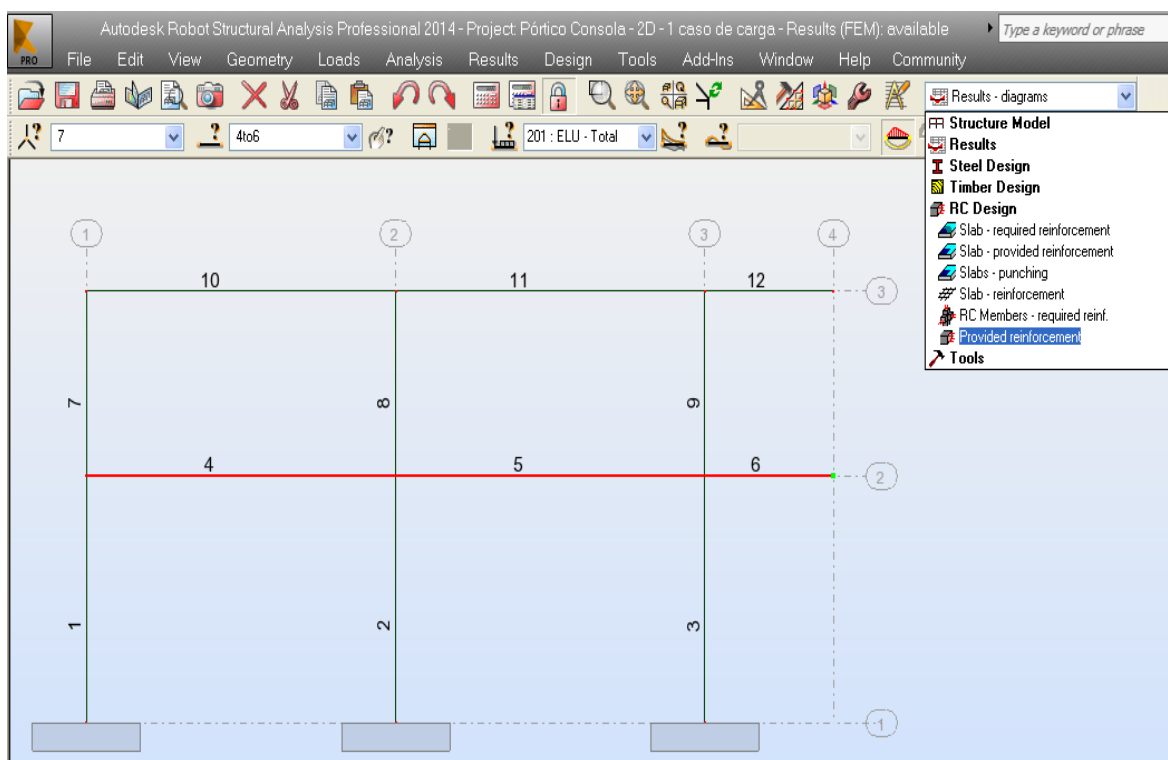


Figura 76 – Selecção dos elementos estruturais para proceder ao cálculo módulo *Provided Reinforcement*

O procedimento e as respectivas configurações, no cálculo do pórtico e piso em estudo, executado pelo módulo *Provided Reinforcement*, estão representadas sequencialmente pelas figuras presentes no ponto **B.2** do **ANEXO B**.

Tal como no módulo *Required Reinforcement* mas com os menus respectivos deste módulo *Provided Reinforcement*, foram consideradas as mesmas situações de cálculo e parâmetros que se encontram contornados de cor verde nas seguintes figuras:

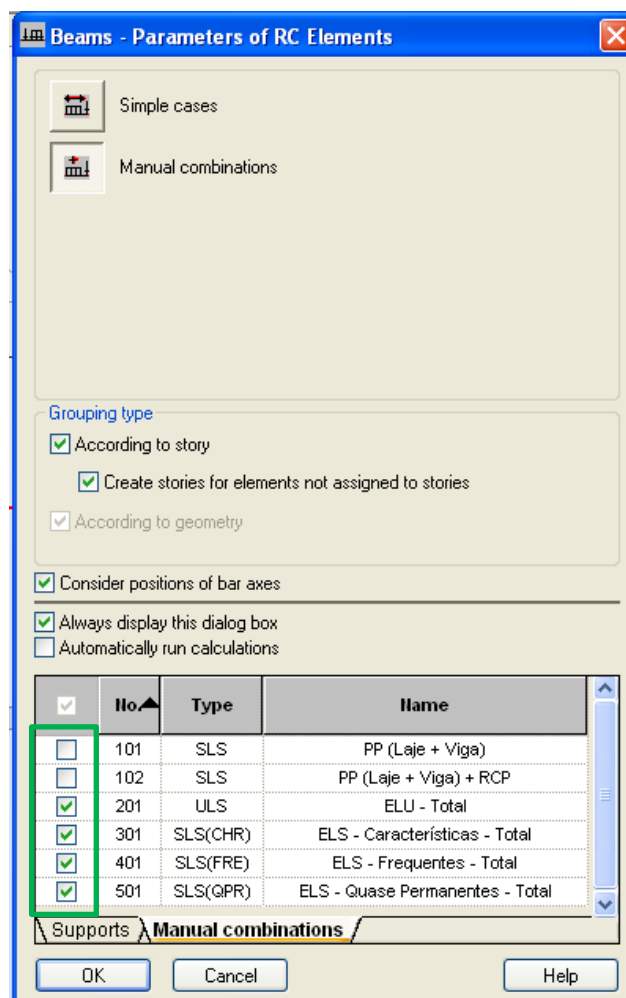


Figura 77 – Parâmetros para o cálculo das vigas, referente às combinações escolhidas

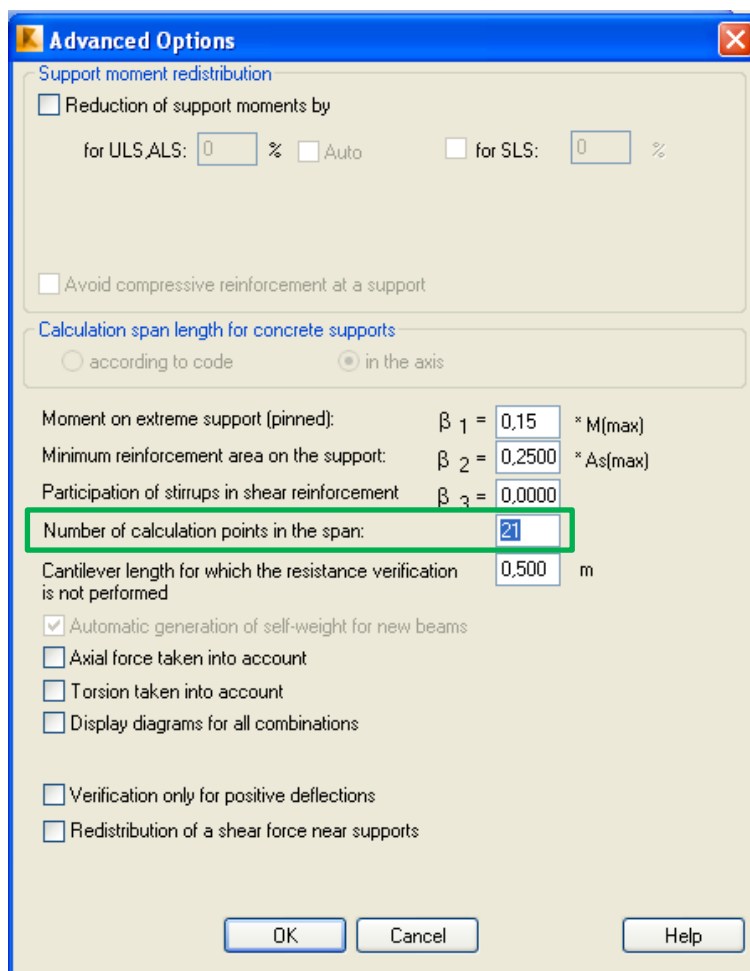


Figura 78 – Opções Avançadas

De acordo com a figura anterior e atendendo ao parâmetro que define o número de pontos a serem considerados no cálculo nos vãos das vigas (*Number of calculation points in the span*), foram optados os mesmos pontos, sendo que:

- 5 pontos;
- 11 pontos, sendo o valor que o programa neste módulo atribui por defeito;
- 21 pontos, conforme foi utilizado no cálculo da deformação pelo método analítico.

Utilizando apenas o módulo *Provided Reinforcement*, o programa irá gerar uma solução estrutural de acordo com o diâmetro das armaduras que foram pré-estabelecidas para o cálculo.

#### 4.4.2.2 Comando *Typical Reinforcement*

O comando *Typical Reinforcement* presente no módulo *Provided Reinforcement*, permite ao utilizador editar os elementos seleccionados, ou seja editar a disposição das armaduras a partir de uma análise já efectuada analiticamente.

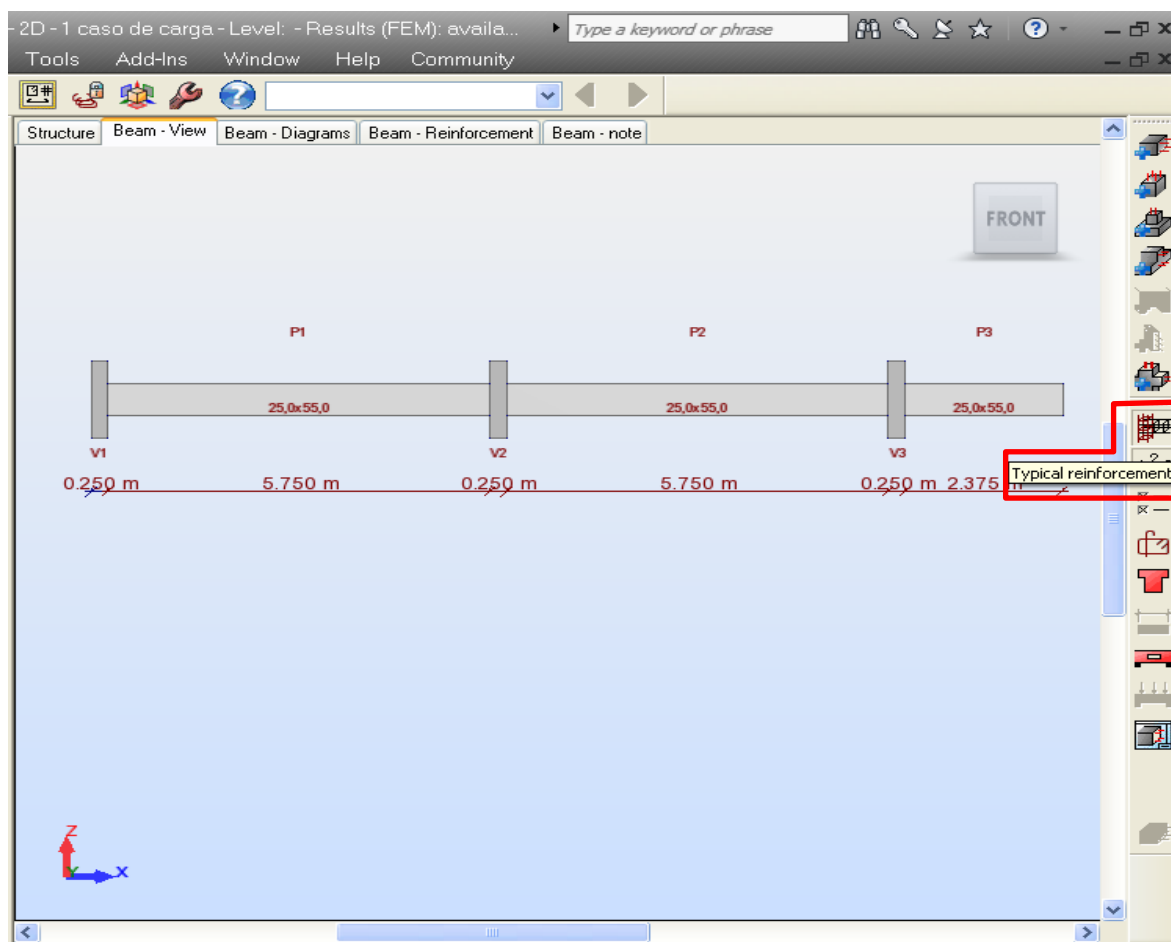


Figura 79 – Comando *Typical Reinforcement*

O procedimento para as disposições das armaduras do pórtico e piso em estudo realizado pelo módulo *Provided Reinforcement* e pelo comando *Typical Reinforcement*, representa-se sequencialmente pelas figuras presentes no ponto **B.3** do **ANEXO B**. As respectivas configurações, situações e parâmetros para o cálculo são as mesmas presentes do ponto **B.2** do **ANEXO B**.

## 4.5 PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO *XD – CONSERV*

O programa *XD-Conserv* é um programa bastante simples e intuitivo que tem apenas como finalidade a verificação dos estados limite de utilização segundo o *Eurocódigo 2*. Na figura seguinte apresenta-se o menu principal do programa.

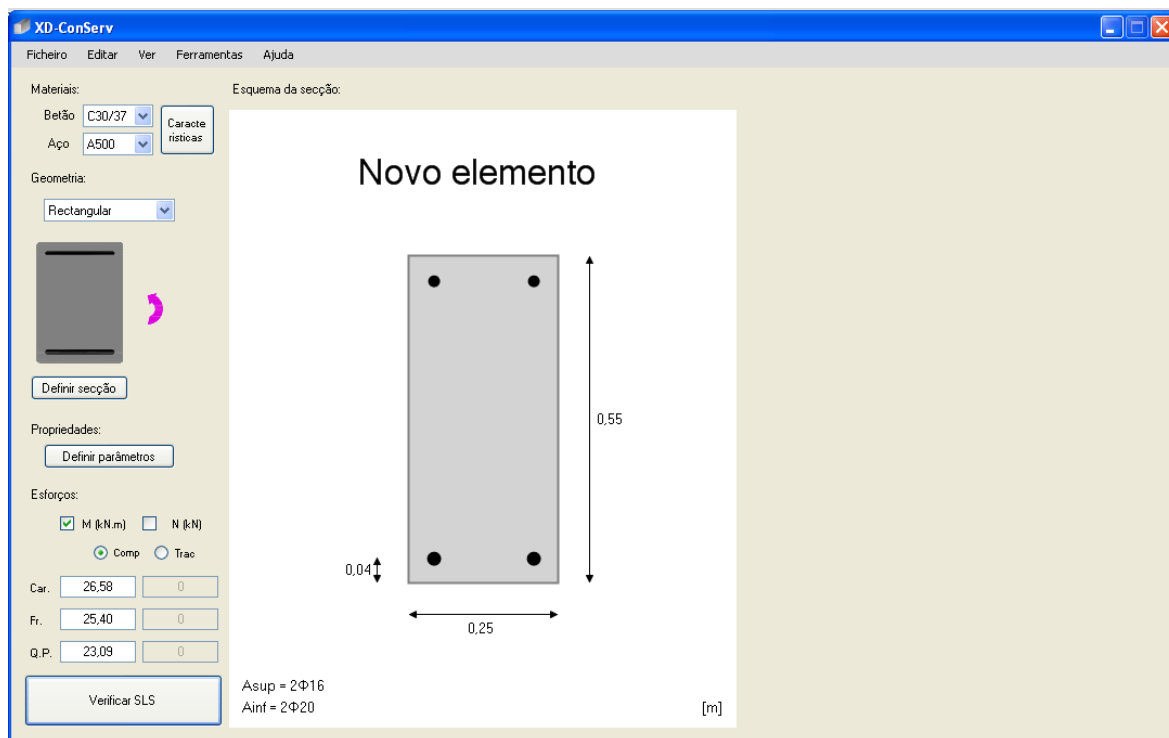


Figura 80 – Interface principal do programa

### 4.5.1 Parâmetros utilizados no cálculo

Na verificação aos estados limites de utilização (estado de tensão, fendilhação e deformação) referente às secções críticas consideradas (secções A-A a H-H) no pórtico e piso em estudo, foram utilizadas os parâmetros principais mencionados no ponto 4.2.2 e ponto 4.3.2 do presente trabalho.

**Nota:** Os valores inseridos e editados no programa encontram-se contornados de cor verde nas figuras ponto B.4 do ANEXO B.



## RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo encontram-se os resultados obtidos, para cada um dos estados limites de utilização e de acordo com cada método de cálculo realizado nas secções em análise do pórtico central e piso em estudo.

A apresentação dos resultados no presente capítulo terá os seguintes pontos:

- Soluções de disposição de armaduras obtidas por todos os métodos realizados com excepção do programa XD-Conserv;
- Resultados referente a cada estado limite de utilização, realizados individualmente por cada método realizado e por cada módulo do programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis Professional 2014*;
- Resumo dos resultados, referente a cada estado limite de utilização, por todos os métodos apresentados.

### 5.1 SOLUÇÃO DE DISPOSIÇÃO DE ARMADURAS

#### 5.1.1 Método Analítico

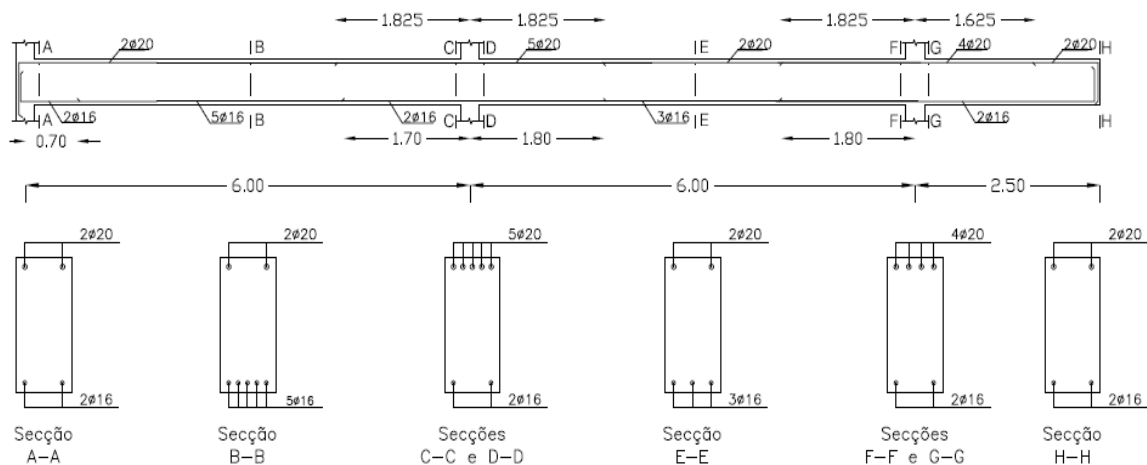
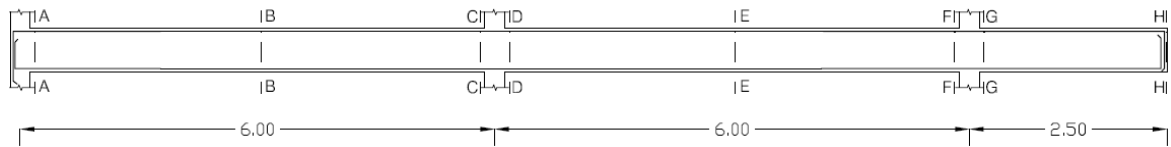


Figura 81 – Disposição da armadura adoptada analiticamente com as respectivas secções

### 5.1.2 Robot Structural Analysis Professional 2014



#### Required Reinforcement

Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Pontos								
21	2 $\phi$ 20		5 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20		4 $\phi$ 20		2 $\phi$ 20
11								
5		5 $\phi$ 16			3 $\phi$ 16			

#### Provided Reinforcement

Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Pontos								
21		2 $\phi$ 16			2 $\phi$ 16			
11	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20
5	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	2 $\phi$ 16

#### Provided Reinforcement (comando Typical Reinforcement)

Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Pontos								
21	2 $\phi$ 20	2 $\phi$ 20	5 $\phi$ 20	2 $\phi$ 20	4 $\phi$ 20	2 $\phi$ 16	2 $\phi$ 16	2 $\phi$ 20
11								
5	2 $\phi$ 16	5 $\phi$ 16	2 $\phi$ 16	3 $\phi$ 16	2 $\phi$ 16	2 $\phi$ 16	2 $\phi$ 16	2 $\phi$ 16

Figura 82 - Disposição das armaduras obtidas em cada módulo de dimensionamento do *Robot* atendendo o número de pontos no cálculo e respectivas secções críticas em cada tramo

## 5.2 ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

Atendendo às soluções e disposições de armaduras obtidas no ponto anterior encontram-se seguidamente para cada método de cálculo realizado, os resultados para cada um dos estados limites de utilização, tensões, fendilhação e deformação nas secções críticas.

### 5.2.1 Robot Structural Analysis Professional 2014

#### 5.2.1.1 Módulo *Required Reinforcement*

- FENDILHAÇÃO

Tabela 13 - Valores de largura de fenda nas secções em estudo e a respectiva verificação

Largura de Fendas - $w_k$ (Combinação de acções Quase Permanentes)										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Número de divisões realizados no cálculo	21 Pontos	$W_k$ (mm)	-	0,235	0,258			0,262	-	
	11 Pontos	$W_k$ (mm)	-	0,223	0,202			0,221	-	
	5 Pontos	$W_k$ (mm)	-	0,188	0,199			0,197	-	
Classe de Exposição		XC1								
Valor Limite $W_{k,máx}$ (mm)		0,40								

Relativamente aos dados fornecidos da tabela anterior, verifica-se que:

- Todos os valores de largura de fenda, em todas as secções de cada tramo, cumprem o valor máximo admissível atendendo aos números de divisões no cálculo do elemento;
- O elemento calculado com o número de divisões de 21 pontos possui os valores de largura de fenda mais elevados, sendo estes valores acrescidos entre 25% a 30% dos valores de largura fenda realizados no elemento calculado com 5 pontos;

- É apresentado para todas as secções, do tramo de extremidade e intermédio, o valor da largura de fenda, dado que este módulo não identifica a posição da largura de fenda máxima no respectivo tramo apenas o valor mais elevado

▪ DEFORMAÇÃO

Tabela 14 – Valores das flechas nas secções em estudo atendendo ao número de pontos que o elemento foi calculado e a rigidez seleccionada

Flechas a longo Prazo - $w_t$ (Combinação de acções Quase Permanentes)						
Tramo			Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção			B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção			<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
Número de divisões realizados no cálculo	21 Pontos	Rigidez Média	$w_t$ (mm)	12,74	4,59	9,59
		Rigidez Mínima		18,24	6,82	14,74
	11 Pontos	Rigidez Média	$w_t$ (mm)	12,73	4,26	9,36
		Rigidez Mínima		16,33	5,71	14,45
	5 Pontos	Rigidez Média	$w_t$ (mm)	10,49	3,42	9,57
		Rigidez Mínima		13,37	5,40	13,60
Valor Limite $W_{t,adm}$ (mm)			24,00	24,00	10,00	

Relativamente aos dados fornecidos da tabela anterior, verifica-se que:

- O valor da flecha a longo prazo aumenta em todas as secções à medida que o número de divisões no cálculo aumenta, obtendo assim o valor mais elevado da flecha em cada tramo com o cálculo do elemento referente a 21 pontos;
- Quando o cálculo do elemento é submetido a rigidez média, o valor da flecha corresponde um valor inferior na ordem dos 20% a 35% comparativamente ao cálculo do elemento com rigidez mínima;
- O valor da flecha apenas não cumpre o valor máximo admissível no tramo em consola, quando o cálculo do elemento é realizado com rigidez mínima e por qualquer número de divisões realizado no cálculo.

### 5.2.1.2 Módulo *Provided Reinforcement*

▪ TENSÕES

Tabela 15 - Valores das tensões nas secções em estudo e a respectiva verificação

Tensões - $\sigma$										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Número de divisões realizadas no cálculo	21 Pontos	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	1,53	-9,03	8,22	7,00	-4,91	8,45	9,31	0,00
		$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	26,15	-232,74	301,55	256,79	-126,70	274,22	265,14	0,00
	11 Pontos	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	1,92	-9,03	8,26	7,04	-4,91	8,51	9,33	0,00
		$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	32,78	-232,74	303,30	258,54	-126,70	276,00	266,39	0,00
	5 Pontos	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	2,22	-5,76	8,50	7,23	-3,28	7,83	8,33	0,00
		$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	222,82	-211,44	311,90	265,46	-120,41	282,55	269,13	0,00
Verificação	$\sigma_c < f_{ck}$	30 MPa								
	$\sigma_s < 0,8 f_{syk}$	400 MPa								

Relativamente aos dados fornecidos da tabela anterior, verifica-se que:

- Todos os valores de tensões de compressão no betão e de tracção na armadura em todas as secções de cada tramo, cumprem o valor máximo admissível atendendo a todos os números de divisões realizadas no cálculo.
- Não existe variação de valores das tensões no betão e na armadura nas secções B-B e E-E, quando o elemento é submetido às divisões de cálculos de 11 pontos e 21 pontos;
- A diferença de valores das tensões no betão e na armadura, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 11 pontos e 21 pontos, é muito pequena na ordem dos 0,5% em todas das secções junto à face dos pilares com a excepção da secção A-A, cuja diferença de valores é cerca de 20%.
- Os valores das tensões no betão e na armadura nas secções B-B e E-E encontram-se como negativos, devido à convenção de sinal dos diagramas de tensões no *Robot*.

- O elemento calculado com o número de divisões de 21 pontos obtém os maiores valores de largura de fenda (zonas inferiores da viga) nas secções B-B e E-E, em quanto que nas restantes secções de cada tramo (zonas superiores da viga) obtém valores mais baixos.

▪ FENDILHAÇÃO

Tabela 16 - Valores de largura de fenda nas secções em estudo e a respectiva verificação

Largura de Fendas - $w_k$ (Combinação de acções Quase Permanentes)										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Número de divisões realizadas no cálculo	21 Pontos	$W_{k,Sup}$ (mm)	-	-	0,205	0,170	-	0,186	0,180	-
		$W_{k,Inf}$ (mm)	-	0,152	-	-	0,070	-	-	-
	11 Pontos	$W_{k,Sup}$ (mm)	-	-	0,206	0,171	-	0,187	0,181	-
		$W_{k,Inf}$ (mm)	-	0,152	-	-	0,070	-	-	-
	5 Pontos	$W_{k,Sup}$ (mm)	-	-	0,213	0,177	-	0,190	0,180	-
		$W_{k,Inf}$ (mm)	-	0,135	-	-	0,065	-	-	-
Classe de Exposição		XC1								
Valor Limite $W_{k,máx}$ (mm)		0,40								

Relativamente aos dados fornecidos da tabela anterior verifica-se que:

- Todos os valores de largura de fenda em todas as secções de cada tramo, cumprem o valor máximo admissível para todos os números de divisões realizadas no cálculo;
- O elemento calculado com o número de divisões de 21 pontos, obtém os maiores valores de largura de fenda (zonas inferiores da viga) nas secções B-B e E-E em quanto que, nas restantes secções de cada tramo (zonas superiores da viga) obtém os valores mais baixos.
- Não existe variação de valores das tensões no betão e na armadura nas secções B-B e E-E, quando cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 11 pontos e 21 pontos;

- A diferença de valores de largura de fendas, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 11 pontos e 21 pontos, é muito pequena na ordem dos 0,5% em todas as secções que se encontram fendilhadas.

▪ DEFORMAÇÃO

Tabela 17 - Valores de largura de fenda nas secções em estudo e a respectiva verificação

Flechas a longo Prazo - $w_t$ (Combinação de acções Quase Permanentes)					
Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
Número de divisões realizados no cálculo	21 Pontos	$w_t$ (mm)	9,82	3,29	8,71
	11 Pontos	$w_t$ (mm)	9,68	3,29	8,71
	5 Pontos	$w_t$ (mm)	8,19	2,77	8,29
Valor Limite $W_{t,adm}$ (mm)			24,00	24,00	10,00

Relativamente aos dados fornecidos da tabela anterior verifica-se que:

- O valor da flecha a longo prazo aumenta em todas as secções à medida que o número de divisões no cálculo aumenta, obtendo assim o valor mais elevado da flecha em cada tramo com o cálculo no elemento referente a 21 pontos;
- O incremento da flecha, quando o cálculo do elemento é realizado com o número de divisões de 5 pontos e 21 pontos, é cerca de 20% nos tramos de extremidade e intermédio e apenas 5% no tramo em consola;
- Não existe variação de valores da flecha no tramo intermédio e na consola, quando o elemento é submetido às divisões de cálculos de 11 pontos e 21 pontos;
- O valor máximo da flecha a longo prazo em cada tramo e para qualquer número de divisões realizadas no cálculo, cumpre o valor máximo admissível.

Na seguinte figura apresentam-se resultados contornados a cor vermelha, referentes às flechas máximas a longo prazo, com a sigla  $w_t$  e à largura de fendas máxima com a sigla  $w_k$ , para cada tramo do pórtico atendendo à combinação seleccionada da figura 68.

Structure	Beam - View	Beam - Diagrams	Beam - Reinforcement	Beam - note		
Span	$w_t(QP)$ (mm)	$w_t(QP)dop$ (mm)	$Dwt(QP)$ (mm)	$Dwt(QP)dop$ (mm)	$w_k$ (mm)	⇒ Combinação de acções Característica
P1	11,279	24,000	5,700	0,000	0,240	
P2	3,825	24,000	2,173	0,000	0,215	
P3	9,393	10,000	4,625	0,000	0,000	
Span	$w_t(QP)$ (mm)	$w_t(QP)dop$ (mm)	$Dwt(QP)$ (mm)	$Dwt(QP)dop$ (mm)	$w_k$ (mm)	⇒ Combinação de acções Frequentes
P1	10,240	24,000	4,660	0,000	0,215	
P2	3,442	24,000	1,790	0,000	0,195	
P3	9,082	10,000	4,016	0,000	0,000	
Span	$w_t(QP)$ (mm)	$w_t(QP)dop$ (mm)	$Dwt(QP)$ (mm)	$Dwt(QP)dop$ (mm)	$w_k$ (mm)	⇒ Combinação de acções Quase Permanentes
P1	9,822	24,000	4,243	0,000	0,205	
P2	3,287	24,000	1,635	0,000	0,186	
P3	8,713	10,000	3,647	0,000	0,000	

Figura 83 - Resultados da flecha e largura de fendas máxima de acordo com a selecção da combinação

Relativamente aos resultados que são contornados de cor vermelha presentes na figura anterior verifica-se que:

- Os valores das flechas e da largura de fendas em cada tramo, são os mais elevados quando é seleccionada a combinação mais desfavorável (combinação característica);
- Sendo a sigla  $w_t$  ser referente aos valores das flechas para as acções quase permanentes, independente da escolha de combinação a ser calculada, os resultados são obtidos nessa coluna, devido a que o cálculo ser feito por combinação manual;
- Para todas as combinações de acções, os valores das flechas e da largura de fendas presentes em cada tramo, são inferiores aos valores máximos admissíveis.
- O valor da largura de fenda, para qualquer combinação, no tramo em consola é apresentado como valor zero, podendo o programa admitir na secção de flecha máxima.

### 5.2.1.3 Módulo *Provided Reinforcement* (comando *Typical Reinforcement*)

▪ TENSÕES

Tabela 18 – Valores das tensões nas secções em estudo e a respectiva verificação

Tensões - $\sigma$										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Número de divisões realizadas no cálculo	21 Pontos	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	-1,69	-7,89	-10,17	-8,66	-5,11	-9,88	-9,46	0,00
		$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	28,37	281,49	253,18	212,97	251,60	283,91	271,15	0,00
	11 Pontos	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	-2,12	-7,89	-10,23	-8,72	-5,11	-9,94	-9,49	0,00
		$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	35,56	281,49	254,68	214,62	245,44	285,83	271,83	0,00
	5 Pontos	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	-2,45	-7,54	-10,52	-8,95	-5,11	-10,16	-9,57	0,00
		$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	411,03	249,45	262,10	221,14	232,28	292,62	274,40	0,00
Verificação	$\sigma_c < f_{ck}$	30 MPa								
	$\sigma_s < 0,8 f_{syk}$	400 MPa								

Relativamente aos dados fornecidos da tabela anterior, verifica-se que:

- Todos os valores de tensões de compressão no betão em todas as secções de cada tramo, cumprem o valor máximo admissível atendendo a todos os números de divisões realizadas no cálculo.
- Todos os valores de tensões de tracção na armadura presentes em todas as secções de cada tramo, atendendo a todos os números de divisões realizadas no cálculo, com excepção da secção A-A em que o elemento é calculado com o número de divisão de 5 pontos, cumprem o valor máximo admissível.
- Quando o elemento é submetido às divisões de cálculos de 11 pontos e 21 pontos, não existe variação de valores das tensões no betão e na armadura na secção B-B, bem como não existe variação de valores apenas referentes às tensões no betão na secção E-E;
- Os valores das tensões no betão e na armadura nas secções B-B e E-E encontram-se como negativos, devido à convenção de sinal dos diagramas de tensões no *Robot*.

- A diferença de valores das tensões no betão e na armadura, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 11 pontos e 21 pontos, é muito pequena na ordem dos 0,7% em todas das secções junto à face dos pilares com a excepção da secção A-A, cuja diferença de valores é cerca de 25%.
- O elemento calculado com o número de divisões de 21 pontos obtém os maiores valores de tensões no betão nas secções B-B e E-E em quanto que, nas restantes secções de cada tramo obtém valores mais baixos referente às tensões na armadura.

▪ FENDILHAÇÃO

Tabela 19 - Valores de largura de fenda nas secções em estudo e a respectiva verificação

Largura de Fendas - $w_k$ (Combinação de acções Quase Permanentes)										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Número de divisões realizados no cálculo	21 Pontos	$W_{k,Sup}$ (mm)	-	-	0,173	0,144	-	0,217	0,206	-
		$W_{k,Inf}$ (mm)	-	0,197	-	-	0,200	-	-	-
	11 Pontos	$W_{k,Sup}$ (mm)	-	-	0,175	0,145	-	0,218	0,207	-
		$W_{k,Inf}$ (mm)	-	0,197	-	-	0,200	-	-	-
	5 Pontos	$W_{k,Sup}$ (mm)	-	-	0,180	0,150	-	0,224	0,209	-
		$W_{k,Inf}$ (mm)	-	0,187	-	-	0,200	-	-	-
Classe de Exposição		XC1								
Valor Limite $W_{k,máx}$ (mm)		0,40								

Relativamente aos dados fornecidos da tabela anterior verifica-se que:

- Todos os valores de largura de fenda em todas as secções de cada tramo, cumprem o valor máximo admissível para todos os números de divisões realizadas no cálculo;
- O elemento calculado com o número de divisões de 21 pontos, obtém os maiores valores de largura de fenda (zonas inferiores da viga) nas secções B-B e E-E em quanto que, nas restantes secções de cada tramo (zonas superiores da viga) obtém os valores mais baixos.

- Não existe variação de valores das tensões no betão e na armadura nas secções B-B e E-E, quando cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 11 pontos e 21 pontos;
- A diferença de valores da largura de fendas, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 11 pontos e 21 pontos, é muito pequena na ordem dos 0,7% em todas as secções que se encontram fendilhadas.

▪ DEFORMAÇÃO

Tabela 20 - Valores das flechas nas secções em estudo e de acordo com o número de pontos que o elemento foi calculado

Flecha a longo Prazo - $w_t$ (Combinação de acções Quase Permanentes)					
Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
Número de divisões realizados no cálculo	21 Pontos	$w_t$ (mm)	<b>10,59</b>	<b>5,07</b>	<b>8,93</b>
	11 Pontos	$w_t$ (mm)	<b>10,44</b>	<b>5,07</b>	<b>8,93</b>
	5 Pontos	$w_t$ (mm)	<b>10,43</b>	<b>5,07</b>	<b>8,93</b>
Valor Limite $W_{t,adm}$ (mm)			<b>24,00</b>	<b>24,00</b>	<b>10,00</b>

Relativamente aos dados fornecidos da tabela anterior verifica-se que:

- O valor da flecha a longo prazo aumenta em todas as secções à medida que o número de divisões no cálculo aumenta, obtendo assim o valor mais elevado da flecha em cada tramo com o cálculo no elemento referente a 21 pontos;
- O incremento da flecha só existe para o tramo da extremidade cerca de 1,5%, quando o cálculo do elemento é realizado com o número de divisões de 5 pontos e 21 pontos;

O valor máximo da flecha a longo prazo em cada tramo e para qualquer número de divisões realizadas no cálculo, cumpre o valor máximo admissível.

Na seguinte figura apresentam-se resultados contornados a cor vermelha, referentes às flechas máximas a longo prazo, com a sigla  $w_t$  e à largura de fendas máxima com a sigla  $w_k$ , para cada tramo do pórtico atendendo à combinação seleccionada da figura 68.

Structure	Beam - View	Beam - Diagrams	Beam - Reinforcement	Beam - note		
Span	<b>wt(QP) (mm)</b>	wt(QP)dop (mm)	Dwt(QP) (mm)	Dwt(QP)dop (mm)	<b>wk (mm)</b>	⇒ Combinação de acções Característica
P1	<b>12,219</b>	24,000	6,199	12,000	<b>0,232</b>	
P2	<b>5,999</b>	24,000	3,672	12,000	<b>0,255</b>	
P3	<b>10,252</b>	10,000	5,064	5,000	<b>0,000</b>	
Span	<b>wt(QP) (mm)</b>	wt(QP)dop (mm)	Dwt(QP) (mm)	Dwt(QP)dop (mm)	<b>wk (mm)</b>	⇒ Combinação de acções Frequentes
P1	<b>11,059</b>	24,000	5,039	12,000	<b>0,207</b>	
P2	<b>5,338</b>	24,000	3,011	12,000	<b>0,228</b>	
P3	<b>9,308</b>	10,000	4,119	5,000	<b>0,000</b>	
Span	<b>wt(QP) (mm)</b>	wt(QP)dop (mm)	Dwt(QP) (mm)	Dwt(QP)dop (mm)	<b>wk (mm)</b>	⇒ Combinação de acções Quase Permanentes
P1	<b>10,593</b>	24,000	4,574	12,000	<b>0,197</b>	
P2	<b>5,070</b>	24,000	2,743	12,000	<b>0,217</b>	
P3	<b>8,929</b>	10,000	3,741	5,000	<b>0,000</b>	

Figura 84 – Resultados da flecha e largura de fendas máxima de acordo com a selecção da combinação

Relativamente aos resultados que são contornados de cor vermelha presentes na figura anterior verifica-se que:

- Os valores das flechas e da largura de fendas em cada tramo, são os mais elevados quando é seleccionada a combinação mais desfavorável (combinação característica);
- Sendo a sigla  $w_t$  ser referente aos valores das flechas para as acções quase permanentes, independente da escolha de combinação a ser calculada, os resultados são obtidos nessa coluna, devido a que o cálculo ser feito por combinação manual;
- Para todas as combinações de acções, os valores das flechas e da largura de fendas presentes em cada tramo, são inferiores aos valores máximos admissíveis.
- O valor da largura de fenda, para qualquer combinação, no tramo em consola é apresentado como valor zero, podendo o programa admitir na secção de flecha máxima.

## 5.2.2 Método Analítico

### TENSÕES

Tabela 21 – Valores de tensões e extensões no betão e na armadura nas respectivas combinações

Tensões e Extensões									
Tramo	Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção	N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
<b>Limitação da fluência do betão (Combinação de acções Quase Permanentes)</b>									
Tensões	$\sigma_{e,CQP}$ (MPa)	-1,49	-8,03	-10,27	-8,74	-5,13	-9,94	-9,55	0,00
	$0,45 f_{ck}$ (Mpa)	13,50							
Extensões	$\epsilon_c$ (m/m)	-0,00012	-0,00066	-0,00085	-0,00072	-0,00042	-0,00082	-0,00079	0,00000
	$\epsilon_{cuk}$ (m/m)	0,0035							
<b>Deformações elásticas da armadura (Combinação de acções Características)</b>									
Tensões	$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	23,15	277,79	249,22	212,10	246,18	279,74	268,95	0,00
	$0,8 f_{syk}$ (Mpa)	400,00							
Extensões	$\epsilon_s$ (m/m)	0,00012	0,00139	0,00125	0,00106	0,00123	0,00140	0,00134	0,00000
	$\epsilon_{suk}$ (m/m)	0,0025							

### FENDILHAÇÃO

Tabela 22 – Valores de largura de fendas e respectiva verificação

Largura de Fendas - $W_k$ (Combinação de acções Quase Permanente)									
Tramo	Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção	N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
$W_{k,Sup}$ (mm)	-	-	0,144	0,118	-	0,175	0,167	-	
$W_{k,Inf}$ (mm)	-	0,166	-	-	0,159	-	-	-	
Classe de Exposição	XC1								
Valor Limite $W_{k,m\acute{a}x}$	0,40								

▪ DEFORMAÇÃO - *Método Simplificado*

Tabela 23 – Valores da flecha a longo prazo pelo método simplificado e respectiva verificação

Tramo	Extremidade	Intermédio	Consola		
Secção	B-B	E-E	H-H		
Estado da Secção	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>		
$\lambda$	<b>0,124</b>	<b>0,156</b>	<b>0,250</b>		
Estado NÃO FENDILHADO	Flexão	$\delta_{fl,lm}$ (mm)	8,36	6,14	3,50
	Retração	$\delta_{cs,lm}$ (mm)	0,33	0,02	0,26
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,lm}$ (mm)	<b>8,70</b>	<b>6,17</b>	<b>3,76</b>
Estado FENDILHADO	Flexão	$\delta_{fl,er}$ (mm)	16,28	16,38	6,01
	Retração	$\delta_{cs,er}$ (mm)	2,08	-2,46	0,84
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,er}$ (mm)	<b>18,35</b>	<b>13,92</b>	<b>6,85</b>
Estado INTERMÉDIO	$\zeta$		<b>0,928</b>	<b>0,775</b>	<b>0,947</b>
	Flexão	$\delta_{fl,int}$ (mm)	15,71	14,07	5,88
	Retração	$\delta_{cs,int}$ (mm)	1,95	-1,90	0,81
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,int}$ (mm)	<b>17,66</b>	<b>12,17</b>	<b>6,69</b>
Verificação	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	<b>24,00</b>	<b>24,00</b>	<b>10,00</b>	

▪ DEFORMAÇÃO - *Método Exacto*

Tabela 24 – Valores da flecha a longo prazo pelo método Exacto e respectiva verificação

Flecha a Longo Prazo - $\delta_x$ (Combinação de acções Quase Permanente)					
Tramo	Extremidade	Intermédio	Consola		
Secção	B-B	E-E	H-H		
Estado da Secção	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>		
Estado NÃO FENDILHADO	Flexão	$\delta_{fl,lm}$ (mm)	5,45	2,10	3,51
	Retração	$\delta_{cs,lm}$ (mm)	0,13	-0,35	0,46
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,lm}$ (mm)	<b>5,58</b>	<b>1,76</b>	<b>3,96</b>
Estado FENDILHADO	Flexão	$\delta_{fl,er}$ (mm)	10,72	5,53	5,81
	Retração	$\delta_{cs,er}$ (mm)	1,38	-1,48	1,24
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,er}$ (mm)	<b>12,10</b>	<b>4,05</b>	<b>7,04</b>
Estado INTERMÉDIO	Flexão	$\delta_{fl,int}$ (mm)	10,11	4,55	5,51
	Retração	$\delta_{cs,int}$ (mm)	1,25	-1,16	1,11
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,int}$ (mm)	<b>11,36</b>	<b>3,39</b>	<b>6,62</b>
Verificação	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	<b>24,00</b>	<b>24,00</b>	<b>10,00</b>	

### 5.2.3 Programa de cálculo *XD-Conserv*

▪ TENSÕES

Tabela 25 - Valores de tensões e extensões no betão e na armadura nas respectivas combinações

Tensões e Extensões									
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.
<b>Limitação da fluência do betão (Combinação de acções Quase Permanentes)</b>									
Tensões	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	-1,48	-7,85	-10,05	-8,55	-5,00	-9,72	-9,34	0,00
	$0,45 f_{ck}$ (Mpa)	13,50							
Extensões	$\epsilon_c$ (m/m)	-0,00013	-0,00068	-0,00087	-0,00074	-0,00043	-0,00084	-0,00081	0,00000
	$\epsilon_{cuk}$ (m/m)	0,0035							
<b>Deformações elásticas da armadura (Combinação de acções Características)</b>									
Tensões	$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	24,10	278,48	249,25	212,13	246,75	279,75	268,96	0,00
	$0,8 f_{syk}$ (Mpa)	400,00							
Extensões	$\epsilon_s$ (m/m)	0,00012	0,00139	0,00125	0,00106	0,00123	0,00140	0,00135	0,00000
	$\epsilon_{suk}$ (m/m)	0,0025							

▪ FENDILHAÇÃO

Tabela 26 - Valores de largura de fendas e respectiva verificação

Largura de Fendas - $W_k$ (mm) (Combinação de acções Quase Permanentes)									
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.
$W_{k,Sup}$ (mm)		-	-	0,139	0,114	-	0,170	0,162	-
$W_{k,Inf}$ (mm)		-	0,170	-	-	0,162	-	-	-
Classe de Exposição		XC1							
Valor Limite $W_{k,máx}$ (mm)		0,40							

▪ DEFORMAÇÃO – *Método Simplificado*

Tabela 27 - Valores da flecha a longo prazo e respectiva verificação

Flecha a Longo Prazo - $\delta_{\infty}$ (Combinação de acções Quase Permanente)					
Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
		$\lambda$	<b>0,124</b>	<b>0,156</b>	<b>0,250</b>
Estado <b>NÃO FENDILHADO</b>	Flexão	$\delta_{fl,lm}$ (mm)	8,65	6,36	3,62
	Retração	$\delta_{cs,lm}$ (mm)	-0,30	-0,03	-0,26
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,lm}$ (mm)	<b>8,35</b>	<b>6,33</b>	<b>3,36</b>
Estado <b>FENDILHADO</b>	Flexão	$\delta_{fl,cr}$ (mm)	16,48	16,55	6,06
	Retração	$\delta_{cs,cr}$ (mm)	-1,92	-2,32	-0,80
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,cr}$ (mm)	<b>14,57</b>	<b>14,23</b>	<b>5,27</b>
		$\zeta$	<b>0,840</b>	<b>0,710</b>	<b>0,860</b>
Estado <b>INTERMÉDIO (Programa)</b>	Flexão	$\delta_{fl,int}$ (mm)	15,20	13,59	5,72
	Retração	$\delta_{cs,int}$ (mm)	-1,70	-1,66	-0,72
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,int}$ (mm)	<b>13,51</b>	<b>11,94</b>	<b>5,00</b>
		$\zeta$	<b>0,945</b>	<b>0,830</b>	<b>0,960</b>
Estado <b>INTERMÉDIO (Analiticamente)</b>	Flexão	$\delta_{fl,int}$ (mm)	16,05	14,82	5,97
	Retração	$\delta_{cs,int}$ (mm)	-1,83	-1,93	-0,78
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,int}$ (mm)	<b>14,23</b>	<b>12,89</b>	<b>5,19</b>
Verificação		$\delta_{máx}$ (mm)	<b>24,00</b>	<b>24,00</b>	<b>10,00</b>

### 5.3 RESUMO DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados obtidos por cada método de cálculo utilizado na verificação aos estados limites de utilização do pórtico e piso em estudo, encontra-se apresentado s em tabelas e figuras um resumo dos resultados para cada um dos estados limites de utilização.

#### 5.3.1 Tensões

- BETÃO

Tabela 28 – Valores das tensões de compressão no betão nas secções críticas referente à combinação de acções quase permanente e aos métodos de cálculo executados

Tensões - Betão $\sigma_{c,CQP}$ (MPa)										
MÉTODO			Secção							
			A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Robot Structural Analysis Professional 2014	Required Reinforcement	(5 pontos)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
		(11 pontos)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
		(21 pontos)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Provided Reinforcement	(5 pontos)	2,22	-5,76	8,50	7,23	-3,28	7,83	8,33	0,00
		(11 pontos)	1,92	-9,03	8,26	7,04	-4,91	8,51	9,33	0,00
		(21 pontos)	1,53	-9,03	8,22	7,00	-4,91	8,45	9,31	0,00
	Typical Reinforcement	(5 pontos)	2,45	-7,54	10,52	8,95	-5,11	10,16	9,57	0,00
		(11 pontos)	2,12	-7,89	10,23	8,72	-5,11	9,94	9,49	0,00
		(21 pontos)	1,69	-7,89	10,17	8,66	-5,11	9,88	9,47	0,00
Analítico			-1,49	-8,03	-10,27	-8,74	-5,13	-9,94	-9,55	0,00
XD - Conserv			-1,48	-7,85	-10,05	-8,55	-5,00	-9,72	-9,34	0,00
Verificação $\sigma_c < f_{ck}$ (Mpa)			30,00							

De acordo com a análise dos resultados apresentados na tabela anterior e fazendo comparações entre os diversos métodos de cálculo, pode se constatar:

Comparando os valores das tensões de compressão no betão, entre os módulos presentes no *Robot Structural Analysis Professional 2014*, verifica-se que:

- O módulo *Required Reinforcement* não apresenta valores, independentemente do número de pontos em que o elemento é calculado;
- No módulo *Provided Reinforcement* e no comando *Typical Reinforcement*, à medida que o número de pontos no cálculo é mais elevado, os valores nas secções B-B e E-E aumentam, em quanto que, nas restantes secções de cada tramo os valores de tensões diminuem.
- No módulo *Provided Reinforcement* e no comando *Typical Reinforcement*, à medida que o número de pontos no cálculo é mais elevado, os valores nas secções B-B e E-E aumentam em quanto que, nas restantes secções de cada tramo os valores diminuem;
- O comando *Typical Reinforcement*, apresenta valores superiores em todas as secções, com excepção da secção B-B, comparativamente ao módulo *Provided Reinforcement*;
- Todos os valores de tensões de compressão no betão em todas as secções de cada tramo, cumprem o valor máximo admissível atendendo a todos os números de divisões realizadas no cálculo.
- A diferença de valores das tensões no betão e na armadura nas secções em cada tramo, entre o módulo *Provided Reinforcement* e o comando *Typical Reinforcement*, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 21 pontos, é entre 10% a 23% no tramo de extremidade; 4% a 23% no tramo intermédio e apenas de 1% no tramo em consola;
- Os valores das tensões no betão nas secções B-B e E-E encontram-se como negativos, devido à convenção de sinal dos diagramas de tensões presentes no *Robot*;
- Os valores das tensões na secção H-H são zero, devido a ser a extremidade da consola.

Encontra-se seguintes figuras em termos gráficos a comparação de valores das tensões de compressão no betão, entre os módulos presentes no *Robot Structural Analysis Professional 2014*.

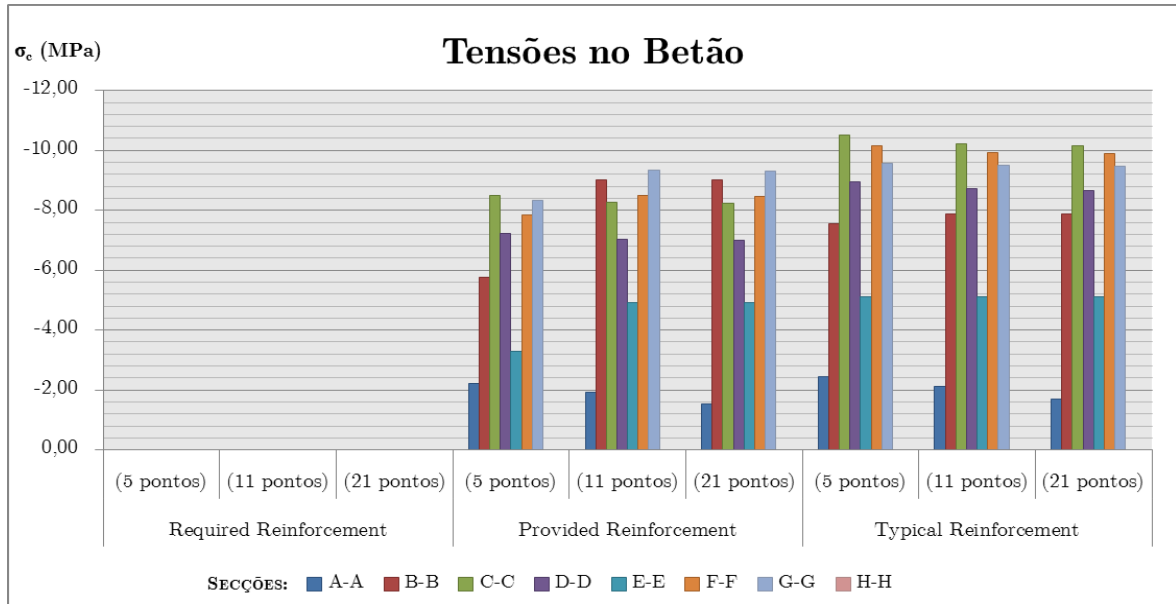


Figura 85 – Comparação dos valores das tensões de compressão no betão, em todas as secções e atendendo ao número de pontos de divisão realizados no cálculo, nos módulos realizados no *Robot*

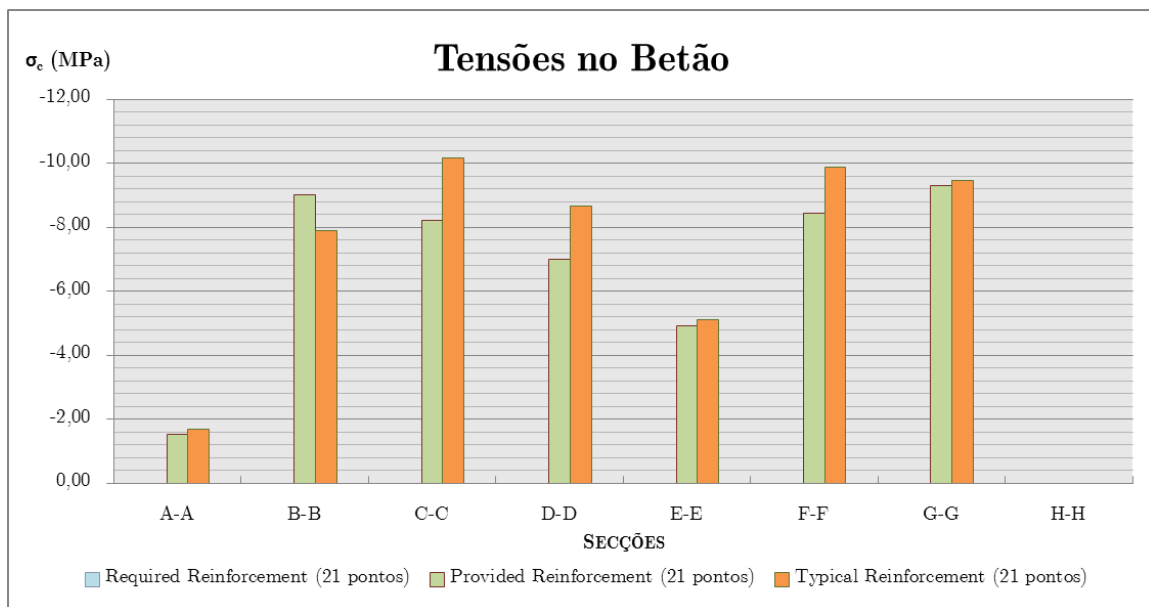


Figura 86 – Comparação dos valores das tensões de compressão em todas as secções e atendendo apenas ao cálculo do elemento com 21 pontos, nos módulos realizados no *Robot*

Comparando os valores das tensões de compressão no betão, entre os três métodos utilizados no cálculo, verifica-se que:

- Os valores das tensões em todas as secções realizadas pelo método analítico, são ligeiramente mais elevadas, com a excepção da secção A-A;
- A diferença de valores entre cada método é muito pequena da ordem de 1%, com a excepção dos valores entre o comando Typical Reinforcement e o método analítico da secção A-A cerca de 13% e da secção B-B cerca de 2%;
- Foram denominados sinais negativos nos valores a tensão à compressão pelo método realizado analiticamente e pelo programa *XD-Conserv*.

Encontra-se ilustrado graficamente na seguinte figura, a comparação de valores das tensões de compressão no betão, entre os três métodos realizados no cálculo à verificação do estado limite de tensão.

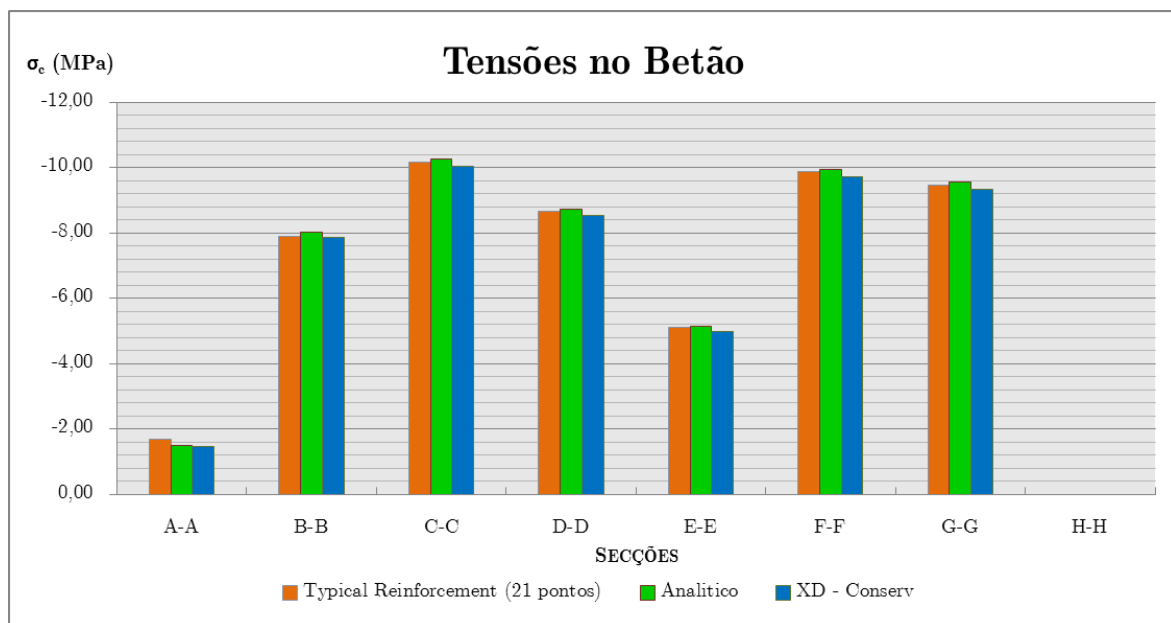


Figura 87 – Comparação dos valores das tensões de compressão no betão, em todas as secções, pelos três métodos realizados no cálculo

▪ ARMADURA

Tabela 29 – Valores das tensões de tracção na armadura nas secções críticas referente à combinação de acções característica e aos métodos de cálculo executados

Tensões - Armadura $\sigma_{s,CC}$ (MPa)											
MÉTODO			Secção								
			A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Robot Structural Analysis Professional 2014	Required Reinforcement	(5 pontos)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
		(11 pontos)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
		(21 pontos)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Provided Reinforcement	(5 pontos)	222,82	-211,44	311,90	265,46	-120,41	282,55	269,13	0,00	
		(11 pontos)	32,78	-232,74	303,30	258,54	-126,70	276,00	266,39	0,00	
		(21 pontos)	26,15	-232,74	301,55	256,79	-126,70	274,22	265,14	0,00	
	Typical Reinforcement	(5 pontos)	411,03	-249,45	262,10	221,14	-232,28	292,62	274,40	0,00	
		(11 pontos)	35,56	-281,49	254,68	214,62	-245,44	285,83	271,83	0,00	
		(21 pontos)	28,37	-281,49	253,18	212,97	-251,60	283,91	271,15	0,00	
Analítico			23,15	277,79	249,22	212,10	246,18	279,74	268,95	0,00	
XD - Conserv			24,10	278,48	249,25	212,13	246,75	279,75	268,96	0,00	
Verificação $\sigma_s < 0,8 f_{syk}$ (Mpa)			400,00								

De acordo com a análise dos resultados apresentados na tabela anterior e fazendo comparações entre os diversos métodos de cálculo, pode se constatar:

Comparando os valores das tensões de tracção na armadura, entre os módulos presentes no Robot Structural Analysis Professional 2014, verifica-se que:

- O módulo *Required Reinforcement* não apresenta valores, independentemente do número de pontos em que o elemento é calculado;
- No módulo *Provided Reinforcement* e no comando *Typical Reinforcement*, à medida que o número de pontos no cálculo é mais elevado, os valores nas secções B-B e E-E aumentam, em quanto que nas restantes secções de cada tramo os valores de tensões diminuem;

- No módulo *Provided Reinforcement* e no comando *Typical Reinforcement*, à medida que o número de pontos no cálculo é mais elevado, os valores nas secções B-B e E-E aumentam, em quanto que nas restantes secções de cada tramo os valores diminuem;
- O comando *Typical Reinforcement*, apresenta valores superiores em todas as secções, com excepção das secções C-C e D-D, comparativamente ao módulo *Provided Reinforcement*;
- Todos os valores de tensões de tracção na armadura presentes em todas as secções de cada tramo, atendendo a todos os números de divisões realizadas no cálculo, cumprem o valor máximo admissível, com excepção do cálculo pelo comando *Typical Reinforcement* na secção A-A em que o elemento é calculado com o número de divisão de 5 pontos.
- A diferença de valores das tensões no betão e na armadura nas secções em cada tramo, entre o módulo *Provided Reinforcement* e o comando *Typical Reinforcement*, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 21 pontos, é entre 8% a 20% no tramo de extremidade; 4% a 20% no tramo intermédio e apenas de 2% no tramo em consola;
- Os valores das tensões no betão nas secções B-B e E-E encontram-se como negativos, devido à convenção de sinal dos diagramas de tensões presentes no *Robot*;
- Os valores das tensões na secção H-H são zero, devido a ser a extremidade da consola.

Encontra-se seguintes figuras em termos gráficos a comparação de valores das tensões de tracção na armadura, entre os módulos presentes no *Robot Structural Analysis Professional 2014*.

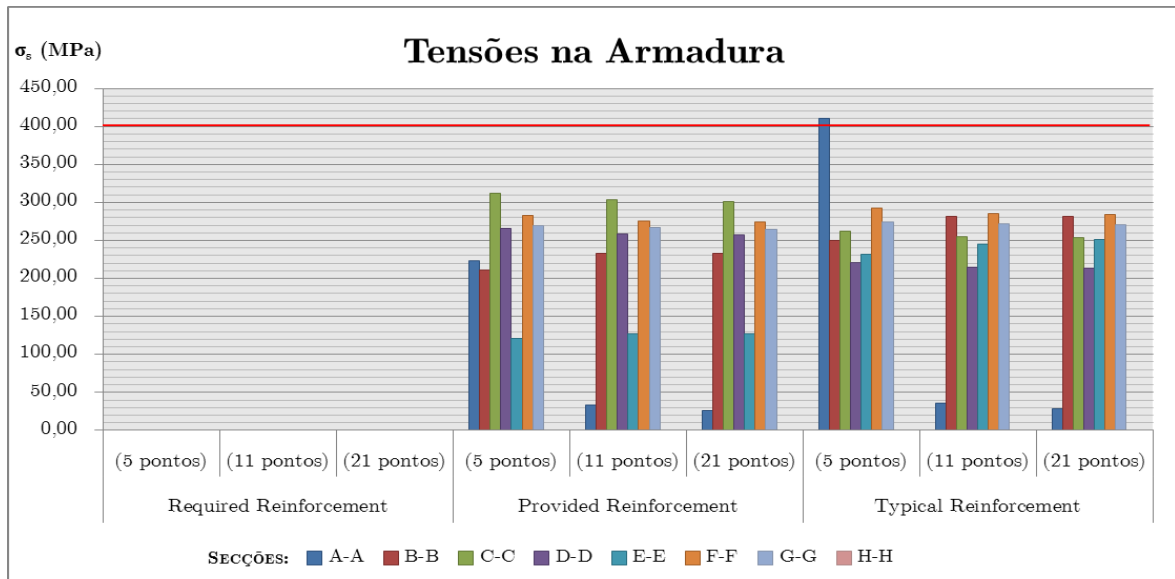


Figura 88 - Comparação dos valores das tensões de tracção na armadura, em todas as secções e atendendo ao número de pontos de divisão realizados no cálculo, nos módulos realizados no *Robot*

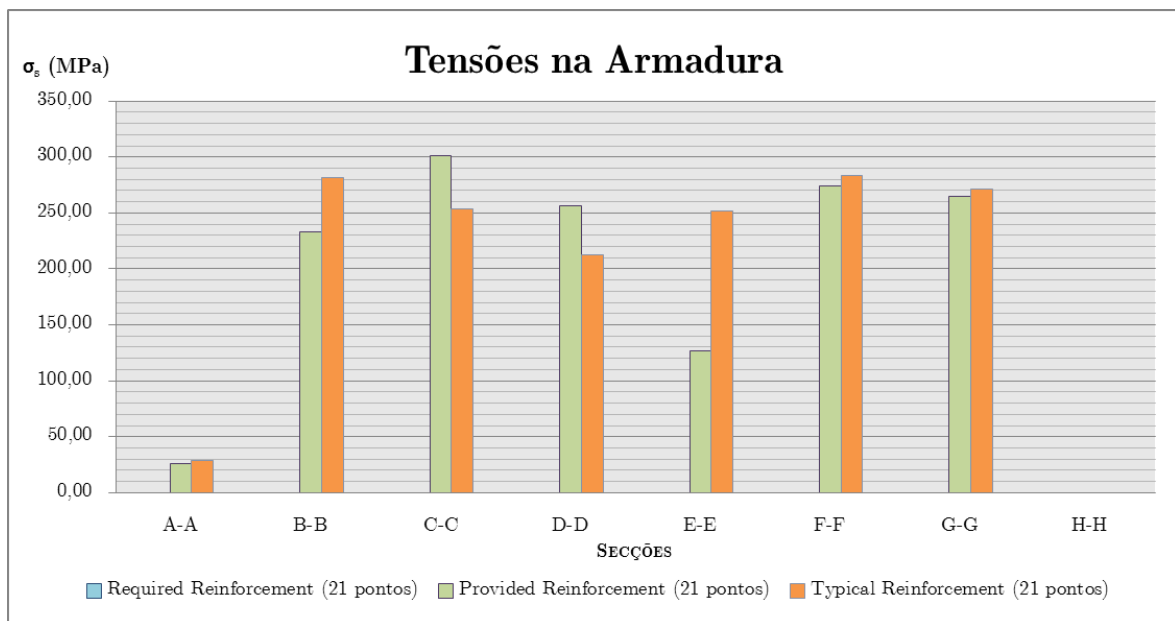


Figura 89 - Comparação dos valores das tensões de tracção na armadura, em todas as secções e atendendo apenas ao cálculo do elemento com 21 pontos, nos módulos realizados no *Robot*

Comparando os valores das tensões de tracção na armadura, entre os três métodos utilizados no cálculo, verifica-se que:

- Os valores das tensões em todas as secções realizadas pelo comando Typical Reinforcement, são ligeiramente mais elevadas;
- A diferença de valores entre cada método é muito pequena entre 0% a 2%, com a excepção dos valores da secção A-A entre o comando Typical Reinforcement e o método analítico cerca de 23% e entre o método analítico e o programa XD-Conserv cerca de 4%;
- Foram denominados sinais negativos nos valores a tensão à compressão pelo método realizado analiticamente e pelo programa *XD-Conserv*.

Encontra-se ilustrado graficamente na seguinte figura, a comparação de valores das tensões de tracção na armadura, entre os três métodos realizados no cálculo à verificação do estado limite de tensão.

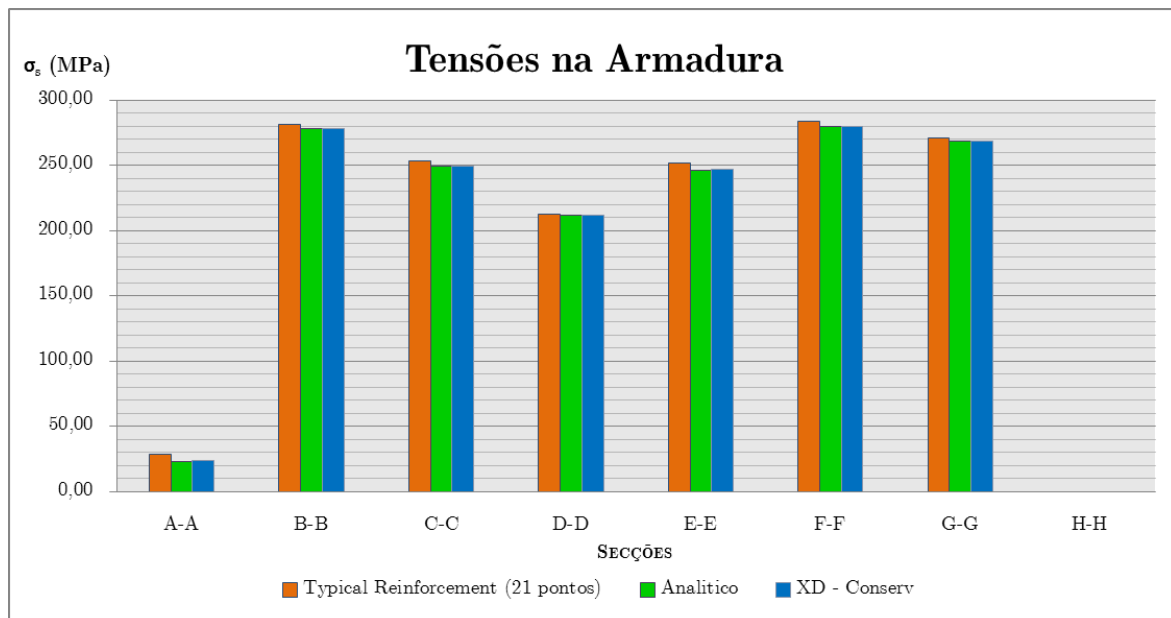


Figura 90 - Comparação dos valores das tensões de tracção na armadura, em todas as secções, pelos três métodos realizados no cálculo

### 5.3.2 Fendilhação

Tabela 30 – Valores da largura de fendas no betão, nas secções fendilhadas, referente à combinação de acções quase permanente e aos métodos de cálculo executados

Fendilhação - $W_k$ (mm)										
MÉTODO			Secção							
			A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Robot Structural Analysis Professional 2014	Required Reinforcement	(5 pontos)	-	0,188		0,199			0,197	-
		(11 pontos)	-	0,223		0,202			0,221	-
		(21 pontos)	-	0,235		0,258			0,262	-
	Provided Reinforcement	(5 pontos)	-	0,135	0,213	0,177	0,065	0,190	0,180	-
		(11 pontos)	-	0,152	0,206	0,171	0,070	0,187	0,181	-
		(21 pontos)	-	0,152	0,205	0,170	0,070	0,186	0,180	-
	Typical Reinforcement	(5 pontos)	-	0,187	0,180	0,150	0,200	0,224	0,209	-
		(11 pontos)	-	0,197	0,175	0,145	0,200	0,218	0,207	-
		(21 pontos)	-	0,197	0,173	0,144	0,200	0,217	0,206	-
Analítico			-	0,166	0,144	0,118	0,159	0,175	0,167	-
XD - Conserv			-	0,170	0,139	0,114	0,162	0,170	0,162	-
Valor Limite $W_{k,máx}$ (mm)			0,400							

De acordo com a análise dos resultados apresentados na tabela anterior e fazendo comparações entre os diversos métodos de cálculo, pode-se constatar:

Comparando os valores da largura de fendas no betão, entre os módulos presentes no *Robot Structural Analysis Professional 2014*, verifica-se que:

- O módulo *Required Reinforcement*, não identifica a posição onde predomina a largura de fenda máxima, apenas apresenta os valores máximos em cada tramo respectivo;
- O módulo *Required Reinforcement* é o módulo que apresenta os valores mais elevados em qualquer número de pontos existentes no cálculo;
- Em todos os módulos e à medida que o número de pontos no cálculo é mais elevado, os valores nas secções B-B e E-E aumentam, em quanto que nas restantes secções de cada tramo os valores de tensões diminuem;

- Todos os valores de largura de fendas em todas as secções que se encontram fendilhadas de cada tramo, atendendo a todos os números de divisões realizadas no cálculo, cumprem o valor máximo admissível de fendilhação;
- A diferença de valores das tensões no betão e na armadura nas secções em cada tramo, entre o módulo *Provided Reinforcement* e o comando *Typical Reinforcement*, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 21 pontos, é entre 20% a 30% no tramo de extremidade; 18% no tramo intermédio (com a excepção da secção E-E que possui uma diferença de valores de 285%) e de 14% no tramo em consola;
- Não há valores de largura de fendas nas secções A-A e H-H, dado que estas secções não se encontram fendilhadas.

Encontra-se seguintes figuras em termos gráficos a comparação de valores da largura de fendas no betão, entre os módulos presentes no *Robot Structural Analysis Professional 2014*.

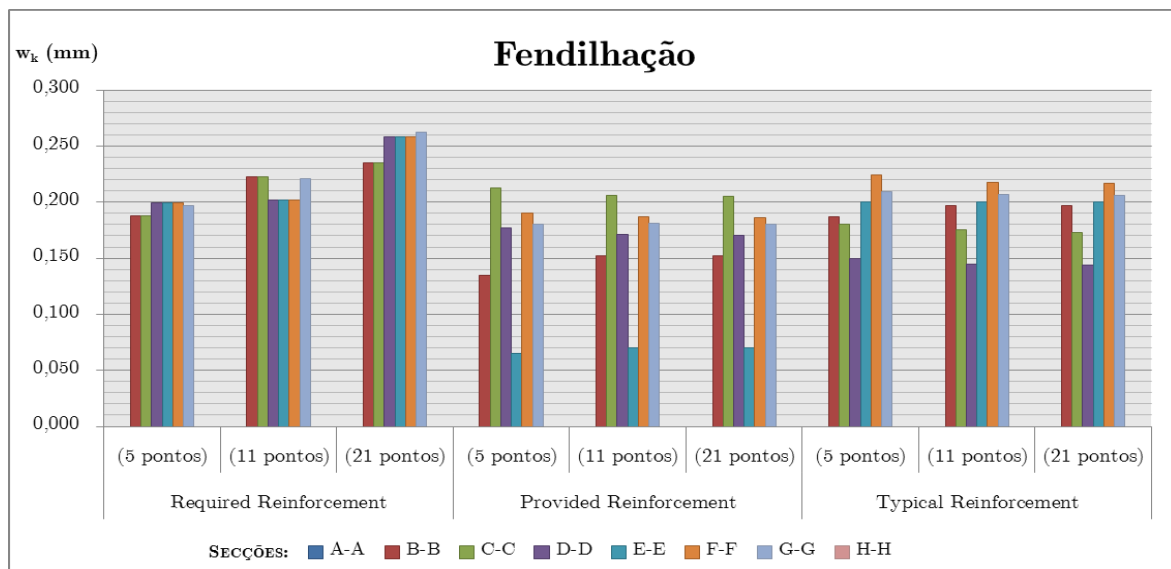


Figura 91 - Comparação dos valores de largura de fendas no betão nas secções fendilhadas, atendendo ao número de pontos de divisão realizados no cálculo, nos módulos realizados no *Robot*

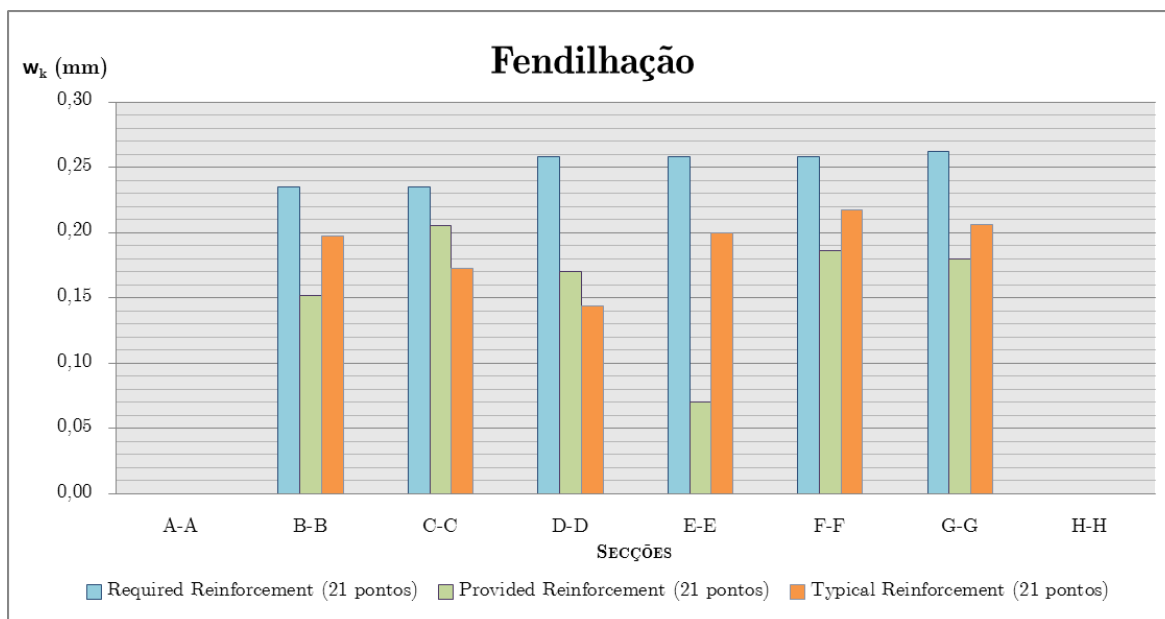


Figura 92 - Comparação dos valores da largura de fendas no betão nas secções fendilhadas, atendendo apenas ao cálculo do elemento com 21 pontos, nos módulos realizados no *Robot*

Comparando os valores da largura de fendas no betão, entre os três métodos utilizados no cálculo, verifica-se que:

- Os valores nas secções fendilhadas, calculados pelo comando *Typical Reinforcement*, são os mais elevados;
- A diferença de valores em todas as secções, entre o método analítico e pelo programa *XD-Conserv* é entre 2% a 4%;
- A diferença de valores entre o comando *Typical Reinforcement* e o método analítico, em termos globais de todas as secções é entre 20% a 25%;
- Todos os valores de largura de fendas em todas as secções que se encontram fendilhadas de cada tramo, cumprem o valor máximo admissível de fendilhação.

Encontra-se ilustrado graficamente na seguinte figura, a comparação de valores da largura de fendas no betão, entre os três métodos realizados no cálculo à verificação do estado limite de fendilhação.

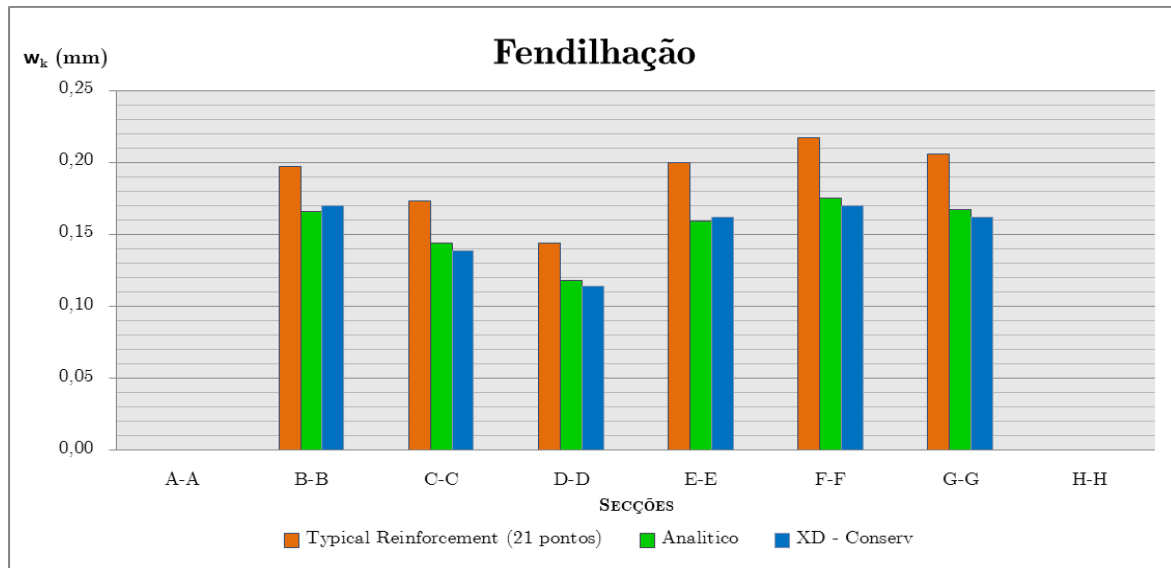


Figura 93 - Comparação dos valores da largura de fendas no betão nas secções fendilhadas, pelos três métodos realizados no cálculo

### 5.3.3 Deformação

Tabela 31 – Valores das flechas nas secções críticas referente à combinação de acções quase permanente e aos métodos de cálculo executados

MÉTODO				Secção		
				B-B	E-E	H-H
Robot Structural Analysis Professional 2014	<i>Required Reinforcement</i>	Rigidez Mínima	(5 pontos)	13,37	5,40	13,60
			(11 pontos)	16,33	5,71	14,45
			(21 pontos)	18,24	6,82	14,74
		Rigidez Média	(5 pontos)	10,49	3,42	9,57
			(11 pontos)	12,73	4,26	9,36
			(21 pontos)	12,74	4,59	9,59
	<i>Provided Reinforcement</i>	(5 pontos)	8,19	2,77	8,29	
		(11 pontos)	9,68	3,29	8,71	
		(21 pontos)	9,82	3,29	8,71	
	<i>Typical Reinforcement</i>	(5 pontos)	10,43	5,07	8,93	
(11 pontos)		10,44	5,07	8,93		
(21 pontos)		10,59	5,07	8,93		
Analítico	Exacto (21 pontos)	s/ retracção	10,11	4,55	5,51	
		c/ retracção	11,36	3,39	6,62	
	Simplificado	s/ retracção	15,71	14,07	5,88	
		c/ retracção	17,66	12,17	6,69	
XD - Conserv	Simplificado ( $\zeta$ do programa)	s/ retracção	15,20	13,59	5,72	
		c/ retracção	13,51	11,94	5,00	
	Simplificado ( $\zeta$ corrigido)	s/ retracção	16,05	14,82	5,97	
		c/ retracção	14,23	12,89	5,19	
Valor Limite $\delta_{x,adm}$ (mm)				24,00	24,00	10,00

De acordo com a análise dos resultados apresentados na tabela anterior e fazendo comparações entre os diversos métodos de cálculo, pode-se constatar:

Comparação dos resultados da flecha a longo prazo, entre os módulos presentes no *Robot Structural Analysis Professional 2014*:

- O módulo *Required Reinforcement*, é o módulo que apresenta o maior valor das flechas nas secções B-B e H-H, independentemente quando o elemento é calculado em rigidez média ou rigidez mínima e até pelo número de pontos que o elemento é calculado;
- No módulo *Required Reinforcement*, quando o cálculo do elemento é realizado com a rigidez média e até pelo número de pontos que o elemento é calculado para a secção E-E, os valores das flechas são inferiores às do módulo *Typical Reinforcement*;
- Em todos os módulos de cálculo e à medida que o número de pontos no cálculo é mais elevado, os valores das flechas aumentam em todas as secções;
- Em todos os módulos os valores de flecha em todas as secções, cumprem o valor máximo admissível, atendendo a todos os números de divisões realizadas no cálculo, com a excepção do módulo *Required Reinforcement* para a secção em consola, em que o elemento é calculado em rigidez mínima;
- A diferença de valores de flechas em cada tramo, entre o módulo *Provided Reinforcement* e o comando *Typical Reinforcement*, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 21 pontos, é de 8% na secção B-B (tramo extremo); 54% na secção E-E (tramo intermédio) e 2,5% na secção H-H (tramo em consola);
- A diferença de valores de flechas em cada tramo, entre o módulo *Required Reinforcement* e *Provided Reinforcement*, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 21 pontos e calculado em rigidez média, é cerca de 30% na secção B-B (tramo de extremidade); 40% na secção E-E (tramo intermédio) e 10% na secção H-H (tramo em consola);

Encontra-se seguintes figuras em termos gráficos a comparação de valores das flechas a longo prazo nas secções críticas, entre os módulos presentes no *Robot Structural Analysis Professional 2014*.

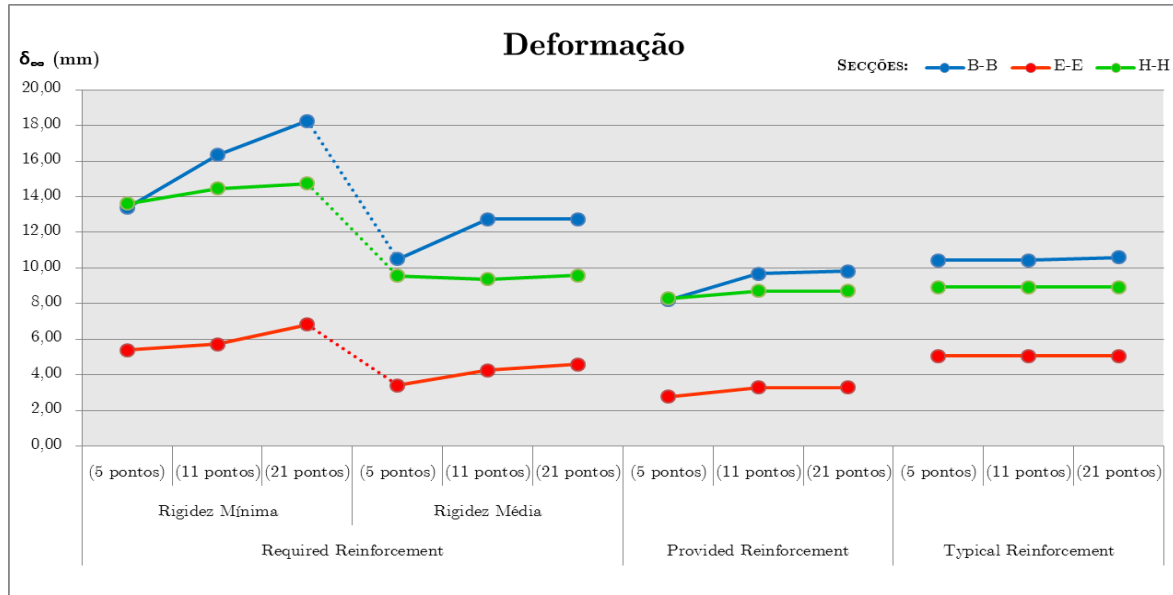


Figura 94 - Comparação dos valores das flechas a longo prazo nas secções críticas em cada tramo, atendendo ao número de pontos de divisão realizados no cálculo, nos módulos realizados no *Robot*

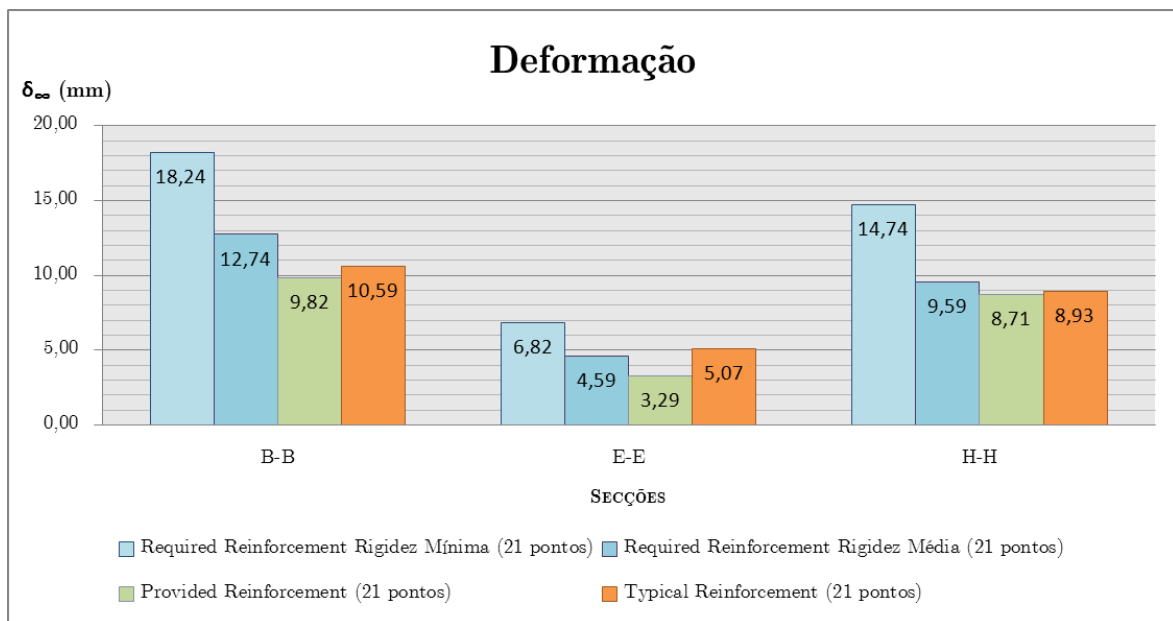


Figura 95 - Comparação dos valores das flechas a longo prazo nas secções críticas em cada tramo, atendendo apenas ao cálculo do elemento com 21 pontos, nos módulos realizados no *Robot*

Comparando os valores das flechas a longo prazo, nas secções críticas em cada tramo, entre os três métodos utilizados no cálculo, verifica-se que:

- Os valores das flechas em todas as secções, realizadas pelo cálculo simplificado do método analítico e pelo programa *XD-Conserv*, são superiores ao cálculo exacto realizado pelo método analítico e pelo comando *Typical Reinforcement*;
- O valor da flecha, quando calculada pelo método analítico, aumenta na presença da retracção do betão nas secções B-B e H-H e diminui na secção E-E;
- O valor da flecha com a presença da retracção do betão, calculadas pelo programa *XD-Conserv*, diminui em todas as secções;
- Os valores das flechas em todas as secções, realizados pelo programa *XD-Conserv* e utilizando o coeficiente de repartição do programa, são inferiores ao cálculo simplificado realizado pelo método analítico;
- A diferença entre os valores das flechas em todas as secções, realizada pelo cálculo simplificado pelo método analítico e pelo programa *XD-Conserv*, é entre os 13% a 15% com a presença da retracção do betão e entre os 2% a 4% sem a presença de retracção no betão;
- A diferença entre os valores de flechas em cada secção, realizada pelo cálculo exacto do método analítico e com a presença da retracção do betão, é cerca de 13% na secção B-B; 34% na secção E-E e de 20% na secção H-H.
- Os valores de flecha em todas as secções, realizados pelo programa *XD-Conserv*, mas utilizando o coeficiente de repartição corrigido, são ligeiramente superiores quando é utilizado o coeficiente de repartição do programa, sendo a diferença de valores de flechas entre os 4% a 9%;
- A diferença entre os valores de flechas em cada secção, sem a presença da retracção do betão, realizada pelo cálculo exacto do método analítico e pelo comando *Typical*

*Reinforcement*, é cerca de 7% na secção B-B; 11% na secção E-E e de 68% na secção H-H.

- A diferença entre os valores das flechas em cada secção, sem a presença da retracção do betão realizada pelo cálculo simplificado do método analítico e pelo comando *Typical Reinforcement*, é cerca de 48% na secção B-B; 280% na secção E-E e de 52% na secção H-H;
- Para todos os métodos, a secção que apresenta a flecha mais elevada, é a secção B-B (tramo de extremidade) em quanto que a secção que apresenta a menor flecha é a secção E-E (tramo intermédio).

Encontra-se na seguinte figura, a comparação de valores das flechas, entre os três métodos realizados no cálculo, à verificação do estado limite de deformação.

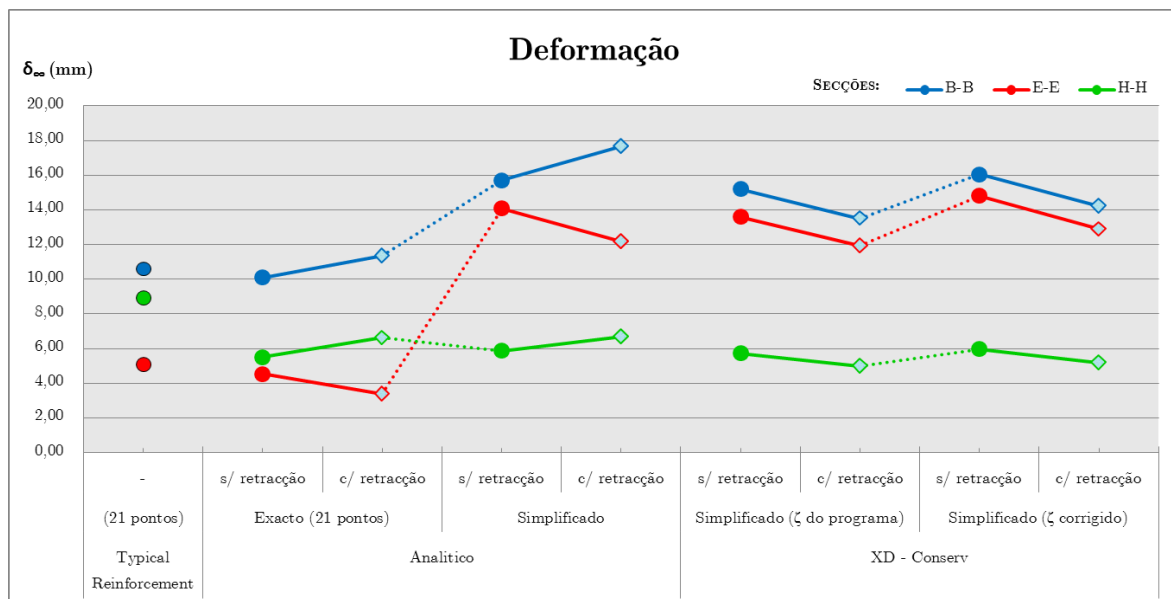


Figura 96 - Comparação dos valores das flechas a longo prazo nas secções críticas em cada tramo, atendendo à presença e a ausência da retracção no betão, pelos três métodos realizados no cálculo

## 6

# CONCLUSÕES

De acordo com a comparação de resultados apresentados por todos os métodos de cálculo realizado na verificação aos estados limites de utilização, da estrutura em estudo, a longo prazo, pode se concluir que os valores apresentados pelo programa de cálculo automático são bastante fiáveis.

Para cada módulo de cálculo presente no programa de cálculo automático e para o estado limite último e para cada estado limite de utilização pode-se ter as seguintes conclusões:

### *MODULO REQUIRED REINFORCEMENT*

- ESTADO LIMITE ÚLTIMO - Soluções de armaduras e respectiva disposição:
  - No módulo *Required Reinforcement*, a quantidade de armadura nas secções em análise não diferiu com o número de pontos calculado;
  - No módulo *Required Reinforcement* verifica-se que, em todas as secções, apenas são apresentadas as armaduras necessárias e não as armaduras construtivas;
  - O módulo *Required Reinforcement* é o módulo que possui menor quantidade de armadura em cada secção em análise.
  
- ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO

### TENSÕES

- O módulo *Required Reinforcement* não apresenta valores, independentemente do número de pontos em que o elemento é calculado;

### FENDILHAÇÃO

- O módulo *Required Reinforcement*, não identifica a posição onde predomina a largura de fenda máxima, apenas apresenta os valores máximos em cada tramo respectivo;
- O módulo *Required Reinforcement* é o módulo que apresenta os valores mais elevados em qualquer número de pontos existentes no cálculo;
- O módulo *Required Reinforcement* permite que a fendilhação pode ser corrigida automaticamente por incremento da quantidade de armadura, caso não seja verificada a fendilhação admissível,

### DEFORMAÇÃO

- O módulo *Required Reinforcement* é o único módulo que proporciona calcular o elemento em rigidez mínima e média, obtendo assim dois tipos de valores na flecha de acordo com o tipo de rigidez seleccionada.
- O módulo *Required Reinforcement*, é o módulo que apresenta o maior valor das flechas nas secções B-B e H-H, independentemente quando o elemento é calculado em rigidez média ou rigidez mínima e até pelo número de pontos que o elemento é calculado;
- No módulo *Required Reinforcement*, quando o cálculo do elemento é realizado com a rigidez média e até pelo número de pontos que o elemento é calculado para a secção E-E (tramo intermédio), os valores das flechas são inferiores às do módulo *Typical Reinforcement*;

Na utilização do módulo *Required Reinforcement* no programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis Professional 2014*, é necessário ter em consideração as configurações dos respectivos menus presentes no módulo:

Figura B.1.4:

- O valor do coeficiente de fluência é apenas atribuído pelo utilizador, sendo o valor maior que zero;
- Quando é seleccionada a opção *Reinforcement check (cracking)*, a fendilhação pode ser corrigida automaticamente por incremento da quantidade de armadura, caso não seja verificada a fendilhação admissível,

Figura B.1.5:

- O diâmetro a ser escolhido para a armadura longitudinal, poderá apenas ser atribuído um para zona superior e outro para a zona inferior da secção (no entanto, em toda a secção as armaduras longitudinais poderão ter o mesmo diâmetro);
- Após definir o diâmetro da armadura longitudinal (superior e inferior), o recobrimento mecânico para o cálculo, será imposto automaticamente apenas pelo diâmetro da armadura longitudinal inferior, no entanto este valor pode ser definido manualmente.

Figura B.1.6:

- O diâmetro a ser escolhido para a armadura transversal, poderá apenas ser atribuído um para todos os elementos;
- Poderá ser escolhido o número de secções para a colocação da armadura transversal no elemento bem como o seu afastamento.

Figura B.1.8:

- Poderá ser definido o comprimento de cálculo de uma viga, e de acordo com a respectiva escolha, os resultados referentes à deformação e fendilhação irão diferir;
- Caso esteja seleccionado para o cálculo flexão desviada, não será possível impor o limite de deformação no menu que conduz á inexistência do resultado da flecha;

- Caso a opção da flecha admissível seja seleccionada o programa irá verificar se o elemento irá cumprir ou não a flecha máxima. Caso o elemento não cumpra o programa apresenta opções para a correcção da flecha, podendo ser o incremento do rácio da área de reforço; incremento da área de armadura de reforço ou alteração do número de armaduras.

#### Figura B.1.9:

- Poderá ser seleccionado o tipo de rigidez que o elemento (viga) toma, e de acordo com a escolha irá diferir os resultados referentes à deformação.

#### Figura B.1.10:

De acordo com a escolha da combinação de acções para o cálculo aos estados de utilização (*Lists of cases SLS*), os resultados referentes às deformações e fendilhação diferem nas seguintes situações:

#### **Deformação**

- Quando são escolhidas todas as combinações de acções, os resultados da deformação referem-se à **flecha máxima a longo prazo** para a combinação de acções mais desfavorável (combinação de acção característica);
- Quando são escolhidas qualquer uma das combinações de acções excepto a combinação quase-permanente, os resultados da deformação referem-se à **flecha elástica admitindo a secção não fendilhada** em função da combinação de acção escolhida.

#### **Fendilhação**

- Quando são escolhidas todas as combinações de acções, os resultados relativos à fendilhação, **são apenas em função da combinação quase-permanente**;

Quando são escolhidas quaisquer uma das combinações de acções com a excepção da combinação quase-permanente, não são apresentados resultados relativos à fendilhação.

### ***MODULO PROVIDED REINFORCEMENT***

- ESTADO LIMITE ÚLTIMO - Soluções de armaduras e respectiva disposição:
  - No módulo *Provided Reinforcement* e atendendo ao número de pontos de cálculo, houve uma diminuição de quantidade de armadura na zona superior da secção, nomeadamente nas secções a meio vão do tramo extremo e intermédio;
  - O módulo *Provided Reinforcement* é o módulo que proporciona maior quantidade de armadura em cada secção em análise, comparativamente com os outros módulos.
  
- ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO

#### TENSÕES

- No módulo *Provided Reinforcement* há possibilidade de saber em qualquer ponto no elemento os valores das tensões no betão e na armadura, compressão e tracção;
- A diferença de valores das tensões no betão e na armadura, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 11 pontos e 21 pontos, é muito pequena na ordem dos 0,5% em todas das secções junto à face dos pilares com a excepção da secção A-A, cuja diferença de valores é cerca de 20%.

#### FENDILHAÇÃO

- O módulo *Provided Reinforcement* possibilidade saber em qualquer ponto no elemento os valores da largura de fendas no betão;

- A diferença de valores de largura de fendas, quando o cálculo do elemento é submetido ao número de divisões de 11 pontos e 21 pontos, é muito pequena na ordem dos 0,5% em todas as secções que se encontram fendilhadas.

### DEFORMAÇÃO

- O módulo *Provided Reinforcement* permite que o cálculo da deformação admissível seja cumprido automaticamente pelos valores estipulados, por incremento da quantidade de armadura ou até pela alteração das dimensões da secção

Na utilização do módulo *Provided Reinforcement* no programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis Professional 2014*, é necessário ter em consideração as configurações dos respectivos menus presentes no módulo:

### Figura C.3:

De acordo com a selecção das combinações de acções para o cálculo aos estados de utilização, os resultados referentes às deformações e fendilhação diferem nas seguintes situações:

### **Deformação**

- Quando são escolhidas todas as combinações de acções, os resultados da deformação referem-se à **flecha máxima a longo prazo** em função da **combinação mais desfavorável** (combinação de acção característica).
- Quando são escolhidas qualquer uma das combinações de acções, os resultados da deformação referem-se à **flecha máxima a longo prazo** de acordo com a **combinação de acção escolhida**.

## Fendilhação

- Quando são escolhidas todas as combinações de acções, os resultados relativos à fendilhação, são apenas em função **da combinação mais desfavorável** (combinação de acção característica).
- Quando é escolhida qualquer uma das combinações de acções, os resultados relativos à fendilhação, referem-se de acordo com **a combinação de acções escolhida**.

## *MODULO PROVIDED REINFORCEMENT – COMANDO TYPICAL REINFORCEMENT*

- ESTADO LIMITE ÚLTIMO - Soluções de armaduras e respectiva disposição:
  - Comando que possibilita o utilizador editar os elementos, definindo os diâmetros a usar na armadura longitudinal e transversal, bem como os respectivos comprimentos nas armaduras;
  - Poderá apenas ser escolhido um tipo de diâmetro para a armadura longitudinal, um para zona superior e outro para a zona inferior da secção (no entanto, em toda a secção as armaduras longitudinais poderão ter o mesmo diâmetro);
  - Poderá apenas ser escolhido para as armaduras transversais, e para cada tramo um tipo de diâmetro e afastamento;



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

As referências bibliográficas, consultadas durante a realização do trabalho, foram as seguintes:

- [1] CEN, Eurocódigo 0: Bases para o Projecto de Estruturas, NP EN 1990, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 2009;
- [2] CEN, Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão, Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios, NP EN 1992-1-1, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 2010;
- [3] Cachim, P.B. e Morais, M.M. – *Estruturas de Betão: Bases de Cálculo segundo o Eurocódigo 2*, Publindústria, Porto, 2013;
- [4] Appleton, J. – *Estruturas de Betão – Vols. I e II*, Orion, Lisboa, 2013;
- [5] Figueiras, Joaquim A. – *Estruturas de Betão 2: Verificação aos Estados Limites de Utilização, Ano Lectivo 2002/2003*, FEUP, Porto, Junho 1997;
- [6] Barros, Helena e Figueiras, Joaquim – *Tabelas e Ábacos de Dimensionamento de Secções de Betão Solicitados à Flexão e a Esforços Axiais Segundo o Eurocódigo 2*, Porto, 2010;
- [7] Camara, José N. – *Estruturas de Betão I - Folha de apoio às aulas*, IST, Lisboa, 2013/2014;
- [8] Félix, Carlos – *Estados Limites de Utilização*, ISEP, Porto, Outubro 2011;
- [9] Apontamentos do Mestrado em Tecnologia e Gestão das Construções, *Estruturas Pré-Esforçadas*, ISEP, Porto, Março 2010;
- [10] Ghali, A., Favre, R. e Eldbadry M. – *Concrete Structures: Stresses and Deformation – Third Edition*, London and New York, 2002;
- [11] Bond, A. J., Booker, O., Harris, A. J., Harrison, T., Moss, R. M., Narayanan, R. S.,

- Webster, R. – *How to Design Concrete Structures using Eurocode 2*, The Concrete Centre, 2006;
- [12] Magalhães, I. – Dissertação – Verificação dos Estados Limites de Utilização, ISEP, Porto, Novembro 2011;
- [13] Pacheco, Pedro Nuno R. – Dissertação – *Automatização do Processo de Dimensionamento das Estruturas de Betão Armado de acordo com o EC2*, IST, Lisboa, Outubro 2011;
- [14] <http://www.sopsec.pt/Imgs/intro.html>
- [15] <https://www.google.com/maps/place/Sopsec+Ii+-+Gest%C3%A3o+De+Projectos+E+Empreendimentos+Imobili%C3%A1rios,+Lda/@41.136714,-8.645854,15z/data=!4m2!3m1!1s0xd2465431c742f31:0x554e9f61c53c2230?hl=en>
- [16] <http://aldowerle.blogspot.pt/2012/08/patologia-em-alvenaria-estrutural.html>

# ANEXOS

## **ANEXO A** – SOLUÇÃO ESTRUTURAL DO PÓRTICO

## **ANEXO B** – PROCEDIMENTO E OPÇÕES DE CÁLCULO NOS PROGRAMAS UTILIZADOS

B.1 – *Robot Structural Analysis Professional 2014* (modo *Required Reinforcement*)

B.2 – *Robot Structural Analysis Professional 2014* (modo *Provided Reinforcement*)

B.3 – *Robot Structural Analysis Professional 2014* (modo *Provided Reinforcement*  
utilizando o comando *Typical Reinforcement*)

B.4 – *XD-Conserv*

## **ANEXO C** – CÁLCULOS E RESULTADOS REFERENTES AO CAPÍTULO 5

C.1 – Método Analítico

C.2 – *Robot Structural Analysis Professional 2014* (modo *Required Reinforcement*)

C.3 – *Robot Structural Analysis Professional 2014* (modo *Provided Reinforcement*)

C.4 – *Robot Structural Analysis Professional 2014* (modo *Provided Reinforcement*  
utilizando o comando *Typical Reinforcement*)

C.5 – Programa *XD-Conserv*



# ANEXO A

SOLUÇÃO ESTRUTURAL DO PÓRTICO CENTRAL

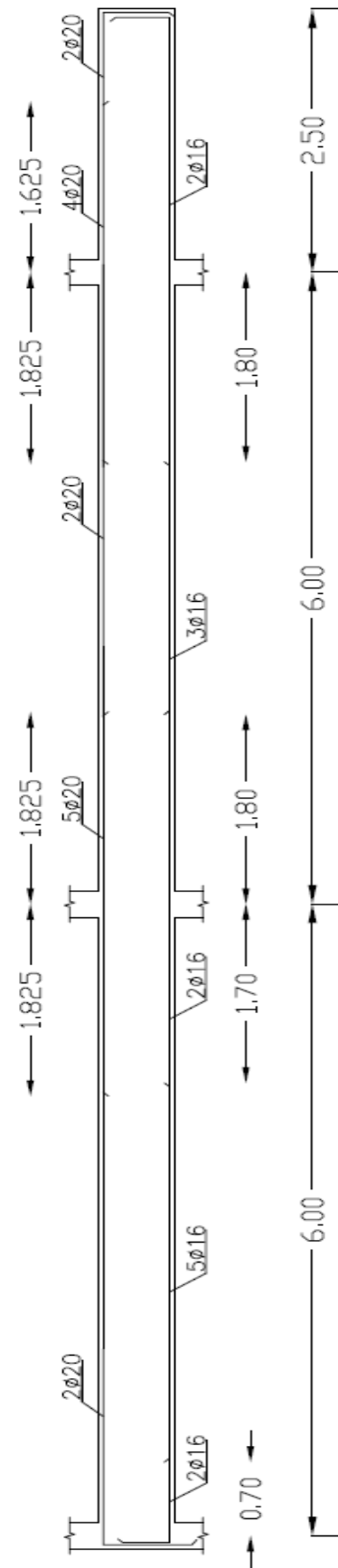


Figura A.1 - Solução estrutural do pórtico

# ANEXO B

PROCEDIMENTO E OPÇÕES DE CÁLCULO

## B.1 – Robot Structural Analysis Professional 2014 (modo *Required Reinforcement*)

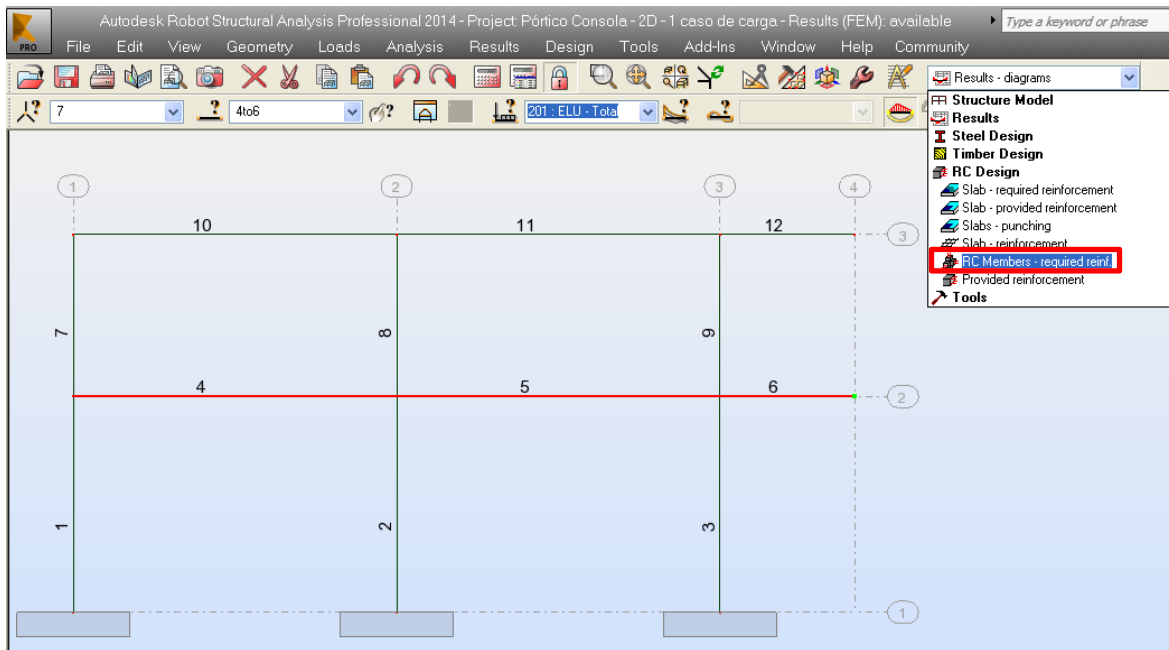


Figura B.1.1 – Escolha do módulo de cálculo *RC Members – Required Reinforcement*

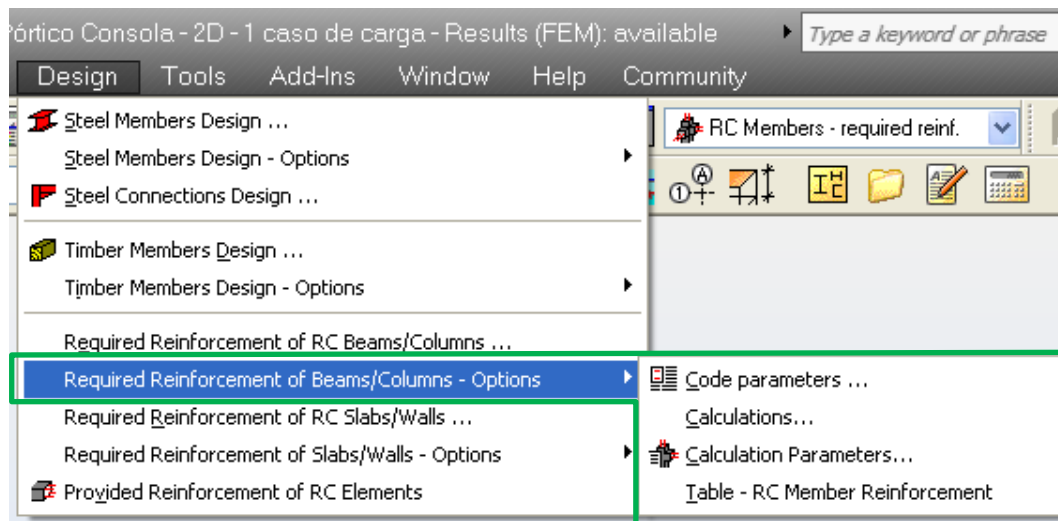


Figura B.1.2 – Opções referentes ao módulo *Required Reinforcement*

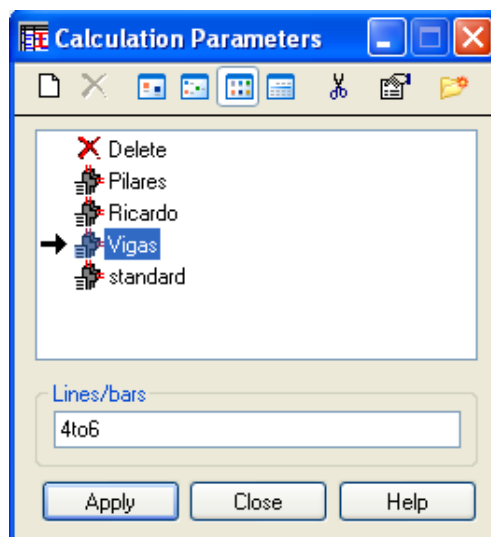


Figura B.1.3 – Menu referente aos parâmetros de cálculo

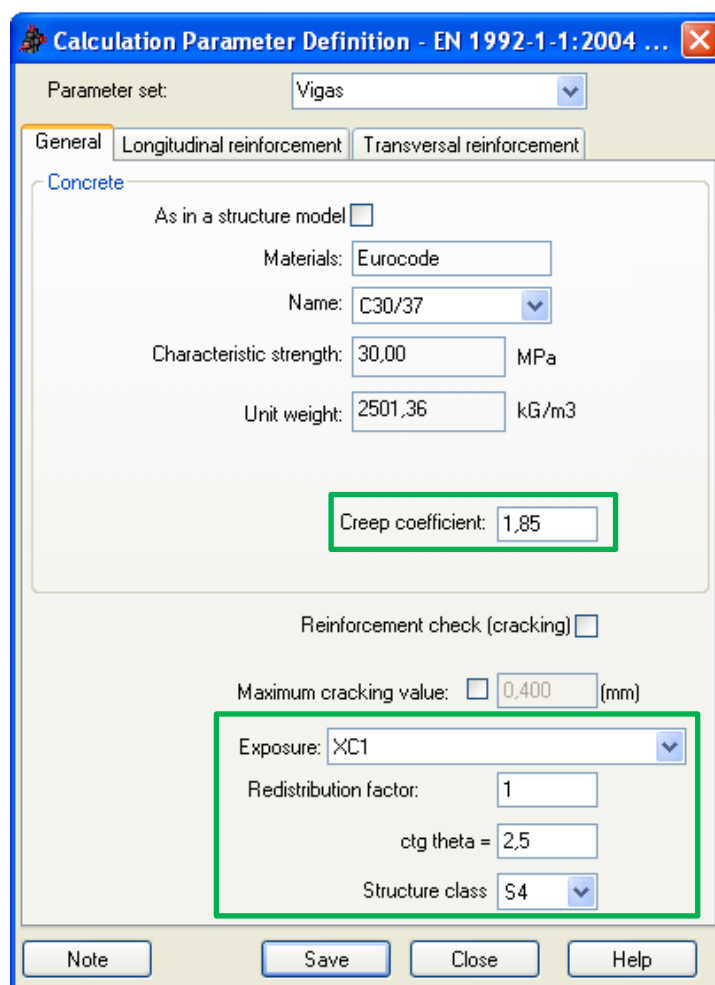


Figura B.1.4 - Menu referente às definições dos parâmetros de cálculo (separador das opções gerais)

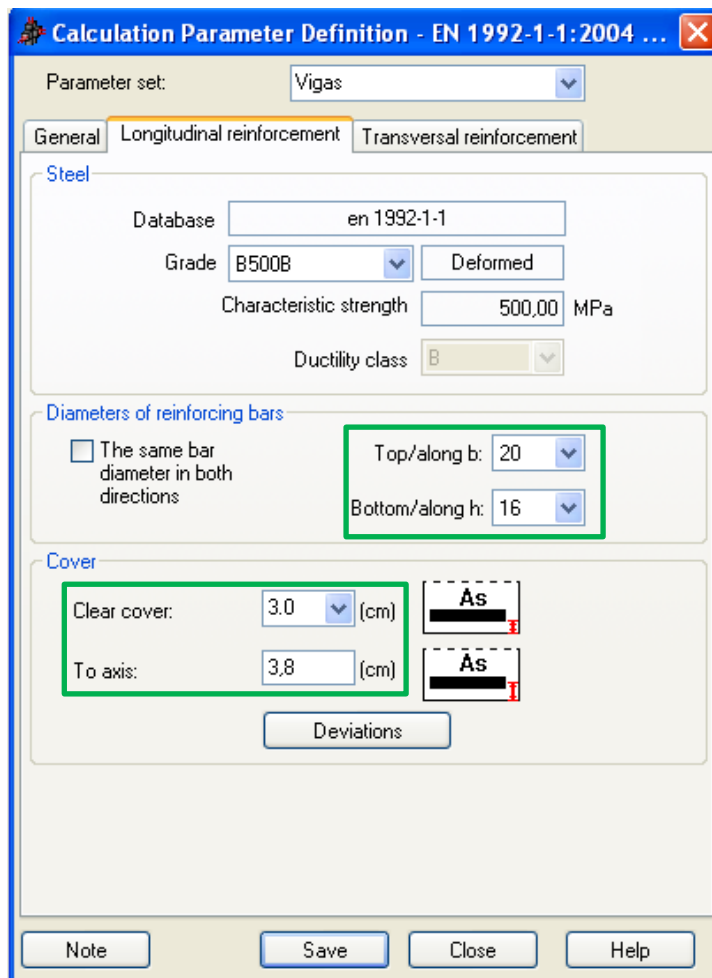


Figura B.1.5 - Menu referente às definições dos parâmetros de cálculo (separador alusivo à armadura longitudinal)

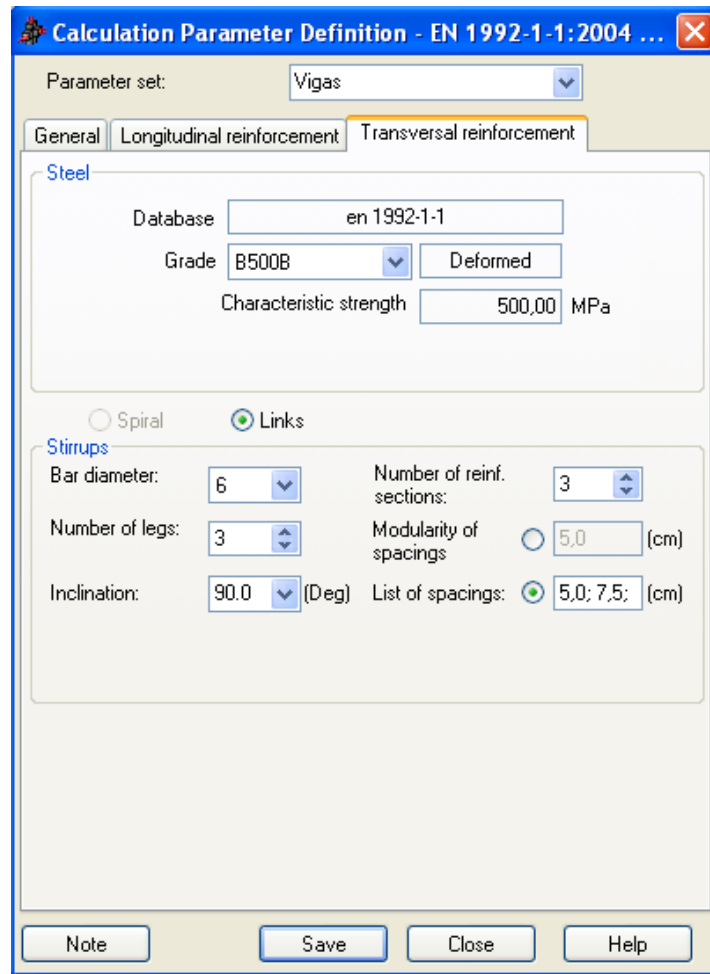


Figura B.1.6 - Menu referente às definições dos parâmetros de cálculo (separador alusivo às armadura transversal)

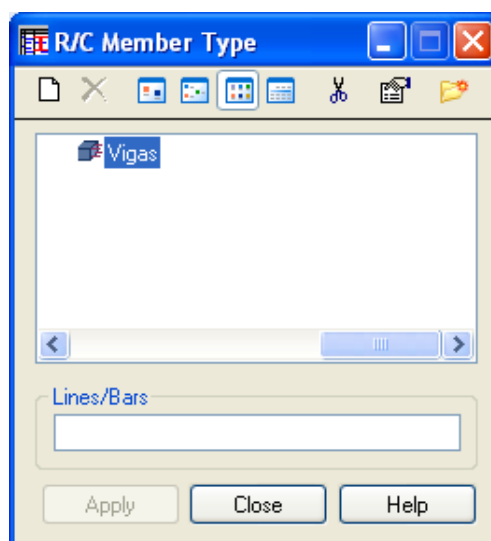


Figura B.1.7 - Menu referente aos tipos de membro a serem calculados

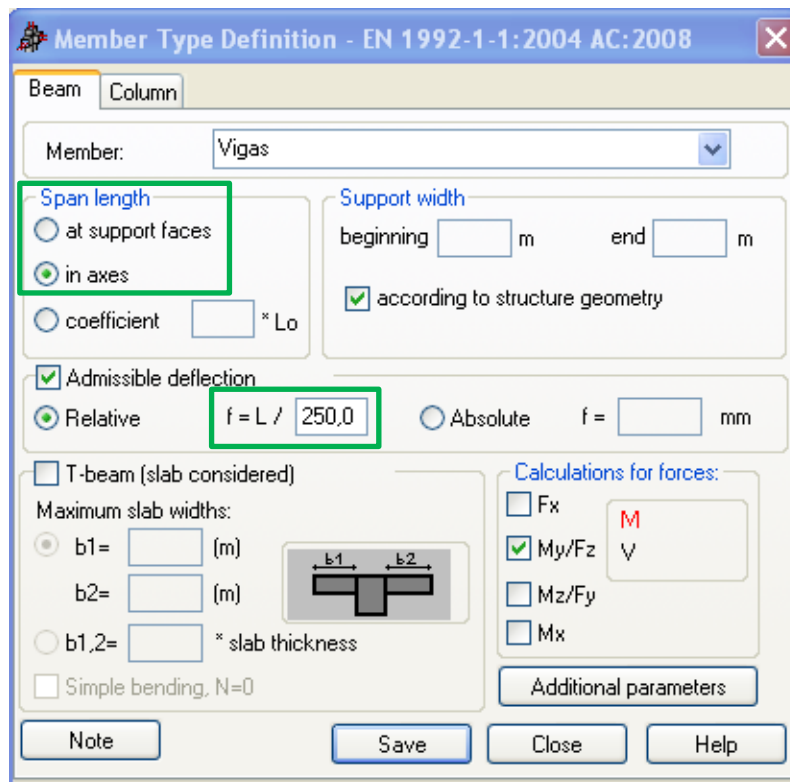


Figura B.1.8 - Menu referente às definições dos tipos de membros (separador alusivo às vigas)

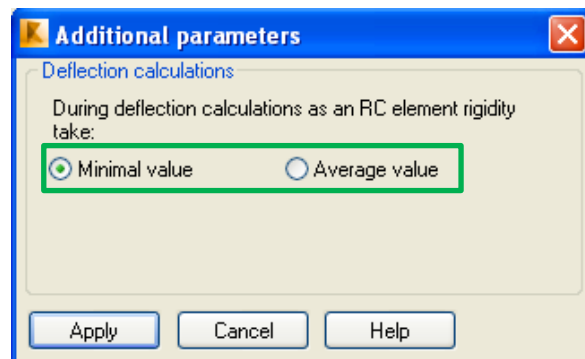


Figura B.1.9 - Menu referente aos parâmetros adicionais para o cálculo da flecha

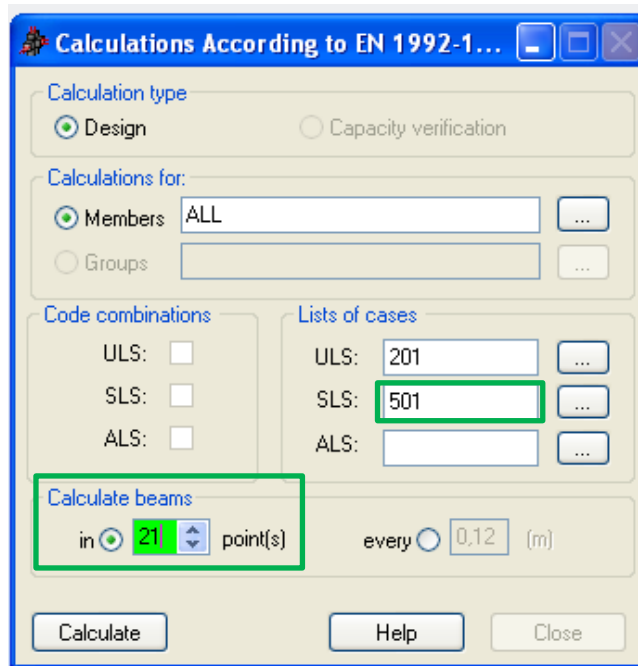


Figura B.1.10 - Menu referente aos cálculos de acordo com a regulamentação escolhida

B.2 – Robot Structural Analysis Professional 2014 (modo *Provided Reinforcement*)

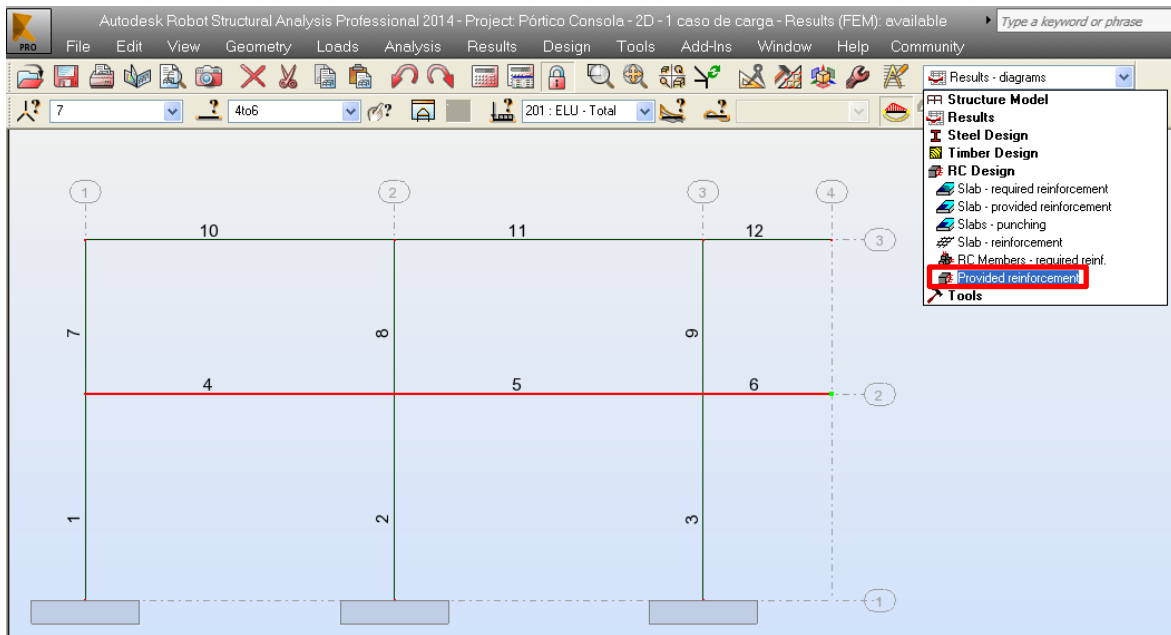


Figura B.2.1 - Escolha do módulo de cálculo - *Provided Reinforcement*

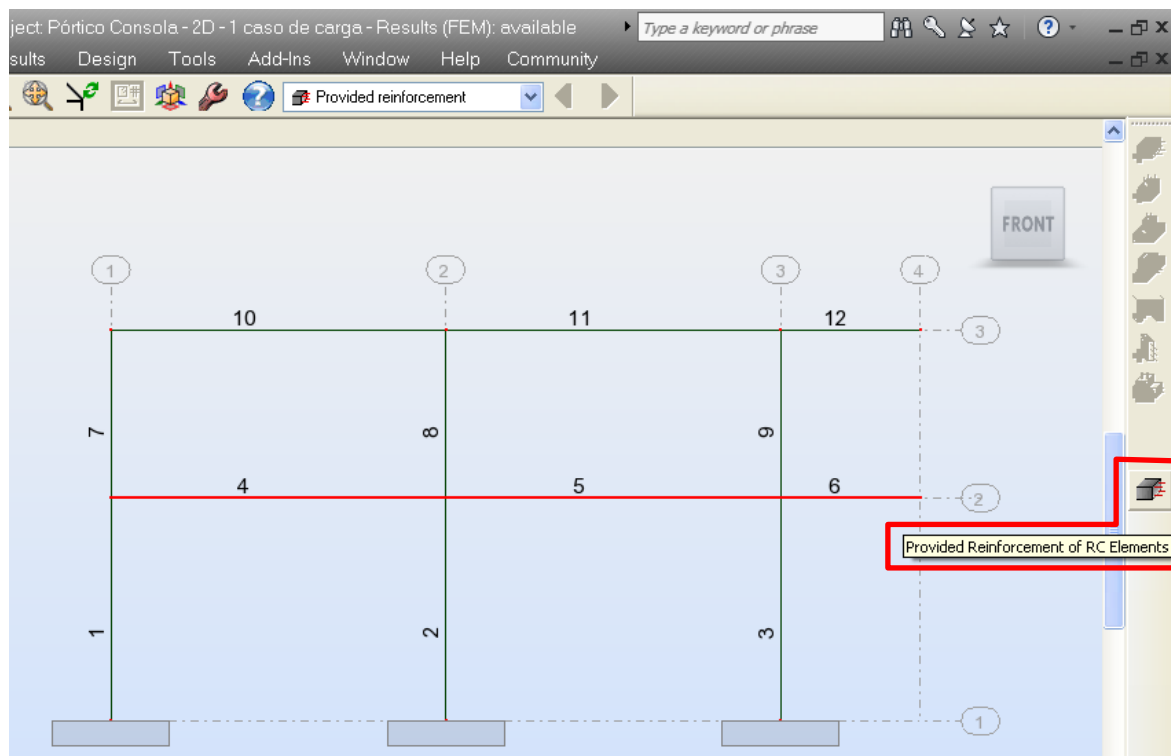


Figura B.2.2 – Selecção do ícone para o cálculo das armaduras necessárias nos elementos (*Provided Reinforcement of RC Elements*) que se encontra no menu vertical direito

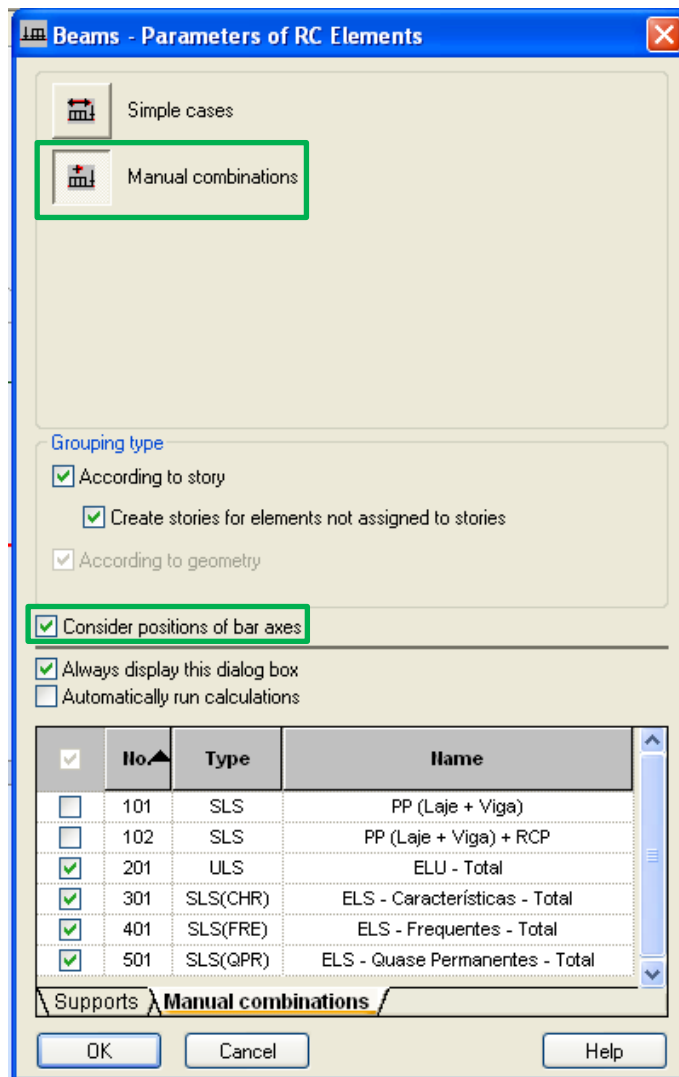


Figura B.2.3 – Menu referente aos parâmetros dos elementos de betão armado (vigas)

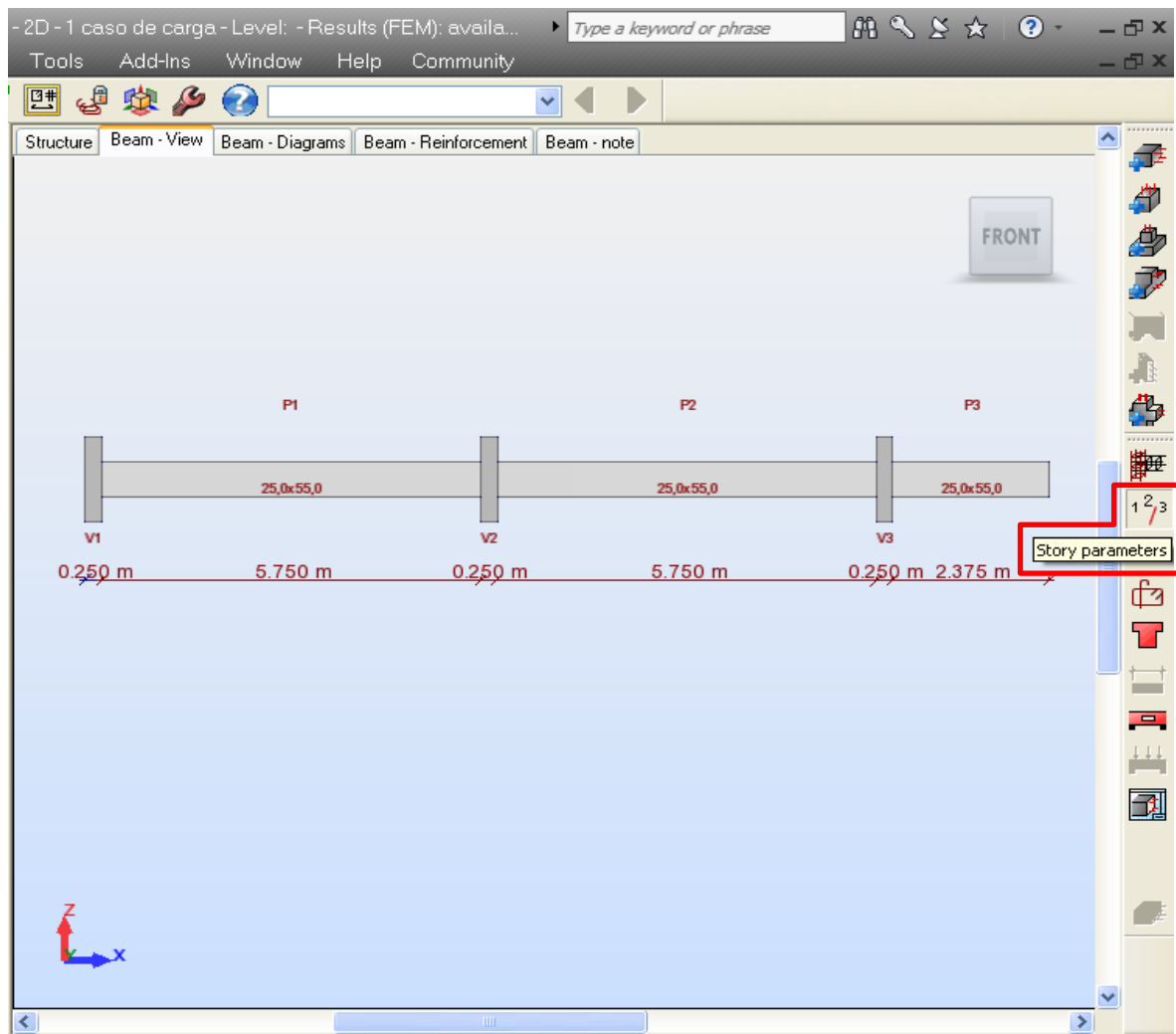


Figura B.2.4 - Selecção do ícone para definir os parâmetros históricos (*Story Parameters*) que se encontra no menu vertical direito

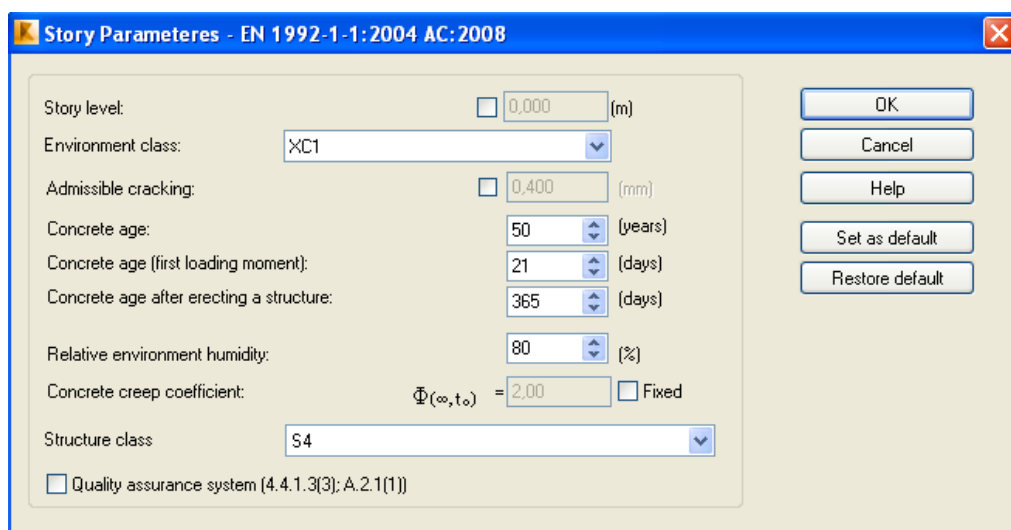


Figura B.2.5 – Menu que define os parâmetros gerais de acordo com a regulamentação escolhida

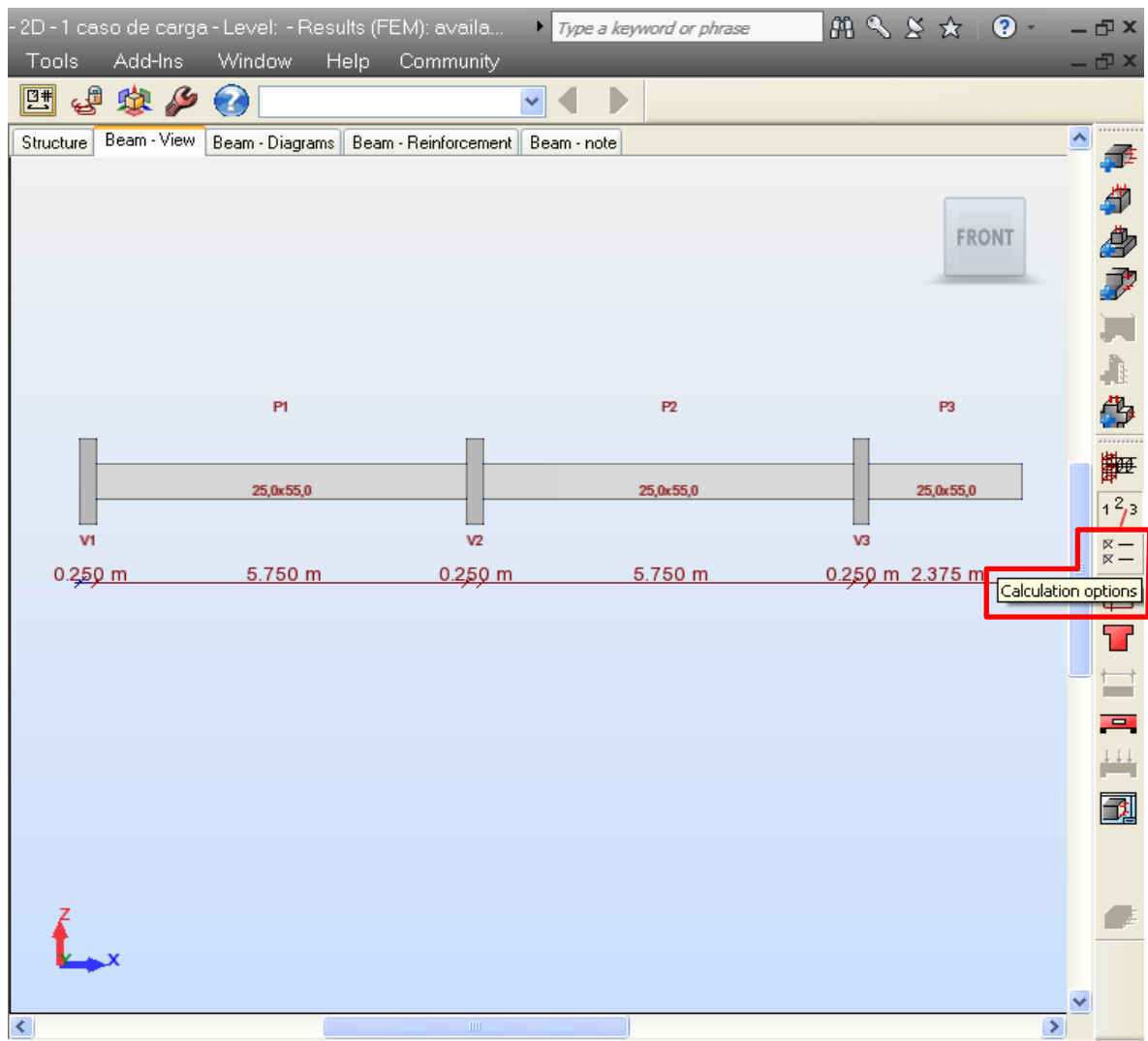


Figura B.2.6 - Selecção do ícone para definir as opções de cálculo (*Calculation Options*) que se encontra no menu vertical direito

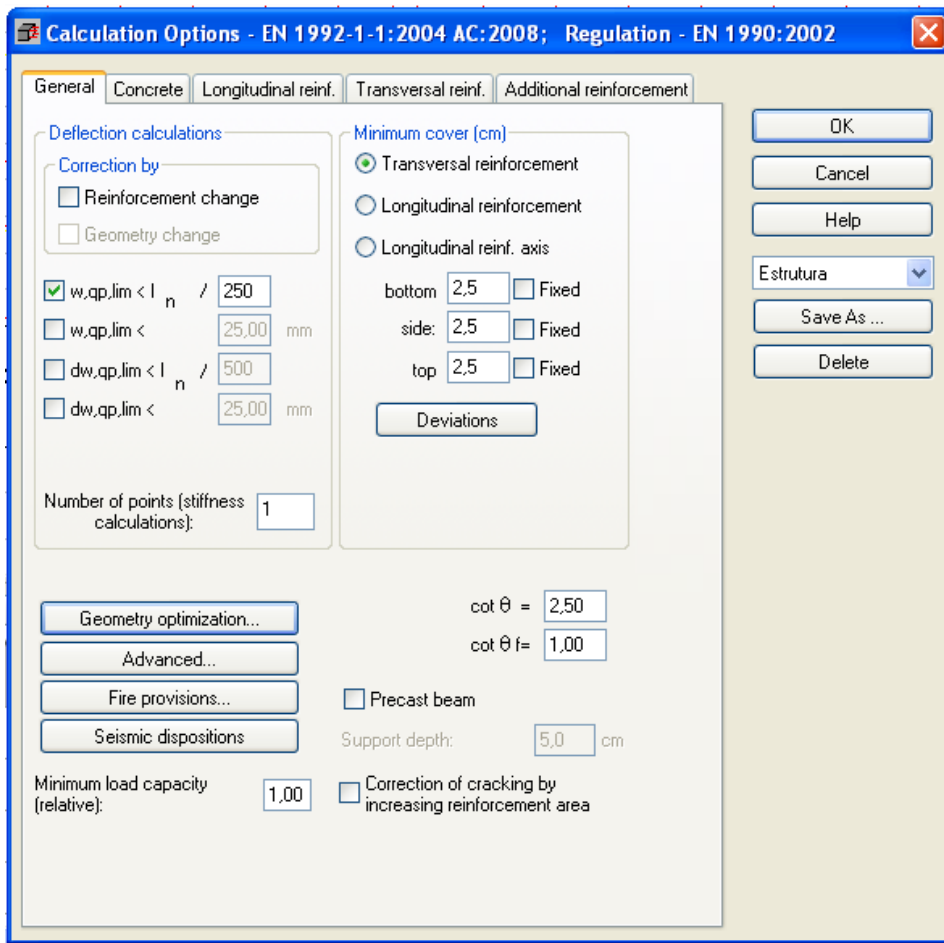


Figura B.2.7 – Menu referente as opções de cálculo (separador das definições gerais)

**Advanced Options**

Support moment redistribution

Reduction of support moments by

for ULS,ALS:  %  Auto  for SLS:  %

Avoid compressive reinforcement at a support

Calculation span length for concrete supports

according to code  in the axis

Moment on extreme support (pinned):  $\beta_1 =$   \* M(max)

Minimum reinforcement area on the support:  $\beta_2 =$   \* As(max)

Participation of stirrups in shear reinforcement  $\beta_3 =$

Number of calculation points in the span:

Cantilever length for which the resistance verification is not performed:  m

Automatic generation of self-weight for new beams

Axial force taken into account

Torsion taken into account

Display diagrams for all combinations

Verification only for positive deflections

Redistribution of a shear force near supports

OK Cancel Help

Figura B.2.8 – Menu referente às opções avançadas

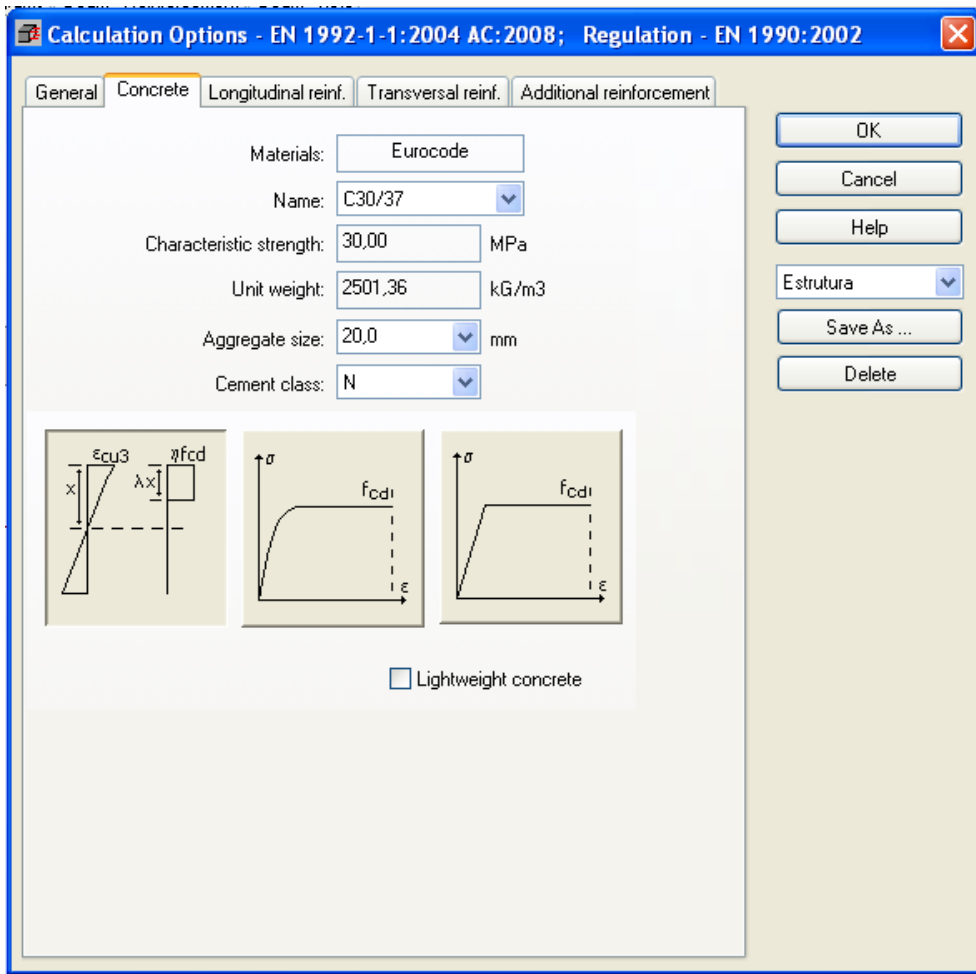


Figura B.2.9 – Menu referente às opções de cálculo (separador alusivo ao betão)

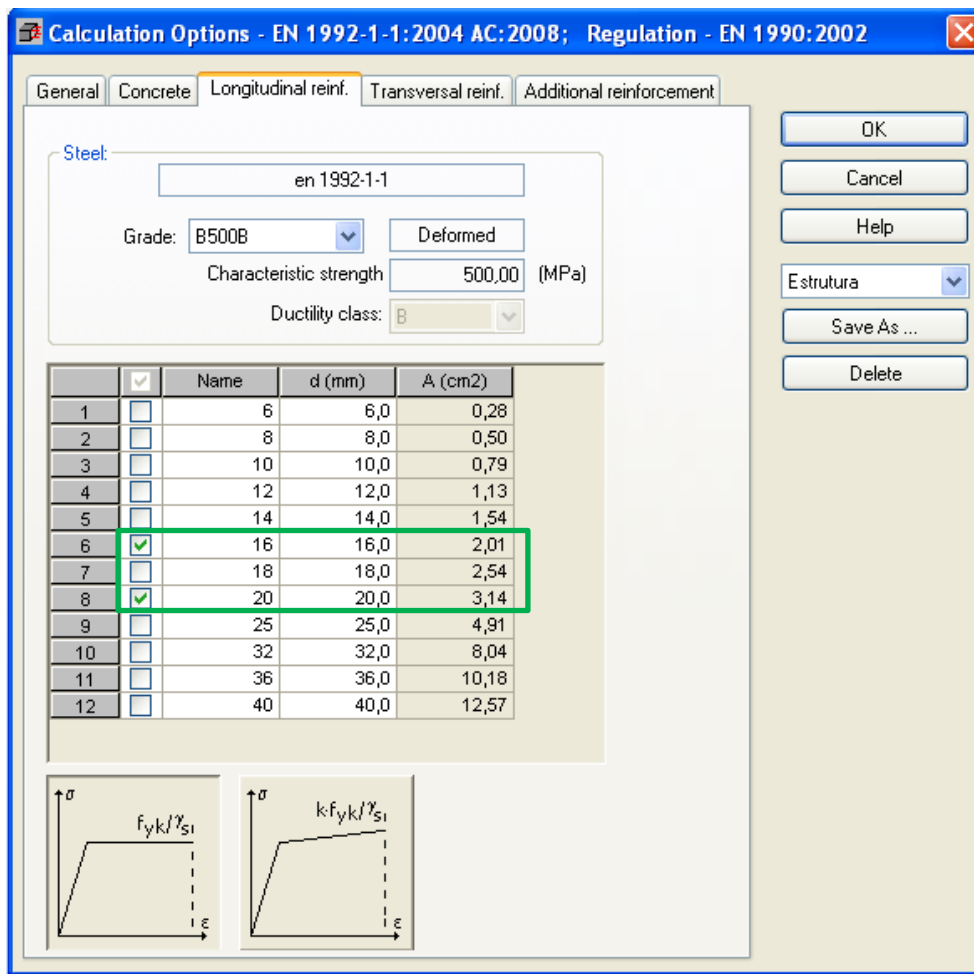


Figura B.2.10 – Menu referente às opções de cálculo (separador alusivo à armadura longitudinal)

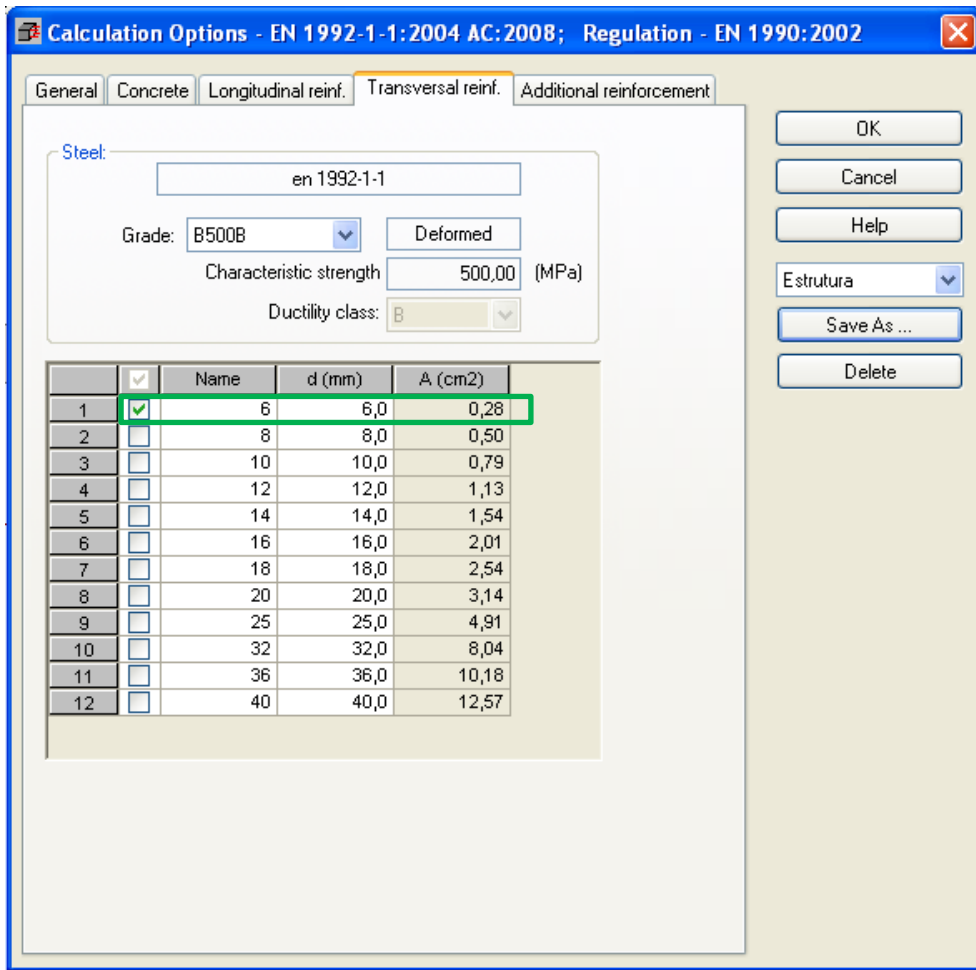


Figura B.2.11 – Menu referente às opções de cálculo (separador alusivo à armadura transversal)

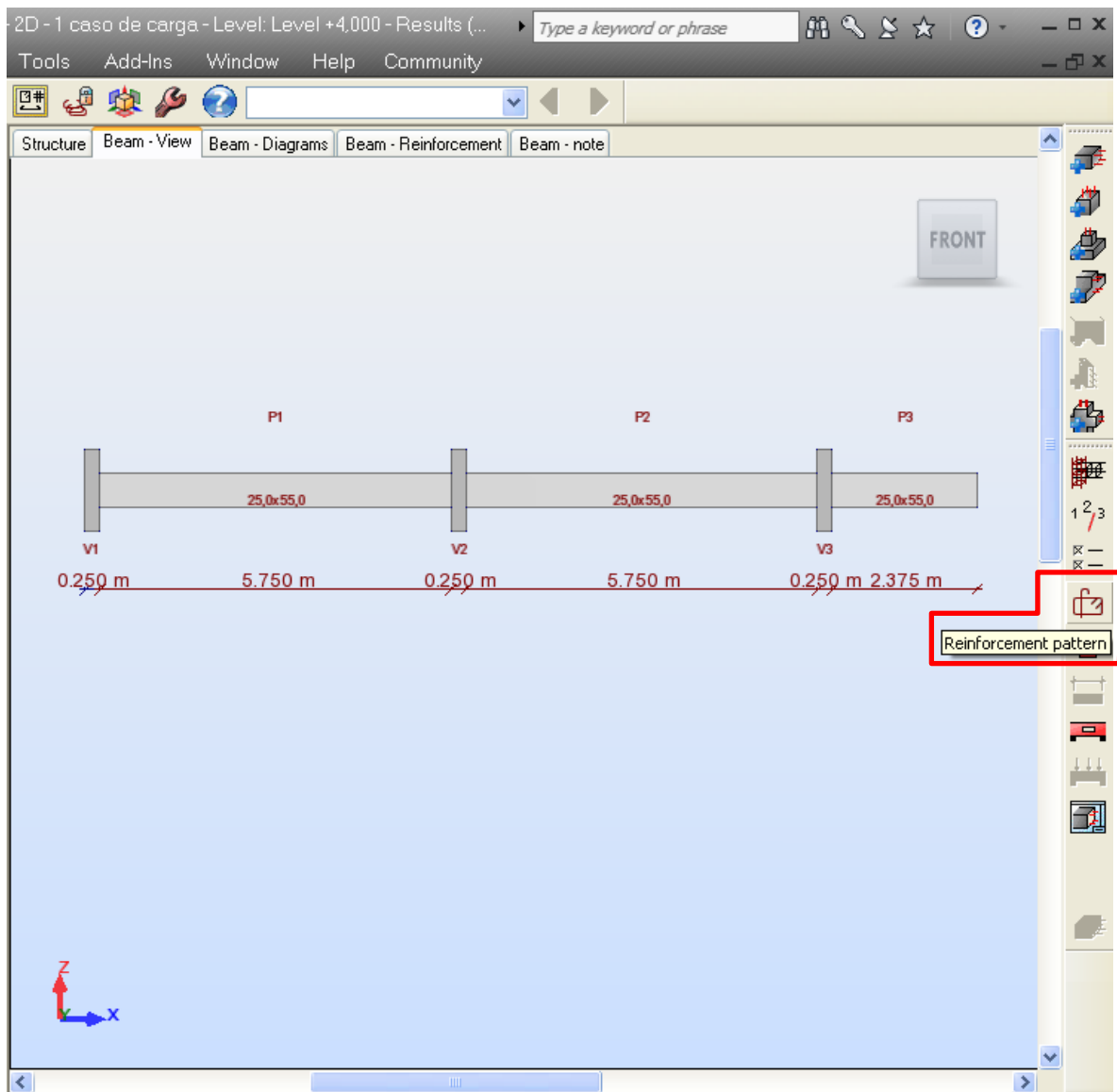


Figura B.2.12 - Selecção do ícone para definir as opções padrão de armaduras que se encontra no menu vertical direito

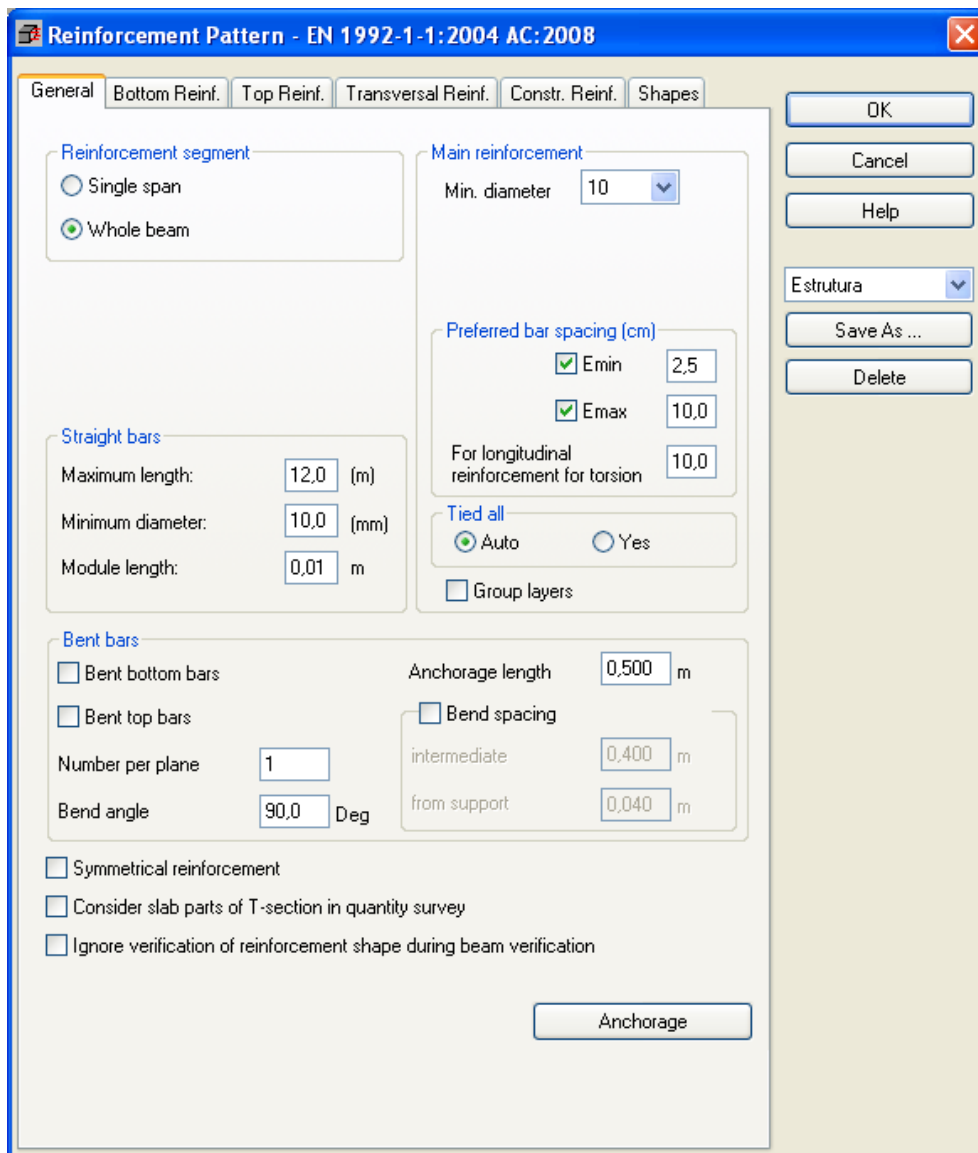


Figura B.2.13 – Menu referente as opções padrão de armaduras de acordo com a regulamentação escolhida (separador das definições gerais)

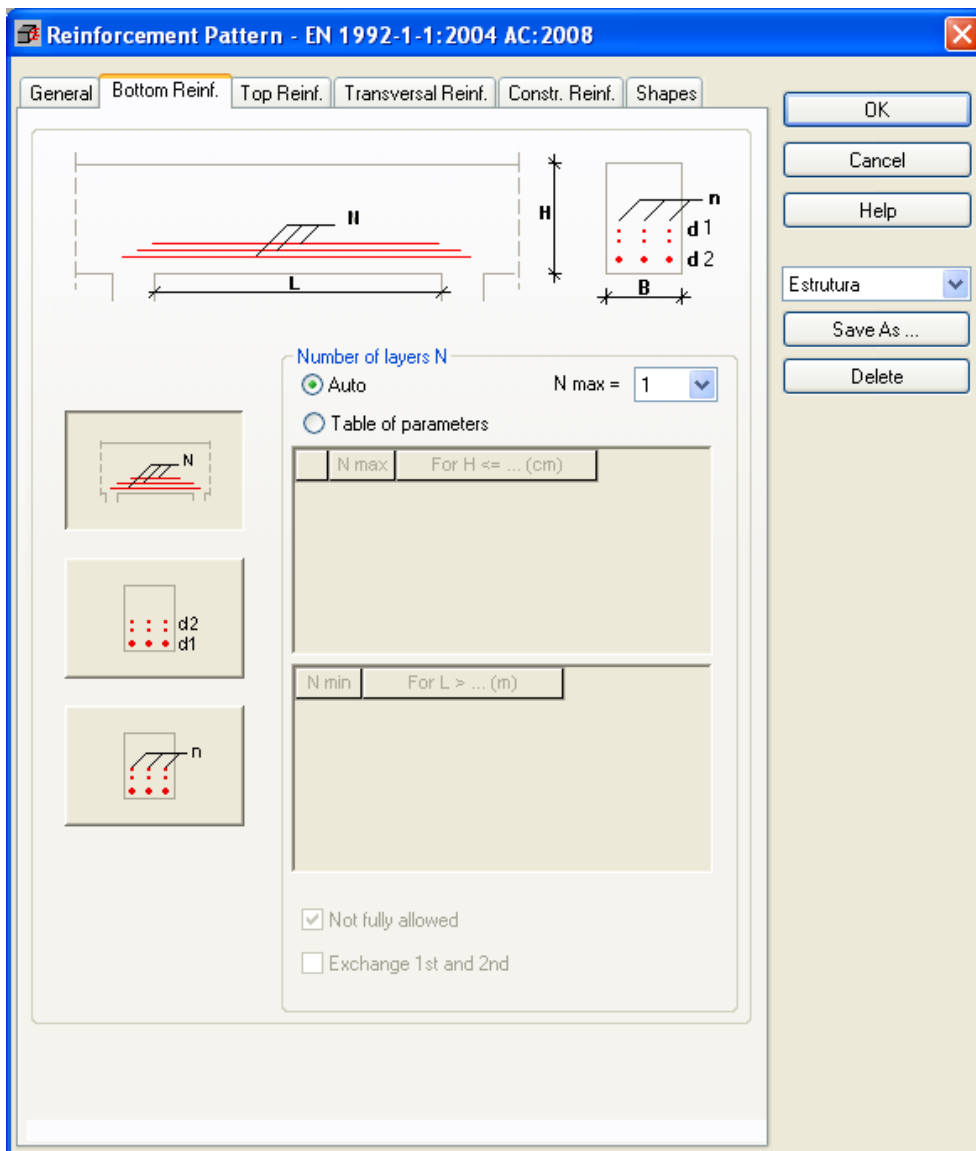


Figura B.2.14 - Menu referente às opções padrão de armaduras de acordo com a regulamentação escolhida (separador alusivo à armadura longitudinal inferior)

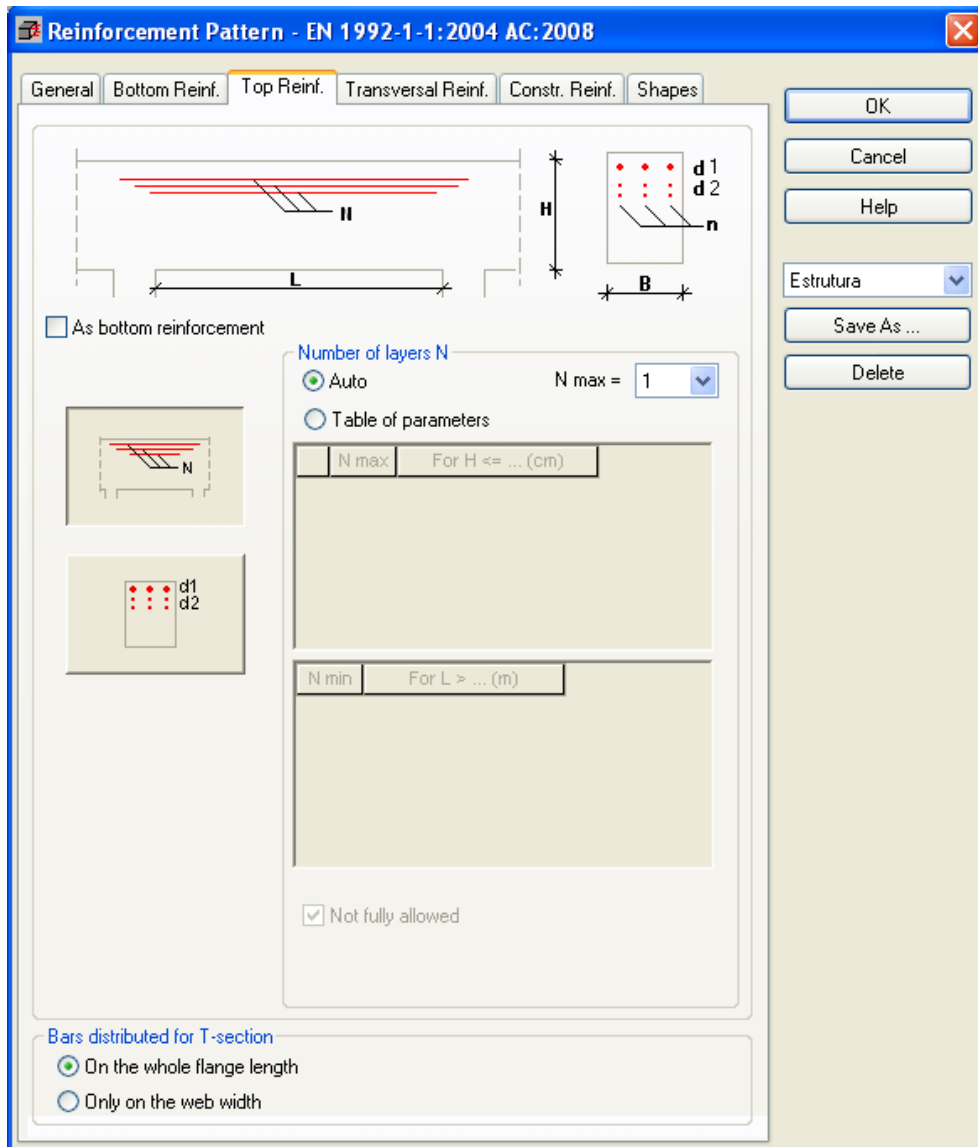


Figura B.2.15 - Menu referente às opções padrão de armaduras de acordo com a regulamentação escolhida (separador alusivo à armadura longitudinal superior)

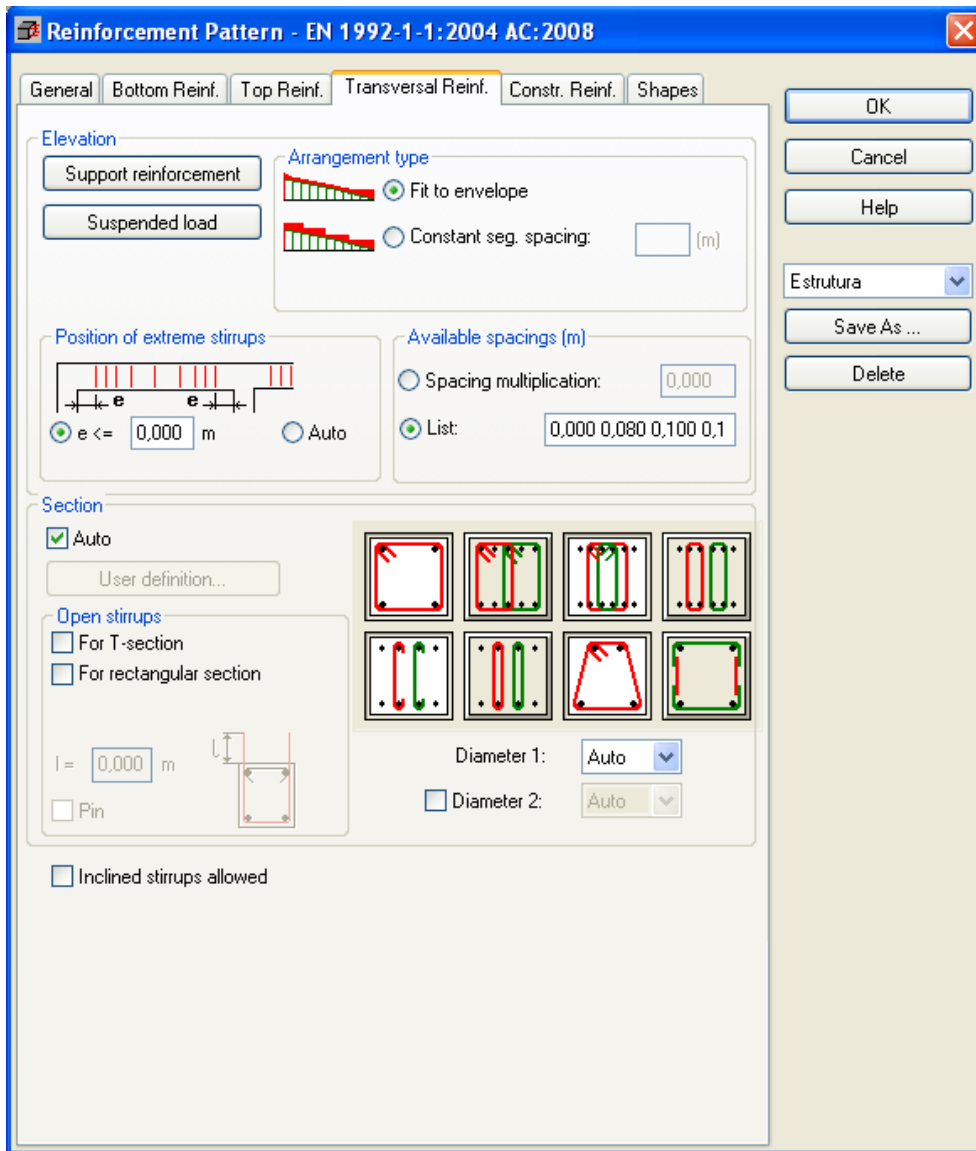


Figura B.2.16 - Menu referente às opções padrão de armaduras de acordo com a regulamentação escolhida (separador alusivo à armadura transversal)

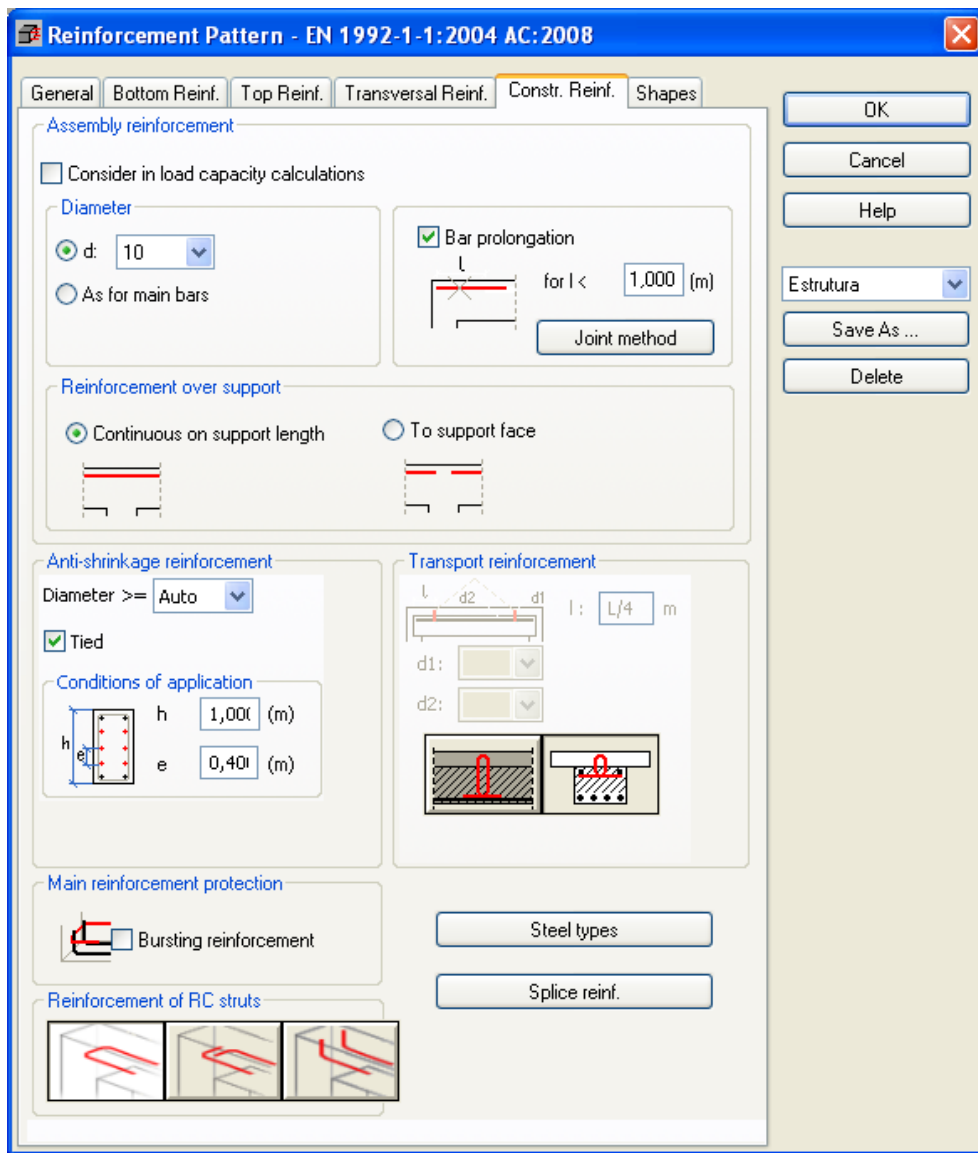


Figura B.2.17 - Menu referente às opções padrão de armaduras de acordo com a regulamentação escolhida (separador alusivo à armadura construtiva)

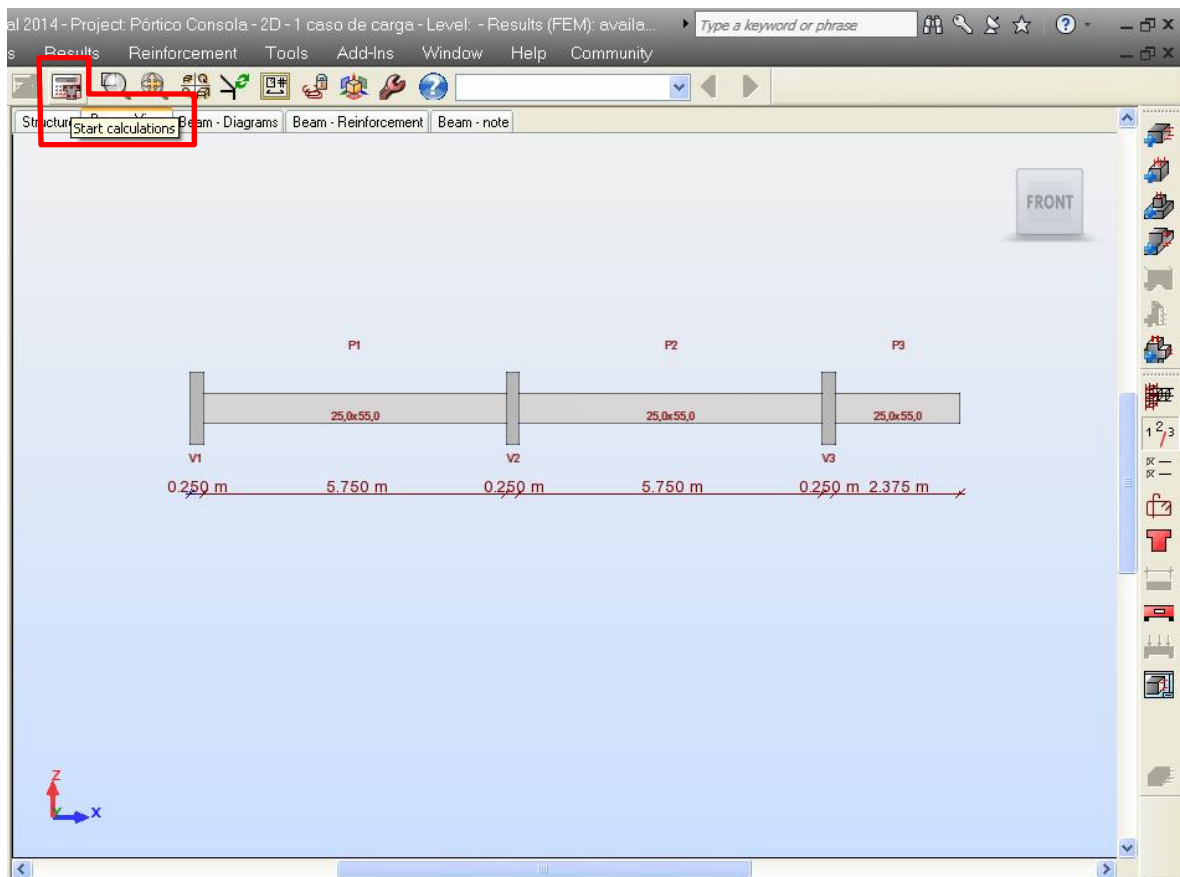


Figura B.2.18 - Seleção do ícone para executar os cálculos (*Start calculations*) que se encontra no menu principal superior

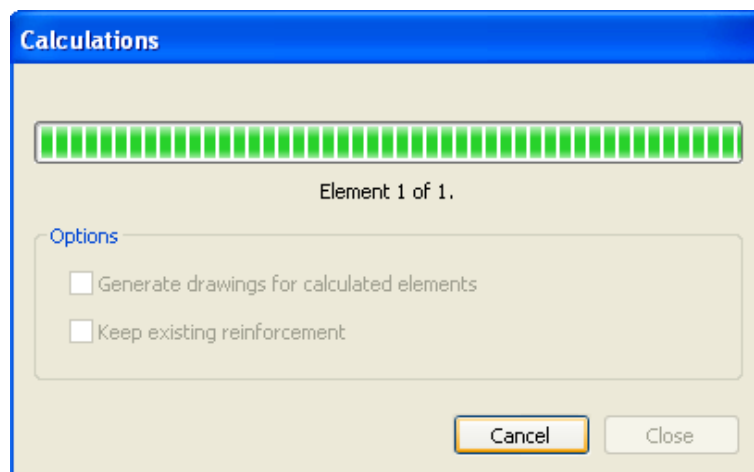


Figura B.2.19 – Execução dos cálculos

B.3 – Robot Structural Analysis Professional 2014 (modo *Provided Reinforcement* utilizando o comando *Typical Reinforcement*)

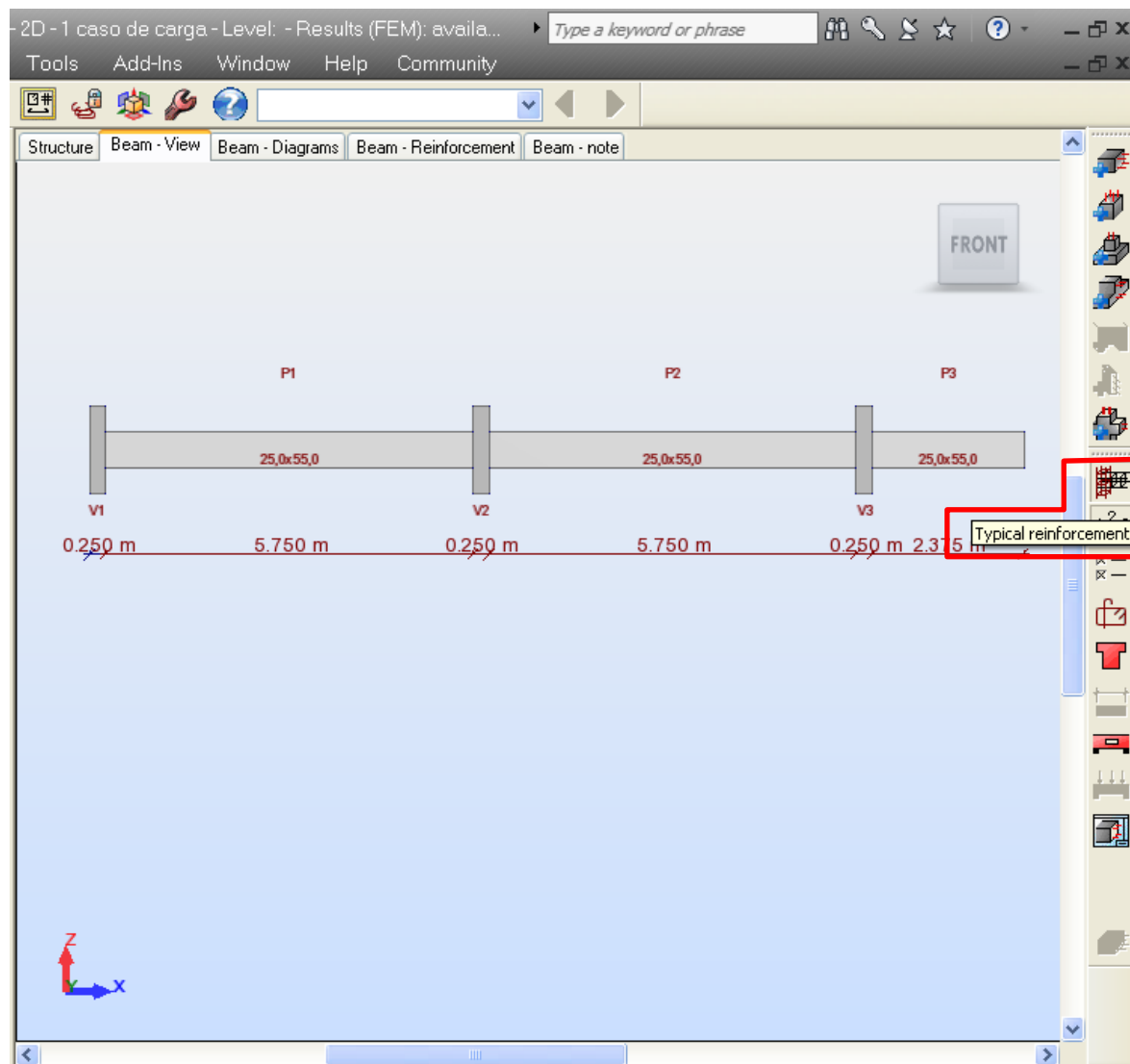


Figura B.3.1 – Cálculo pelo comando *Typical Reinforcement* que se encontra no menu vertical direito

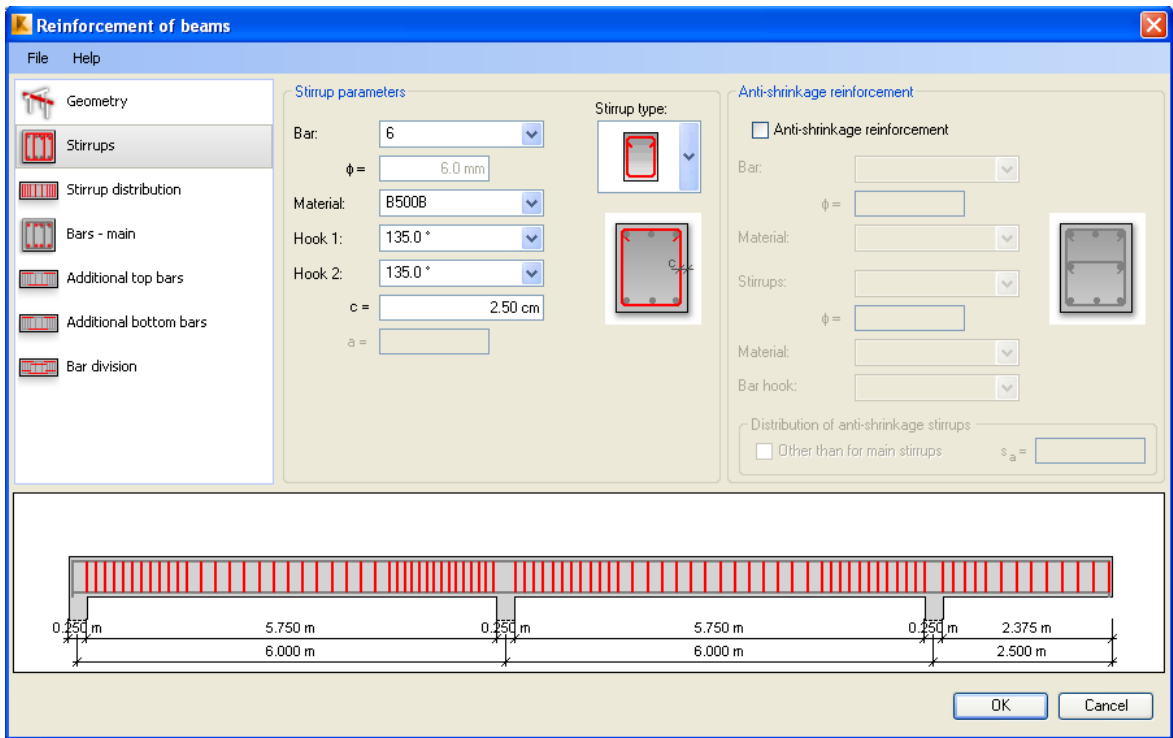


Figura B.3.2 – Menu referente à definição da disposição de armaduras nas vigas (separador alusivo à armadura transversal)

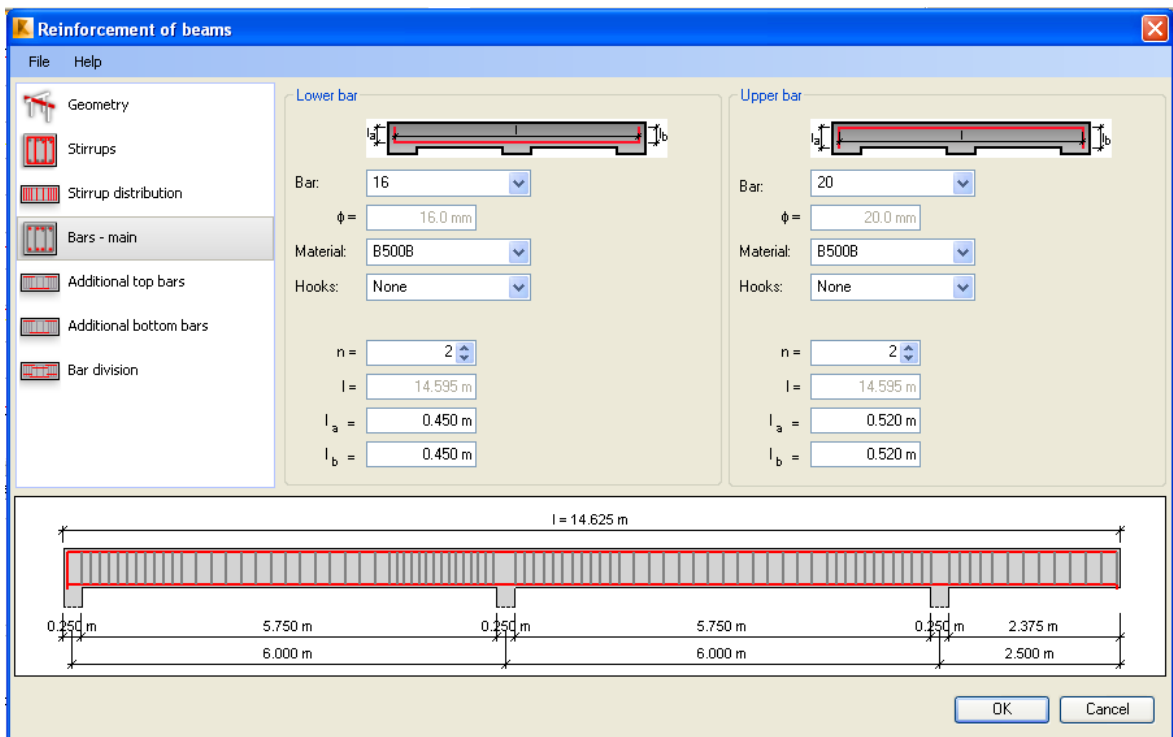


Figura B.3.3 – Menu referente à definição da disposição de armaduras nas vigas (separador alusivo à armadura longitudinal principal inferior e superior)

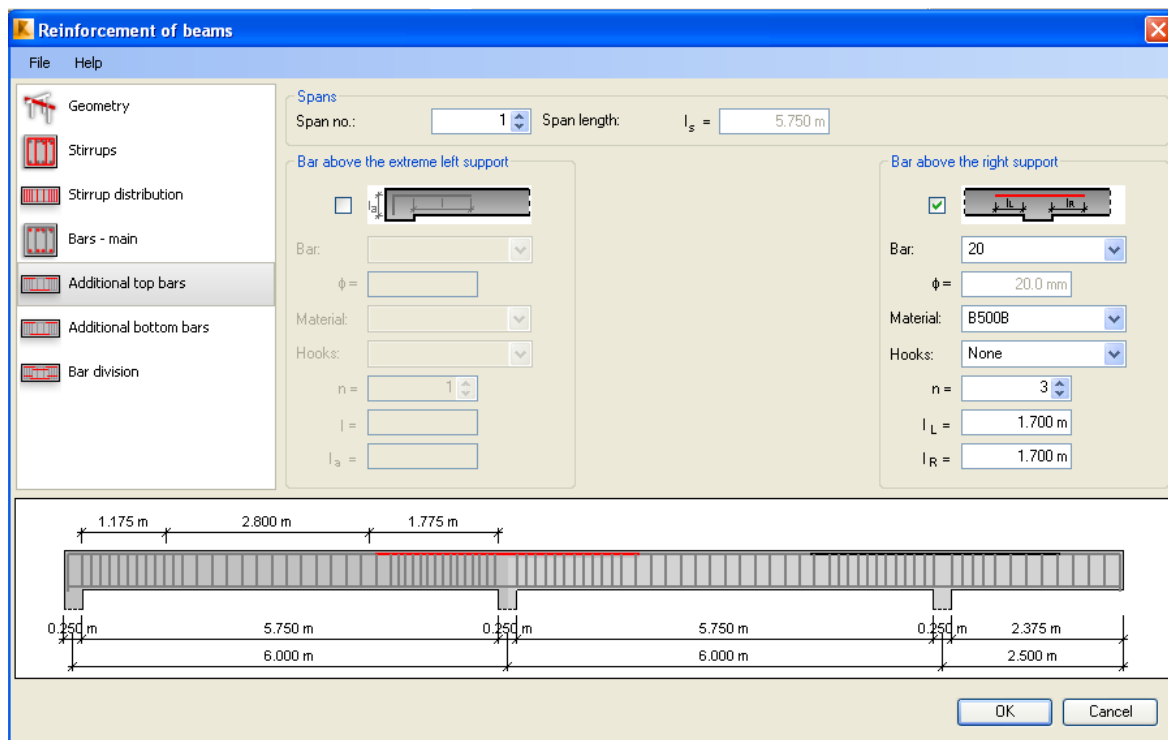


Figura B.3.4 – Menu referente à definição da disposição de armaduras nas vigas (separador alusivo à adição de armaduras longitudinais superiores – apoios entre o tramo de extremidade)

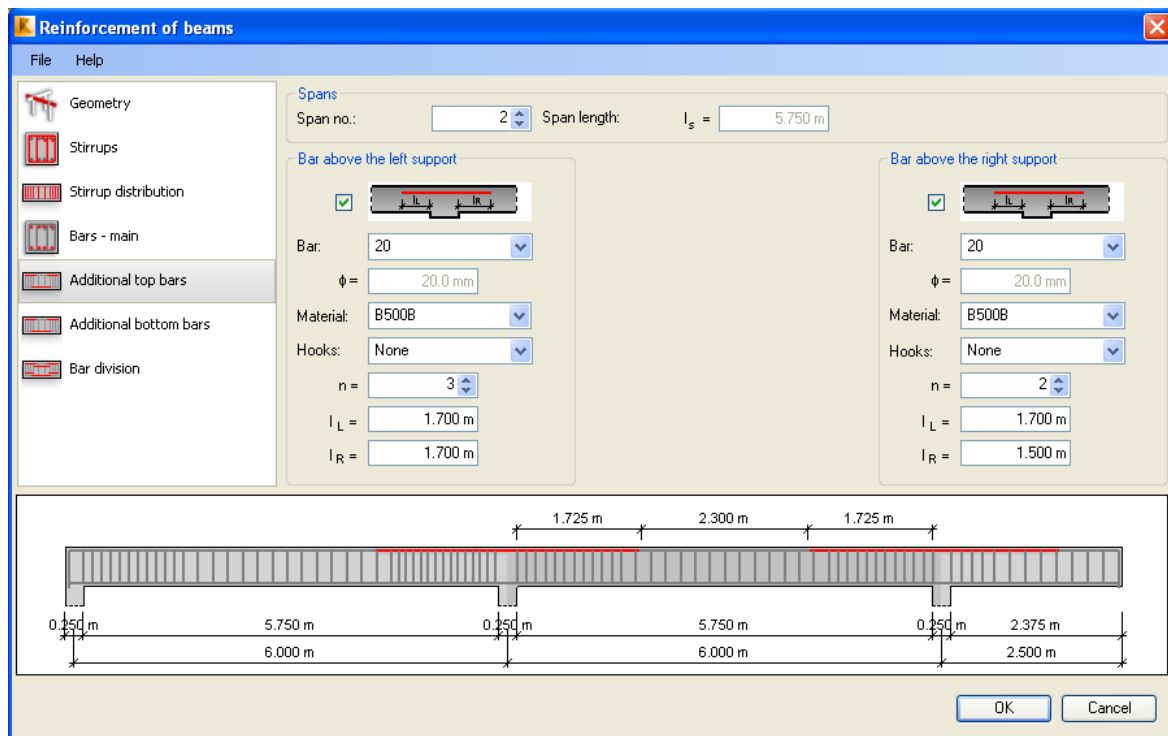


Figura B.3.5 – Menu referente à definição da disposição de armaduras nas vigas (separador alusivo à adição de armaduras longitudinais superiores – apoios entre o tramo intermédio)

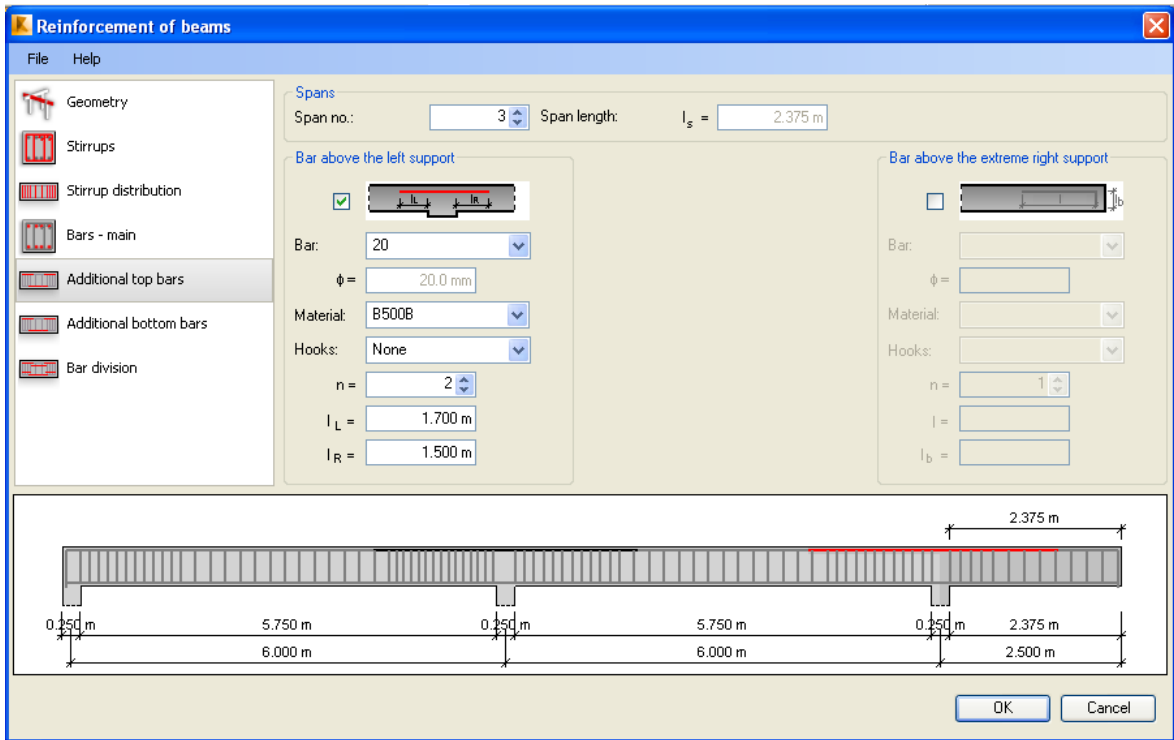


Figura B.3.6 – Menu referente à definição da disposição de armaduras nas vigas (separador alusivo à adição de armaduras longitudinais superiores – apoio do tramo em consola)

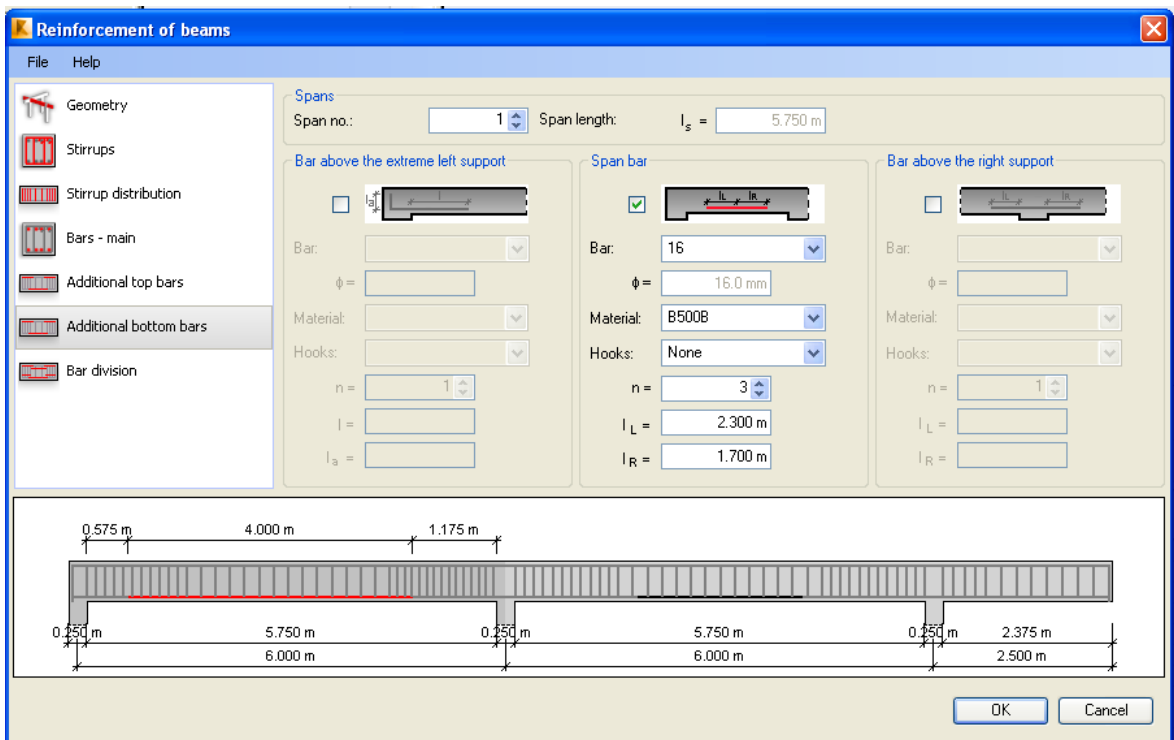


Figura B.3.7 – Menu referente à definição da disposição de armaduras nas vigas (separador alusivo à adição de armaduras longitudinais inferiores – tramo de extremidade)

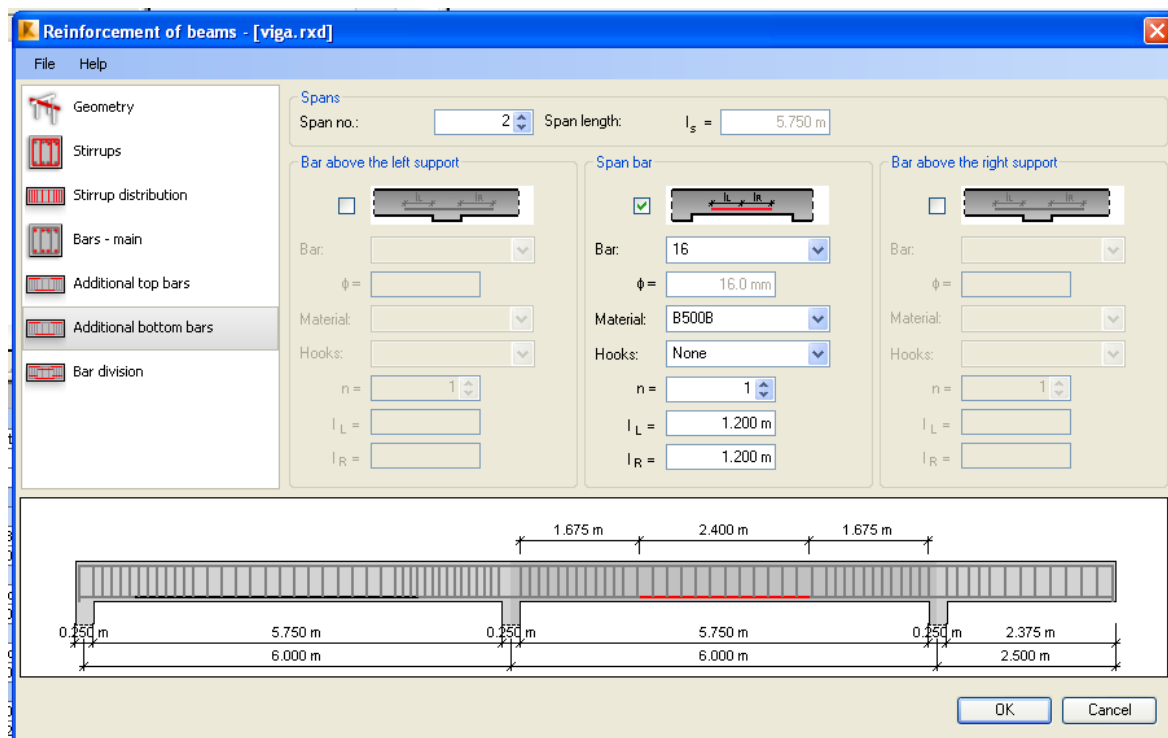


Figura B.3.8 – Menu referente à definição da disposição de armaduras nas vigas (separador alusivo à adição de armaduras longitudinais inferiores – tramo intermédio)

## B.4 – *XD-Conserv*

The screenshot shows a dialog box titled 'Materiais' with a blue header bar. It has two tabs: 'Betão' (selected) and 'Aço'. The main area displays the material name 'C30/37' and four input fields with their corresponding values:

Propriedade	Valor
fck - resistência característica à compressão (MPa)	30,00
fcm - resistência média à compressão (MPa)	38,00
fctm - resistência à tração (MPa)	2,90
Ecm - valor médio do módulo de elasticidade (GPa)	32,84

At the bottom, there are 'OK' and 'Cancelar' buttons.

Figura B.4.1 – Materiais (separador alusivo às propriedades do betão pretendido aos 28dias de idade)

The screenshot shows the same 'Materiais' dialog box, but with the 'Aço' tab selected. The main area displays the material name 'A500' and two input fields with their corresponding values:

Propriedade	Valor
f <sub>yk</sub> - tensão característica de cedência (MPa)	500,00
E <sub>s</sub> - módulo de elasticidade (GPa)	200,00

At the bottom, there are 'OK' and 'Cancelar' buttons.

Figura B.4.2 - Materiais (separador alusivo à armadura)

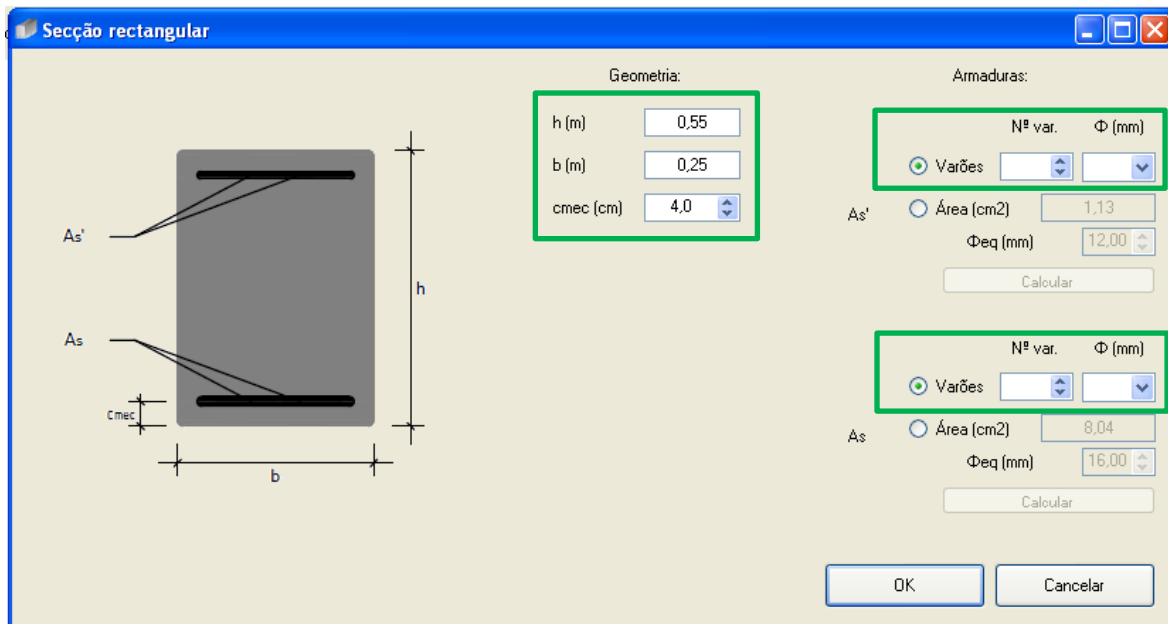


Figura B.4.3 - Propriedades da secção (geometria e armaduras longitudinais inferiores e superiores)

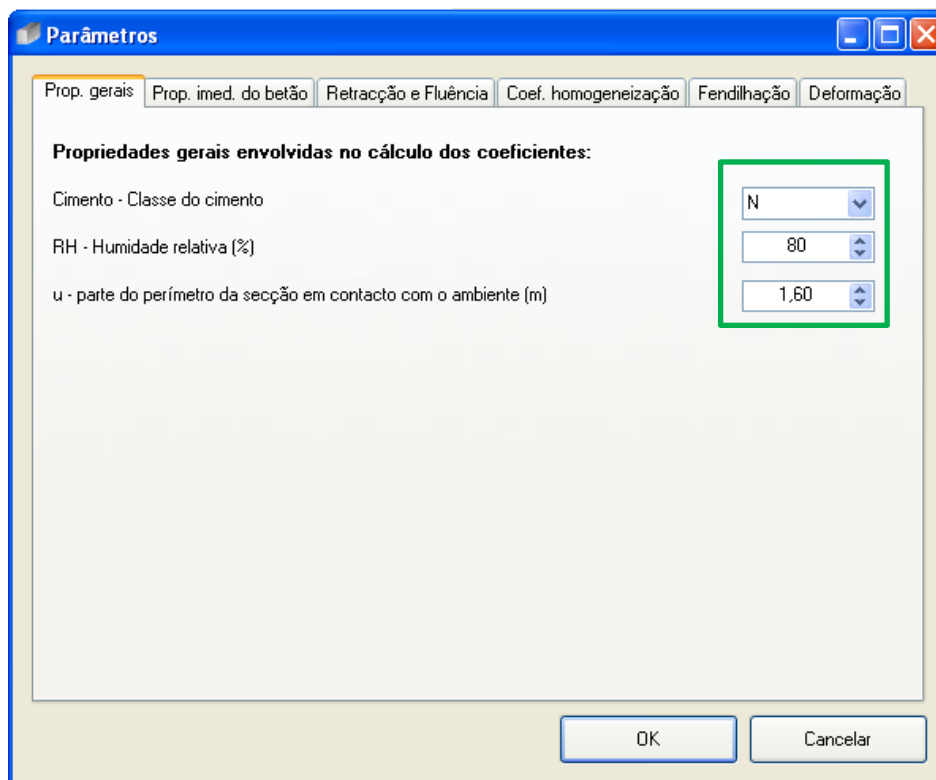


Figura B.4.4 - Parâmetros (separador alusivo às propriedades gerais)

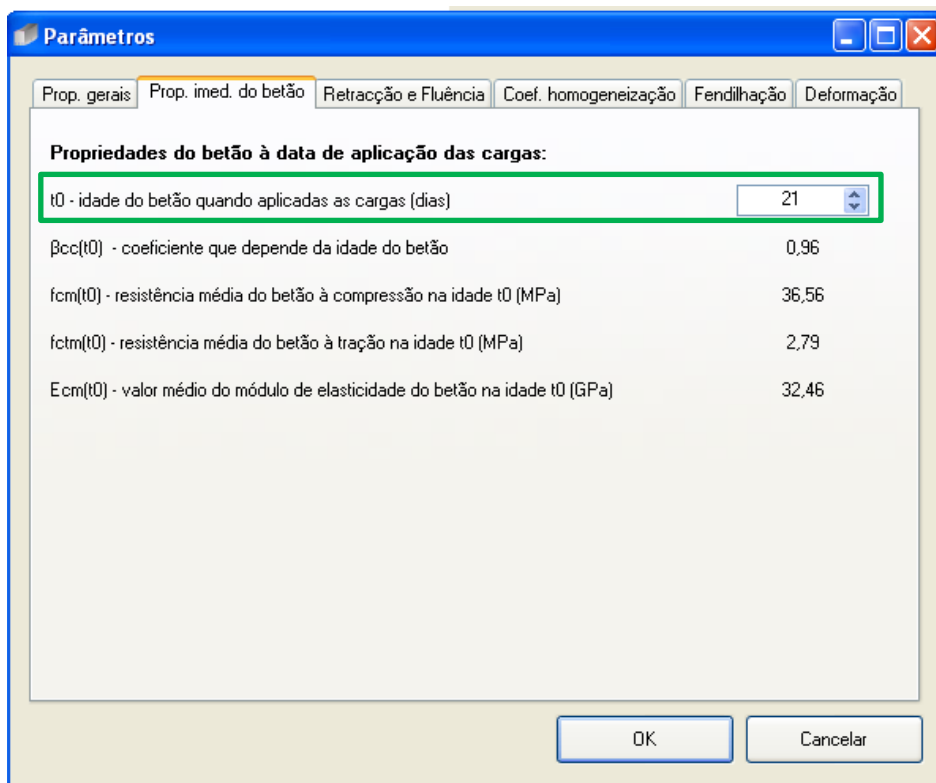


Figura B.4.5 - Parâmetros (separador alusivo às propriedades imediatas do betão)

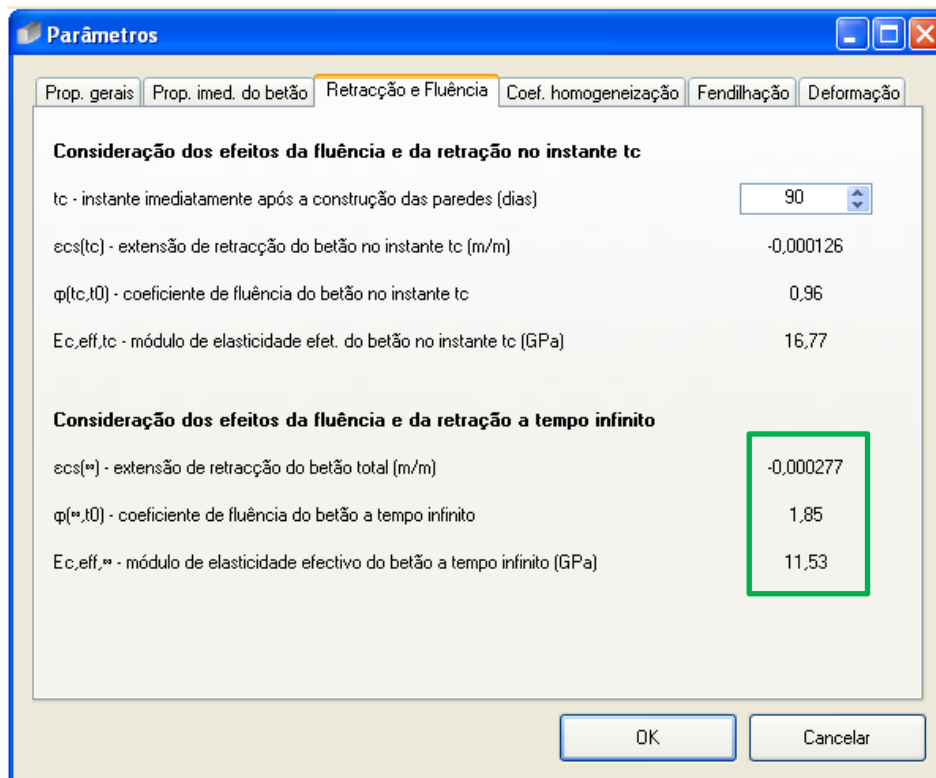


Figura B.4.6 - Parâmetros (separador alusivo à retracção e fluência)

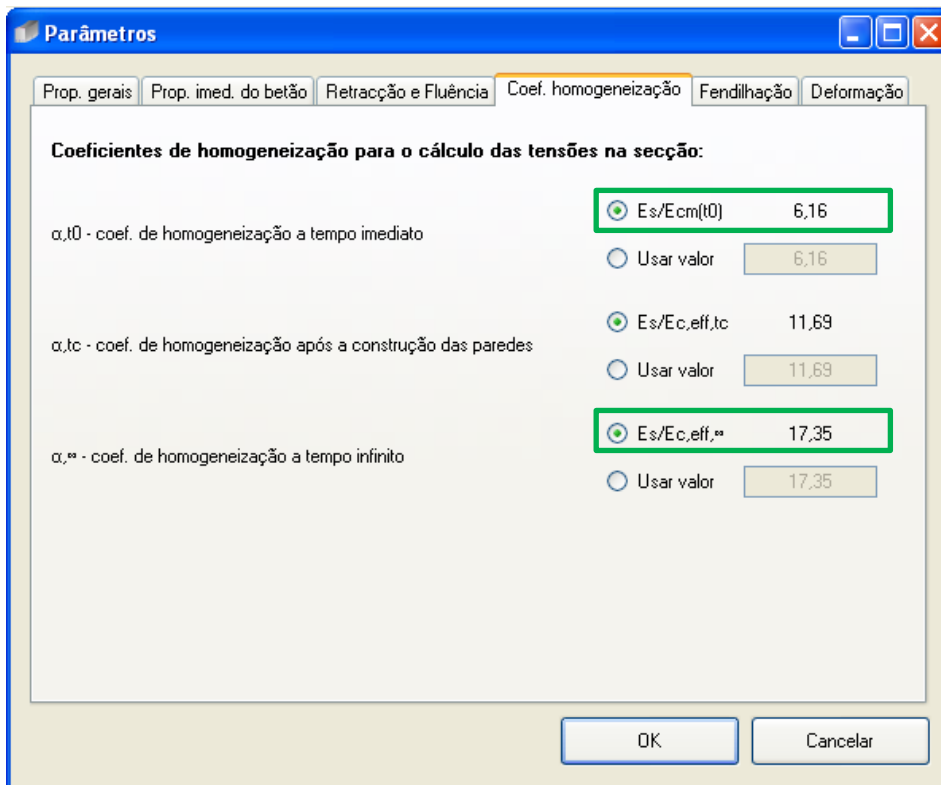


Figura B.4.7 - Parâmetros (separador alusivo ao coeficiente de homogeneização)

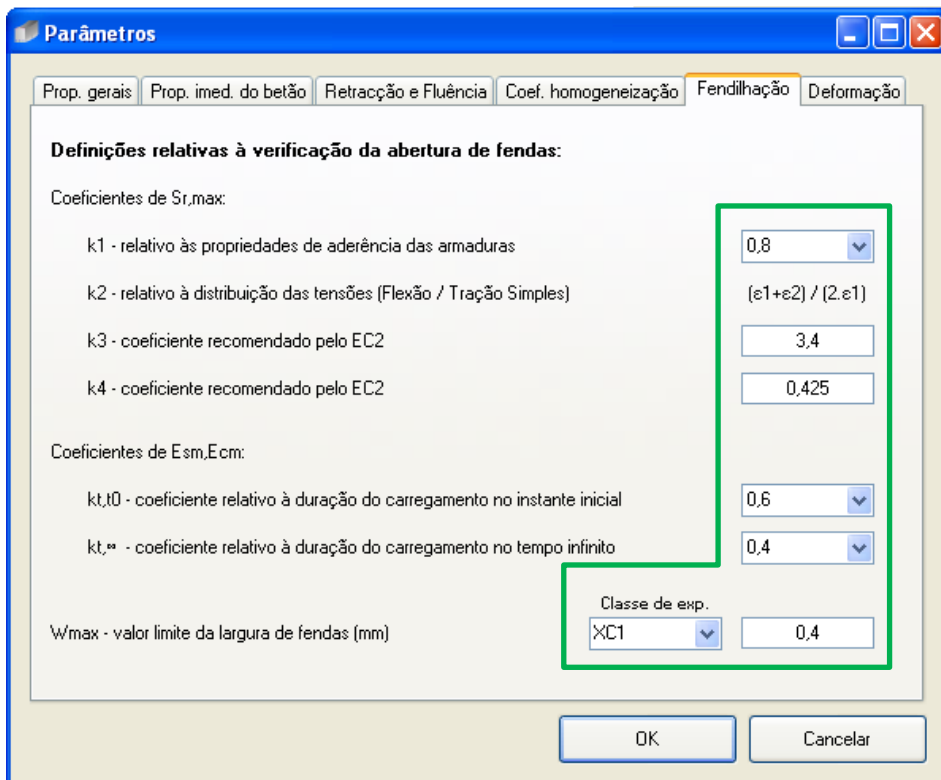


Figura B.4.8 - Parâmetros (separador alusivo à fendilhação)

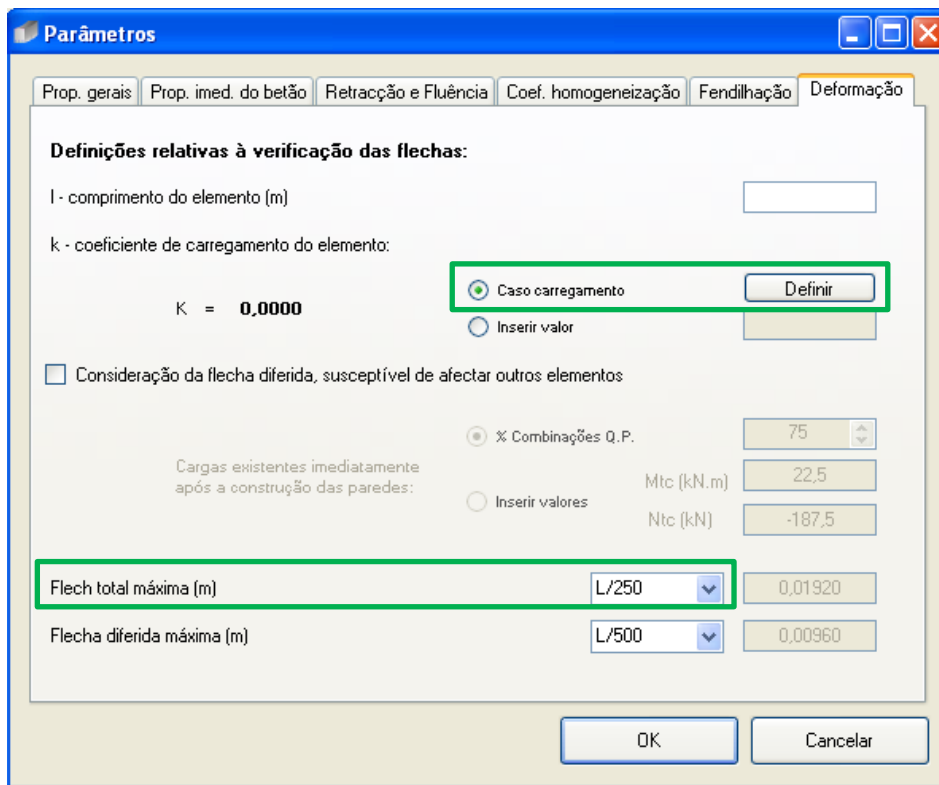


Figura B.4.9 - Parâmetros (separador alusivo à deformação)

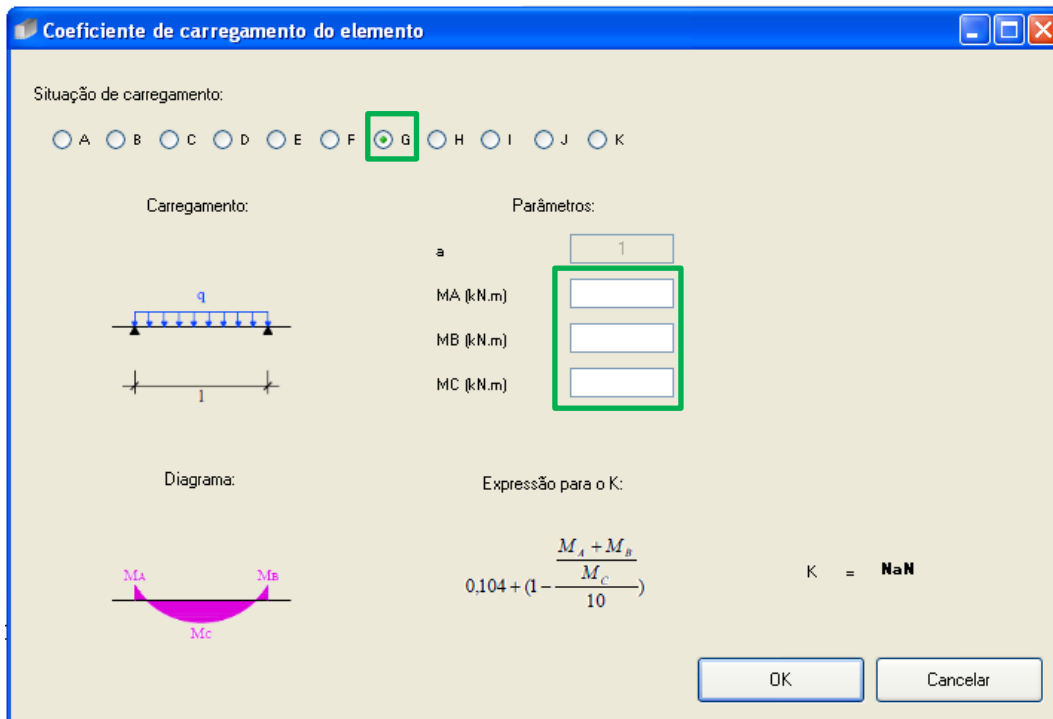


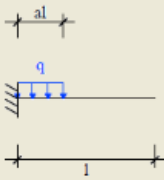
Figura B.4.10 – Determinação do coeficiente de carregamento  $K$  (Tramos Extremidade e Intermédio)

**Coefficiente de carregamento do elemento**

Situação de carregamento:

A
  B
  C
  D
  E
  F
  G
  H
  I
  J
  K

Carregamento:



Parâmetros:


a:

MA (kN.m):

MB (kN.m):

MC (kN.m):

Diagrama:



Expressão para o K:

$$\frac{a(4-a)}{12}, a > 0 \wedge a \leq 1,0$$

K = **0,2500**

OK Cancelar

Figura B.4.11 – Determinação do coeficiente de carregamento  $K$  (Consola)

# ANEXO C

CÁLCULOS E RESULTADOS REFERENTES AO CAPÍTULO 5

## C.1 – Método Analítico

### ▪ ANÁLISE DO ESTADO DE CADA SECÇÃO

Na tabela que se segue, encontram-se os cálculos respectivos de modo a serem obtidos posteriormente os valores das tensões nas secções em estudo.

Tabela C.1.1 – Análise do estado das secções em estudo, bem como os valores do eixo neutro, área homogeneizada, centro de gravidade, inércia e momento estático de acordo com o seu estado

Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Armadura Longitudinal	Asl <sub>sup</sub>	2Ø20	2Ø20	5Ø20	5Ø20	2Ø20	4Ø20	4Ø20	2Ø20
	Área (cm <sup>2</sup> )	6,28	6,28	15,70	15,70	6,28	12,56	12,56	6,28
	Asl <sub>inf</sub>	2Ø16	5Ø16	2Ø16	2Ø16	3Ø16	2Ø16	2Ø16	2Ø16
	Área (cm <sup>2</sup> )	4,02	10,05	4,02	4,02	6,03	4,02	4,02	4,02
Estado NÃO FENDILHADO	x <sub>m</sub> (m)	<b>-0,280</b>	<b>0,284</b>	<b>-0,300</b>	<b>-0,300</b>	<b>0,275</b>	<b>-0,294</b>	<b>-0,294</b>	<b>-0,280</b>
	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	0,154	0,163	0,168	0,168	0,157	0,163	0,163	0,154
	z <sub>G</sub> (m)	-0,280	0,284	-0,300	-0,300	0,275	-0,294	-0,294	-0,280
	I <sub>m</sub> (m <sup>4</sup> )	0,00434	0,00486	0,00504	0,00504	0,00452	0,00482	0,00482	0,00434
	S (m <sup>3</sup> )	0,00005	0,00008	0,00022	0,00022	0,00000	0,00017	0,00017	0,00005
Estado FENDILHADO	x <sub>cr</sub> (m)	-	<b>0,181</b>	<b>-0,224</b>	<b>-0,224</b>	<b>0,145</b>	<b>-0,205</b>	<b>-0,205</b>	-
	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	-	0,072	0,088	0,088	0,056	0,078	0,078	-
	z <sub>G'</sub> (m)	-	0,181	-0,224	-0,224	0,145	-0,205	-0,205	-
	I <sub>cr</sub> (m <sup>4</sup> )	-	0,00250	0,00326	0,00326	0,00170	0,00281	0,00281	-
	S (m <sup>3</sup> )	-	0,00024	0,00037	0,00037	0,00016	0,00031	0,00031	-
M <sub>CC</sub> (kN.m)	-26,58	127,18	-172,23	-146,58	69,00	-156,57	-150,53	0,00	
M <sub>CQP</sub> (kN.m)	<b>-23,09</b>	<b>110,50</b>	<b>-149,65</b>	<b>-127,36</b>	<b>59,95</b>	<b>-136,03</b>	<b>-130,79</b>	<b>0,00</b>	
M <sub>cr</sub> (kN.m)	39,91	41,94	43,83	43,83	40,23	42,53	42,53	39,91	
Estado da Secção	<b>N.F.</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	

▪ TENSÕES

Nas seguintes tabelas encontram-se os valores das tensões e extensões do betão e das armaduras para as combinações de **acções características** e **acções quase permanentes**.

Tabela C.1.2 - Valores das tensões e extensões no betão e na armadura para a combinação de acções quase permanentes em cada secção em estudo

Tensões e Extensões - Combinação de acções Quase Permanentes										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Tensões	Betão	$\sigma_c$ (MPa)	-1,71	-9,24	-11,82	-10,06	-5,90	-11,44	-11,00	0,00
		$\sigma_{ct}$ (MPa)	1,65	18,77	17,23	14,66	16,46	19,19	18,45	0,00
	Armadura	$\sigma_s$ (MPa)	23,15	277,79	249,22	212,10	246,18	279,74	268,95	0,00
		$\sigma_{sc}$ (MPa)	-24,42	-118,30	-161,43	-137,39	-70,09	-153,31	-147,39	0,00
Extensões	Betão	$\epsilon_c$ (m/m)	-0,00014	-0,00076	-0,00098	-0,00083	-0,00049	-0,00095	-0,00091	0,00000
		$\epsilon_{ct}$ (m/m)	0,00014	0,00155	0,00143	0,00121	0,00136	0,00159	0,00153	0,00000
	Armadura	$\epsilon_s$ (m/m)	0,00012	0,00139	0,00125	0,00106	0,00123	0,00140	0,00134	0,00000
		$\epsilon_{sc}$ (m/m)	-0,00012	-0,00059	-0,00081	-0,00069	-0,00035	-0,00077	-0,00074	0,00000

Tabela C.1.3 - Valores das tensões e extensões no betão e na armadura para a combinação de acções característica em cada secção em estudo

Tensões e Extensões - Combinação de acções Características										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Tensões	Betão	$\sigma_c$ (MPa)	-1,49	-8,03	-10,27	-8,74	-5,13	-9,94	-9,55	0,00
		$\sigma_{ct}$ (MPa)	1,43	16,31	14,97	12,74	14,30	16,67	16,03	0,00
	Armadura	$\sigma_s$ (MPa)	20,11	241,36	216,54	184,29	213,89	243,04	233,68	0,00
		$\sigma_{sc}$ (MPa)	-21,22	-102,78	-140,27	-119,38	-60,90	-133,19	-128,06	0,00
Extensões	Betão	$\epsilon_c$ (m/m)	-0,00012	-0,00066	-0,00085	-0,00072	-0,00042	-0,00082	-0,00079	0,00000
		$\epsilon_{ct}$ (m/m)	0,00012	0,00135	0,00124	0,00105	0,00118	0,00138	0,00133	0,00000
	Armadura	$\epsilon_s$ (m/m)	0,00010	0,00121	0,00108	0,00092	0,00107	0,00122	0,00117	0,00000
		$\epsilon_{sc}$ (m/m)	-0,00011	-0,00051	-0,00070	-0,00060	-0,00030	-0,00067	-0,00064	0,00000

Na tabela seguinte estão representadas as verificações das tensões do betão de modo a cumprir a sua fluência e as tensões das armaduras, cumprindo estas a deformabilidade elástica nas situações de serviço.

Tabela C.1.4 – Verificações dos valores das tensões e extensões do betão e da armadura para as combinações apropriadas

Tensões e Extensões									
Tramo	Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção	N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
<b>Limitação da fluência do betão</b> ( <i>Combinação de acções Quase Permanentes</i> )									
Tensões	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	-1,49	-8,03	-10,27	-8,74	-5,13	-9,94	-9,55	0,00
	$0,45 f_{ck}$ (MPa)	13,50							
Extensões	$\epsilon_c$ (m/m)	-0,00012	-0,00066	-0,00085	-0,00072	-0,00042	-0,00082	-0,00079	0,00000
	$\epsilon_{cuk}$ (m/m)	0,0035							
<b>Deformações elásticas da armadura</b> ( <i>Combinação de acções Características</i> )									
Tensões	$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	23,15	277,79	249,22	212,10	246,18	279,74	268,95	0,00
	$0,8 f_{syk}$ (MPa)	400,00							
Extensões	$\epsilon_s$ (m/m)	0,00012	0,00139	0,00125	0,00106	0,00123	0,00140	0,00134	0,00000
	$\epsilon_{suk}$ (m/m)	0,0025							

▪ FENDILHAÇÃO

Nas tabelas seguintes, encontram-se os cálculos respectivos para o controlo e verificação da fendilhação nas secções que se encontram fendilhadas.

Tabela C.1.5 - Valores das extensões médias relativas entre a armadura e o betão nas secções em estudo

Extensão média relativa entre a armadura e o betão - ( $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ )									
Tramo	Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção	N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
$K_t$		0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
Superior	$\sigma_{s,cr}$ (Mpa)	-	-	216,54	184,29	-	243,04	233,68	-
	$h_{c,ef}$ (m)	-	-	0,103	0,103	-	0,103	0,103	-
	$A_{c,eff}$ (m <sup>2</sup> )	-	-	0,0256	0,0256	-	0,0256	0,0256	-
	$\rho_{p,eff}$	-	-	0,061	0,061	-	0,049	0,049	-
	<b>(<math>\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}</math>) (m/m)</b>	-	-	<b>0,00089</b>	<b>0,00073</b>	-	<b>0,00100</b>	<b>0,00095</b>	-
Inferior	$\sigma_{s,cr}$ (Mpa)	-	241,36	-	-	213,89	-	-	-
	$h_{c,ef}$ (m)	-	0,098	-	-	0,098	-	-	-
	$A_{c,eff}$ (m <sup>2</sup> )	-	0,0244	-	-	0,0244	-	-	-
	$\rho_{p,eff}$	-	0,041	-	-	0,025	-	-	-
	<b>(<math>\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}</math>) (m/m)</b>	-	<b>0,00097</b>	-	-	<b>0,00074</b>	-	-	-

Tabela C.1.6 - Valores das distâncias máximas entre fendas nas secções em estudo

Distancia Máxima entre fendas - $S_{r,máx}$									
Tramo	Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção	N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
K1		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	
Superior	$S_1$ (m)	-	-	0,025	0,025	-	0,040	0,040	-
	$\leq 5 \times (c+O/2)$ (m)	-	-	0,2050	0,2050	-	0,2050	0,2050	-
	$\epsilon_1$ (m/m)	-	-	0,00124	0,00105	-	0,00138	0,00133	-
	$\epsilon_2$ (m/m)	-	-	0,00000	0,00000	-	0,00000	0,00000	-
	K2	-	-	0,50	0,50	-	0,50	0,50	-
	$S_{r,máx}$ (m)	-	-	0,161	0,161	-	0,175	0,175	-
Inferior	$S_1$ (m)	-	0,0300	-	-	0,0760	-	-	-
	$\leq 5 \times (c+O/2)$ (m)	-	0,1950	-	-	0,1950	-	-	-
	$\epsilon_1$ (m/m)	-	0,00135	-	-	0,00118	-	-	-
	$\epsilon_2$ (m/m)	-	0,00000	-	-	0,00000	-	-	-
	K2	-	0,50	-	-	0,50	-	-	-
	$S_{r,máx}$ (m)	-	-0,171	-	-	-0,215	-	-	-

Tabela C.1.7 - Valores da largura de fendas nas secções em estudo bem como a sua verificação de acordo com a classe de exposição

Tramo	Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Estado da Secção	N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.
<b>Extensão média relativa entre a armadura e o betão (<math>\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}</math>)</b>								
$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), Sup$ (m/m)	-	-	0,00089	0,00073	-	0,00100	0,00095	-
$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), Inf$ (m/m)	-	0,00097	-	-	0,00731	-	-	-
<b>Distancia Máxima entre fendas - <math>S_{r,máx}</math></b>								
$S_{r,máx} Sup$ (m)	-	-	0,161	0,161	-	0,175	0,175	-
$S_{r,máx} Inf$ (m)	-	0,171	-	-	0,215	-	-	-
<b>Largura de Fendas - <math>W_k</math> (Combinação Quase Permanente)</b>								
$W_{k,Sup}$ (mm)	-	-	0,144	0,118	-	0,175	0,167	-
$W_{k,Inf}$ (mm)	-	0,166	-	-	0,159	-	-	-
Classe de Exposição	XC1							
$W_{k,máx}$ (mm)	0,40							

▪ DEFORMAÇÃO

Para as secções onde se verifica a deformação máxima em cada tramo do pórtico central em estudo, estão apresentadas nas seguintes tabelas os valores das curvaturas a longo prazo referentes à flexão, retracção e a curvatura total para os estados não fendilhado, fendilhado e intermédio.

Tabela C.1.8 - Valores das curvaturas referentes à flexão, retracção e total para os estados não fendilhado e fendilhado referente às secções em estudo

Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
<b>Curvaturas a Longo Prazo - <math>1/r_x</math> (Combinação Quase Permanente)</b>					
<b>Estado NÃO FENDILHADO</b>	Flexão	$1/r_{fl,m}$ (1/m)	0,00188	0,00110	0,00224
	Retracção	$1/r_{cs,m}$ (1/m)	0,00008	0,000004	0,00017
	<b>TOTAL</b>	$1/r_{tot,m}$ (1/m)	<b>0,00196</b>	<b>0,00110</b>	<b>0,00241</b>
<b>Estado FENDILHADO</b>	Flexão	$1/r_{fl,cr}$ (1/m)	0,00366	0,00292	0,00385
	Retracção	$1/r_{cs,cr}$ (1/m)	0,00047	-0,00044	0,00054
	<b>TOTAL</b>	$1/r_{tot,cr}$ (1/m)	<b>0,00413</b>	<b>0,00248</b>	<b>0,00438</b>

Tabela C.1.9 - Valores dos coeficientes de repartição bem com as curvaturas referentes à flexão, retracção e total para o estado intermédio referente às secções em estudo

Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
$M_{cr}$ (kN.m)		41,94	40,23	42,53	
$M_{CQP}$ (kN.m)		110,50	59,95	-130,79	
$\beta$		<b>0,500</b>			
$\zeta$		<b>0,928</b>	<b>0,775</b>	<b>0,947</b>	
<b>Curvaturas a Longo Prazo - <math>1/r_x</math> (Combinação Quase Permanente)</b>					
<b>ESTADO INTERMÉDIO</b>	Flexão	$1/r_{fl,int}$ (1/m)	0,00353	0,00251	0,00376
	Retracção	$1/r_{cs,int}$ (1/m)	0,00044	-0,00034	0,00052
	<b>TOTAL</b>	$1/r_{tot,int}$ (1/m)	<b>0,00397</b>	<b>0,00217</b>	<b>-0,00428</b>

A partir das curvaturas anteriormente calculadas em cada uma das secções, apresentam-se os respectivos cálculos e valores das flechas máximas em cada tramo do pórtico em estudo atendendo aos métodos de cálculo da deformação final.

◦ Método Simplificado

Tabela C.1.10 - Valores dos coeficientes de carregamento  $\lambda$

Tramo	Extremidade	Intermédio	Consola
Secção	B-B	E-E	H-H
Estado da Secção	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>
$M_{CQP}$ Secção (kN.m)	110,50	59,95	-130,79
$M_{CQP}$ Apoio Esq. (kN.m)	-37,37	-144,20	-144,92
$M_{CQP}$ Apoio Direito (kN.m)	-169,42	-153,25	0,00
Vão (m)	6,00	6,00	2,50
$\lambda$	<b>0,124</b>	<b>0,156</b>	<b>0,250</b>

Tabela C.1.11 - Valores das flechas pelo método simplificado a longo prazo nas secções em estudo nos estados não fendilhado e fendilhado e intermédio e a respectiva verificação

Flecha a Longo Prazo - $\delta_x$ (Combinação Quase Permanente)					
Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
Estado NÃO FENDILHADO	Flexão	$\delta_{fl,m}$ (mm)	8,36	6,14	3,50
	Retração	$\delta_{cs,m}$ (mm)	0,33	0,02	0,26
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,m}$ (mm)	<b>8,70</b>	<b>6,17</b>	<b>3,76</b>
Estado FENDILHADO	Flexão	$\delta_{fl,cr}$ (mm)	16,28	16,38	6,01
	Retração	$\delta_{cs,cr}$ (mm)	2,08	-2,46	0,84
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,cr}$ (mm)	<b>18,35</b>	<b>13,92</b>	<b>6,85</b>
Estado INTERMÉDIO	Flexão	$\delta_{fl,int}$ (mm)	15,71	14,07	5,88
	Retração	$\delta_{cs,int}$ (mm)	1,95	-1,90	0,81
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,int}$ (mm)	<b>17,66</b>	<b>12,17</b>	<b>6,69</b>
Verificação		$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	24,00	24,00	10,00

◦ Método Exacto

a) Tramo de Extremidade

Na tabela seguinte, visualiza-se as armaduras presentes e os momentos flectores actuantes em cada divisão do tramo de modo a verificar o estado de cada secção.

Tabela C.1.12 – Armaduras longitudinais e momentos flectores actuantes para cada ponto de divisão do tramo de extremidade

x (m)	Armaduras Longitudinais				M <sub>Q.P.</sub> (kN.m)
	Superior	Área (cm <sup>2</sup> )	Inferior	Área (cm <sup>2</sup> )	
0,00	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	-37,37
0,30	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	-4,33
0,60	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	24,55
0,90	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	49,25
1,20	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	69,77
1,50	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	86,12
1,80	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	98,30
2,10	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	106,31
2,40	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	110,14
2,70	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	109,80
3,00	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	105,28
3,30	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	96,59
3,60	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	83,73
3,90	2 Ø 20	6,28	5 Ø 16	10,05	66,69
4,20	5 Ø 20	15,71	5 Ø 16	10,05	45,48
4,50	5 Ø 20	15,71	5 Ø 16	10,05	20,10
4,80	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-9,46
5,10	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-43,19
5,40	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-81,09
5,70	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-123,17
6,00	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-169,42

**Nota:** Os valores dos momentos flectores foram retirados do programa de cálculo automático *Robot*.

Na tabela seguinte é realizado a verificação do estado da secção para cada um dos pontos do tramo em estudo (para os estados não fendilhado e fendilhado) de acordo com os momentos actuantes visualizados na tabela anterior.

Tabela C.1.13 – Cálculo dos parâmetros necessários para verificação do estado de cada secção no tramo de extremidade para os estados não fendilhado e fendilhado

x (m)	Estado Secção	M <sub>cr</sub> (kN.m)	Estado NÃO FENDILHADO					Estado FENDILHADO				
			x <sub>im</sub> (m)	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	z <sub>G</sub> (m)	I <sub>im</sub> (m <sup>4</sup> )	S <sub>im</sub> (m <sup>3</sup> )	x <sub>cr</sub> (m)	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	z <sub>G'</sub> (m)	I <sub>cr</sub> (m <sup>4</sup> )	S <sub>cr</sub> (m <sup>3</sup> )
0,00	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-
0,30	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-
0,60	N.F.	39,37	<b>0,270</b>	0,154	0,270	0,00434	-0,00005	-	-	-	-	-
0,90	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
1,20	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
1,50	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
1,80	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
2,10	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
2,40	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
2,70	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
3,00	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
3,30	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
3,60	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
3,90	F	41,94	<b>0,284</b>	0,163	0,284	0,00486	0,00008	<b>0,181</b>	0,072	0,181	0,00250	0,00024
4,20	F	43,54	<b>0,264</b>	0,178	0,264	0,00565	-0,00010	<b>0,157</b>	0,080	0,157	0,00274	0,00017
4,50	N.F.	43,54	<b>0,264</b>	0,178	0,264	0,00565	-0,00010	-	-	-	-	-
4,80	N.F.	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,00022	-	-	-	-	-
5,10	N.F.	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,00022	-	-	-	-	-
5,40	F	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,00022	<b>-0,224</b>	0,088	-0,224	0,00326	0,00037
5,70	F	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,00022	<b>-0,224</b>	0,088	-0,224	0,00326	0,00037
6,00	F	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,00022	<b>-0,224</b>	0,088	-0,224	0,00326	0,00037

Nas tabelas seguintes apresentam-se para todos os pontos do tramo em estudo os valores das curvaturas e flechas a longo prazo referentes à flexão, retracção e a curvatura total para os estados não fendilhado, fendilhado e intermédio.

Tabela C.1.14 – Valores das curvaturas e flechas referentes à flexão, retracção e total em todos pontos de divisão do tramo de extremidade nos estados não fendilhado e fendilhado

x (m)	Estado da Secção	Estado NÃO FENDILHADO						Estado FENDILHADO					
		Flexão		Retração		TOTAL		Flexão		Retração		TOTAL	
		$1/r_{fl,m}$ (1/m)	$\delta_{fl,m}$ (mm)	$1/r_{cs,m}$ (1/m)	$\delta_{cs,m}$ (mm)	$1/r_{tot,m}$ (1/m)	$\delta_{tot,m}$ (mm)	$1/r_{fl,cr}$ (1/m)	$\delta_{fl,cr}$ (mm)	$1/r_{cs,cr}$ (1/m)	$\delta_{cs,cr}$ (mm)	$1/r_{tot,cr}$ (1/m)	$\delta_{tot,cr}$ (mm)
0,00	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
0,30	N.F.	-0,00008	0,91	-0,00005	0,02	-0,00013	0,94	0,00000	1,73	-0,00005	0,25	-0,00005	1,98
0,60	N.F.	0,00047	1,82	-0,00005	0,05	0,00042	1,87	0,00000	3,47	-0,00005	0,50	-0,00005	3,96
0,90	F	0,00084	2,68	0,00008	0,08	0,00091	2,76	0,00163	5,16	0,00047	0,74	0,00210	5,90
1,20	F	0,00119	3,48	0,00008	0,10	0,00126	3,58	0,00231	6,73	0,00047	0,95	0,00278	7,68
1,50	F	0,00147	4,16	0,00008	0,12	0,00154	4,29	0,00285	8,10	0,00047	1,12	0,00332	9,22
1,80	F	0,00167	4,72	0,00008	0,13	0,00175	4,85	0,00326	9,21	0,00047	1,25	0,00372	10,46
2,10	F	0,00181	5,13	0,00008	<b>0,14</b>	0,00189	5,26	0,00352	10,03	0,00047	1,33	0,00399	11,36
2,40	F	0,00188	5,37	0,00008	0,14	0,00195	5,51	0,00365	10,54	0,00047	1,38	0,00412	11,92
2,70	F	0,00187	<b>5,45</b>	0,00008	0,13	0,00194	<b>5,58</b>	0,00364	<b>10,72</b>	0,00047	<b>1,38</b>	0,00410	<b>12,10</b>
3,00	F	0,00179	5,36	0,00008	0,11	0,00187	5,48	0,00349	10,58	0,00047	1,34	0,00396	11,92
3,30	F	0,00164	5,12	0,00008	0,09	0,00172	5,21	0,00320	10,13	0,00047	1,25	0,00367	11,38
3,60	F	0,00143	4,72	0,00008	0,06	0,00150	4,78	0,00277	9,39	0,00047	1,13	0,00324	10,52
3,90	F	0,00114	4,20	0,00008	0,02	0,00121	4,23	0,00221	8,41	0,00047	0,96	0,00268	9,37
4,20	F	0,00067	3,58	-0,00009	-0,02	0,00058	3,57	0,00138	7,23	-0,00031	0,77	0,00107	8,00
4,50	N.F.	0,00029	2,90	-0,00009	-0,05	0,00021	2,85	0,00000	5,94	-0,00009	0,59	-0,00009	6,53
4,80	N.F.	-0,00016	2,20	-0,00021	-0,08	-0,00037	2,12	0,00000	4,62	-0,00021	0,42	-0,00021	5,04
5,10	N.F.	-0,00071	1,51	-0,00021	-0,08	-0,00092	1,42	0,00000	3,31	-0,00021	0,26	-0,00021	3,57
5,40	F	-0,00133	0,88	-0,00021	-0,07	-0,00154	0,81	-0,00206	2,03	-0,00055	0,13	-0,00261	2,17
5,70	F	-0,00202	0,38	-0,00021	-0,04	-0,00223	0,34	-0,00312	0,92	-0,00055	0,05	-0,00367	0,97
6,00	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00

**Nota:** Os valores que se encontram nas células de cor encarnada e a negrito, são os valores máximos das flechas referentes à flexão, retracção e total para os estados não fendilhados e fendilhados.

Tabela C.1.15 – Valores das curvaturas e flechas referentes à flexão, retração e total estático em todos pontos de divisão do tramo de extremidade no estado intermédio

Estado INTERMÉDIO								
x (m)	Estado da Secção	$\zeta$	Flexão		Retração		TOTAL	
			$1/r_{fl,int}$ (1/m)	$\delta_{fl,int}$ (mm)	$1/r_{cs,int}$ (1/m)	$\delta_{cs,int}$ (mm)	$1/r_{tot,int}$ (1/m)	$\delta_{tot,int}$ (mm)
0,00	-	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00
0,30	N.F.	0,000	-0,000082	1,65	-0,000052	0,22	-0,000134	1,87
0,60	N.F.	0,000	0,000467	3,29	-0,000052	0,44	0,000416	3,73
0,90	F	0,637	0,001344	4,89	0,000325	0,65	0,001669	5,54
1,20	F	0,819	0,002109	6,36	0,000396	0,84	0,002505	7,20
1,50	F	0,881	0,002689	7,65	0,000421	1,00	0,003110	8,65
1,80	F	0,909	0,003113	8,70	0,000431	1,12	0,003544	9,82
2,10	F	0,922	0,003389	9,47	0,000437	1,21	0,003826	10,68
2,40	F	0,927	0,003520	9,95	0,000439	1,25	0,003959	11,20
2,70	F	0,927	0,003509	<b>10,11</b>	0,000439	<b>1,25</b>	0,003947	<b>11,36</b>
3,00	F	0,921	0,003354	9,95	0,000436	1,22	0,003790	11,17
3,30	F	0,906	0,003054	9,50	0,000430	1,14	0,003484	10,64
3,60	F	0,875	0,002605	8,77	0,000418	1,03	0,003023	9,80
3,90	F	0,802	0,001997	7,82	0,000390	0,88	0,002387	8,70
4,20	F	0,542	0,001050	6,69	-0,000205	0,70	0,000845	7,40
4,50	N.F.	0,000	0,000294	5,47	-0,000086	0,53	0,000209	6,00
4,80	N.F.	0,000	-0,000155	4,21	-0,000212	0,38	-0,000367	4,58
5,10	N.F.	0,000	-0,000708	2,96	-0,000212	0,23	-0,000920	3,20
5,40	F	0,854	-0,001951	1,80	-0,000500	0,12	-0,002451	1,92
5,70	F	0,937	-0,003054	0,81	-0,000528	0,04	-0,003583	0,85
6,00	-	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00

**Nota:** Os valores que se encontram nas células de cor encarnada e a negrito, são os valores máximos das flechas referentes à flexão, retração e total para o estado intermédio.

Após a visualização dos resultados referentes ao tramo de extremidade, segue-se de acordo com a mesma sequência de tabelas que foi utilizada para o tramo em causa, os resultados de todos os parâmetros e das flechas finais para os tramos intermédio e consola.

## b) Tramo Intermédio

Tabela C.1.16 - Armaduras longitudinais e momentos flectores actuantes para cada ponto de divisão do tramo intermédio

x (m)	Armaduras Longitudinais				M <sub>Q.P.</sub> (kN.m)
	Superior	Área (cm <sup>2</sup> )	Inferior	Área (cm <sup>2</sup> )	
0,00	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-144,20
0,30	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-105,00
0,60	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-69,98
0,90	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-39,13
1,20	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	-12,45
1,50	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	10,05
1,80	5 Ø 20	15,71	2 Ø 16	4,02	28,38
2,10	2 Ø 20	6,28	3 Ø 16	6,03	42,53
2,40	2 Ø 20	6,28	3 Ø 16	6,03	52,51
2,70	2 Ø 20	6,28	3 Ø 16	6,03	58,32
3,00	2 Ø 20	6,28	3 Ø 16	6,03	59,95
3,30	2 Ø 20	6,28	3 Ø 16	6,03	57,42
3,60	2 Ø 20	6,28	3 Ø 16	6,03	50,70
3,90	2 Ø 20	6,28	3 Ø 16	6,03	39,82
4,20	4 Ø 20	12,57	3 Ø 16	6,03	24,76
4,50	4 Ø 20	12,57	3 Ø 16	6,03	5,52
4,80	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-17,89
5,10	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-45,47
5,40	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-77,22
5,70	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-113,15
6,00	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-153,25

**Nota:** Os valores dos momentos flectores foram retirados do programa de cálculo automático *Robot*.

Na tabela seguinte é realizado a verificação do estado da secção para cada um dos pontos do tramo em estudo (para os estados não fendilhado e fendilhado) de acordo com os momentos actuantes visualizados na tabela anterior.

Tabela C.1.17 - Cálculo dos parâmetros necessários para verificação do estado de cada secção no tramo intermédio para os estados não fendilhado e fendilhado

x (m)	Estado Secção	M <sub>cr</sub> (kN.m)	Estado NÃO FENDILHADO					Estado FENDILHADO				
			x <sub>im</sub> (m)	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	z <sub>G</sub> (m)	I <sub>im</sub> (m <sup>4</sup> )	S <sub>im</sub> (m <sup>3</sup> )	x <sub>cr</sub> (m)	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	z <sub>G'</sub> (m)	I <sub>cr</sub> (m <sup>4</sup> )	S <sub>cr</sub> (m <sup>3</sup> )
0,00	F	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,000223	<b>-0,224</b>	0,088	-0,224	0,003	0,000374
0,30	F	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,000223	<b>-0,224</b>	0,088	-0,224	0,003	0,000374
0,60	F	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,000223	<b>-0,224</b>	0,088	-0,224	0,003	0,000374
0,90	N.F.	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,000223	-	-	-	-	-
1,20	N.F.	43,83	<b>-0,300</b>	0,168	-0,300	0,00504	0,000223	-	-	-	-	-
1,50	N.F.	40,89	<b>0,250</b>	0,168	0,250	0,00504	-0,000223	-	-	-	-	-
1,80	N.F.	40,89	<b>0,250</b>	0,168	0,250	0,00504	-0,000223	-	-	-	-	-
2,10	F	40,23	<b>0,275</b>	0,157	0,275	0,00452	-0,000004	<b>0,145</b>	0,056	0,145	0,00170	0,000155
2,40	F	40,23	<b>0,275</b>	0,157	0,275	0,00452	-0,000004	<b>0,145</b>	0,056	0,145	0,00170	0,000155
2,70	F	40,23	<b>0,275</b>	0,157	0,275	0,00452	-0,000004	<b>0,145</b>	0,056	0,145	0,00170	0,000155
3,00	F	40,23	<b>0,275</b>	0,157	0,275	0,00452	-0,000004	<b>0,145</b>	0,056	0,145	0,00170	0,000155
3,30	F	40,23	<b>0,275</b>	0,157	0,275	0,00452	-0,000004	<b>0,145</b>	0,056	0,145	0,00170	0,000155
3,60	F	40,23	<b>0,275</b>	0,157	0,275	0,00452	-0,000004	<b>0,145</b>	0,056	0,145	0,00170	0,000155
3,90	N.F.	40,23	<b>0,275</b>	0,157	0,275	0,00452	-0,000004	-	-	-	-	-
4,20	N.F.	41,28	<b>0,261</b>	0,166	0,261	0,00502	-0,000125	-	-	-	-	-
4,50	N.F.	41,28	<b>0,261</b>	0,166	0,261	0,00502	-0,000125	-	-	-	-	-
4,80	N.F.	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,000168	-	-	-	-	-
5,10	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,000168	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,003	0,000315
5,40	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,000168	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,00281	0,000315
5,70	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,000168	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,00281	0,000315
6,00	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,000168	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,00281	0,000315

Nas tabelas seguintes apresentam-se para todos os pontos do tramo em estudo os valores das curvaturas e flechas a longo prazo referentes à flexão, retracção e a curvatura total para os estados não fendilhado, fendilhado e intermédio.

Tabela C.1.18 - Valores das curvaturas e flechas referentes à flexão, retracção e total em todos pontos de divisão do tramo intermédio nos estados não fendilhado e fendilhado

x (m)	Estado da Secção	Estado NÃO FENDILHADO						Estado FENDILHADO					
		Flexão		Retracção		TOTAL		Flexão		Retracção		TOTAL	
		$1/r_{fl,um}$ (1/m)	$\delta_{fl,um}$ (mm)	$1/r_{cs,um}$ (1/m)	$\delta_{cs,um}$ (mm)	$1/r_{tot,um}$ (1/m)	$\delta_{tot,um}$ (mm)	$1/r_{fl,er}$ (1/m)	$\delta_{fl,er}$ (mm)	$1/r_{cs,er}$ (1/m)	$\delta_{cs,er}$ (mm)	$1/r_{tot,er}$ (1/m)	$\delta_{tot,er}$ (mm)
0,00	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
0,30	F	-0,00172	0,05	-0,000212	-0,10	-0,00193	-0,05	-0,00266	0,38	-0,00055	-0,29	-0,00321	0,09
0,60	F	-0,00115	0,20	-0,000212	-0,19	-0,00136	0,01	-0,00177	0,91	-0,00055	-0,54	-0,00232	0,38
0,90	N.F.	-0,00064	0,46	-0,000212	-0,27	-0,00085	0,20	-0,00064	1,60	-0,00021	-0,74	-0,00085	0,86
1,20	N.F.	-0,00020	0,78	-0,000212	-0,32	-0,00042	0,46	-0,00020	2,37	-0,00021	-0,92	-0,00042	1,44
1,50	N.F.	0,00016	1,12	-0,000212	-0,35	-0,00005	0,77	0,00016	3,15	-0,00021	-1,08	-0,00005	2,07
1,80	N.F.	0,00047	1,44	-0,000212	<b>-0,36</b>	0,00025	1,08	0,00047	3,92	-0,00021	-1,23	0,00025	2,69
2,10	F	0,00078	1,72	-0,000004	<b>-0,36</b>	0,00077	1,36	0,00207	4,62	-0,00044	-1,35	0,00163	3,27
2,40	F	0,00096	1,94	-0,000004	-0,36	0,00096	1,58	0,00256	5,16	-0,00044	-1,43	0,00212	3,73
2,70	F	0,00107	2,07	-0,000004	-0,35	0,00106	1,71	0,00284	5,47	-0,00044	-1,47	0,00240	4,00
3,00	F	0,00110	<b>2,10</b>	-0,000004	-0,35	0,00109	<b>1,76</b>	0,00292	<b>5,53</b>	-0,00044	<b>-1,48</b>	0,00248	<b>4,05</b>
3,30	F	0,00105	2,04	-0,000004	-0,34	0,00105	1,70	0,00280	5,33	-0,00044	-1,44	0,00236	3,89
3,60	F	0,00093	1,89	-0,000004	-0,33	0,00092	1,56	0,00247	4,89	-0,00044	-1,37	0,00203	3,52
3,90	N.F.	0,00073	1,65	-0,000004	-0,32	0,00072	1,33	0,00073	4,25	0,00000	-1,27	0,00072	2,98
4,20	N.F.	0,00041	1,35	-0,000120	-0,31	0,00029	1,04	0,00041	3,52	-0,00012	-1,15	0,00029	2,37
4,50	N.F.	0,00009	1,02	-0,000120	-0,29	-0,00003	0,72	0,00009	2,75	-0,00012	-1,02	-0,00003	1,72
4,80	N.F.	-0,00031	0,68	-0,000167	-0,26	-0,00047	0,41	-0,00031	1,97	-0,00017	-0,89	-0,00047	1,08
5,10	F	-0,00078	0,36	-0,000167	-0,22	-0,00095	0,14	-0,00134	1,23	-0,00054	-0,73	-0,00187	0,51
5,40	F	-0,00132	0,12	-0,000167	-0,16	-0,00149	-0,04	-0,00227	0,62	-0,00054	-0,53	-0,00281	0,09
5,70	F	-0,00194	0,00	-0,000167	-0,09	-0,00211	-0,08	-0,00333	0,21	-0,00054	-0,28	-0,00387	-0,07
6,00	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00

**Notas:**

- Os valores que se encontram nas células de cor encarnada e a negrito, são os valores máximos das flechas referentes à flexão, retracção e total para os estados não fendilhado e fendilhado.

- Salienta-se que a flecha devido à retracção no estado fendilhado, possui uma curvatura negativa (contra flecha) devido a armadura ser assimétrica. É ilustrado na figura 40 do presente trabalho o que foi anteriormente mencionado.

Tabela C.1.19 - Valores das curvaturas e flechas referentes à flexão, retracção e total estático em todos pontos de divisão do tramo intermédio no estado intermédio

Estado INTERMÉDIO								
x (m)	Estado da Secção	$\zeta$	Flexão		Retracção		TOTAL	
			$1/r_{fl,int}$ (1/m)	$\delta_{fl,int}$ (mm)	$1/r_{cs,int}$ (1/m)	$\delta_{cs,int}$ (mm)	$1/r_{tot,int}$ (1/m)	$\delta_{tot,int}$ (mm)
0,00	-	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00
0,30	F	0,913	-0,002581	0,26	-0,000520	-0,24	-0,003102	0,02
0,60	F	0,804	-0,001652	0,68	-0,000483	-0,44	-0,002135	0,24
0,90	N.F.	0,000	-0,000642	1,24	-0,000212	-0,61	-0,000854	0,63
1,20	N.F.	0,000	-0,000204	1,88	-0,000212	-0,75	-0,000416	1,12
1,50	N.F.	0,000	0,000165	2,53	-0,000212	-0,87	-0,000047	1,66
1,80	N.F.	0,000	0,000465	3,17	-0,000212	-0,98	0,000253	2,19
2,10	F	0,553	0,001494	3,75	-0,000245	-1,06	0,001250	2,69
2,40	F	0,707	0,002091	4,21	-0,000311	-1,12	0,001780	3,09
2,70	F	0,762	0,002421	4,48	-0,000335	-1,16	0,002086	3,33
3,00	F	0,775	0,002512	<b>4,55</b>	-0,000341	<b>-1,16</b>	0,002171	<b>3,39</b>
3,30	F	0,755	0,002370	4,39	-0,000332	-1,13	0,002038	3,26
3,60	F	0,685	0,001986	4,02	-0,000302	-1,08	0,001684	2,95
3,90	N.F.	0,000	0,000728	3,50	-0,000004	-1,00	0,000724	2,50
4,20	N.F.	0,000	0,000408	2,89	-0,000120	-0,91	0,000288	1,97
4,50	N.F.	0,000	0,000091	2,24	-0,000120	-0,82	-0,000029	1,42
4,80	N.F.	0,000	-0,000307	1,58	-0,000167	-0,71	-0,000473	0,87
5,10	F	0,563	-0,001094	0,96	-0,000375	-0,59	-0,001468	0,38
5,40	F	0,848	-0,002128	0,45	-0,000481	-0,43	-0,002609	0,02
5,70	F	0,929	-0,003231	0,13	-0,000511	-0,23	-0,003742	-0,10
6,00	-	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00

**Nota:** Os valores que se encontram nas células de cor encarnada e a negrito, são os valores máximos das flechas devido à flexão, retracção e total para o estado intermédio.

c) Tramo em Consola

Tabela C.1.20 - Armaduras longitudinais e momentos flectores actuantes para cada ponto de divisão do tramo em consola

x (m)	Armaduras Longitudinais				M <sub>Q.P.</sub> (kN.m)
	Superior	Área (cm <sup>2</sup> )	Inferior	Área (cm <sup>2</sup> )	
0,000	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-144,92
0,125	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-130,79
0,250	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-117,38
0,375	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-104,70
0,500	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-92,75
0,625	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-81,51
0,750	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-71,01
0,875	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-61,23
1,000	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-52,17
1,125	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-43,84
1,250	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-36,23
1,375	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-29,35
1,500	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-23,19
1,625	4 Ø 20	12,57	2 Ø 16	4,02	-17,75
1,750	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	-13,04
1,875	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	-9,06
2,000	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	-5,80
2,125	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	-3,26
2,250	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	-1,45
2,375	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	-0,36
2,500	2 Ø 20	6,28	2 Ø 16	4,02	0,00

**Nota:** Os valores dos momentos flectores foram retirados do programa de cálculo automático *Robot*.

Na tabela seguinte é realizado a verificação do estado da secção para cada um dos pontos do tramo em estudo (para os estados não fendilhado e fendilhado) de acordo com os momentos actuantes visualizados na tabela anterior.

Tabela C.1.21 - Cálculo dos parâmetros necessários para verificação do estado de cada secção no tramo em consola para os estados não fendilhado e fendilhado

x (m)	Estado Secção	M <sub>cr</sub> (kN.m)	Estado NÃO FENDILHADO					Estado FENDILHADO				
			x <sub>im</sub> (m)	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	z <sub>G</sub> (m)	I <sub>im</sub> (m <sup>4</sup> )	S <sub>im</sub> (m <sup>3</sup> )	x <sub>cr</sub> (m)	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	z <sub>G'</sub> (m)	I <sub>cr</sub> (m <sup>4</sup> )	S <sub>cr</sub> (m <sup>3</sup> )
0,00	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,003	0,000
0,13	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,003	0,000
0,25	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,003	0,000
0,38	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,003	0,000
0,50	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,003	0,000
0,63	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,003	0,000
0,75	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,003	0,000
0,88	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,00281	0,00031
1,00	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,00281	0,00031
1,13	F	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	<b>-0,205</b>	0,078	-0,205	0,00281	0,00031
1,25	N.F.	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	-	-	-	-	-
1,38	N.F.	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	-	-	-	-	-
1,50	N.F.	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	-	-	-	-	-
1,63	N.F.	42,53	<b>-0,294</b>	0,163	-0,294	0,00483	0,00017	-	-	-	-	-
1,75	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-
1,88	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-
2,00	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-
2,13	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-
2,25	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-
2,38	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-
2,50	N.F.	39,91	<b>-0,280</b>	0,154	-0,280	0,00434	0,00005	-	-	-	-	-

Nas tabelas seguintes apresentam-se para todos os pontos do tramo em estudo os valores das curvaturas e flechas a longo prazo referentes à flexão, retracção e a curvatura total para os estados não fendilhado, fendilhado e intermédio.

Tabela C.1.22 - Valores das curvaturas e flechas referentes à flexão, retracção e total em todos pontos de divisão do tramo em consola nos estados não fendilhado e fendilhado

x (m)	Estado da Secção	Estado NÃO FENDILHADO						Estado FENDILHADO					
		Flexão		Retracção		TOTAL		Flexão		Retracção		TOTAL	
		$1/r_{fl,um}$ (1/m)	$\delta_{fl,um}$ (mm)	$1/r_{cs,um}$ (1/m)	$\delta_{cs,um}$ (mm)	$1/r_{tot,um}$ (1/m)	$\delta_{tot,um}$ (mm)	$1/r_{fl,er}$ (1/m)	$\delta_{fl,er}$ (mm)	$1/r_{cs,er}$ (1/m)	$\delta_{cs,er}$ (mm)	$1/r_{tot,er}$ (1/m)	$\delta_{tot,er}$ (mm)
0,000	-	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
0,125	F	-0,00224	0,01	-0,00017	0,00	-0,00241	0,01	-0,00385	0,02	-0,00054	0,00	-0,00438	0,02
0,250	F	-0,00201	0,04	-0,00017	0,00	-0,00218	0,05	-0,00345	0,07	-0,00054	0,01	-0,00399	0,08
0,375	F	-0,00179	0,11	-0,00017	0,01	-0,00196	0,12	-0,00308	0,19	-0,00054	0,03	-0,00362	0,21
0,500	F	-0,00159	0,20	-0,00017	0,02	-0,00176	0,22	-0,00273	0,35	-0,00054	0,05	-0,00327	0,40
0,625	F	-0,00140	0,32	-0,00017	0,03	-0,00156	0,35	-0,00240	0,55	-0,00054	0,09	-0,00294	0,64
0,750	F	-0,00122	0,46	-0,00017	0,04	-0,00138	0,50	-0,00209	0,79	-0,00054	0,13	-0,00263	0,92
0,875	F	-0,00105	0,62	-0,00017	0,06	-0,00122	0,68	-0,00180	1,07	-0,00054	0,18	-0,00234	1,24
1,000	F	-0,00089	0,80	-0,00017	0,07	-0,00106	0,87	-0,00153	1,37	-0,00054	0,24	-0,00207	1,60
1,125	F	-0,00075	0,99	-0,00017	0,09	-0,00092	1,08	-0,00129	1,69	-0,00054	0,30	-0,00183	2,00
1,250	N.F.	-0,00062	1,19	-0,00017	0,12	-0,00079	1,31	-0,00062	2,04	-0,00017	0,38	-0,00079	2,42
1,375	N.F.	-0,00050	1,40	-0,00017	0,14	-0,00067	1,54	-0,00050	2,39	-0,00017	0,46	-0,00067	2,85
1,500	N.F.	-0,00040	1,62	-0,00017	0,17	-0,00056	1,79	-0,00040	2,76	-0,00017	0,54	-0,00056	3,30
1,625	N.F.	-0,00030	1,85	-0,00017	0,20	-0,00047	2,05	-0,00030	3,13	-0,00017	0,62	-0,00047	3,75
1,750	N.F.	-0,00025	2,08	-0,00005	0,24	-0,00030	2,31	-0,00025	3,51	-0,00005	0,71	-0,00030	4,21
1,875	N.F.	-0,00017	2,31	-0,00005	0,27	-0,00022	2,58	-0,00017	3,88	-0,00005	0,79	-0,00022	4,68
2,000	N.F.	-0,00011	2,55	-0,00005	0,31	-0,00016	2,86	-0,00011	4,27	-0,00005	0,88	-0,00016	5,15
2,125	N.F.	-0,00006	2,79	-0,00005	0,34	-0,00011	3,13	-0,00006	4,65	-0,00005	0,97	-0,00011	5,62
2,250	N.F.	-0,00003	3,03	-0,00005	0,38	-0,00008	3,41	-0,00003	5,04	-0,00005	1,06	-0,00008	6,09
2,375	N.F.	-0,00001	3,27	-0,00005	0,42	-0,00006	3,69	-0,00001	5,42	-0,00005	1,15	-0,00006	6,57
2,500	N.F.	0,00000	<b>3,51</b>	0,00000	<b>0,46</b>	0,00000	<b>3,96</b>	0,00000	<b>5,81</b>	0,00000	<b>1,24</b>	0,00000	<b>7,04</b>

**Nota:** Os valores que se encontram nas células de cor encarnada e a negrito, são os valores máximos das flechas referentes à flexão, retracção e total para os estados não fendilhado e fendilhado.

Tabela C.1.23 - Valores das curvaturas e flechas referentes à flexão, retracção e total estático em todos pontos de divisão do tramo em consola no estado intermédio

Estado INTERMÉDIO								
x (m)	Estado da Secção	$\zeta$	Flexão		Retracção		TOTAL	
			$1/r_{fl,int}$ (1/m)	$\delta_{fl,int}$ (mm)	$1/r_{cs,int}$ (1/m)	$\delta_{cs,int}$ (mm)	$1/r_{tot,int}$ (1/m)	$\delta_{tot,int}$ (mm)
0,000	-		-	0,00	-	0,00	-	0,00
0,125	F	0,947	-0,003763	0,01	-0,000517	0,00	-0,004280	0,02
0,250	F	0,934	-0,003359	0,07	-0,000512	0,01	-0,003871	0,08
0,375	F	0,918	-0,002974	0,18	-0,000506	0,03	-0,003481	0,21
0,500	F	0,895	-0,002609	0,34	-0,000498	0,05	-0,003107	0,39
0,625	F	0,864	-0,002262	0,54	-0,000486	0,08	-0,002748	0,62
0,750	F	0,821	-0,001933	0,77	-0,000470	0,12	-0,002403	0,89
0,875	F	0,759	-0,001620	1,03	-0,000447	0,17	-0,002067	1,20
1,000	F	0,668	-0,001322	1,32	-0,000414	0,22	-0,001736	1,54
1,125	F	0,529	-0,001036	1,63	-0,000363	0,28	-0,001399	1,91
1,250	N.F.	0,000	-0,000621	1,95	-0,000167	0,35	-0,000788	2,30
1,375	N.F.	0,000	-0,000503	2,29	-0,000167	0,41	-0,000670	2,70
1,500	N.F.	0,000	-0,000397	2,63	-0,000167	0,49	-0,000564	3,12
1,625	N.F.	0,000	-0,000304	2,98	-0,000167	0,56	-0,000471	3,54
1,750	N.F.	0,000	-0,000248	3,34	-0,000052	0,64	-0,000300	3,97
1,875	N.F.	0,000	-0,000172	3,69	-0,000052	0,71	-0,000224	4,41
2,000	N.F.	0,000	-0,000110	4,05	-0,000052	0,79	-0,000162	4,85
2,125	N.F.	0,000	-0,000062	4,42	-0,000052	0,87	-0,000114	5,29
2,250	N.F.	0,000	-0,000028	4,78	-0,000052	0,95	-0,000079	5,73
2,375	N.F.	0,000	-0,000007	5,15	-0,000052	1,03	-0,000058	6,17
2,500	N.F.	0,000	0,000000	<b>5,51</b>	0,000000	<b>1,11</b>	0,000000	<b>6,62</b>

**Nota:** Os valores que se encontram nas células de cor encarnada e a negrito, são os valores máximos das flechas referentes à flexão, retracção e total para o estado intermédio.

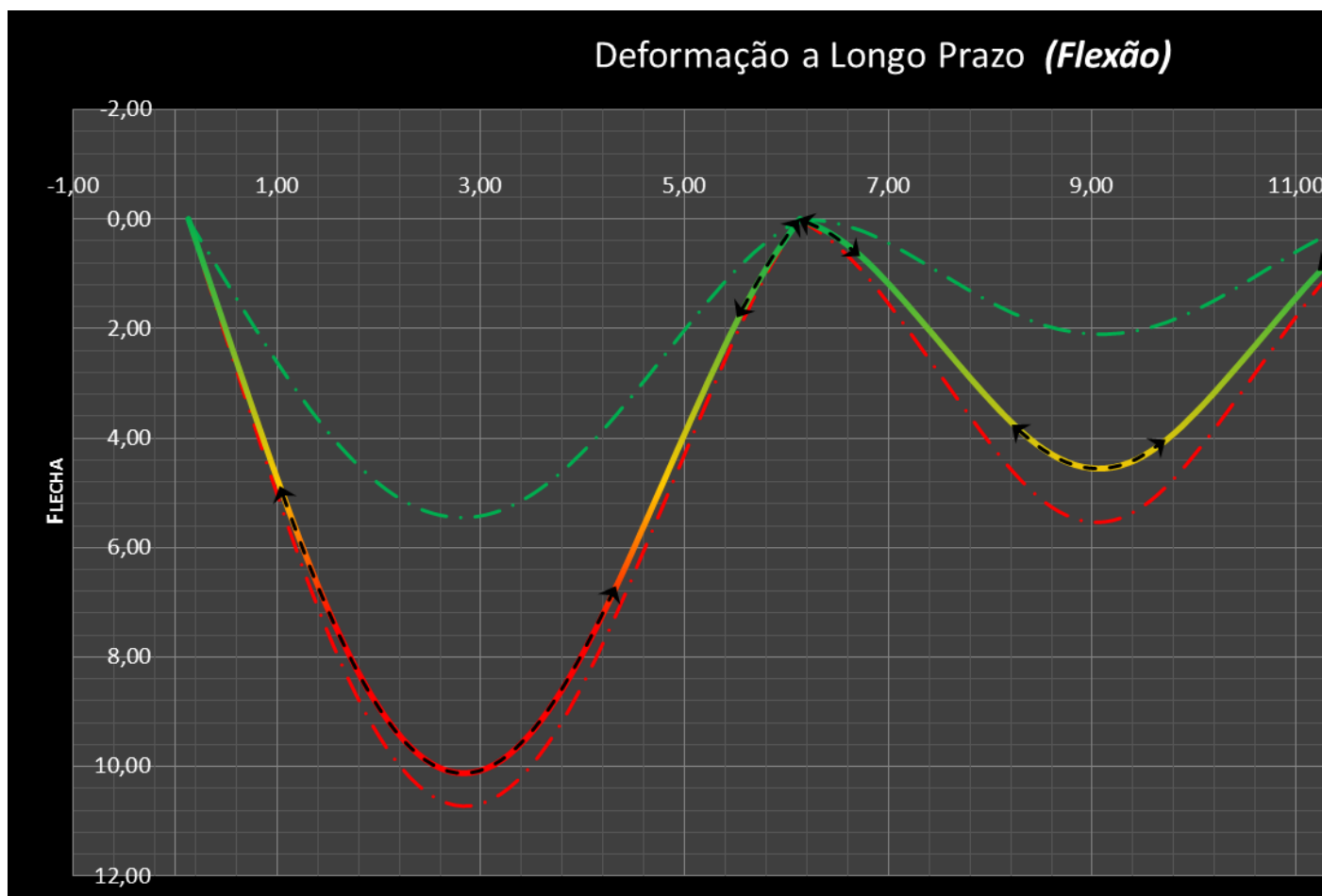


Figura C.1.24 – Deformação a longo prazo do pórtico central referente apenas à flecha

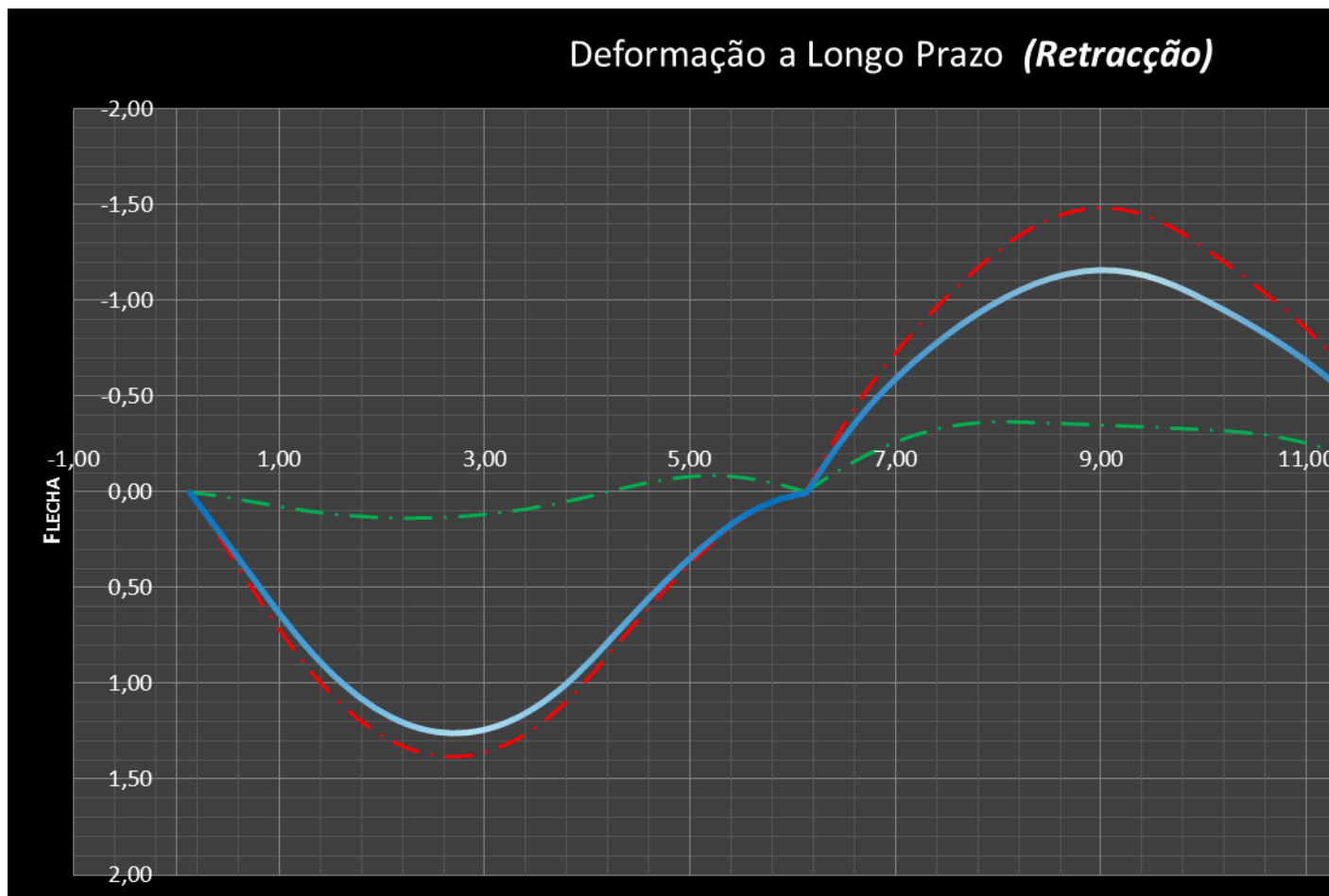


Figura C.1.25 - Deformação a longo prazo do pórtico central referente apenas à retracção

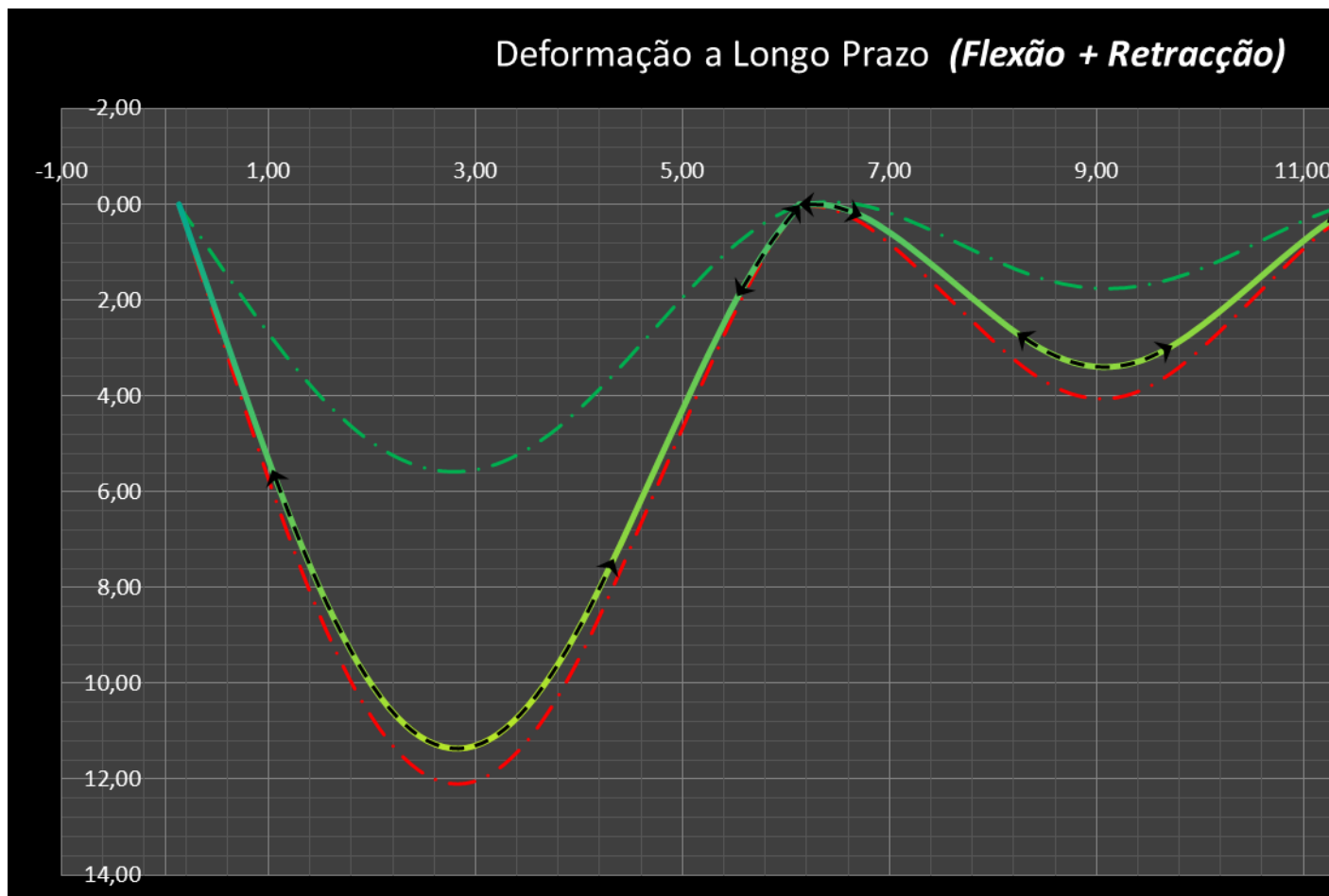


Figura C.1.26 - Deformação a longo prazo do pórtico central predominando a flexão e r

## C.2 – Robot Structural Analysis Professional 2014 (modo *Required Reinforcement*)

Encontram-se nos seguintes pontos a respectiva verificação aos estados limites últimos e de utilização do pórtico em estudo, considerando o comprimento efectivo das vigas entre eixos dos apoios e ao número de pontos e que o elemento foi calculado (5, 11 e 21 pontos respectivamente).

### I. VERIFICAÇÃO AO ESTADO LIMITE ÚLTIMO

Bar/Position (m)	Top required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Top reinforcement - distribution (My)	Bottom required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom reinforcement - distribution (My)	Top provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Design moment My (kNm)	Design case
<b>4</b>								
4/ 0,0	2,96	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-59,28	201
4/ 1,500	0,0	-	6,96	4f16	0,0	8,04	141,62	201
4/ 3,000	0,0	-	8,26	5f16	0,0	10,05	166,99	201
4/ 4,500	1,93	2f20	2,70	2f16	6,28	4,02	54,17	201
4/ 6,000	13,84	5f20	0,0	-	15,71	0,0	-268,73	201
<b>5</b>								
5/ 0,0	11,42	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-228,71	201
5/ 1,500	1,93	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	29,00	201
5/ 3,000	0,0	-	4,50	3f16	0,0	6,03	95,10	201
5/ 4,500	1,93	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	-32,79	201
5/ 6,000	12,23	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-243,07	201
<b>6</b>								
6/ 0,0	11,44	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-229,85	201
6/ 0,625	8,16	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-169,12	201
6/ 1,250	3,99	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-85,91	201
6/ 1,875	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-31,43	201
6/ 2,500	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-5,69	201

Figura C.2.1 - Distribuição das armaduras necessárias e adoptadas em **todos os tramos** (5 pontos)

Bar/Position (m)	Top required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Top reinforcement - distribution (My)	Bottom required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom reinforcement - distribution (My)	Top provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Design moment My (kNm)	Design case
<b>4</b>								
4/ 0,0	2,96	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-59,28	201
4/ 0,600	1,93	2f20	3,39	2f16	6,28	4,02	68,52	201
4/ 1,200	0,0	-	6,35	4f16	0,0	8,04	129,33	201
4/ 1,800	0,0	-	8,09	5f16	0,0	10,05	163,66	201
4/ 2,400	0,0	-	8,66	5f16	0,0	10,05	174,69	201
4/ 3,000	0,0	-	8,43	5f16	0,0	10,05	170,17	201
4/ 3,600	0,0	-	7,23	4f16	0,0	8,04	146,90	201
4/ 4,200	0,0	-	4,77	3f16	0,0	6,03	97,16	201
4/ 4,800	3,07	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	-61,87	201
4/ 5,400	9,28	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-186,42	201
4/ 6,000	13,84	5f20	0,0	-	15,71	0,0	-268,73	201

Figura C.2.2 - Distribuição das armaduras necessárias e adoptadas no **tramo extremo** (11 pontos)

Bar/Position (m)	Top required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Top reinforcement - distribution (My)	Bottom required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom reinforcement - distribution (My)	Top provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Design moment My (kNm)	Design case
<b>5</b>								
5/ 0,0	11,42	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-228,71	201
5/ 0,600	7,72	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-159,55	201
5/ 1,200	2,69	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	-57,39	201
5/ 1,800	0,0	-	2,86	2f16	0,0	4,02	60,80	201
5/ 2,400	0,0	-	4,16	3f16	0,0	6,03	88,16	201
5/ 3,000	0,0	-	4,50	3f16	0,0	6,03	95,10	201
5/ 3,600	0,0	-	4,08	3f16	0,0	6,03	86,47	201
5/ 4,200	0,0	-	2,64	2f16	0,0	4,02	56,24	201
5/ 4,800	3,16	2f20	0,04	2f16	6,28	4,02	-67,19	201
5/ 5,400	8,38	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-172,23	201
5/ 6,000	12,23	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-243,07	201

Figura C.2.3 - Distribuição das armaduras necessárias e adoptadas no **tramo intermédio** (11 pontos)

Bar/Position (m)	Top required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Top reinforcement - distribution (My)	Bottom required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom reinforcement - distribution (My)	Top provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Design moment My (kNm)	Design case
<b>6</b>								
6/ 0,0	11,44	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-229,85	201
6/ 0,250	11,41	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-229,42	201
6/ 0,500	9,04	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-185,79	201
6/ 0,750	7,01	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-146,76	201
6/ 1,000	5,28	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-112,33	201
6/ 1,250	3,83	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-82,49	201
6/ 1,500	2,63	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-57,26	201
6/ 1,750	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-36,62	201
6/ 2,000	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-20,57	201
6/ 2,250	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-9,13	201
6/ 2,500	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-2,28	201

Figura C.2.4 - Distribuição das armaduras necessárias e adoptadas no **tramo em consola**(11 pontos)

Bar/Position (m)	Top required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Top reinforcement - distribution (My)	Bottom required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom reinforcement - distribution (My)	Top provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Design moment My (kNm)	Design case
<b>4</b>								
4/ 0,0	2,96	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-59,28	201
4/ 0,300	2,50	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	-50,10	201
4/ 0,600	0,17	2f20	3,52	2f16	6,28	4,02	71,26	201
4/ 0,900	0,0	-	5,15	3f16	0,0	6,03	104,97	201
4/ 1,200	0,0	-	6,48	4f16	0,0	8,04	132,06	201
4/ 1,500	0,0	-	7,52	4f16	0,0	8,04	152,54	201
4/ 1,800	0,0	-	8,23	5f16	0,0	10,05	166,40	201
4/ 2,100	0,0	-	8,61	5f16	0,0	10,05	173,63	201
4/ 2,400	0,0	-	8,66	5f16	0,0	10,05	174,69	201
4/ 2,700	0,0	-	8,66	5f16	0,0	10,05	174,60	201
4/ 3,000	0,0	-	8,57	5f16	0,0	10,05	172,90	201
4/ 3,300	0,0	-	8,14	5f16	0,0	10,05	164,58	201
4/ 3,600	0,0	-	7,37	4f16	0,0	8,04	149,64	201
4/ 3,900	0,0	-	6,28	4f16	0,0	8,04	128,07	201
4/ 4,200	0,0	-	4,90	3f16	0,0	6,03	99,89	201
4/ 4,500	1,93	2f20	3,22	2f16	6,28	4,02	65,09	201
4/ 4,800	2,94	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	-59,14	201
4/ 5,100	5,79	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-118,11	201
4/ 5,400	9,13	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-183,69	201
4/ 5,700	13,10	5f20	0,0	-	15,71	0,0	-255,89	201
4/ 6,000	13,84	5f20	0,0	-	15,71	0,0	-268,73	201

Figura C.2.5 – Distribuição das armaduras necessárias e adoptadas no **tramo extremo** (21 pontos)

Bar/Position (m)	Top required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Top reinforcement - distribution (My)	Bottom required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom reinforcement - distribution (My)	Top provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Design moment My (kNm)	Design case
<b>5</b>								
5/ 0,0	11,42	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-228,71	201
5/ 0,300	10,82	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-217,84	201
5/ 0,600	7,58	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-156,82	201
5/ 0,900	4,86	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-102,43	201
5/ 1,200	2,56	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	-54,66	201
5/ 1,500	1,93	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	39,92	201
5/ 1,800	0,0	-	2,99	2f16	0,0	4,02	63,53	201
5/ 2,100	0,0	-	3,80	2f16	0,0	4,02	80,52	201
5/ 2,400	0,0	-	4,30	3f16	0,0	6,03	90,89	201
5/ 2,700	0,0	-	4,48	3f16	0,0	6,03	94,64	201
5/ 3,000	0,0	-	4,50	3f16	0,0	6,03	95,10	201
5/ 3,300	0,0	-	4,46	3f16	0,0	6,03	94,39	201
5/ 3,600	0,0	-	4,21	3f16	0,0	6,03	89,20	201
5/ 3,900	0,0	-	3,65	2f16	0,0	4,02	77,40	201
5/ 4,200	0,0	-	2,77	2f16	0,0	4,02	58,97	201
5/ 4,500	1,93	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	33,93	201
5/ 4,800	3,03	2f20	1,93	2f16	6,28	4,02	-64,46	201
5/ 5,100	5,41	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-113,67	201
5/ 5,400	8,24	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-169,50	201
5/ 5,700	11,60	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-231,94	201
5/ 6,000	12,23	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-243,07	201

Figura C.2.6 - Distribuição das armaduras necessárias e adoptadas no **tramo intermédio** (21 pontos)

Bar/Position (m)	Top required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Top reinforcement - distribution (My)	Bottom required reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom reinforcement - distribution (My)	Top provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Bottom provided reinforcement (My) (cm <sup>2</sup> )	Design moment My (kNm)	Design case
<b>6</b>								
6/ 0,0	11,44	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-229,85	201
6/ 0,125	11,44	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-229,85	201
6/ 0,250	11,41	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-229,41	201
6/ 0,375	10,18	4f20	0,0	-	12,57	0,0	-207,02	201
6/ 0,500	9,04	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-185,78	201
6/ 0,625	7,98	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-165,69	201
6/ 0,750	7,01	3f20	0,0	-	9,42	0,0	-146,75	201
6/ 0,875	6,11	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-128,96	201
6/ 1,000	5,28	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-112,32	201
6/ 1,125	4,52	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-96,83	201
6/ 1,250	3,83	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-82,48	201
6/ 1,375	3,20	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-69,29	201
6/ 1,500	2,63	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-57,25	201
6/ 1,625	2,12	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-46,35	201
6/ 1,750	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-36,60	201
6/ 1,875	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-28,01	201
6/ 2,000	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-20,56	201
6/ 2,125	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-14,26	201
6/ 2,250	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-9,11	201
6/ 2,375	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-5,11	201
6/ 2,500	1,93	2f20	0,0	-	6,28	0,0	-2,26	201

Figura C.2.7 - Distribuição das armaduras necessárias e adoptadas no **tramo em consola** (21 pontos)

## II. VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

Bar	Section	Reinforcement parameters	Design case SLS	Maximum deflection (mm)	Number of calculation points	Cracking (mm)	Remarks
1	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
2	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
3	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
4	B R25x55	Vigas	501	13,367	5	0,188	Calculations OK
5	B R25x55	Vigas	501	5,400	5	0,199	Calculations OK
6	B R25x55	Vigas	501	13,602	5	0,197	Allowable deflection exceeded

Figura C.2.8 – Resultados e respectivas verificações das flechas e fendilhação em **todos os tramos** (considerando **5 pontos** de cálculo, vão efectivo **entre eixos** de apoios e rigidez de **valor mínimo**)

Bar	Section	Reinforcement parameters	Design case SLS	Maximum deflection (mm)	Number of calculation points	Cracking (mm)	Remarks
1	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
2	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
3	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
4	B R25x55	Vigas	501	16,331	11	0,223	Calculations OK
5	B R25x55	Vigas	501	5,713	11	0,202	Calculations OK
6	B R25x55	Vigas	501	14,448	11	0,221	Allowable deflection exceeded

Figura C.2.9 - Resultados e respectivas verificações das flechas e fendilhação em **todos os tramos** (considerando **11 pontos** de cálculo, vão efectivo **entre eixos** de apoios e rigidez de **valor mínimo**)

Bar	Section	Reinforcement parameters	Design case SLS	Maximum deflection (mm)	Number of calculation points	Cracking (mm)	Remarks
1	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
2	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
3	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
4	B R25x55	Vigas	501	18,240	21	0,235	Calculations OK
5	B R25x55	Vigas	501	6,816	21	0,258	Calculations OK
6	B R25x55	Vigas	501	14,736	21	0,262	Allowable deflection exceeded

Figura C.2.10 - Resultados e respectivas verificações das flechas e fendilhação em **todos os tramos** (considerando **21 pontos** de cálculo, vão efectivo **entre eixos** de apoios e rigidez de **valor mínimo**)

Bar	Section	Reinforcement parameters	Design case SLS	Maximum deflection (mm)	Number of calculation points	Cracking (mm)	Remarks
1	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
2	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
3	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
4	B R25x55	Vigas	501	10,490	5	0,188	Calculations OK
5	B R25x55	Vigas	501	3,419	5	0,199	Calculations OK
6	B R25x55	Vigas	501	9,569	5	0,197	Calculations OK

Figura C.2.11 - Resultados e respectivas verificações das flechas e fendilhação em **todos os tramos** (considerando **5 pontos** de cálculo, vão efectivo **entre eixos** de apoios e rigidez de **valor médio**)

Bar	Section	Reinforcement parameters	Design case SLS	Maximum deflection (mm)	Number of calculation points	Cracking (mm)	Remarks
1	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
2	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
3	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
4	B R25x55	Vigas	501	12,733	11	0,223	Calculations OK
5	B R25x55	Vigas	501	4,261	11	0,202	Calculations OK
6	B R25x55	Vigas	501	9,363	11	0,221	Calculations OK

Figura C.2.12 - Resultados e respectivas verificações das flechas e fendilhação em **todos os tramos** (considerando **11 pontos** de cálculo, vão efectivo **entre eixos** de apoios e rigidez de **valor médio**)

Bar	Section	Reinforcement parameters	Design case SLS	Maximum deflection (mm)	Number of calculation points	Cracking (mm)	Remarks
1	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
2	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
3	C R25x25	Pilares	501	-	1	0,0	Calculations OK
4	B R25x55	Vigas	501	12,741	21	0,235	Calculations OK
5	B R25x55	Vigas	501	4,592	21	0,258	Calculations OK
6	B R25x55	Vigas	501	9,588	21	0,262	Calculations OK

Figura C.2.13 - Resultados e respectivas verificações das flechas e fendilhação em **todos os tramos** (considerando **21 pontos** de cálculo, vão efectivo **entre eixos** de apoios e rigidez de **valor médio**)

### C.3 – Robot Structural Analysis Professional 2014 (modo *Provided Reinforcement*)

Encontram-se nos pontos seguintes atendendo ao número de pontos que o elemento foi calculado (5, 11 e 21 pontos respectivamente), as soluções da disposição de armadura e as respectivas verificações referentes aos estados limites últimos e de utilização.

#### I. SOLUÇÃO DA DISPOSIÇÃO DE ARMADURAS

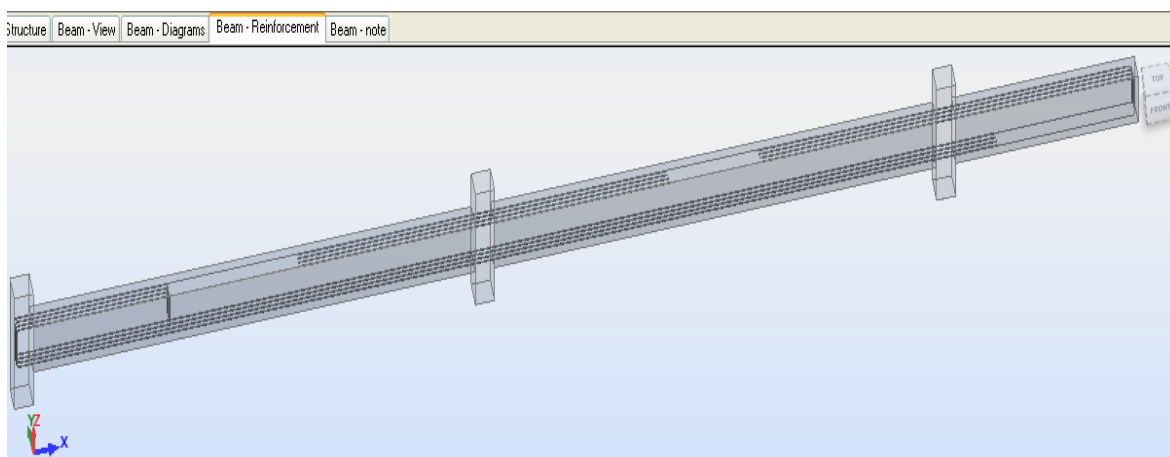


Figura C.3.1 – Perspectiva da solução e disposição de armaduras longitudinais do pórtico e piso em estudo (calculado para 11 e 21 pontos no elemento)

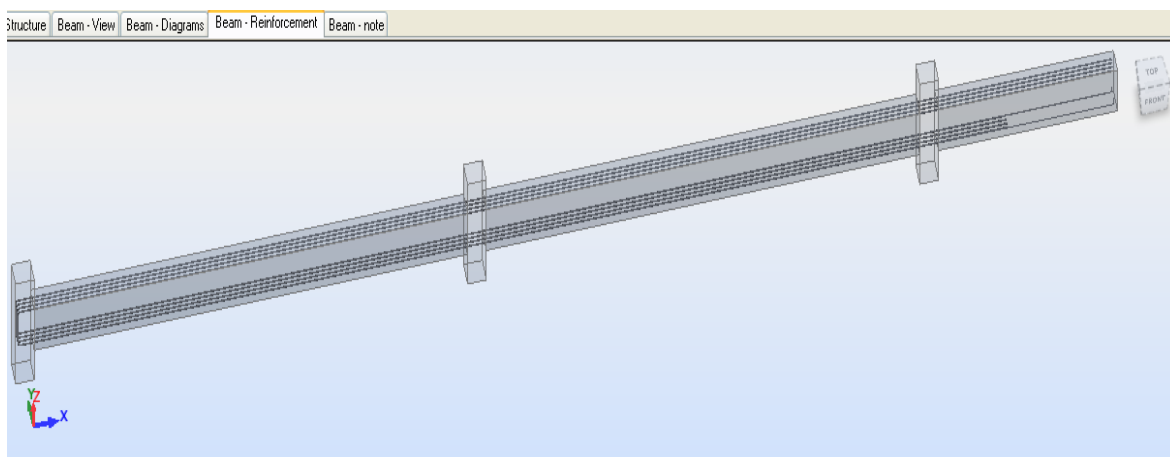


Figura C.3.2 – Perspectiva da solução e disposição de armaduras longitudinais do pórtico e piso em estudo (calculado para 5 pontos no elemento)

General Detailed Summary table Spacings and areas							
	No.	Reinforcement Type	Steel Grade	Diameter (mm)	Shape Code	Number	(m)
1	1	main-top	B500B	20	00	4	A = 2,025
2	2	main-top	B500B	20	00	4	A = 4,821
3	9	main-top	B500B	20	00	4	A = 4,886
4	4	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 5,187
5	5	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 3,275
6	7	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 5,720
7	6	assembly-top	B500B	16	00	2	A = 4,356
8	8	assembly-top	B500B	16	00	2	A = 3,456
9	10	assembly-bottom	B500B	16	00	2	A = 2,930
*							

Figura C.3.3 - Valores obtidos da solução de armaduras referente à posição, classe, diâmetro, número e respectivo comprimento (calculado para **21 pontos** no elemento)

General Detailed Summary table Spacings and areas							
	No.	Reinforcement Type	Steel Grade	Diameter (mm)	Shape Code	Number	(m)
1	1	main-top	B500B	20	00	4	A = 1,714
2	2	main-top	B500B	20	00	4	A = 5,421
3	7	main-top	B500B	20	00	4	A = 5,186
4	4	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 5,187
5	5	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 3,275
6	8	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 5,683
7	6	assembly-top	B500B	16	00	2	A = 4,056
8	9	assembly-top	B500B	16	00	2	A = 2,856
9	10	assembly-bottom	B500B	16	00	2	A = 2,930
*							

Figura C.3.4 - Valores obtidos da solução de armaduras referente à posição, classe, diâmetro, número e respectivo comprimento (calculado para **11 pontos** no elemento)

General Detailed Summary table Spacings and areas							
	No.	Reinforcement Type	Steel Grade	Diameter (mm)	Shape Code	Number	(m)
1	1	main-top	B500B	20	00	4	A = 3,618
2	2	main-top	B500B	20	00	4	A = 7,035
3	6	main-top	B500B	20	00	4	A = 5,993
4	4	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 5,187
5	5	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 3,275
6	7	main-bottom	B500B	20	00	4	A = 5,647
7	8	assembly-bottom	B500B	16	00	2	A = 2,930
*							

Figura C.3.5 - Valores obtidos da solução de armaduras referente à posição, classe, diâmetro, número e respectivo comprimento (calculado para **5 pontos** no elemento)

## II. VERIFICAÇÃO AO ESTADO LIMITE ÚLTIMO

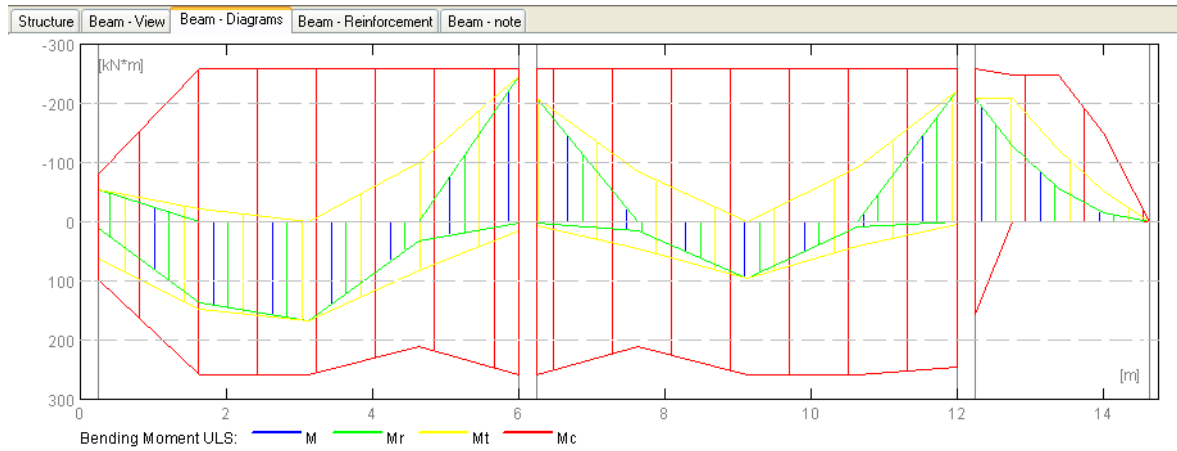


Figura C.3.6 - Diagramas dos momentos flectores actuantes e resistentes (correspondente ao cálculo de **5 pontos** no elemento)

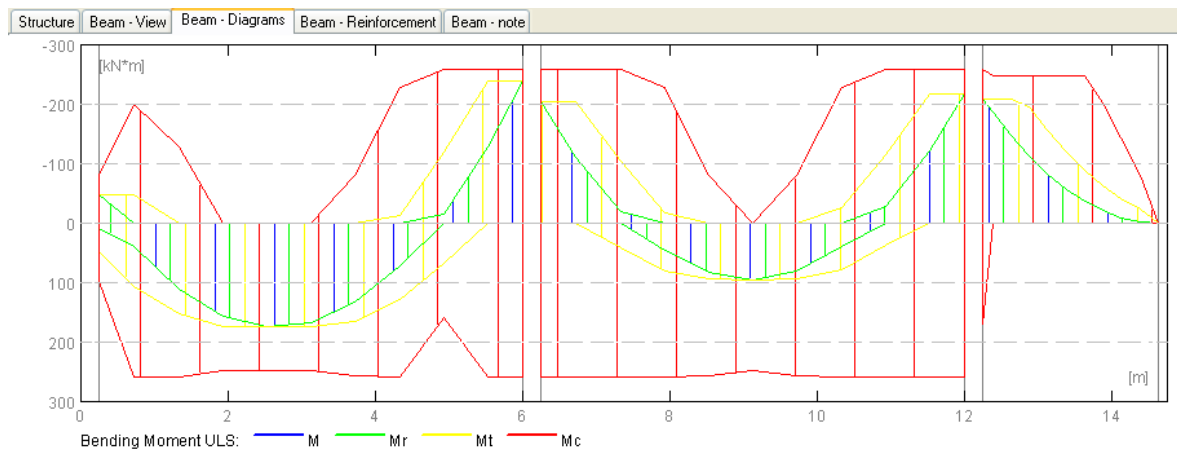


Figura C.3.7 - Diagramas dos momentos flectores actuantes e resistentes (correspondente ao cálculo de **11 pontos** no elemento)

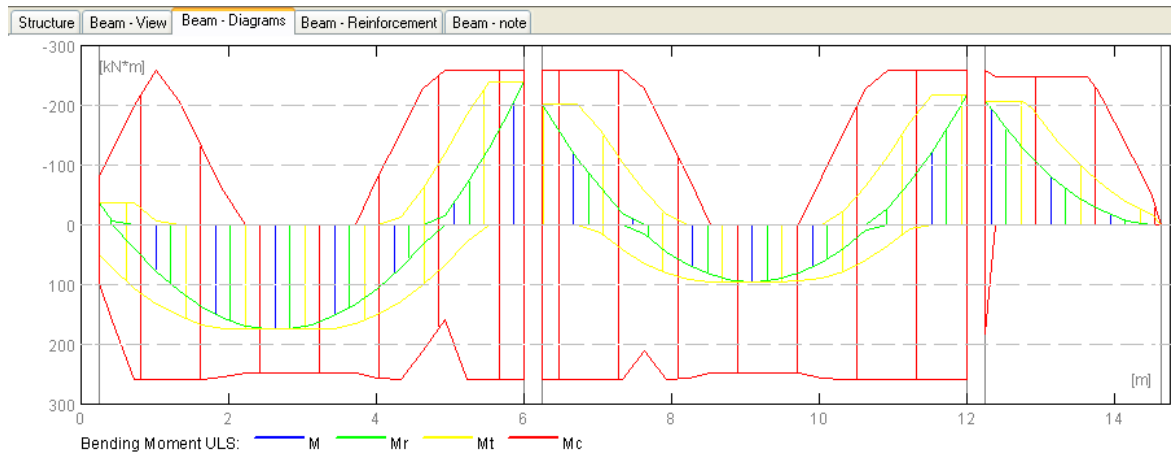


Figura C.3.8 - Diagramas dos momentos flectores actuantes, resistentes (correspondente ao cálculo de **21 pontos** no elemento)

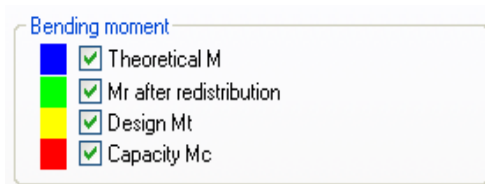


Figura C.3.9 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente aos momentos flectores teóricos, redistribuídos, de cálculo e resistentes

### III. VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

#### ▪ TENSÕES

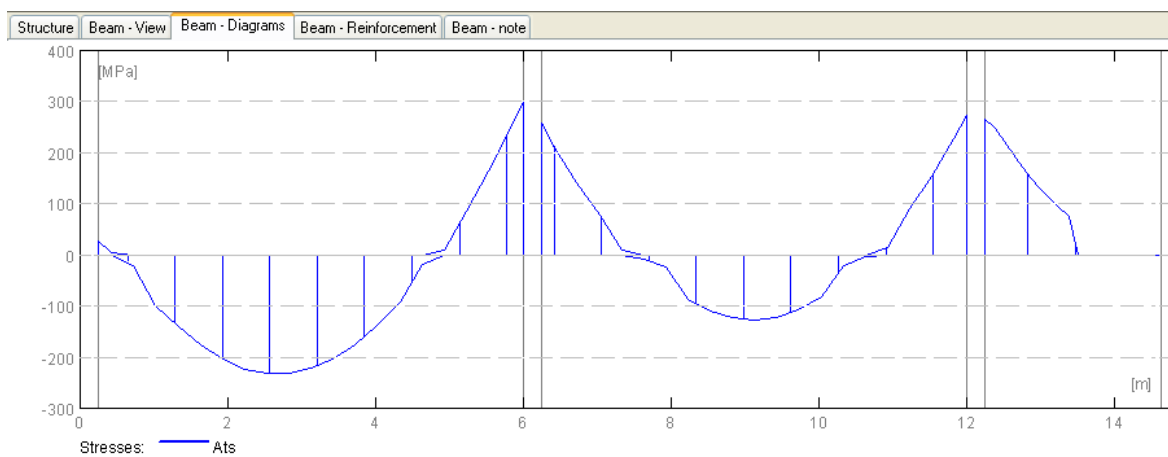


Figura C.3.10 – Diagrama de tensões de tracção na armadura (calculado para **21 pontos** no elemento)

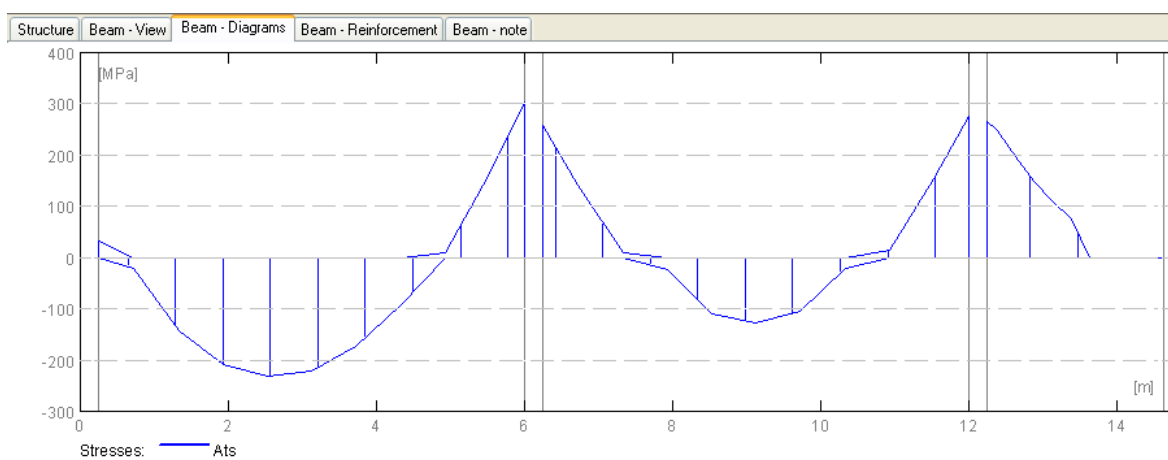


Figura C.3.11 – Diagrama de tensões de tracção na armadura (calculado para **11 pontos** no elemento)

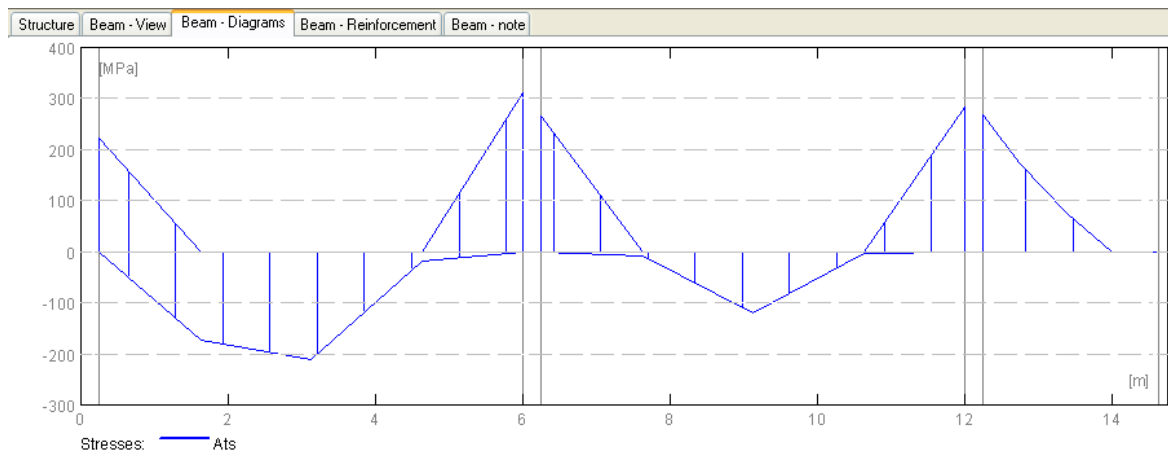


Figura C.3.12 – Diagrama de tensões de tracção na armadura (calculado para **5 pontos** no elemento)

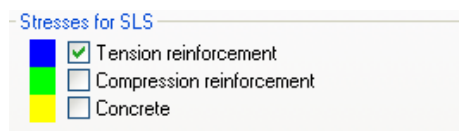


Figura C.3.13 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente às tensões de tracção na armadura ao longo do pórtico

Results	ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases				
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,425(m)	X = 0,725(m)	X = 1,025(m)	X = 1,325(m)	X = 1,625(m)	Active span
Ats (MPa)	26,15	301,55	-232,74	26,15	4,24	0,00	0,00	0,00	0,00	<< P1
				0,00	0,00	-20,29	-98,90	-140,99	-176,09	

Results	ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases				
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,425(m)	X = 6,725(m)	X = 7,025(m)	X = 7,325(m)	X = 7,625(m)	Active span
Ats (MPa)	256,79	274,22	-126,70	256,79	210,87	140,54	78,58	10,09	0,00	<< P2
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-8,78	

Results	ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases				
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,500(m)	X = 12,625(m)	X = 12,750(m)	X = 12,875(m)	Active span
Ats (MPa)	265,14	0,00	150,05	265,14	248,05	221,25	195,99	172,26	150,05	<< P3
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura C.3.14 – Valores das tensões de tracção na armadura em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **21 pontos** no elemento)

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,725(m)	X = 1,325(m)	X = 1,925(m)	X = 2,525(m)	X = 3,125(m)	
Ats (MPa)	32,78	303,30	-232,74	32,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,00	-20,29	-142,73	-207,73	-232,74	-222,48	

Active span: << P1

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,725(m)	X = 7,325(m)	X = 7,925(m)	X = 8,525(m)	X = 9,125(m)	
Ats (MPa)	258,54	276,00	-126,70	258,54	140,54	10,09	0,00	0,00	0,00	
				0,00	0,00	0,00	-23,23	-108,52	-126,70	

Active span: << P2

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,625(m)	X = 12,875(m)	X = 13,125(m)	X = 13,375(m)	
Ats (MPa)	266,39	0,00	150,05	266,39	248,05	195,99	150,05	110,24	76,56	
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Active span: << P3

Figura C.3.15 - Valores das tensões de tracção na armadura em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **11 pontos** no elemento)

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 1,625(m)	X = 3,125(m)	X = 4,625(m)	X = 6,000(m)		
Ats (MPa)	222,82	311,90	-211,44	222,82	0,00	0,00	0,00	311,90		
				0,00	-172,96	-211,44	-17,36	0,00		

Active span: << P1

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 7,625(m)	X = 9,125(m)	X = 10,625(m)	X = 12,000(m)		
Ats (MPa)	265,46	282,55	-120,41	265,46	0,00	0,00	0,00	282,55		
				0,00	-8,68	-120,41	-4,48	0,00		

Active span: << P2

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,750(m)	X = 13,375(m)	X = 14,000(m)	X = 14,625(m)		
Ats (MPa)	269,13	0,00	76,56	269,13	172,26	76,56	-0,00	-0,00		
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		

Active span: << P3

Figura C.3.16 - Valores das tensões de tracção na armadura em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **5 pontos** no elemento)

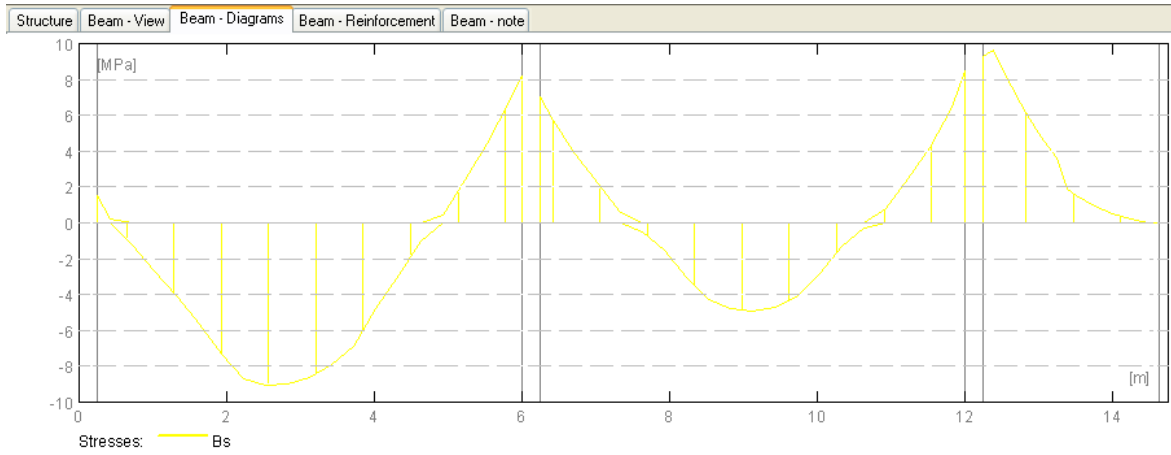


Figura C.3.17 – Diagrama de tensões de compressão no betão (calculado para **21 pontos** no elemento)

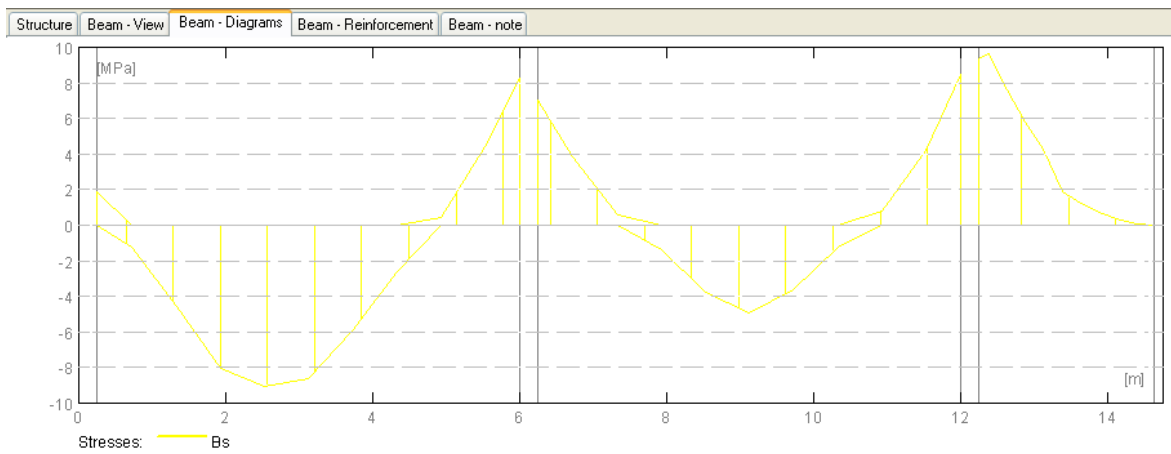


Figura C.3.18 - Diagrama de tensões de compressão no betão (calculado para **11 pontos** no elemento)

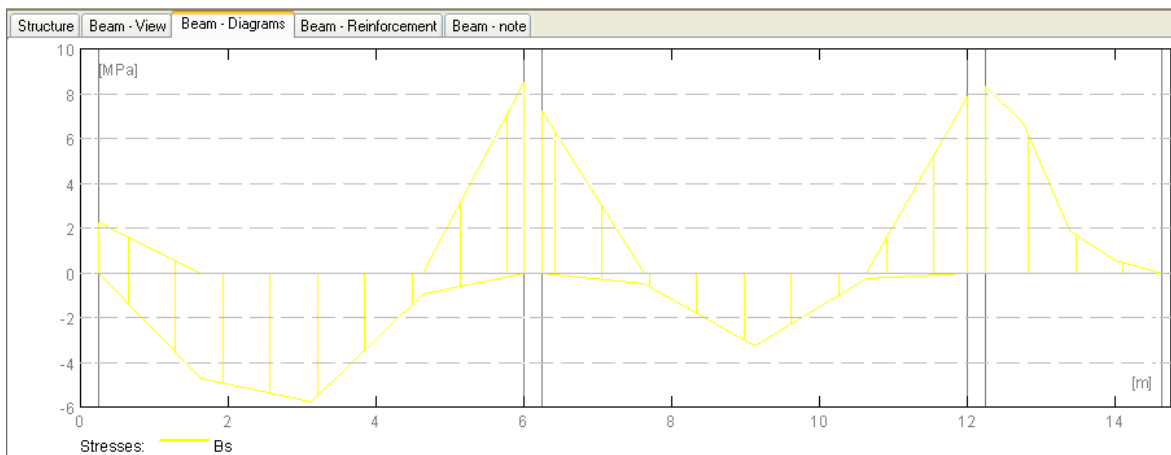


Figura C.3.19 – Diagrama de tensões de compressão no betão (calculado para **5 pontos** no elemento)

Stresses for SLS

- Tension reinforcement
- Compression reinforcement
- Concrete

Figura C.3.20 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente às tensões de compressão no betão ao longo do pórtico

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,425(m)	X = 0,725(m)	X = 1,025(m)	X = 1,325(m)	X = 1,625(m)
Bs (MPa)	1,53	8,22	-9,03	1,53	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,00	0,00	-1,23	-2,69	-4,10	-5,65

Active span: P1

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,425(m)	X = 6,725(m)	X = 7,025(m)	X = 7,325(m)	X = 7,625(m)
Bs (MPa)	7,00	8,45	-4,91	7,00	5,75	3,83	2,14	0,58	0,00
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,50

Active span: P2

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,500(m)	X = 12,625(m)	X = 12,750(m)	X = 12,875(m)
Bs (MPa)	9,31	0,00	5,82	9,31	9,62	8,58	7,60	6,68	5,82
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Active span: P3

Figura C.3.21 - Valores das tensões de compressão no betão em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **21 pontos** no elemento)

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,725(m)	X = 1,325(m)	X = 1,925(m)	X = 2,525(m)	X = 3,125(m)
Bs (MPa)	1,92	8,26	-9,03	1,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,00	-1,23	-4,59	-8,06	-9,03	-8,63

Active span: P1

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,725(m)	X = 7,325(m)	X = 7,925(m)	X = 8,525(m)	X = 9,125(m)
Bs (MPa)	7,04	8,51	-4,91	7,04	3,83	0,58	0,00	0,00	0,00
				0,00	0,00	0,00	-1,37	-3,74	-4,91

Active span: P2

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,625(m)	X = 12,875(m)	X = 13,125(m)	X = 13,375(m)
Bs (MPa)	9,33	0,00	5,82	9,33	9,62	7,60	5,82	4,28	1,87
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Active span: P3

Figura C.3.22 - Valores das tensões de compressão no betão em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **11 pontos** no elemento)

Results									
	ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases			
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 1,625(m)	X = 3,125(m)	X = 4,625(m)	X = 6,000(m)	
Bs (MPa)	2,22	8,50	-5,76	2,22	0,00	0,00	0,00	8,50	
				0,00	-4,71	-5,76	-0,95	0,00	

Active span: << P1

Results									
	ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases			
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 7,625(m)	X = 9,125(m)	X = 10,625(m)	X = 12,000(m)	
Bs (MPa)	7,23	7,83	-3,28	7,23	0,00	0,00	0,00	7,83	
				0,00	-0,48	-3,28	-0,26	0,00	

Active span: << P2

Results									
	ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases			
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,750(m)	X = 13,375(m)	X = 14,000(m)	X = 14,625(m)	
Bs (MPa)	8,33	0,00	1,87	8,33	6,68	1,87	0,55	-0,00	
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Active span: << P3

Figura C.3.23 - Valores das tensões de compressão no betão em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **5 pontos** no elemento)

## ▪ FENDILHAÇÃO

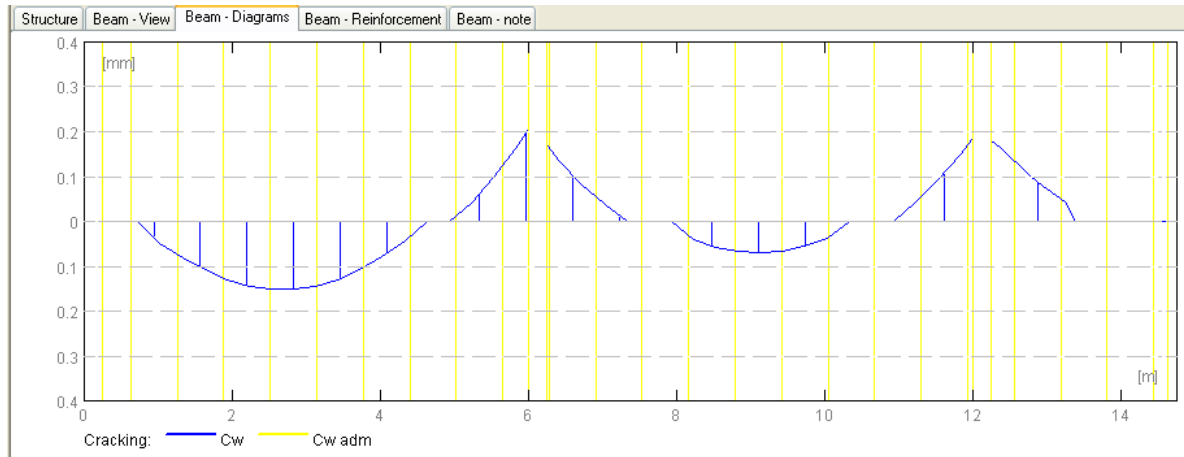


Figura C.3.24 - Diagramas da fendação obtida e admissível (calculado para **21 pontos** no elemento)

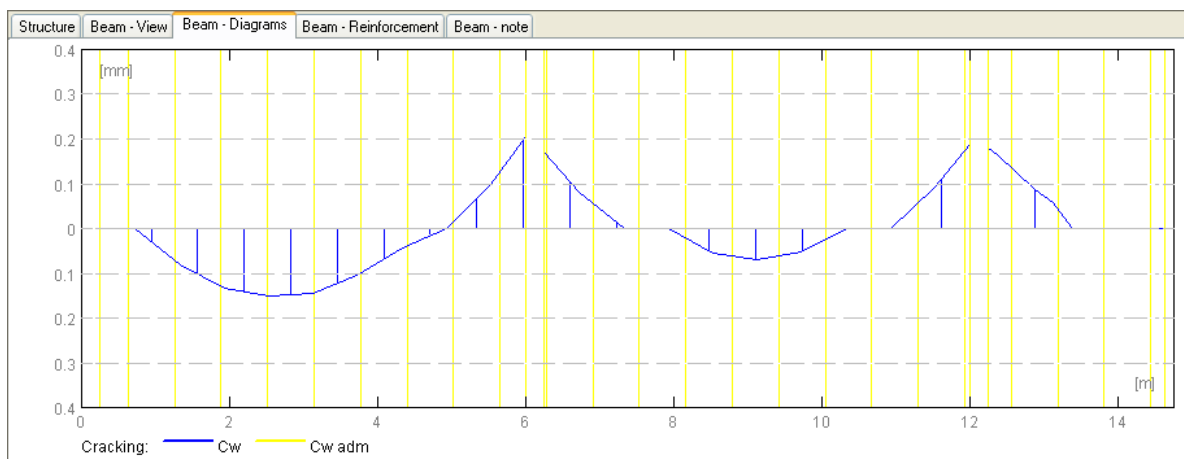


Figura C.3.25 - Diagramas da fendação obtida e admissível (calculado para **11 pontos** no elemento)

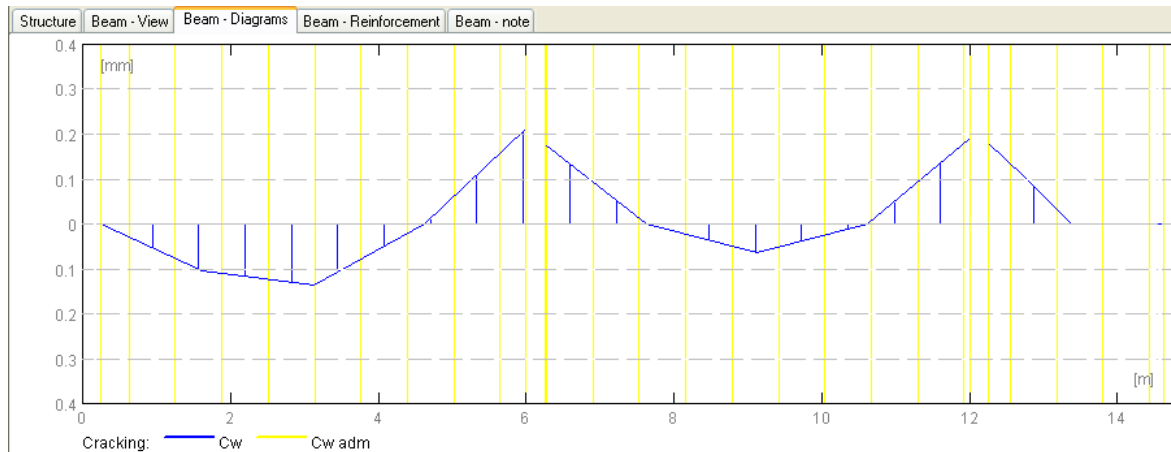


Figura C.3.26 - Diagramas da fendilhação obtida e admissível (calculado para **5 pontos** no elemento)

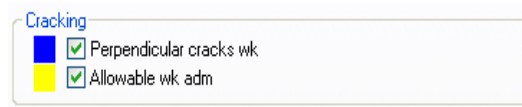


Figura C.3.27 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente à fendilhação perpendicular e admissível ao longo do pórtico

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,425(m)	X = 0,725(m)	X = 1,025(m)	X = 1,325(m)	X = 1,625(m)
Cw (mm)	0,000	0,205	0,152	0,000	0,000	0,000	0,049	0,081	0,108
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,425(m)	X = 6,725(m)	X = 7,025(m)	X = 7,325(m)	X = 7,625(m)
Cw (mm)	0,170	0,186	0,070	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,500(m)	X = 12,625(m)	X = 12,750(m)	X = 12,875(m)
Cw (mm)	0,180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400

Figura C.3.28 - Valores da fendilhação em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **21 pontos** no elemento)

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,725(m)	X = 1,325(m)	X = 1,925(m)	X = 2,525(m)	X = 3,125(m)	
Cw (mm)	0,000	0,206	0,152	0,000	0,000	0,082	0,132	0,152	0,144	Active span: P1
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	Display of results for openings: P1

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,725(m)	X = 7,325(m)	X = 7,925(m)	X = 8,525(m)	X = 9,125(m)	
Cw (mm)	0,171	0,187	0,070	0,000	0,000	0,000	0,000	0,056	0,070	Active span: P2
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	Display of results for openings: P2

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,625(m)	X = 12,875(m)	X = 13,125(m)	X = 13,375(m)	
Cw (mm)	0,181	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Active span: P3
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,181	0,163	0,123	0,088	0,057	0,000	Display of results for openings: P3

Figura C.3.29 - Valores da fendilhação em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **11 pontos** no elemento)

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 1,625(m)	X = 3,125(m)	X = 4,625(m)	X = 6,000(m)		
Cw (mm)	0,000	0,213	0,135	0,000	0,106	0,135	0,000	0,000		Active span: P1
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,213	Display of results for openings: P1

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 7,625(m)	X = 9,125(m)	X = 10,625(m)	X = 12,000(m)		
Cw (mm)	0,177	0,190	0,065	0,000	0,000	0,065	0,000	0,000		Active span: P2
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,177	0,000	0,000	0,000	0,190		Display of results for openings: P2

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,750(m)	X = 13,375(m)	X = 14,000(m)	X = 14,625(m)		
Cw (mm)	0,180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		Active span: P3
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,180	0,105	0,000	0,000	0,000		Display of results for openings: P3

Figura C.3.30 - Valores da fendilhação em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **5 pontos** no elemento)

## ▪ DEFORMAÇÃO

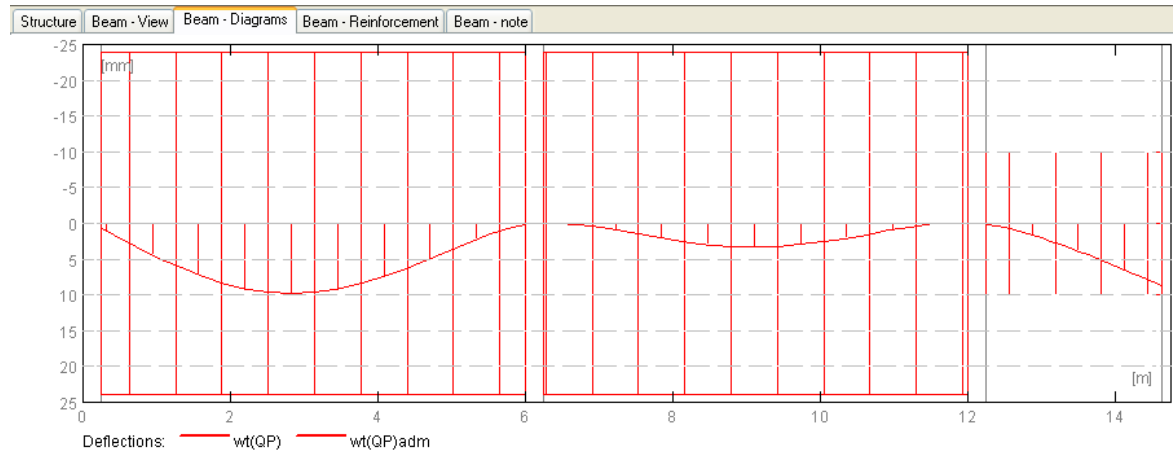


Figura C.3.31 - Diagramas da deformação obtida e admissível (calculado para **21 pontos** no elemento)

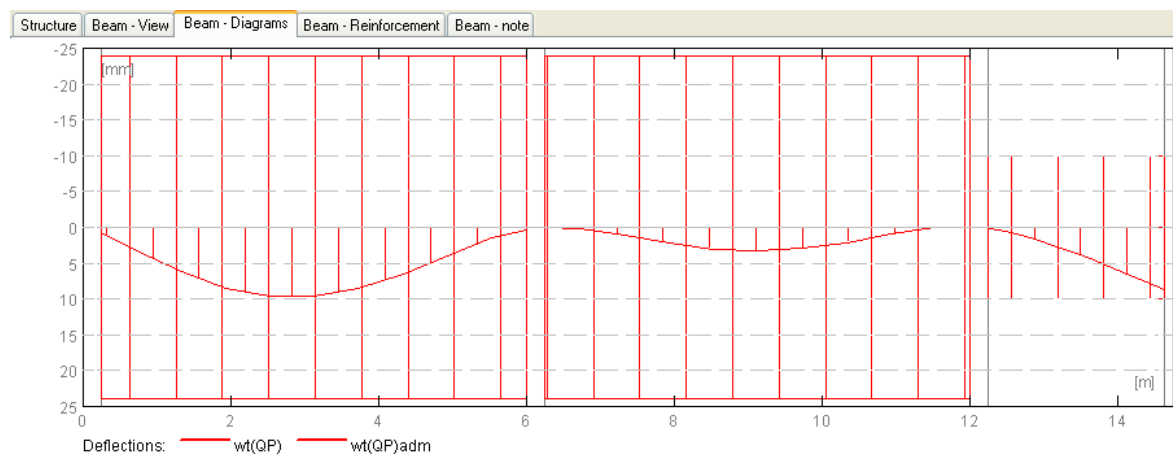


Figura C.3.32 - Diagramas da deformação obtida e admissível (calculado para **11 pontos** no elemento)

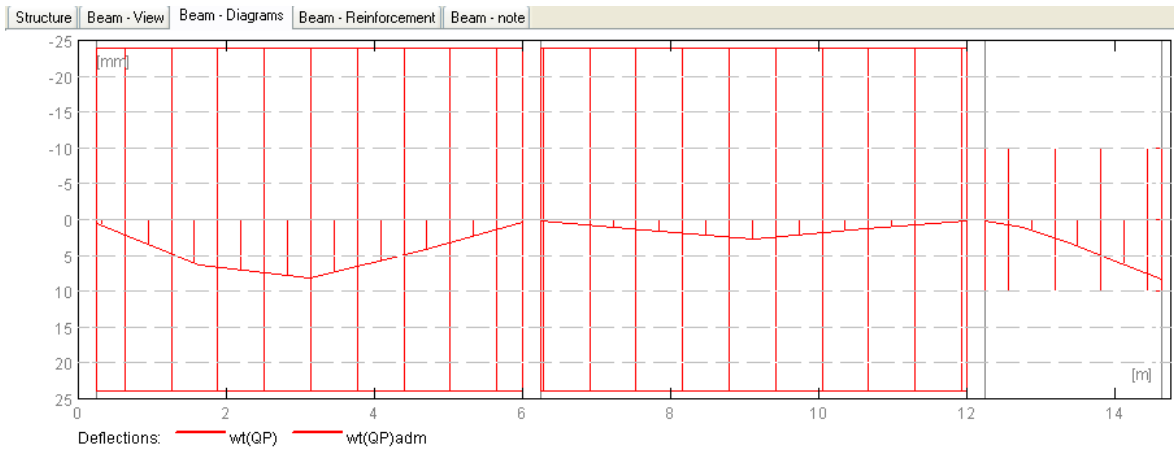


Figura C.3.33 - Diagramas da deformação obtida e admissível (calculado para **5 pontos** no elemento)

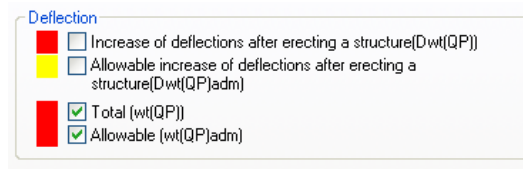


Figura C.3.4 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente à deformação total e admissível ao longo do pórtico

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,425(m)	X = 0,725(m)	X = 1,025(m)	X = 1,325(m)	X = 1,625(m)
wt(QP) (mm)	0,675	0,244	9,822	0,675	1,619	3,251	4,816	6,247	7,488
wt(QP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,425(m)	X = 6,725(m)	X = 7,025(m)	X = 7,325(m)	X = 7,625(m)
wt(QP) (mm)	0,000	0,000	3,287	0,000	0,000	0,194	0,612	1,133	1,688
wt(QP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,500(m)	X = 12,625(m)	X = 12,750(m)	X = 12,875(m)
wt(QP) (mm)	0,140	8,713	5,998	0,140	0,340	0,592	0,891	1,233	1,611
wt(QP)adm	-10,000	-10,000	-10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000

Figura C.3.35 - Valores da flecha em cada tramo e nas seções críticas consideradas (calculado para **21 pontos** no elemento)

Results										
ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases					
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,725(m)	X = 1,325(m)	X = 1,925(m)	X = 2,525(m)	X = 3,125(m)	
wt(GP) (mm)	0,677	0,315	9,677	0,677	3,251	6,247	8,494	9,677	9,667	
wt(GP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
				24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	
				-24,000	-24,000	-24,000	-24,000	-24,000	-24,000	

Results										
ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases					
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,725(m)	X = 7,325(m)	X = 7,925(m)	X = 8,525(m)	X = 9,125(m)	
wt(GP) (mm)	0,040	0,017	3,287	0,040	0,194	1,133	2,217	3,019	3,287	
wt(GP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
				24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	
				-24,000	-24,000	-24,000	-24,000	-24,000	-24,000	

Results										
ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases					
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,625(m)	X = 12,875(m)	X = 13,125(m)	X = 13,375(m)	
wt(GP) (mm)	0,170	8,714	5,463	0,170	0,340	0,892	1,611	2,460	3,403	
wt(GP)adm	-10,000	-10,000	-10,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
				10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	
				-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	

Figura C.3.36 - Valores da flecha em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para 11 pontos no elemento)

Results										
ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases					
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 1,625(m)	X = 3,125(m)	X = 4,625(m)	X = 6,000(m)		
wt(GP) (mm)	0,529	0,369	8,189	0,529	6,343	8,189	4,426	0,369		
wt(GP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
				24,000	24,000	24,000	24,000	24,000		
				-24,000	-24,000	-24,000	-24,000	-24,000		

Results										
ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases					
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 7,625(m)	X = 9,125(m)	X = 10,625(m)	X = 12,000(m)		
wt(GP) (mm)	0,119	0,108	2,774	0,119	1,424	2,774	1,300	0,108		
wt(GP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
				24,000	24,000	24,000	24,000	24,000		
				-24,000	-24,000	-24,000	-24,000	-24,000		

Results										
ULS	SLS	ALS	Reinforcement	Deflection	Simple cases					
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,750(m)	X = 13,375(m)	X = 14,000(m)	X = 14,625(m)		
wt(GP) (mm)	0,235	8,290	5,707	0,235	1,173	3,237	5,707	8,290		
wt(GP)adm	-10,000	-10,000	-10,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
				10,000	10,000	10,000	10,000	10,000		
				-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000		

Figura C.3.37 - Valores da flecha em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para 5 pontos no elemento)

C.4 – Robot Structural Analysis Professional 2014 (modo *Provided Reinforcement* utilizando o comando *Typical Reinforcement*)

Encontram-se nos pontos seguintes atendendo ao número de pontos que o elemento foi calculado (5, 11 e 21 pontos respectivamente), a respectiva disposição de armadura adoptada analiticamente e as respectivas verificações referentes aos estados limites últimos e de utilização.

## I. DISPOSIÇÃO DE ARMADURA

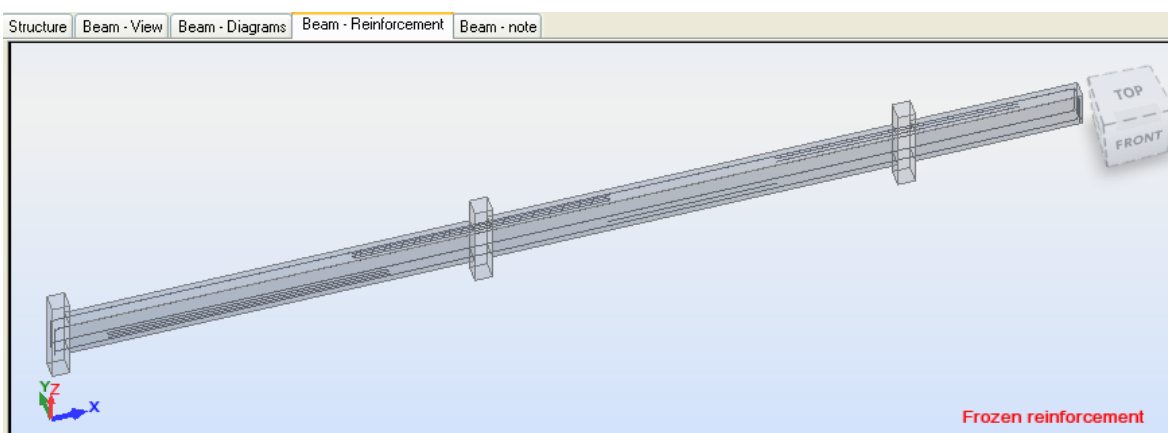


Figura C.4.1 – Disposição de armadura idêntica à solução adoptada analiticamente

## II. VERIFICAÇÃO AO ESTADO LIMITE ÚLTIMO

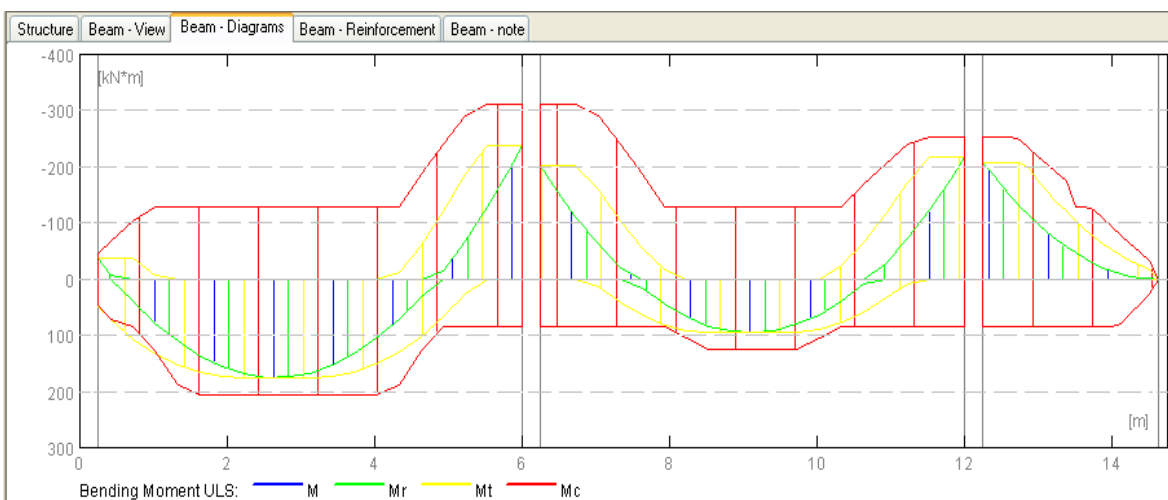


Figura C.4.2 – Diagramas dos momentos flectores actuantes e resistentes (calculado para **21 pontos** no elemento)

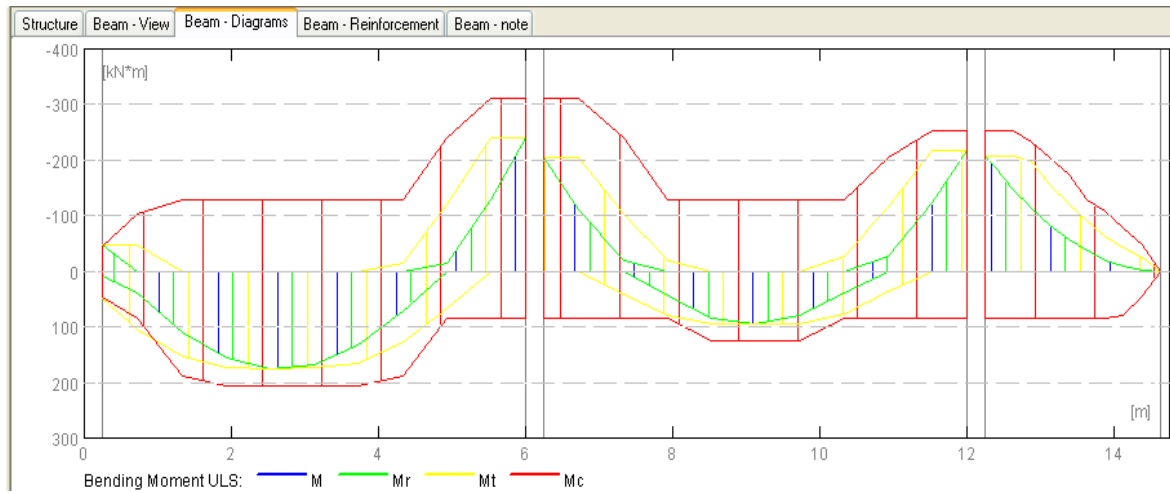


Figura C.4.3 – Diagramas dos momentos flectores actuantes e resistentes (calculado para **11 pontos** no elemento)

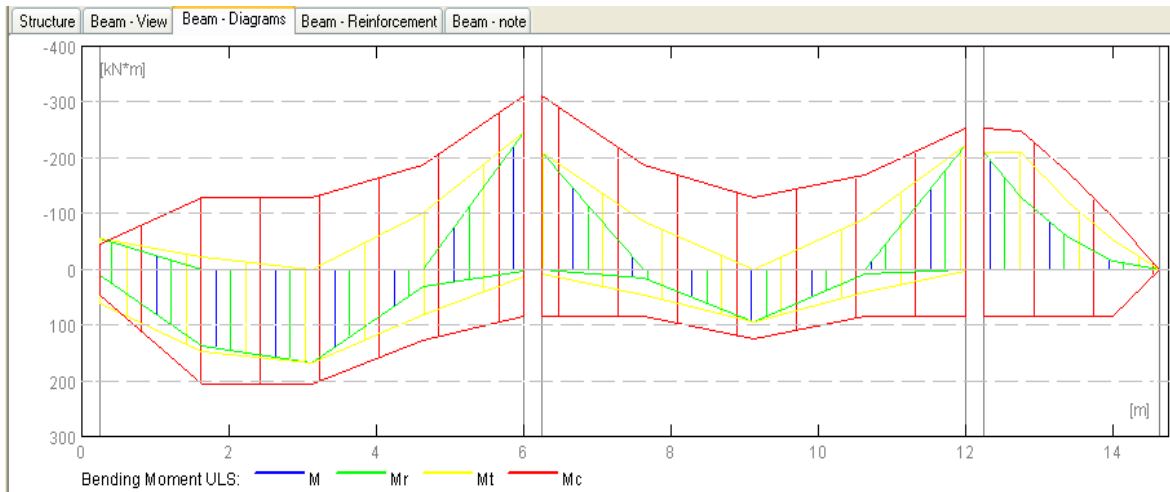


Figura C.4.4 – Diagramas dos momentos flectores actuantes e resistentes (calculado para **5 pontos** no elemento)

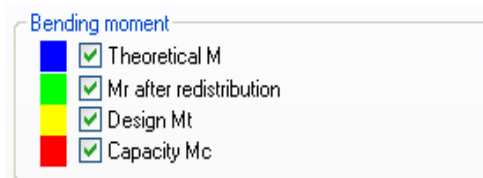


Figura C.4.5 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente aos momentos flectores teóricos, redistribuídos, de cálculo e resistentes

### III. VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

#### ▪ TENSÕES

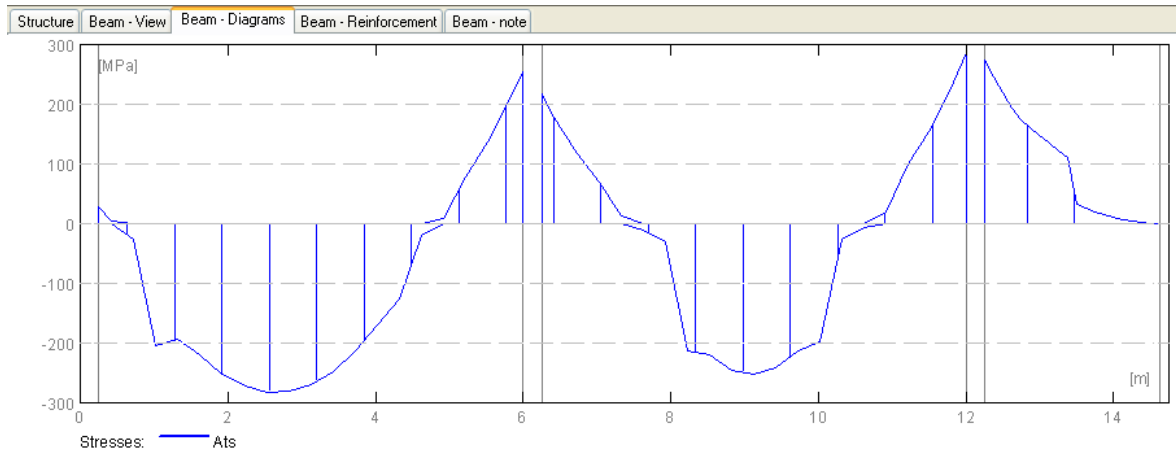


Figura C.4.6 - Diagrama de tensões de tracção na armadura (calculado para **21 pontos** no elemento)

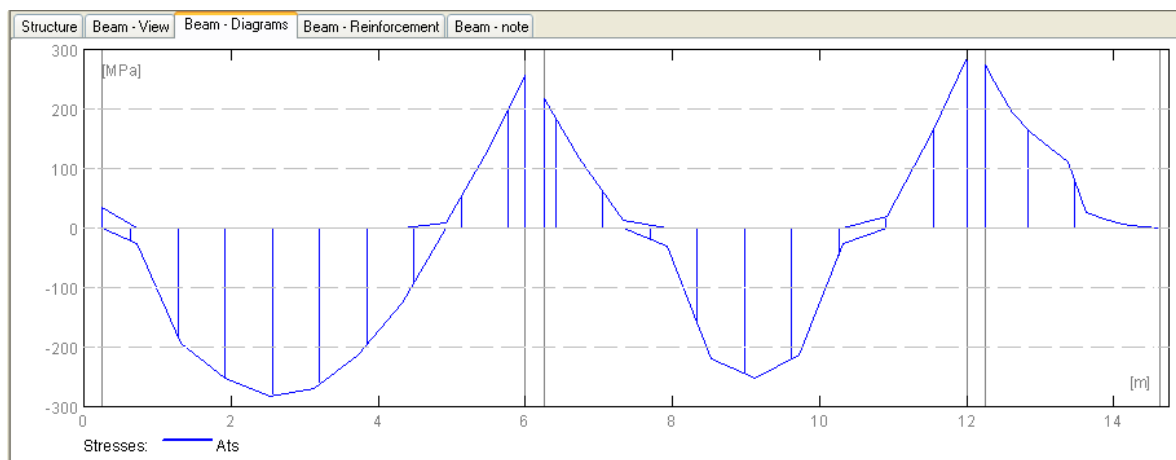


Figura C.4.7 - Diagrama de tensões de tracção na armadura (calculado para **11 pontos** no elemento)

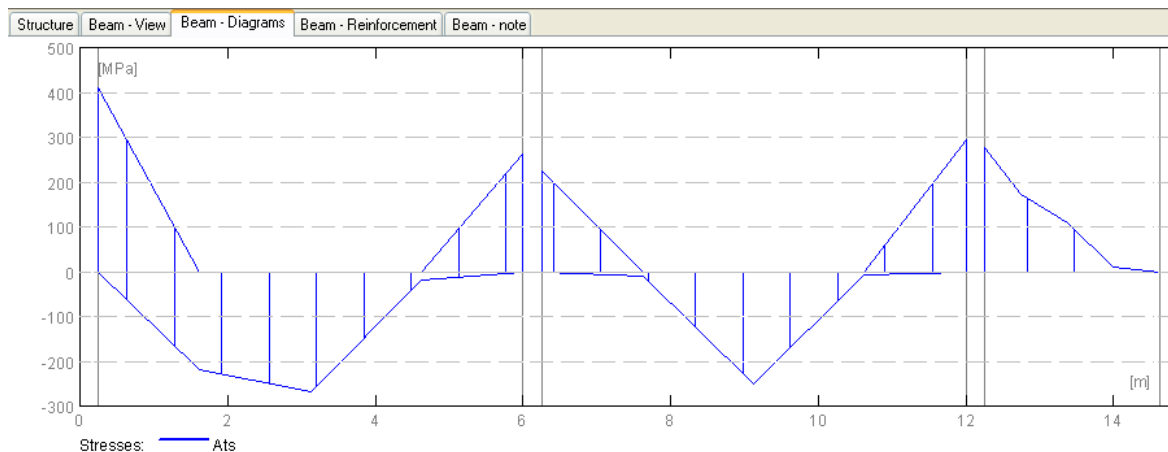


Figura C.4.8 - Diagrama de tensões de tracção na armadura (calculado para **5 pontos** no elemento)

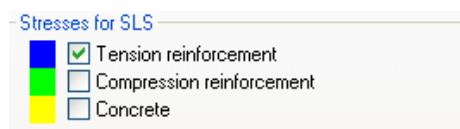


Figura C.4.9 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente às tensões de tracção na armadura ao longo do pórtico

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,425(m)	X = 0,725(m)	X = 1,025(m)	X = 1,325(m)	X = 1,625(m)
Ats (MPa)	28,52	254,02	-281,53	28,52	4,94	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,00	0,00	-26,95	-204,47	-193,82	-220,15

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,425(m)	X = 6,725(m)	X = 7,025(m)	X = 7,325(m)	X = 7,625(m)
Ats (MPa)	216,31	285,93	-251,78	216,31	177,63	118,38	70,50	12,71	0,00
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-10,56

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,500(m)	X = 12,625(m)	X = 12,750(m)	X = 12,875(m)
Ats (MPa)	273,88	0,00	160,66	273,88	245,81	219,26	194,22	173,53	160,66
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura C.4.10 - Valores das tensões de tracção na armadura em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **21 pontos** no elemento)

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,725(m)	X = 1,325(m)	X = 1,925(m)	X = 2,525(m)	X = 3,125(m)	Active span
A <sub>ts</sub> (MPa)	35,75	255,49	-281,53	35,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<< P1
				0,00	-26,95	-193,82	-251,28	-281,53	-269,11	

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,725(m)	X = 7,325(m)	X = 7,925(m)	X = 8,525(m)	X = 9,125(m)	Active span
A <sub>ts</sub> (MPa)	217,78	287,75	-251,78	217,78	118,38	12,71	0,00	0,00	0,00	<< P2
				0,00	0,00	0,00	-30,78	-220,53	-251,78	

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,625(m)	X = 12,875(m)	X = 13,125(m)	X = 13,375(m)	Active span
A <sub>ts</sub> (MPa)	274,64	0,00	160,66	274,64	245,81	194,22	160,66	135,13	109,92	<< P3
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura C.4.11 - Valores das tensões de tracção na armadura em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **11 pontos** no elemento)

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 1,625(m)	X = 3,125(m)	X = 4,625(m)	X = 6,000(m)		Active span
A <sub>ts</sub> (MPa)	411,10	262,74	-269,11	411,10	0,00	0,00	0,00	262,74		<< P1
				0,00	-220,15	-269,11	-20,02	0,00		

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 7,625(m)	X = 9,125(m)	X = 10,625(m)	X = 12,000(m)		Active span
A <sub>ts</sub> (MPa)	223,61	294,18	-251,78	223,61	0,00	0,00	0,00	294,18		<< P2
				0,00	-10,56	-251,78	-5,86	0,00		

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,750(m)	X = 13,375(m)	X = 14,000(m)	X = 14,625(m)		Active span
A <sub>ts</sub> (MPa)	276,92	0,00	109,92	276,92	173,53	109,92	9,99	-0,00		<< P3
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		

Figura C.4.12 - Valores das tensões de tracção na armadura em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **5 pontos** no elemento)

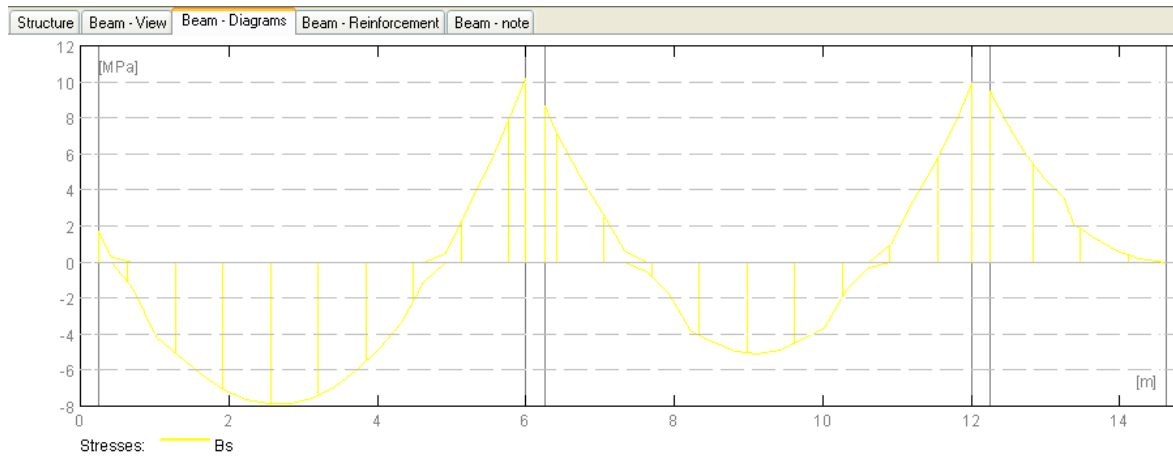


Figura C.4.13 - Diagrama de tensões de compressão no betão (calculado para **21 pontos** no elemento)

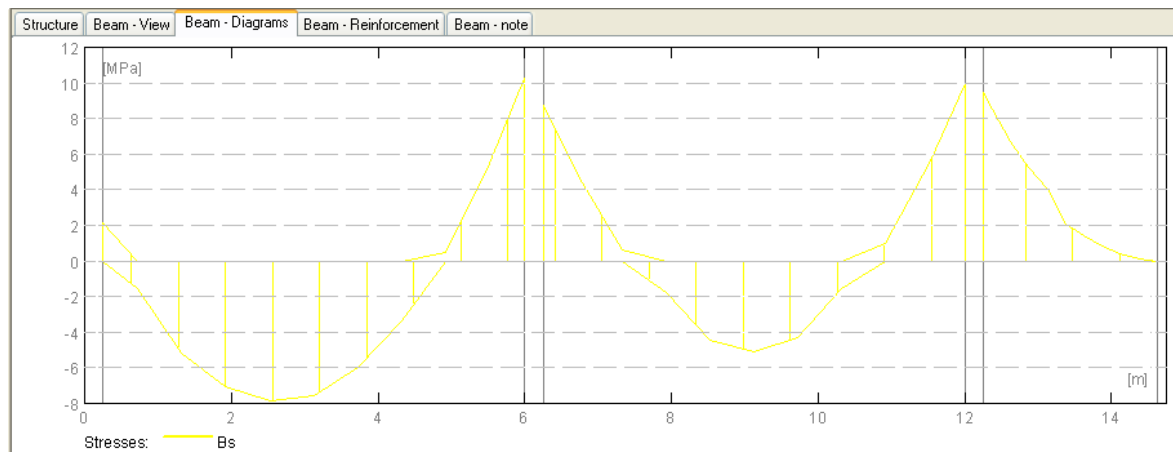


Figura C.4.14 - Diagrama de tensões de compressão no betão (calculado para **11 pontos** no elemento)

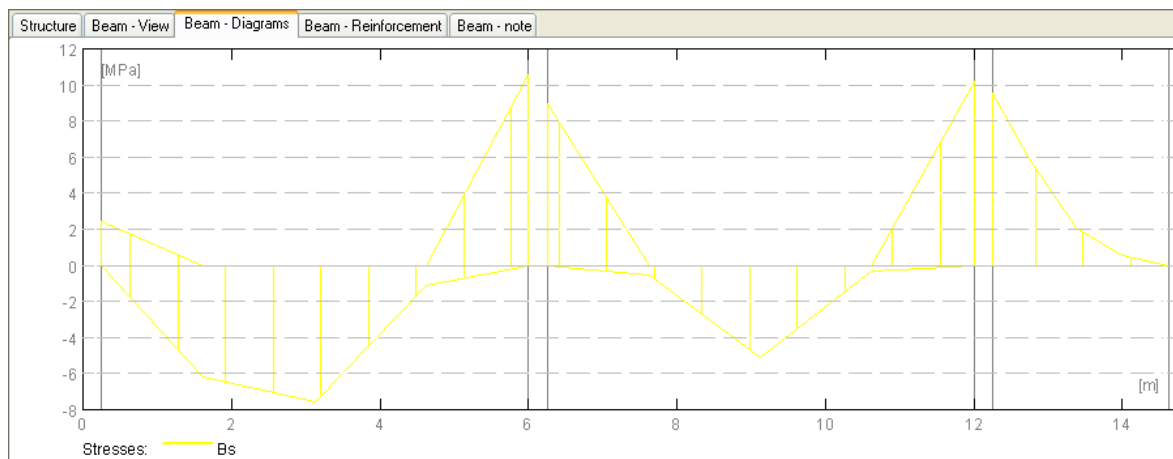


Figura C.4.15 - Diagrama de tensões de compressão no betão (calculado para **5 pontos** no elemento)

Stresses for SLS

- Tension reinforcement
- Compression reinforcement
- Concrete

Figura C.4.16 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente às tensões de compressão no betão ao longo do pórtico

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,425(m)	X = 0,725(m)	X = 1,025(m)	X = 1,325(m)	X = 1,625(m)	Active span
Bs (MPa)	1,69	10,17	-7,89	1,69	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	P1
				0,00	0,00	-1,57	-4,18	-5,14	-6,17	

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,425(m)	X = 6,725(m)	X = 7,025(m)	X = 7,325(m)	X = 7,625(m)	Active span
Bs (MPa)	8,66	9,88	-5,12	8,66	7,12	4,74	2,70	0,64	0,00	P2
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,56	

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,500(m)	X = 12,625(m)	X = 12,750(m)	X = 12,875(m)	Active span
Bs (MPa)	9,47	0,00	5,27	9,47	8,49	7,58	6,71	5,93	5,27	P3
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura C.4.17 - Valores das tensões de compressão no betão em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **21 pontos** no elemento)

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,725(m)	X = 1,325(m)	X = 1,925(m)	X = 2,525(m)	X = 3,125(m)	Active span
Bs (MPa)	2,12	10,23	-7,89	2,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	P1
				0,00	-1,57	-5,14	-7,04	-7,89	-7,54	

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,725(m)	X = 7,325(m)	X = 7,925(m)	X = 8,525(m)	X = 9,125(m)	Active span
Bs (MPa)	8,72	9,94	-5,12	8,72	4,74	0,64	0,00	0,00	0,00	P2
				0,00	0,00	0,00	-1,74	-4,48	-5,12	

Results										
ULS SLS ALS Reinforcement Deflection Simple cases										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,625(m)	X = 12,875(m)	X = 13,125(m)	X = 13,375(m)	Active span
Bs (MPa)	9,49	0,00	5,27	9,49	8,49	6,71	5,27	4,05	2,07	P3
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura C.4.18 - Valores das tensões de compressão no betão em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **11 pontos** no elemento)

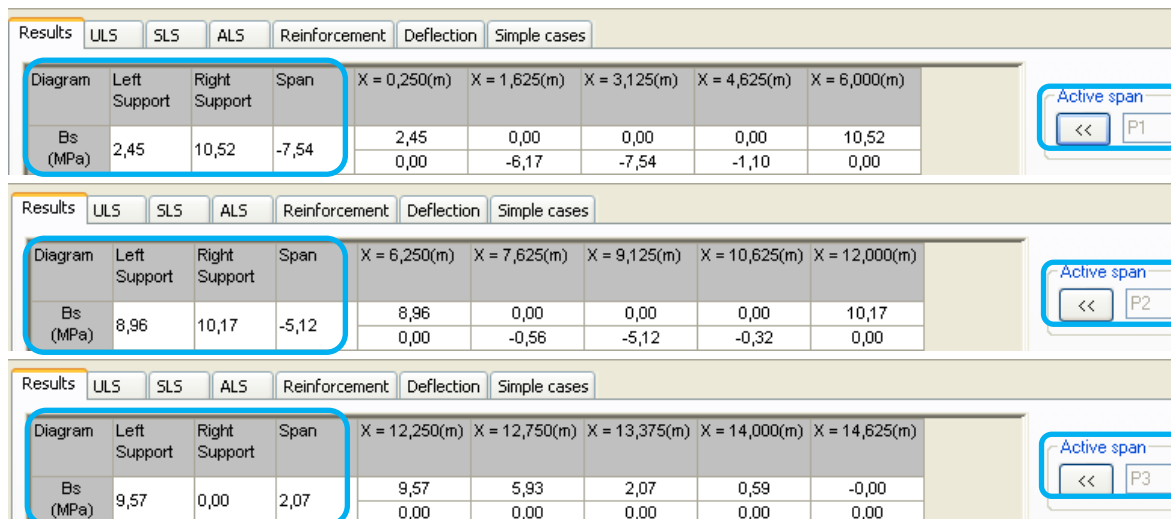


Figura C.4.19 - Valores das tensões de compressão no betão em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **5 pontos** no elemento)

## ▪ FENDILHAÇÃO

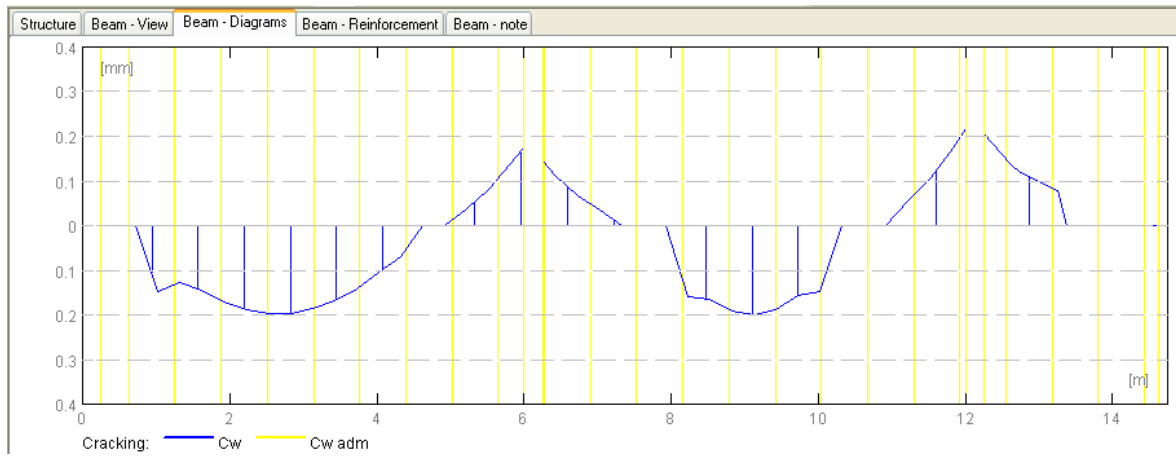


Figura C.4.20 - Diagramas da fendilhação obtida e admissível (calculado para **21 pontos** no elemento)

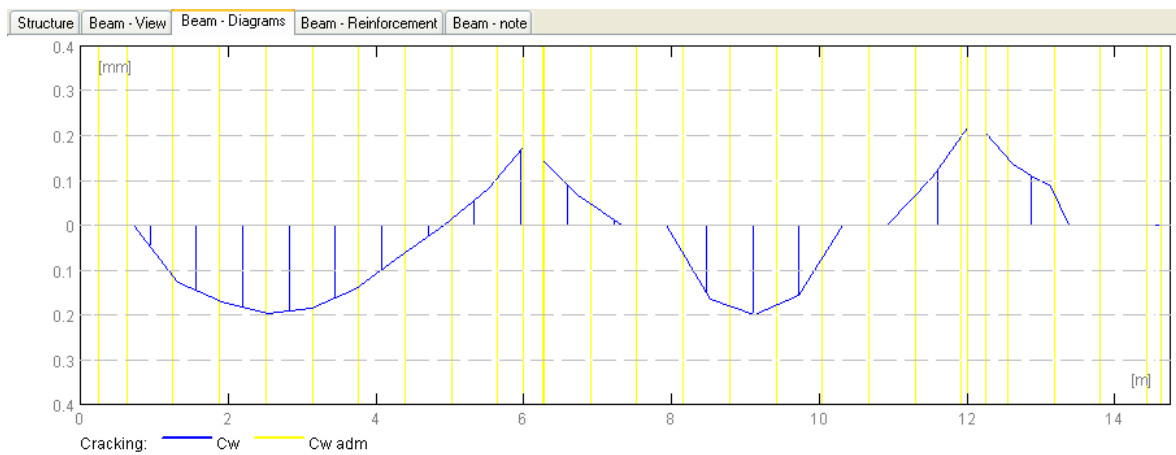


Figura C.4.21 - Diagramas da fendilhação obtida e admissível (calculado para **11 pontos** no elemento)



Figura C.4.22 - Diagramas da fendilhação obtida e admissível (calculado para **5 pontos** no elemento)

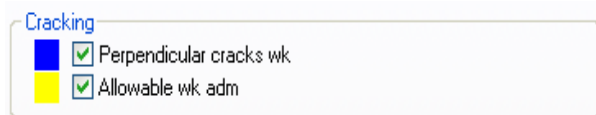


Figura C.4.23 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente à fendilhação perpendicular e admissível ao longo do pórtico

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,425(m)	X = 0,725(m)	X = 1,025(m)	X = 1,325(m)	X = 1,625(m)
Cw (mm)	0,000	0,173	0,197	0,000	0,000	0,000	0,147	0,127	0,146
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,425(m)	X = 6,725(m)	X = 7,025(m)	X = 7,325(m)	X = 7,625(m)
Cw (mm)	0,144	0,217	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,500(m)	X = 12,625(m)	X = 12,750(m)	X = 12,875(m)
Cw (mm)	0,206	0,000	0,000	0,000	0,206	0,182	0,158	0,136	0,119
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400

Figura C.4.24 - Valores da fendilhação em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **21 pontos** no elemento)

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,725(m)	X = 1,325(m)	X = 1,925(m)	X = 2,525(m)	X = 3,125(m)	
Cw (mm)	0,000	0,175	0,197	0,000	0,000	0,127	0,172	0,197	0,187	
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,725(m)	X = 7,325(m)	X = 7,925(m)	X = 8,525(m)	X = 9,125(m)	
Cw (mm)	0,145	0,218	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,165	0,200	
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,625(m)	X = 12,875(m)	X = 13,125(m)	X = 13,375(m)	
Cw (mm)	0,207	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,182	0,136	0,109	0,087	0,000	

Figura C.4.25 - Valores da fendilhação em cada tramo e nas seções críticas consideradas (calculado para **11 pontos** no elemento)

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 1,625(m)	X = 3,125(m)	X = 4,625(m)	X = 6,000(m)		
Cw (mm)	0,000	0,180	0,187	0,000	0,146	0,187	0,000	0,000		
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400		

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 7,625(m)	X = 9,125(m)	X = 10,625(m)	X = 12,000(m)		
Cw (mm)	0,150	0,224	0,200	0,000	0,000	0,200	0,000	0,000		
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,000	0,400	0,400	0,224		

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,750(m)	X = 13,375(m)	X = 14,000(m)	X = 14,625(m)		
Cw (mm)	0,209	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Cw adm (mm)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,209	0,119	0,000	0,000		

Figura C.4.26 - Valores da fendilhação em cada tramo e nas seções críticas consideradas (calculado para **5 pontos** no elemento)

## ▪ DEFORMAÇÃO

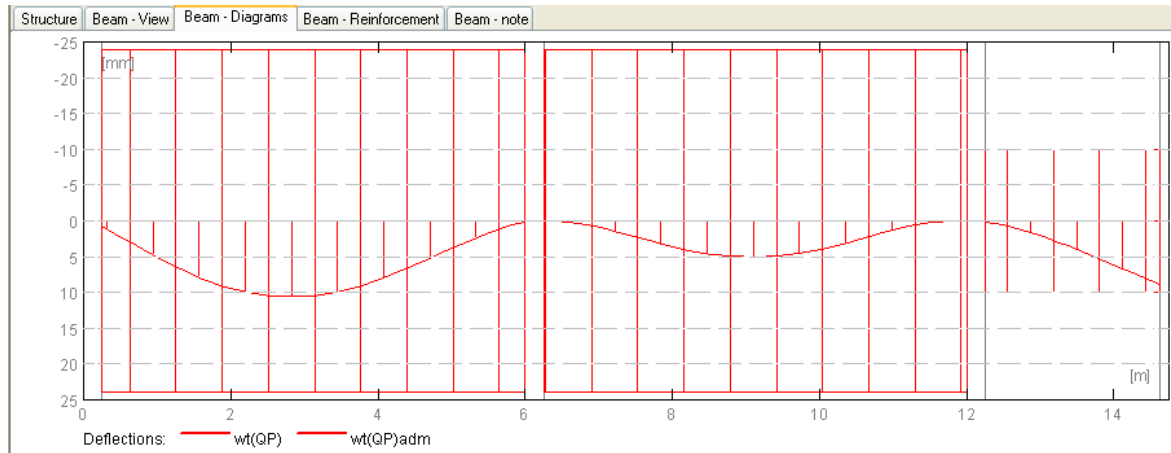


Figura C.4.27 - Diagramas da deformação obtida e admissível (calculado para **21 pontos** no elemento)

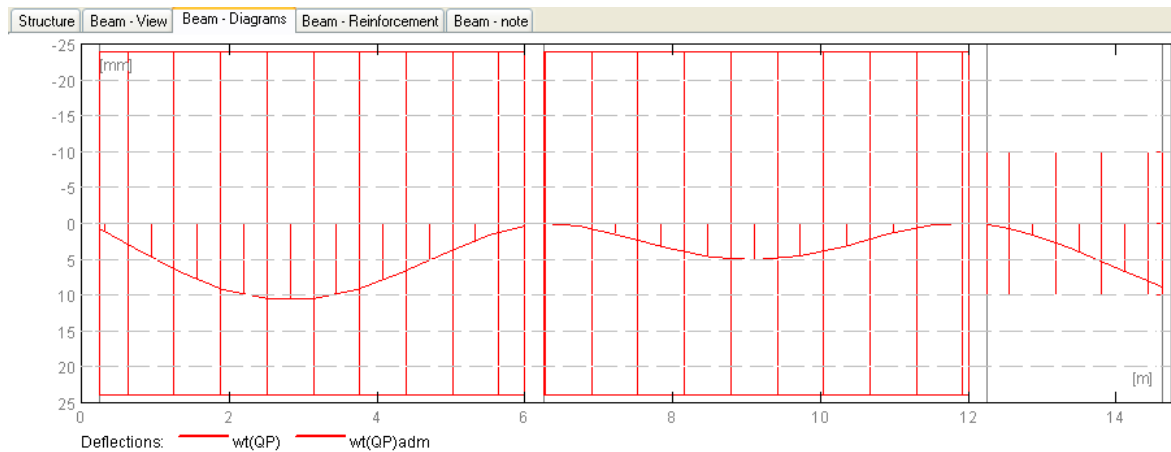


Figura C.4.28 - Diagramas da deformação obtida e admissível (calculado para **11 pontos** no elemento)

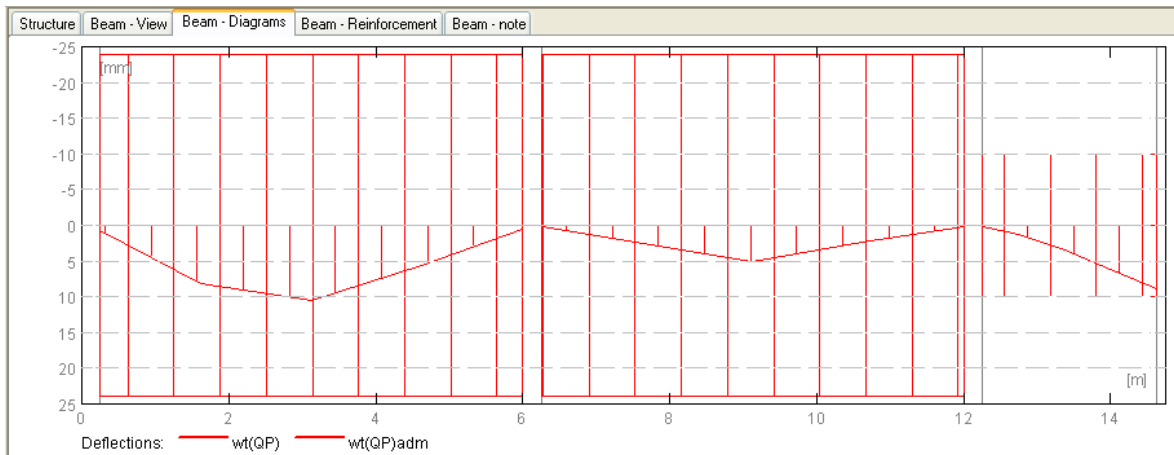


Figura C.4.29 - Diagramas da deformação obtida e admissível (calculado para **5 pontos** no elemento)

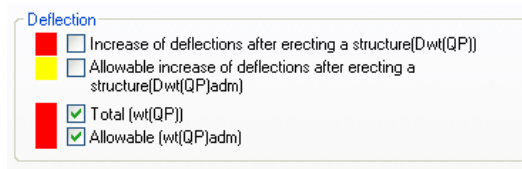


Figura C.4.30 - Legenda dos diagramas visualizados nas figuras anteriores correspondente à deformação total e admissível

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,425(m)	X = 0,725(m)	X = 1,025(m)	X = 1,325(m)	X = 1,625(m)
wt(QP) (mm)	0,728	0,264	10,593	0,728	1,746	3,506	5,194	6,738	8,076
wt(QP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,425(m)	X = 6,725(m)	X = 7,025(m)	X = 7,325(m)	X = 7,625(m)
wt(QP) (mm)	0,000	0,000	5,070	0,000	0,000	0,299	0,944	1,748	2,603
wt(QP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000

Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,500(m)	X = 12,625(m)	X = 12,750(m)	X = 12,875(m)
wt(QP) (mm)	0,144	8,929	6,147	0,144	0,348	0,607	0,914	1,264	1,651
wt(QP)adm	-10,000	-10,000	-10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000

Figura C.4.31 - Valores da flecha em cada tramo e nas seções críticas consideradas (calculado para **21 pontos** no elemento)

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 0,725(m)	X = 1,325(m)	X = 1,925(m)	X = 2,525(m)	X = 3,125(m)	
wt(GP) (mm)	0,730	0,340	10,437	0,730	3,506	6,738	9,161	10,437	10,426	
wt(GP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 6,725(m)	X = 7,325(m)	X = 7,925(m)	X = 8,525(m)	X = 9,125(m)	
wt(GP) (mm)	0,062	0,026	5,070	0,062	0,299	1,748	3,419	4,656	5,070	
wt(GP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,375(m)	X = 12,625(m)	X = 12,875(m)	X = 13,125(m)	X = 13,375(m)	
wt(GP) (mm)	0,174	8,930	5,599	0,174	0,348	0,914	1,651	2,521	3,487	
wt(GP)adm	-10,000	-10,000	-10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	

Figura C.4.32 - Valores da flecha em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **11 pontos** no elemento)

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 0,250(m)	X = 1,625(m)	X = 3,125(m)	X = 4,625(m)	X = 6,000(m)		
wt(GP) (mm)	0,673	0,470	10,426	0,673	8,076	10,426	5,635	0,470		
wt(GP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000		

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 6,250(m)	X = 7,625(m)	X = 9,125(m)	X = 10,625(m)	X = 12,000(m)		
wt(GP) (mm)	0,217	0,198	5,070	0,217	2,603	5,070	2,375	0,198		
wt(GP)adm	-24,000	-24,000	-24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000		

Results										
ULS										
Diagram	Left Support	Right Support	Span	X = 12,250(m)	X = 12,750(m)	X = 13,375(m)	X = 14,000(m)	X = 14,625(m)		
wt(GP) (mm)	0,253	8,932	6,149	0,253	1,264	3,488	6,149	8,932		
wt(GP)adm	-10,000	-10,000	-10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000		

Figura C.4.33 - Valores da flecha em cada tramo e nas secções críticas consideradas (calculado para **5 pontos** no elemento)

## C.5 – XD-Conserv

### ▪ ANÁLISE DO ESTADO DE CADA SECÇÃO

Tabela C.5.1 – Análise do estado das secções em estudo, bem como os valores do eixo neutro, área homogeneizada, centro de gravidade, inércia e momento estático de acordo com o seu estado

Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Armadura Longitudinal	Asl <sub>sup</sub>	2O20	2O20	5O20	5O20	2O20	4O20	4O20	2O20
	Área (cm <sup>2</sup> )	6,28	6,28	15,70	15,70	6,28	12,56	12,56	6,28
	Asl <sub>inf</sub>	2O16	5O16	2O16	2O16	3O16	2O16	2O16	2O16
	Área (cm <sup>2</sup> )	4,02	10,05	4,02	4,02	6,03	4,02	4,02	4,02
Estado NÃO FENDILHADO	x <sub>im</sub> (m)	<b>0,281</b>	<b>0,284</b>	<b>0,301</b>	<b>0,301</b>	<b>0,274</b>	<b>0,295</b>	<b>0,295</b>	<b>0,295</b>
	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	0,154	0,164	0,170	0,170	0,158	0,165	0,165	0,165
	z <sub>G</sub> (m)	0,281	0,284	0,301	0,301	0,274	0,295	0,295	0,295
	I <sub>im</sub> (m <sup>4</sup> )	0,00439	0,00493	0,00513	0,00513	0,00458	0,00490	0,00490	0,00490
Estado FENDILHADO	x <sub>cr</sub> (m)	-	<b>0,184</b>	<b>0,227</b>	<b>0,227</b>	<b>0,147</b>	<b>0,209</b>	<b>0,209</b>	-
	A <sub>hom</sub> (m <sup>2</sup> )	-	0,074	0,091	0,091	0,058	0,081	0,081	-
	z <sub>G'</sub> (m)	-	0,184	0,227	0,227	0,147	0,209	0,209	-
	I <sub>cr</sub> (m <sup>4</sup> )	-	0,00259	0,00339	0,00339	0,00176	0,00292	0,00293	-
M <sub>CC</sub> (kN.m)	-26,58	127,18	-172,23	-146,58	69,00	-156,57	-150,53	0,00	
M <sub>CQP</sub> (kN.m)	<b>-23,09</b>	<b>110,50</b>	<b>-149,65</b>	<b>-127,36</b>	<b>59,95</b>	<b>-136,03</b>	<b>-130,79</b>	<b>0,00</b>	
M <sub>cr</sub> (kN.m)	<b>39,87</b>	<b>41,87</b>	<b>43,82</b>	<b>43,82</b>	<b>40,17</b>	<b>42,51</b>	<b>42,51</b>	<b>39,87</b>	
Estado da Secção	<b>N.F.</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	

▪ TENSÕES

Encontram-se nas seguintes tabelas os valores das tensões e extensões do betão e das armaduras para as combinações de **acções características** e **acções quase permanentes**.

Tabela C.5.2 – Valores das tensões e extensões no betão e na armadura para a combinação de acções quase permanentes em cada secção em estudo

Tensões e Extensões (Combinação de acções Quase Permanentes)										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Tensões	Betão	$\sigma_c$ (MPa)	-1,48	-7,85	-10,05	-8,55	-5,00	-9,72	-9,34	0,00
		$\sigma_{ct}$ (MPa)	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Armadura	$\sigma_s$ (MPa)	20,93	241,96	216,57	184,31	214,38	243,05	233,69	0,00
		$\sigma_{sc}$ (MPa)	-21,96	-106,55	-143,75	-122,34	-63,19	-136,38	-131,12	0,00
Extensões	Betão	$\epsilon_c$ (m/m)	-0,00013	-0,00068	-0,00087	-0,00074	-0,00043	-0,00084	-0,00081	0,00000
		$\epsilon_{ct}$ (m/m)	0,00012	0,00136	0,00124	0,00105	0,00119	0,00138	0,00132	0,00000
	Armadura	$\epsilon_s$ (m/m)	0,00011	0,00121	0,00108	0,00092	0,00107	0,00122	0,00117	0,00000
		$\epsilon_{sc}$ (m/m)	-0,00011	-0,00053	-0,00072	-0,00061	-0,00032	-0,00068	-0,00066	0,00000

Tabela C.5.3 – Valores das tensões e extensões no betão e na armadura para a combinação de acções características em cada secção em estudo

Tensões e Extensões (Combinação de acções Características)										
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola		
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H	
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.	
Tensões	Betão	$\sigma_c$ (MPa)	-1,70	-9,03	-11,56	-9,84	-5,76	-11,18	-10,75	0,00
		$\sigma_{ct}$ (MPa)	1,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Armadura	$\sigma_s$ (MPa)	24,10	278,48	249,25	212,13	246,75	279,75	268,96	0,00
		$\sigma_{sc}$ (MPa)	-25,28	-122,63	-165,44	-140,80	-72,73	-156,97	-150,92	0,00
Extensões	Betão	$\epsilon_c$ (m/m)	-0,00015	-0,00078	-0,00100	-0,00085	-0,00050	-0,00097	-0,00093	0,00000
		$\epsilon_{ct}$ (m/m)	0,00014	0,00156	0,00142	0,00121	0,00137	0,00159	0,00152	0,00000
	Armadura	$\epsilon_s$ (m/m)	0,00012	0,00139	0,00125	0,00106	0,00123	0,00140	0,00135	0,00000
		$\epsilon_{sc}$ (m/m)	-0,00013	-0,00061	-0,00083	-0,00070	-0,00036	-0,00079	-0,00076	0,00000

Na tabela seguinte estão representadas as verificações das tensões do betão de modo a cumprir a sua fluência e as tensões das armaduras, cumprindo estas a deformabilidade elástica nas situações de serviço.

Tabela C.5.4 – Verificações dos valores das tensões e extensões do betão e da armadura para as combinações apropriadas

Tensões e Extensões									
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.
<b>Limitação da fluência do betão</b> ( <i>Combinação de acções Quase Permanentes</i> )									
Tensões	$\sigma_{c,CQP}$ (MPa)	-1,48	-7,85	<b>-10,05</b>	-8,55	-5,00	<b>-9,72</b>	<b>-9,34</b>	0,00
	$0,45 f_{ck}$ (Mpa)	13,50							
Extensões	$\epsilon_c$ (m/m)	-0,00013	-0,00068	<b>-0,00087</b>	-0,00074	-0,00043	<b>-0,00084</b>	<b>-0,00081</b>	0,00000
	$\epsilon_{cuk}$ (m/m)	0,0035							
<b>Deformações elásticas da armadura</b> ( <i>Combinação de acções Características</i> )									
Tensões	$\sigma_{s,CC}$ (MPa)	24,10	<b>278,48</b>	249,25	212,13	246,75	<b>279,75</b>	<b>268,96</b>	0,00
	$0,8 f_{syk}$ (Mpa)	400,00							
Extensões	$\epsilon_s$ (m/m)	0,00012	<b>0,00139</b>	0,00125	0,00106	0,00123	<b>0,00140</b>	<b>0,00135</b>	0,00000
	$\epsilon_{suk}$ (m/m)	0,0025							

▪ FENDILHAÇÃO

Nas tabelas seguintes, encontram-se os cálculos respectivos para o controlo e verificação da fendilhação nas secções que se encontram fendilhadas.

Tabela C.5.5 – Valores das extensões médias relativas entre a armadura e o betão nas secções em estudo

Extensão média relativa entre a armadura e o betão - ( $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ )									
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.
$K_t$		0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Superior	$\sigma_{s,cr}$ (Mpa)	-	-	216,56	184,31	-	243,05	233,68	-
	$h_{c,ef}$ (m)	-	-	0,100	0,100	-	0,100	0,100	-
	$A_{c,eff}$ (m <sup>2</sup> )	-	-	0,0250	0,0250	-	0,0250	0,0250	-
	$\rho_{p,eff}$	-	-	0,063	0,063	-	0,050	0,050	-
	<b>(<math>\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}</math>) (m/m)</b>	-	-	<b>0,00089</b>	<b>0,00073</b>	-	<b>0,00100</b>	<b>0,00095</b>	-
Inferior	$\sigma_{s,cr}$ (Mpa)	-	241,95	-	-	214,38	-	-	-
	$h_{c,ef}$ (m)	-	0,100	-	-	0,100	-	-	-
	$A_{c,eff}$ (m <sup>2</sup> )	-	0,0250	-	-	0,0250	-	-	-
	$\rho_{p,eff}$	-	0,040	-	-	0,024	-	-	-
	<b>(<math>\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}</math>) (m/m)</b>	-	<b>0,00097</b>	-	-	<b>0,00731</b>	-	-	-

Tabela C.5.6 – Valores das distâncias máximas entre fendas nas secções em estudo

Distancia Máxima entre fendas - $S_{r,máx}$									
Tramo		Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Estado da Secção		N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.
$K_1$		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Superior	$S_1$ (m)	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\epsilon_1$ (m/m)	-	-	0,00124	0,00105	-	0,00138	0,00132	-
	$\epsilon_2$ (m/m)	-	-	0,00000	0,00000	-	0,00000	0,00000	-
	K2	-	-	0,50	0,50	-	0,50	0,50	-
	<b><math>S_{r,máx}</math> (m)</b>	-	-	<b>0,156</b>	<b>0,156</b>	-	<b>0,170</b>	<b>0,170</b>	-
Inferior	$S_1$ (m)	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\epsilon_1$ (m/m)	-	0,00136	-	-	0,00119	-	-	-
	$\epsilon_2$ (m/m)	-	0,00000	-	-	0,00000	-	-	-
	K2	-	0,50	-	-	0,50	-	-	-
	<b><math>S_{r,máx}</math> (m)</b>	-	<b>0,176</b>	-	-	<b>0,222</b>	-	-	-

Tabela C.5.7 – Valores da largura de fenda nas secções em estudo bem como a sua verificação de acordo com a classe de exposição

Tramo	Extremidade			Intermédio			Consola	
Secção	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	H-H
Estado da Secção	N.F.	F	F	F	F	F	F	N.F.
<b>Extensão média relativa entre a armadura e o betão (<math>\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}</math>)</b>								
$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), \text{Sup (m/m)}$	-	-	0,00089	0,00073	-	0,00100	0,00095	-
$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), \text{Inf (m/m)}$	-	0,00097	-	-	0,00731	-	-	-
<b>Distancia Máxima entre fendas - <math>S_{r,máx}</math></b>								
$S_{r,máx} \text{ Sup (m)}$	-	-	0,156	0,156	-	0,170	0,170	-
$S_{r,máx} \text{ Inf (m)}$	-	0,176	-	-	0,222	-	-	-
<b>Largura de Fendas - <math>W_k</math> (Combinação Quase Permanente)</b>								
$W_{k,Sup} \text{ (mm)}$	-	-	0,139	0,114	-	0,170	0,162	-
$W_{k,Inf} \text{ (mm)}$	-	0,170	-	-	0,162	-	-	-
Classe de Exposição	<b>XC1</b>							
Valor Limite $W_{k,máx} \text{ (mm)}$	<b>0,40</b>							

▪ DEFORMAÇÃO

Tabela C.5.8 – Valores das curvaturas referentes à flexão, retracção e total para os estados não fendilhado e fendilhado referente às secções em estudo

Curvaturas a Longo Prazo - $1/r_{cr}$ (Combinação Quase Permanente)					
Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
Estado <b>NÃO FENDILHADO</b>	Flexão	$1/r_{fl,lm}$ (1/m)	0,00195	0,00114	0,00232
	Retracção	$1/r_{cs,lm}$ (1/m)	-0,000067	-0,000005	-0,000164
	<b>TOTAL</b>	$1/r_{tot,lm}$ (1/m)	<b>0,00188</b>	<b>0,00113</b>	<b>0,00215</b>
Estado <b>FENDILHADO</b>	Flexão	$1/r_{fl,cr}$ (1/m)	0,00371	0,00295	0,00388
	Retracção	$1/r_{cs,cr}$ (1/m)	-0,000431	-0,000414	-0,000510
	<b>TOTAL</b>	$1/r_{tot,cr}$ (1/m)	<b>0,00328</b>	<b>0,00254</b>	<b>0,00337</b>

Tabela C.5.9 – Parâmetros para os coeficientes de repartição referente às secções em estudo

Tramo	Extremidade	Intermédio	Consola
Secção	B-B	E-E	H-H
Estado da Secção	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>
$M_{cr}$ (kN.m)	41,87	40,17	42,51
$M_{CC}$ (kN.m)	127,18	69,00	-150,53
$\beta$	0,50		

Tabela C.5.10 - Curvaturas referentes à flexão, retracção e total para o estado intermédio atendendo ao coeficiente de repartição calculado pelo programa e analiticamente

Curvaturas a Longo Prazo - $1/r_{cr}$ (Combinação Quase Permanente)					
Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
ESTADO INTERMÉDIO		$\zeta$ (programa)	<b>0,840</b>	<b>0,710</b>	<b>0,860</b>
	Flexão	$1/r_{fl,int}$ (1/m)	0,00343	0,00242	0,00366
	Retracção	$1/r_{cs,int}$ (1/m)	-0,00037	-0,00029	-0,00046
	<b>TOTAL</b>	$1/r_{tot,int}$ (1/m)	<b>0,00305</b>	<b>0,00213</b>	<b>0,00320</b>
ESTADO INTERMÉDIO		$\zeta$ (analiticamente)	<b>0,945</b>	<b>0,830</b>	<b>0,960</b>
	Flexão	$1/r_{fl,int}$ (1/m)	0,00361	0,00265	0,00382
	Retracção	$1/r_{cs,int}$ (1/m)	-0,00041	-0,00034	-0,00050
	<b>TOTAL</b>	$1/r_{tot,int}$ (1/m)	<b>0,00320</b>	<b>0,00230</b>	<b>0,00332</b>

◦ Método Simplificado

Tabela C.5.11 - Valores dos coeficientes de carregamento  $K$  (valores iguais ao método analítico)

Tramo	Extremidade	Intermédio	Consola
Secção	B-B	E-E	H-H
Estado da Secção	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>
$M_{CQP}$ Secção (kN.m)	110,50	59,95	-130,79
$M_{CQP}$ Apoio Esq. (kN.m)	-37,37	-144,20	-144,92
$M_{CQP}$ Apoio Direito (kN.m)	-169,42	-153,25	0,00
Vão (m)	6,00	6,00	2,50
<b><math>K</math></b>	<b>0,124</b>	<b>0,156</b>	<b>0,250</b>

Tabela C.5.12 - Valores das flechas a longo prazo nas secções em estudo nos estados não fendilhado, fendilhado e intermédio com a respectiva verificação

Flecha a Longo Prazo - $\delta_{\infty}$ (Combinação de acções Quase Permanente)					
Tramo		Extremidade	Intermédio	Consola	
Secção		B-B	E-E	H-H	
Estado da Secção		<b>F</b>	<b>F</b>	<b>N.F.</b>	
Estado <b>NÃO FENDILHADO</b>	Flexão	$\delta_{fl,lm}$ (mm)	8,65	6,36	3,62
	Retração	$\delta_{cs,lm}$ (mm)	-0,30	-0,03	-0,26
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,lm}$ (mm)	<b>8,35</b>	<b>6,33</b>	<b>3,36</b>
Estado <b>FENDILHADO</b>	Flexão	$\delta_{fl,cr}$ (mm)	16,48	16,55	6,06
	Retração	$\delta_{cs,cr}$ (mm)	-1,92	-2,32	-0,80
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,cr}$ (mm)	<b>14,57</b>	<b>14,23</b>	<b>5,27</b>
Estado <b>INTERMÉDIO (Programa)</b>	Flexão	$\delta_{fl,int}$ (mm)	<b>15,20</b>	<b>13,59</b>	<b>5,72</b>
	Retração	$\delta_{cs,int}$ (mm)	<b>-1,70</b>	<b>-1,66</b>	<b>-0,72</b>
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,int}$ (mm)	<b>13,51</b>	<b>11,94</b>	<b>5,00</b>
Estado <b>INTERMÉDIO (Analiticamente)</b>	Flexão	$\delta_{fl,int}$ (mm)	<b>16,05</b>	<b>14,82</b>	<b>5,97</b>
	Retração	$\delta_{cs,int}$ (mm)	<b>-1,83</b>	<b>-1,93</b>	<b>-0,78</b>
	<b>TOTAL</b>	$\delta_{tot,int}$ (mm)	<b>14,23</b>	<b>12,89</b>	<b>5,19</b>
Verificação		$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	<b>24,00</b>	<b>24,00</b>	<b>10,00</b>

