

Estudo da metodologia de verificação indireta de abertura de fendas

Ana Patrícia Jorge Santos

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador

Professor Doutor José Manuel Matos Noronha da Câmara

Júri

Presidente: Professor Doutor José Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro

Orientador: Professor Doutor José Manuel Matos Noronha da Câmara

Vogal: Professor Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio

Outubro de 2016

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Fernando Santos e Maria José Jorge, por me terem proporcionado a oportunidade de estudar na faculdade e curso que ambicionava e por me terem sempre apoiado ao longo destes anos em qualquer situação. O que sou hoje deve-se muito a eles!

Em segundo lugar, quero agradecer ao meu orientador, professor José Câmara, pela orientação e preocupação que demonstrou sempre ao longo do trabalho realizado e pelos conhecimentos transmitidos.

Seguidamente quero agradecer a todos os meus amigos de turma Leonor Caetano, Mariana Antunes, Filipe Reis, Raquel Mariano, Filipe Vale, João Rafael que me acompanharam desde o início da faculdade e me motivaram a continuar este percurso.

Aos amigos mais próximos que fui fazendo ao longo destes anos no IST, Catarina Oliveira, Pedro Melo, Cristiano Pamplona, Fábio Costa e José Mateus pelo apoio, amizade e entreaajuda que sempre demonstraram.

Quero agradecer, em particular, à Beatriz Loura pela ajuda e motivação neste caminho, pela ajuda indispensável nas piores alturas e pelas noites passadas no Espaço 24 a desenvolver a dissertação.

Ao meu irmão, João Santos, e todos os amigos de Leiria, em especial ao Mário Domingues, ao Samuel e Solange Domingues e ao João Silva, quero agrader o facto de terem permanecido ao meu lado ao longo destes anos a estudar em Lisboa.

Quero, também, agradecer em especial à Ana Filipa Carvalho e Ricardo Sousa pela ajuda prestada na revisão da dissertação e pelos conselhos transmitidos com vista ao aperfeiçoamento deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer ao meu namorado, Tiago Pereira, não só pela ajuda na execução da dissertação, mas também pelo seu companheirismo e dedicação desde sempre.

Resumo

Desde o início da utilização do betão armado na Engenharia Civil que o fenómeno da abertura de fendas está presente. No caminho para a contemporaneidade, esta problemática foi ganhando maior relevância, não só por motivos estéticos, mas também devido a maiores exigências de qualidade e durabilidade das próprias estruturas.

A fendilhação pode ser uma consequência do carregamento aplicado, como também poderá resultar de deformações impostas impedidas na estrutura por ação de variações de temperatura e retração do betão.

Na atualidade, a norma europeia (Eurocódigo 2) propõe um cálculo mais rigoroso, através de expressões numéricas, e outro mais expedito, com recurso a quadros onde se indicam diâmetros e espaçamentos máximos dos varões, dependentes da tensão de serviço no aço, que garantem, por si só, a verificação da segurança do ponto de vista do controlo das aberturas de fendas.

O objetivo desta dissertação incide, essencialmente, na análise e verificação do controlo indireto da fendilhação e perceber em que medida os quadros propostos são adequados, considerando a diferença entre situações em que os efeitos das cargas ou das deformações impostas são preponderantes. Com este objetivo, são realizadas diversas análises de cálculo das aberturas de fendas pelo cálculo direto para aferir os dados do controlo indireto para o caso das deformações impostas e cargas aplicadas, fazendo-se, ainda, a diferenciação entre flexão e tração. Vários estudos paramétricos são desenvolvidos.

Com as análises realizadas, concluiu-se que a principal variável para a escolha de uma determinada pormenorização é, como se poderia esperar, a tensão de serviço no aço. No entanto, na aplicação das disposições de cálculo indireto, concluiu-se, em geral, que os quadros no EC2 estão balizados para as situações de deformação imposta, ou seja, para percentagens de armadura moderadas, sendo conservativos para situações de maiores percentagens de armadura, casos correntes em situações de preponderância da ação de cargas. Esta conclusão é mais significativa para o caso da flexão simples comparativamente à tração pura.

Ao longo desta dissertação são também referenciadas algumas particularidades relativas à fendilhação em estruturas de betão armado que muitas vezes não são levadas em conta.

Palavras-chave: Fendilhação; Abertura de fendas; Cargas aplicadas; Deformações impostas; Eurocódigo 2; Área de armadura mínima.

Abstract

The phenomenon of crack is present ever since reinforced concrete was first used in civil engineering. Nowadays, this issue was gaining relevance, not only for aesthetic reasons, but also because of structures' own safety and durability.

Cracking may either be a consequence of the applied loads or of the imposed deformations in the structure due to temperature variations and shrinkage of the concrete components.

Nowadays, European Standard (Eurocode 2 – “Design of concrete structures”) is used, which allows for a more accurate calculation using numerical expressions and another one, less demanding, with the use of tables, in which maximum bar diameters and maximum bar spacing to adopt are indicated, depending on the working stress present on steel.

The aim of this thesis focuses mainly on the analysis and verification of indirect control of cracking and realizes in which situations these data should be applied. In this way, multiple analysis scenarios are conducted to understand the accuracy of the indirect control data for the case of imposed deformations and applied loads, making the differentiation between bending stress and traction.

By analyzing the frames of the indirect control of cracking it is concluded that “the only variable of interest for choosing a particular detail is the working stress on the steel”. Through the analysis in this thesis, it is clear that this statement is not entirely correct. The results in the tables of indirect control were done for a reinforcement area similar to the minimum one. This fact is more evident for structures subjected to bending stress than to axial forces.

A reference to some peculiarities is also presented, related to cracking in reinforced concrete elements that are often not taken into account and that result in functional problems in service.

Keywords: Cracking; Crack width; Applied loads; Imposed deformations; Eurocode 2; Minimum reinforcement area

Índice

Capítulo 1.	Introdução.....	1
Capítulo 2.	Comportamento do betão fendilhado.....	5
2.1.	Tipos de fendilhação.....	6
2.1.1.	Ações diretas.....	7
2.1.1.1.	Tração pura – tirante.....	7
2.1.1.2.	Flexão simples.....	8
2.1.2.	Ações indiretas.....	9
2.1.2.1.	Retração e fluência.....	10
2.1.2.2.	Variações de temperatura.....	11
2.1.2.3.	Deformação imposta axial e de flexão.....	12
2.1.2.4.	Deformação imposta axial sobreposta à flexão de cargas.....	13
2.1.3.	Armadura mínima.....	14
2.2.	Necessidade de controlar a abertura de fendas.....	14
Capítulo 3.	Métodos de controlo da fendilhação.....	17
3.1.	Cálculo direto da abertura de fendas.....	18
3.2.	Controlo indireto da fendilhação, sem cálculos.....	21
3.3.	Cálculo da armadura mínima.....	23
Capítulo 4.	Avaliação do método indireto do controlo da fendilhação.....	25
4.1.	Introdução.....	25
4.2.	Avaliação da importância das variáveis no cálculo da abertura de fendas.....	26
4.2.1.	Distinção entre vigas e lajes.....	27
4.2.2.	Comparação do efeito do esforço de flexão e tração.....	30
4.2.3.	Relevância da altura da laje.....	31
4.2.4.	Importância da área/percentagem de armadura.....	33
4.2.4.1.	Caso 1.....	34
4.2.4.2.	Caso 2.....	36
4.2.5.	Análise do valor do diâmetro dos varões.....	38
4.3.	Verificação dos quadros do controlo indireto para as deformações impostas.....	40
4.4.	Verificação dos quadros do controlo indireto para a flexão de cargas.....	42

4.4.1.	Diâmetros máximos dos varões.....	43
4.4.2.	Espaçamento máximo entre varões	44
4.5.	Verificação dos quadros do controlo indireto para a tração de cargas	45
4.5.1.	Diâmetro máximo dos varões	45
4.5.2.	Espaçamento máximo entre varões	47
4.6.	Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3.....	49
4.6.1.	Diâmetro máximo dos varões	50
4.6.2.	Espaçamento máximo entre varões	51
4.7.	Elaboração de gráficos alternativos.....	52
4.7.1.	Gráficos <i>Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões</i>	53
4.7.2.	Gráficos <i>Diâmetro dos varões vs Percentagem efetiva de armadura</i>	59
Capítulo 5.	Conclusões	61
Referências	64

Índice de Figuras

Figura 1 – Modelo esquemático da transmissão de tensões, após abertura de uma fenda.....	5
Figura 2 – Modelo esquemático das tensões que se geram, no aço e no betão, com a abertura progressiva de fendas, numa peça de betão armado. [8].....	6
Figura 3 – Comportamento de um tirante de betão armado, sujeito a tração pura.	8
Figura 4 – Comportamento de um elemento de betão armado, sujeito à flexão.	9
Figura 5 – Diagramas representativos das diferentes parcelas do efeito da temperatura.....	11
Figura 6 – Comportamento de um tirante de betão armado, sujeito a deformação imposta axial.....	12
Figura 7 – Comportamento de um elemento de betão armado, sujeito a deformação imposta axial com flexão de cargas.	13
Figura 8 – Modelos esquemáticos com a área efetiva de betão tracionado envolvente da armadura. [8].....	20
Figura 9 – Exemplo de uma viga de secção 0,3m x0,6m, sujeito à flexão simples.	27
Figura 10 – Exemplo de viga com secção em T, em betão armado, sujeita à flexão simples.....	29
Figura 11 – Propagação das fendas numa viga sem armadura lateral de reforço na alma.	29
Figura 12 – Propagação das fendas numa viga com armadura lateral de reforço na alma.	30
Figura 13 – Diagramas de extensões da flexão simples e tração pura.	30
Figura 14 – Variação da abertura de fendas em função da altura da laje.	33
Figura 15 – Variação da abertura de fendas em função da percentagem de armadura.	36
Figura 16 – Variação da abertura de fendas em função do diâmetro do varão.....	40
Figura 17 – Diâmetro máximo dos varões, em função da tensão no aço. [9].....	49
Figura 18 – Espaçamento máximo entre varões, em função da tensão no aço. [9].....	49
Figura 19 – Comparação dos dados do EC2 da parte 3 com a parte 1, para o diâmetro máximo dos varões.....	50
Figura 20 – Correlação entre diâmetro e espaçamento dos varões, para uma largura de fenda de 0,3 mm.	53
Figura 21 – Determinação gráfica da gama de pormenorizações possíveis, para uma tensão de serviço de 320 MPa e uma área de armadura de 15 cm ² /m.	54
Figura 22 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,4 mm, com os diâmetros máximos do controlo indireto do EC2, para a flexão.....	57
Figura 23 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,3 mm, com os diâmetros máximos do controlo indireto do EC2, para a flexão.....	57
Figura 24 – Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,2 mm, com os diâmetros máximos do controlo indireto do EC2, para a flexão.....	57

Figura 25 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,4 mm, com os diâmetros máximos do controlo indireto do EC2, para a tração.	58
Figura 26 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,3 mm, com os diâmetros máximos do controlo indireto do EC2, para a tração.	58
Figura 27 – Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,2 mm, com os diâmetros máximos do controlo indireto do EC2, para a tração.	58
Figura 28 - Correlação entre diâmetro do varão e área de armadura, para uma largura de fenda de 0,3 mm.	59

Índice de quadros

Quadro 1 – Diâmetros de varão máximos, $\varnothing s *$, para controlar a fendilhação. [8]	22
Quadro 2 – Espaçamentos máximos entre varões, s , para controlar a fendilhação. [8].....	22
Quadro 3 – Considerações gerais para o controlo indireto.	22
Quadro 4 – Características do betão adotado.....	25
Quadro 5 – Características da classe de aço adotada.....	26
Quadro 6 – Parâmetros para o cálculo da abertura de fendas.....	26
Quadro 7 – Parâmetros auxiliares para o cálculo da abertura de fendas.....	27
Quadro 8 – Abertura de fendas para as diferentes tensões de serviço.....	28
Quadro 9 – Diâmetros máximos, para uma largura de fendas máxima de 0,3 mm.	28
Quadro 10 – Aberturas de fendas para a tração e flexão, com igual pormenorização.	31
Quadro 11 – Pormenorizações adotadas para diferentes níveis de tensão.	32
Quadro 12 – Aberturas de fendas para as diferentes alturas de laje e tensões de serviço.....	32
Quadro 13 - Pormenorizações adotadas e respetivas percentagens de armadura.....	34
Quadro 14 – Larguras de fendas para diferentes percentagens de armadura e diferentes tensões em serviço.	35
Quadro 15 – Pormenorizações e aberturas de fendas obtidas para cada tensão.	37
Quadro 16 – Pormenorizações adotadas para as diferentes tensões de serviço.....	38
Quadro 17 – Larguras de fendas para diferentes diâmetros de varão com igual área de armadura....	39
Quadro 18 – Áreas de armaduras adotadas para os dois tipos de esforços críticos.....	41
Quadro 19 – Cálculo da abertura de fendas para o esforço de flexão.	41
Quadro 20 – Cálculo da abertura de fendas para o esforço de tração.	42
Quadro 21 – Pormenorizações e áreas de armadura adotadas.....	43
Quadro 22 – Abertura de fendas numa laje de 25 cm com 20 cm ² /m de armadura, sujeita à flexão. ..	44
Quadro 23 – Pormenorizações e áreas de armadura adotadas.....	44
Quadro 24 – Largura de fendas numa laje de 25 cm com 20 cm ² /m de armadura, sujeita à flexão.....	45
Quadro 25 – Pormenorizações adotadas com base nos diâmetros máximos das tabelas – Caso 1. ...	46
Quadro 26 – Pormenorizações adotadas com base nos diâmetros máximos modificados – Caso 2. .	46
Quadro 27 – Cálculo da abertura de fendas - Caso 1.	47
Quadro 28 – Cálculo da aberturas de fendas - Caso 2.	47
Quadro 29 – Pormenorizações adotadas com base nos espaçamentos máximos do controlo indireto.	48
Quadro 30 – Cálculo da abertura de fendas.....	48
Quadro 31 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,3 mm.	51
Quadro 32 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,2 mm.	51
Quadro 33 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,1 mm.	51
Quadro 34 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,3 mm.	52
Quadro 35 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,2 mm.	52
Quadro 36 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,1 mm.	52
Quadro 37 – Largura de fendas com base nos resultados do gráfico.	55

Quadro 38 – Largura de fendas com base nos quadros do EC2.	55
Quadro 39 – Cálculo da abertura de fendas para os pares diâmetro/espacamento dos varões dos gráficos.....	59

Lista de símbolos

Letras maiúsculas latinas

- A_{ct} área de betão tracionado
 $A_{s, min}$ área de armadura mínima
 A_s área da secção de uma armadura para betão armado
EC Eurocódigo
 E_{cm} módulo de elasticidade secante do betão
 E_s valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço de uma armadura para betão armado

Letras minúsculas latinas

- b largura total de uma secção transversal
 c recobrimento do betão
 d altura útil de uma secção transversal
 f_{cd} valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
 f_{ck} valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade
 f_{ctm} valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples
 h altura total de uma secção transversal
 $h_{c, eff}$ altura efetiva de betão tracionado
 K coeficiente; fator
 l comprimento
 s espaçamento entre varões
 $s_{r, máx}$ espaçamento máximo entre fendas
 w_k abertura de fendas
 x altura do eixo neutro
 z braço do binário das forças interiores

Letras minúsculas gregas

- α ângulo; relação
 σ_c tensão de compressão do betão
 \emptyset diâmetro de um varão ou de uma bainha de pré-esforço
 ρ percentagem de armadura
 $\rho_{c, eff}$ percentagem efetiva de armadura
 ϵ_{sm} extensão média do aço
 ϵ_{cm} extensão média do betão
 ϵ_{srm} diferença entre extensões médias do aço e betão

Capítulo 1.

Introdução

Desde o início da utilização do betão armado em estruturas que a problemática da fendilhação está presente. A abertura de fendas em estruturas de betão é um fenómeno praticamente inevitável, pelo que, ao longo dos anos, tem-se assistido a um esforço para compreender melhor o fenómeno e, conseqüentemente, controlar os seus efeitos. Alguns aspetos deste mecanismo exigem, ainda nos dias de hoje, uma contínua investigação.

A fendilhação é um fenómeno que deve ser razoavelmente monitorizado no sentido de evitar a ocorrência de efeitos secundários indesejados. Além dos aspetos estéticos, o aparecimento de fendas coloca em causa a estanqueidade da estrutura – aspeto muito importante no caso de estruturas especiais, como silos e reservatórios – e pode, se não limitada a sua abertura, contribuir para a corrosão das armaduras, quando expostas a agentes agressivos do ambiente envolvente.

A máxima abertura de fendas ($w_{m\acute{a}x}$) configura-se, pois, como uma grandeza importante no projeto estrutural, devendo ser razoavelmente limitada para que os seus efeitos não sejam prejudiciais, no que respeita ao comportamento em serviço e à sua durabilidade. Os valores máximos para este parâmetro devem estar compreendidos entre os 0,2 e 0,4 mm, para estruturas correntes de betão armado. Haverá, por outro lado, necessidade de adotar valores mais baixos para esta grandeza quando se estiver perante situações com exigências mais restritivas.

Para que as aberturas de fendas nas estruturas sejam controladas torna-se necessário considerar diversos parâmetros, os quais serão referidos e analisados ao longo desta dissertação.

Sendo o desenvolvimento da fendilhação um fenómeno complexo e dependente de diversas variáveis, por vezes difíceis de quantificar, torna-se praticamente impossível de prever, com exatidão, o esquema de fendilhação que se vai verificar e mesmo a avaliação das máximas aberturas de fendas a esperar. Ao longo dos anos de clarificação do comportamento no betão estrutural, o assunto da fendilhação tem sido muito estudado. No entanto, neste trabalho, limitou-se a análise às indicações regulamentares atuais.

Atualmente, dispõe-se da Norma Portuguesa do Eurocódigo 2 – “Projeto de estruturas de betão”, mais concretamente [NP-EN 1992-1-1: 2010, 7] para regras gerais e para edifícios e [EN 1992-3: 2006, 7] para o caso particular da fendilhação em silos e reservatórios. [8] [9]

O controlo proposto na parte 1-1 do EC 2 comporta duas vertentes distintas: a análise **direta** através de equações matemáticas baseadas no comportamento físico do fenómeno e dos parâmetros mais significativos ou **indiretamente** através da consulta dos quadros. As referidas tabelas fornecem, a partir do nível de tensão de serviço no aço, o diâmetro dos varões ou os espaçamentos máximos

entre varões e deverão permitir assegurar, por si só, que o elemento estrutural em causa verifica os critérios de controlo de abertura de fendas necessário.

A presente dissertação tem como objetivos a verificação e clarificação da metodologia do controlo indireto da fendilhação (página 139 do EC2 – parte 1). Pretende-se, resumidamente, aferir acerca da razoabilidade dos valores propostos nos quadros do Eurocódigo para o cálculo indireto, fazendo uso das expressões da abertura de fendas e, por outro lado, compreender a importância dos diversos parâmetros envolvidos no cálculo direto, fazendo uma análise detalhada de cada variável.

Realizou-se, também, a devida distinção entre elementos estruturais submetidos a cargas e deformações impostas, sujeitos a esforços de flexão e também de tração.

No sentido de aprofundar o conteúdo exposto, proceder-se-á à verificação dos quadros da parte 3 do EC2 referentes ao controlo da fendilhação em silos e reservatórios, onde a ação relevante é a tração pura devida a deformações impostas.

Na parte final da dissertação são propostas alterações à metodologia atual do controlo indireto da fendilhação, justificando-as tendo presente que se pretende uma metodologia simples e fiável mas que cubra as diferentes situações que se colocam na prática.

A dissertação está, no essencial, organizada em cinco capítulos fundamentais. Em primeiro lugar, neste capítulo de introdução pretende-se enquadrar o tema em análise, os objetivos a cumprir e de que forma serão implementados. O conteúdo dos outros Capítulos resume-se seguidamente:

O capítulo 2 – “Comportamento do betão fendilhado” aborda de uma forma breve a explicação do fenómeno da fendilhação. Como se formam as fendas e quais os fenómenos que se desencadeiam com a abertura de uma fenda e durante o processo de carregamento são tópicos descritos neste capítulo. Enumeram-se, ainda, os tipos de fendilhação e apresentam-se, com detalhe, aqueles cuja relevância se destaca no desenvolvimento desta dissertação. Procede-se, ainda, à distinção entre ações diretas e indiretas e de que forma os esforços de tração e flexão se desenvolvem para cada tipo de ação. Neste contexto, é definido o conceito de área de armadura mínima.

No terceiro capítulo – “Métodos do controlo da fendilhação”, faz-se uma breve referência aos diferentes métodos de controlo do fenómeno que foram surgindo ao longo do tempo, efetuando-se uma apresentação detalhada dos métodos usados atualmente (Eurocódigo 2), visto que serão estes os métodos analisados nesta dissertação. É, também, analisada a equação de avaliação da área de armadura mínima e quais as suas diferenças para o esforço de tração e flexão.

No quarto capítulo – “Avaliação do método indireto”, são apresentados os exemplos realizados ao longo da dissertação, subdividindo-se esta secção em oito subcapítulos diferentes. Inicia-se este capítulo com a análise dos diversos parâmetros necessários ao cálculo da abertura de fendas. Posteriormente, é feita uma análise dos quadros do controlo indireto em relação às deformações impostas e a cargas aplicadas para a flexão e para a tração, comparando-se este último com os dados presentes na parte 3 do EC 2. No final deste capítulo apresentam-se gráficos alternativos para a avaliação da abertura de fendas, comparando-se os resultados obtidos com os dados dos quadros do controlo indireto.

No último capítulo – “Conclusões”, apresenta-se, sinteticamente, todas as ilações obtidas através das análises realizadas no capítulo anterior, bem como algumas considerações que, por vezes, não são tomadas em conta e que têm relevância a nível do controlo da fendilhação das estruturas.

Capítulo 2.

Comportamento do betão fendilhado

Existem quatro tipos de critérios para verificar o comportamento em serviço das estruturas de betão armado: limitação de tensões, limitação da abertura de fendas, limitação da deformação e limitação das vibrações. Estas quatro condições acabam necessariamente por estar relacionadas entre si.

Os Estados Limites de Serviço podem condicionar o dimensionamento das estruturas, com maior ou menor influência, consoante o grau de exigência necessário e as ações a que a estrutura está sujeita. Na presente dissertação, será apenas analisada a limitação da abertura de fendas.

Este processo de abertura de fendas ocorre quando o betão atinge a máxima resistência à tração, sem que o aço entre em cedência. Devido à heterogeneidade própria do betão, a fenda apresenta uma geometria irregular, verificando-se a presença de fendas nas secções mais solicitadas e/ou nas zonas singulares onde o betão apresenta maior fragilidade.

Quando ocorre a formação de uma fenda, as tensões de tração existentes no betão transmitem-se para as armaduras, assistindo-se, deste modo, a um acréscimo de tensão no aço. A análise da secção sem considerar o betão à tração designa-se por estado II – estado fendilhado.

Na região adjacente à formação da fenda ocorre uma transferência de tensões do aço para o betão, de forma gradual, por efeito da aderência existente entre estes dois materiais, conforme ilustra a Figura 1, sendo esta situação possível através da utilização de varões com as condições de aderência necessárias.

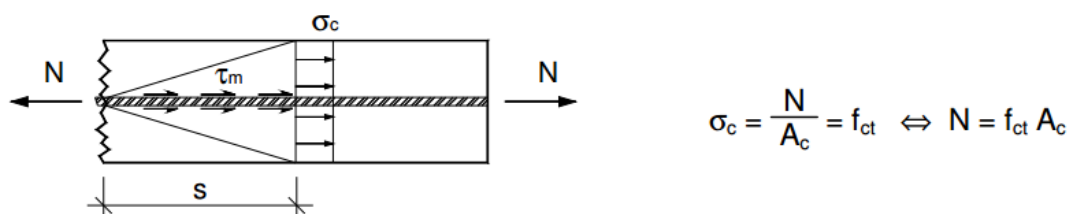


Figura 1 – Modelo esquemático da transmissão de tensões, após abertura de uma fenda.

Quando noutra qualquer secção, afastada dessa zona de transição, as tensões de tração atingem novamente a sua resistência, pode formar-se uma nova fenda. A formação de fendas irá continuar até que, entre as fendas que se formaram, não se consiga atingir a tensão de resistência do betão à tração.

Na figura seguinte é possível observar, de uma forma esquemática, a distribuição das tensões, tanto no aço como no betão, numa peça de betão armado fendilhada.

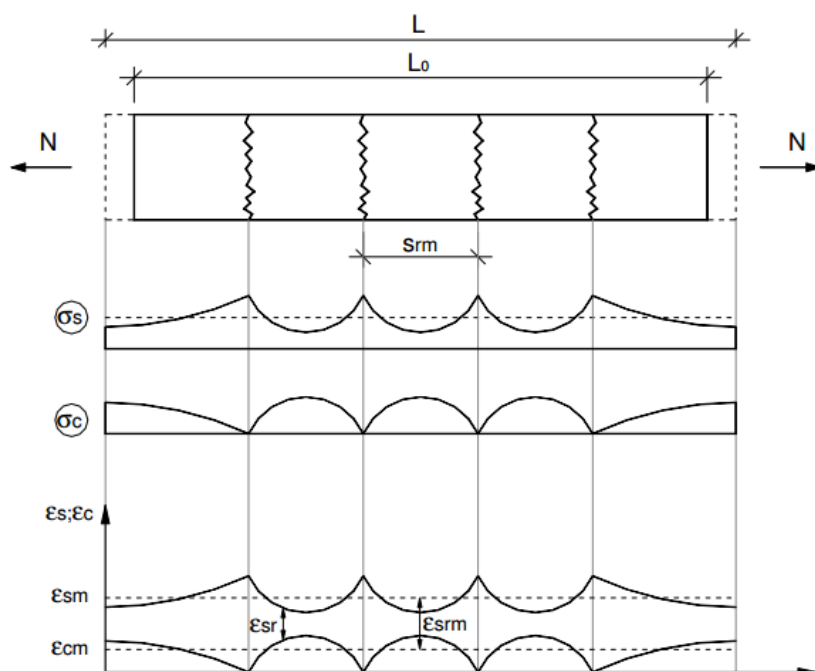


Figura 2 – Modelo esquemático das tensões que se geram, no aço e no betão, com a abertura progressiva de fendas, numa peça de betão armado. [8]

No sentido de promover a limitação da abertura de fendas, é necessário adotar desde logo para as condições de serviço, pelo menos, uma área de armadura mínima, para garantir a não cedência do aço na situação de uma deformação imposta. Por outro lado, consoante o limite máximo admissível da largura da fenda que se pretende estipular, pode haver a necessidade de se adotar uma quantidade de armadura superior.

Neste capítulo, são enumerados os diversos tipos de fendilhação, em particular fazendo-se distinção entre os efeitos das ações diretas e indiretas. Para a ação direta, será analisado o comportamento de um elemento de betão armado sujeito à tração e outro à flexão, realçando-se as diferenças entre estes dois casos. No caso das ações indiretas, serão feitas duas análises: uma com um elemento sujeito a uma deformação imposta axial isolada e outra com o elemento sujeito a deformação imposta axial com sobreposição de esforço de flexão devido ao efeito de cargas aplicadas.

Far-se-á, também, uma breve referência às deformações impostas de maior interesse (retração e variações de temperatura) e, por fim, será explicitado o significado físico do conceito de área de armadura mínima.

2.1. Tipos de fendilhação

O fenómeno da fendilhação comporta, essencialmente, duas origens diferentes: antes e após o endurecimento do betão. A fendilhação, caso ocorra antes do endurecimento do betão, não será abordada nesta dissertação, uma vez que, nesta fase, a existência de armaduras no betão não tem qualquer contribuição para o controlo da fendilhação, uma vez que a aderência entre os dois componentes do betão armado ainda não se estabeleceu. Pelo contrário, poderá contribuir para a

formação de fendas, quando se verifica durante o processo de cura o abaixamento da massa do betão.

Por outro lado, no caso em que a fendilhação se verifica após o endurecimento do betão, o processo pode resultar de múltiplos fatores como a ação de cargas aplicadas (ações diretas), de deformações impostas (ações indiretas) e corrosão das armaduras ou reações expansivas no betão.

Neste caso, faz-se apenas referência aos dois primeiros casos, visto as outras situações não se enquadrarem no tema desta dissertação.

2.1.1. Ações diretas

As ações diretas dizem respeito a cargas aplicadas na estrutura, quer na direção vertical, quer na horizontal. Este tipo de carregamento origina diferentes esforços na estrutura, sendo os esforços de tração e flexão os mais relevantes para a fendilhação em condições de serviço.

A orientação das fendas, provocadas pela ação de cargas, é inicialmente perpendicular à orientação das tensões principais de tração, sendo que após se verificar o início da fendilhação, a orientação segundo a qual ocorrerá a propagação das fendas dependerá também da pormenorização de armaduras adotada.

Para este tipo de ações, é sempre necessário que, em relação à segurança à rotura, a estrutura tenha uma determinada capacidade resistente, o que já não acontece no caso das ações indiretas, onde apenas é necessário que a estrutura tenha capacidade de deformação suficiente para absorver essa deformação imposta.

O controlo da fendilhação provocada por este tipo de ação é um objetivo importante do dimensionamento de estruturas. Poder-se-á dizer que, nos casos correntes, um dimensionamento adequado aos Estados Limites Últimos e a adoção de disposições de armadura usuais, resulta em bons resultados para aquela verificação aos Estados Limites de Serviço.

2.1.1.1. Tração pura – tirante

Com o intuito de melhor compreender a ação de um esforço de tração num elemento de betão armado, torna-se importante caracterizar o comportamento de um tirante sujeito a tração pura. Por observação, facilmente se comprova que o comportamento do tirante comporta três fases distintas quando sujeito a uma ação crescente até à rotura.

Inicialmente, verifica-se um estado não fendilhado – Estado I. Neste estado, o tirante tem um comportamento elástico linear, não apresentando qualquer fendilhação. Este facto ocorre em virtude das tensões presentes na peça serem inferiores à resistência de tração do betão ao longo da peça. Ainda neste estado, a estrutura pode ser carregada e descarregada sem ficar com qualquer dano permanente. Quando as tensões ultrapassam a resistência local do betão nalguma zona, forma-se a primeira fenda na estrutura, iniciando-se o comportamento em estado fendilhado. É possível, então, considerar que este estado se subdivide em duas fases.

A primeira corresponde à formação progressiva de novas fendas, aumentando a deformação e diminuindo significativamente a rigidez da peça. Para que este processo ocorra, é necessário que a

área de amadura seja suficiente para garantir que as tensões, primeiramente instaladas no betão, possam ser transferidas para a armadura, aquando da formação de uma fenda.

A partir de um determinado valor de N , a formação de fendas praticamente termina, havendo apenas lugar a um aumento das suas aberturas. Este estado denomina-se de fendilhação estabilizada, pelo que o tirante exhibe, novamente, um comportamento com uma certa uniformidade.

Por fim, com o aumento do esforço N , a estrutura atinge a capacidade máxima, através da cedência do aço.

As fases anteriormente descritas encontram-se apresentadas esquematicamente na figura que se segue (Figura 3).

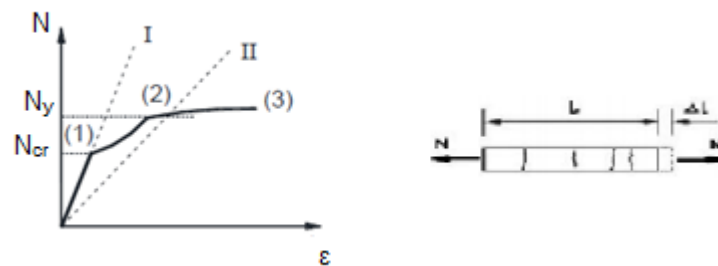


Figura 3 – Comportamento de um tirante de betão armado, sujeito a tração pura.

A fase compreendida entre os pontos 1 e 2, visíveis na figura anterior, não corresponde exatamente a uma curva, sendo, no processo de formação de fendas, constituída por patamares que correspondem à formação de cada nova fenda. Geralmente, para simplificação dos diagramas correspondentes à tração/deformação, utiliza-se uma curva que se vai aproximando gradualmente do estado fendilhado (Estado II), em particular aquando da fendilhação estabilizada.

2.1.1.2. Flexão simples

Um elemento estrutural, sujeito a um momento fletor constante apresenta uma curvatura uniforme e uma rotação entre as secções extremas.

O comportamento é similar à ação da tração pura, sendo que, na fase inicial, a curvatura, variável cinemática associada, tem um comportamento elástico linear, com uma rotação proporcional ao momento fletor (Estado I).

Quando se inicia a fendilhação, atingindo-se o momento M_{cr} , a curvatura passa a ser variável. Nas secções onde se formam as fendas, a distribuição de tensões altera-se e o betão deixa praticamente de contribuir para o comportamento da secção, ocorrendo uma modificação da posição da linha neutra (Estado II) e um aumento da curvatura devido à perda de rigidez.

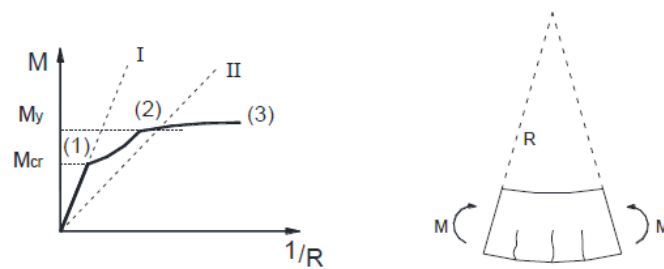


Figura 4 – Comportamento de um elemento de betão armado, sujeito à flexão.

Neste caso, tal como no caso da tração, o número de fendas vai aumentando numa primeira fase e, posteriormente, há a estabilização da fendilhação com o incremento do momento fletor, até que se atinja a cedência do aço. A diferença entre estes esforços (tração pura e flexão simples) é ao nível da zona da secção que se encontra à tração, que no caso da tração pura é cerca de duas vezes superior.

A curva observada entre 1 e 2 também corresponde às duas fases do processo de fendilhação. No entanto, na flexão, o espaçamento verificado entre fendas é menor, uma vez que a zona de transmissão de tensões aço/betão se localiza numa parte mais reduzida da secção, facilitando a transmissão das tensões do aço para o betão.

2.1.2. Ações indiretas

Num passado recente, não era dada grande relevância às ações indiretas, não sendo estas consideradas para o dimensionamento de estruturas, ou sendo-o, eram-no de uma forma inadequada face às suas características. Em particular, não eram convenientemente analisados os seus efeitos em termos do comportamento em serviço gerando, por vezes, comportamentos claramente inaceitáveis.

As deformações impostas constituem uma das principais causas de aberturas de fendas nas estruturas de betão armado correntes. Estas ações originam esforços autoequilibrados, pelo que a fendilhação só ocorre quando se gera algum tipo de hiperestaticidade (impedimentos) quer interiores, quer exteriores. A grande generalidade das estruturas ou elementos estruturais é hiperestática, característica muito favorável na conceção estrutural em geral, sendo, deste modo, muito difícil evitar este tipo de fendilhação. A hiperestatia estrutural permite alguma adaptação no encaminhamento das cargas, sendo que em sistemas contínuos se traduz na capacidade de redistribuição de esforços.

As ações indiretas não contribuem para a rotura da estrutura, excetuando os casos muito particulares, em que os efeitos de 2ª ordem, gerados por estes efeitos, tenham uma relevância significativa. No entanto, estas deformações podem contribuir para o funcionamento deficiente da estrutura em serviço, quer a nível funcional quer estético.

O Eurocódigo 2 menciona que as deformações impostas devem ser somente consideradas nos Estados Limites de Utilização, desde que a estrutura tenha capacidade de deformação plástica suficiente para o comportamento na rotura, ou seja, ductilidade. Verifica-se que, num instante próximo da rotura, uma estrutura com ductilidade suficiente para acomodar estes efeitos, tem um

comportamento muito semelhante a um mecanismo, o que leva a concluir que as deformações impostas não precisam de capacidade resistente para a resposta.

A ductilidade de um elemento é melhorada com recurso a armaduras que possuam ductilidade adequada e, no caso da flexão, com a adoção de estribos bem executados e com espaçamentos adequados para garantir um maior confinamento do betão.

As ações que se analisam neste âmbito são as variações de temperatura, retração do betão e assentamentos diferenciais da estrutura. Estas ações geram esforços na estrutura que são tanto maiores quanto maior for o número de impedimentos ao encurtamento ou expansão da estrutura, mas de qualquer modo sempre limitados, consequência da perda de rigidez estrutural devido à fluência ou fendilhação, como se salienta mais à frente nesta dissertação.

No contexto das análises efetuadas, apenas se fará referência à retração e variações de temperatura.

2.1.2.1. Retração e fluência

A retração e a fluência são propriedades reológicas do betão que se manifestam ao longo do tempo, sendo que devem ser consideradas essencialmente nos Estados Limites de Serviço. No entanto, há que distinguir em termos da resposta estrutural a retração da fluência. Enquanto a retração pode ser considerada como uma ação independente, a fluência só se manifesta como resposta a um estado de tensão instalado, não devendo ser considerada como uma ação, mas sim como uma característica do comportamento do betão que afeta a resposta estrutural para as várias ações ao longo do tempo. Para o comportamento à rotura, estes efeitos necessitam apenas que a estrutura tenha ductilidade e capacidade de rotação suficiente para acomodarem as deformações. Em casos particulares, onde deformações de 2ª ordem possam ser significativas, é necessário ter essa deformação em consideração na verificação da segurança aos Estados Limites Últimos para elementos de betão armado.

A retração e a fluência dependem da humidade do ambiente, das dimensões adotadas no elemento e da composição do betão. A fluência depende, também, da idade do betão no primeiro carregamento e da duração e intensidade dessa mesma carga.

A retração corresponde a uma variação do volume do betão ao longo do seu tempo de vida, gerando numa peça linear de betão armado livre, para além de um encurtamento global da peça, tensões de tração no betão e compressão nas armaduras. Assim que a aderência entre o aço e o betão se desenvolve, a tendência para o encurtamento do betão encontra-se restringida pelas próprias armaduras. Além desta restrição interna, também existem, em geral, restrições externas que contribuem, pelas trações geradas, para que se possam formar fendas ao longo do tempo de vida da estrutura.

A retração é constituída essencialmente por duas componentes: a extensão de retração por secagem e a extensão de retração autogénea. A expressão geral para o cálculo da retração encontra-se discriminada abaixo: [8]

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (1)$$

Em que:

- ε_{cs} extensão total da retração
- ε_{cd} extensão de retração por secagem
- ε_{ca} extensão de retração autogénea

A primeira componente vai evoluindo lentamente, em função do tempo de evaporação da água presente no elemento de betão (cura do betão). A extensão de retração autogénea desenvolve-se durante o endurecimento do betão, sendo que o seu desenvolvimento se dá essencialmente nos primeiros dias após a betonagem. Esta componente deve ser considerada, principalmente, quando se coloca betão novo sobre betão endurecido.

2.1.2.2. Variações de temperatura

A ação da temperatura apresenta variações ao longo da vida útil da estrutura, de forma cíclica. Este efeito tanto pode causar encurtamento como expansão do betão, podendo originar fendilhação devido às restrições da estrutura à deformação livre.

Quando se inicia o dimensionamento de uma estrutura, é necessário ter em conta alguns aspetos relativos a esta problemática. A localização e orientação da estrutura são aspetos que devem ser considerados. Os tipos de revestimento utilizados também deverão ser tidos em conta, pois a sua utilização depende das condições climáticas do local.

A variação de temperatura pode ser dividida em três parcelas diferentes: a parcela de variação uniforme, as parcelas de variação diferencial linear e a parcela de variação não linear (Figura 5).

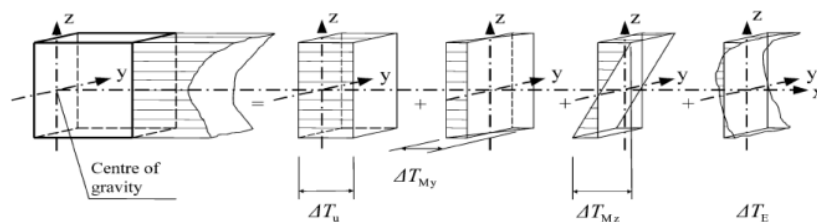


Figura 5 – Diagramas representativos das diferentes parcelas do efeito da temperatura.

Estas parcelas geram, tal como no caso da retração, deformações e, no caso do último diagrama, tensões autoequilibradas. Numa estrutura isostática provocam extensões axiais devido à parcela uniforme e variação da curvatura, devido às parcelas de variação diferencial linear, gerando-se tensão devido à parcela não linear, que poderá ser responsável por alguma fendilhação superficial.

Quando as estruturas são hiperestáticas, as parcelas uniforme e diferencial linear passam a gerar esforços globais, eventualmente responsáveis por fendilhação.

Uma das possibilidades de diminuir o risco de fendilhação desta origem pode passar pela colocação de juntas de dilatação – principalmente em estruturas de grande comprimento – embora seja uma solução com outros inconvenientes relativos à manutenção, uma vez que configura pontos de potencial degradação e, portanto, deficiente funcionamento em serviço.

Outra solução passará pela adoção de um faseamento na betonagem, de forma a minimizar os efeitos diferenciais. No entanto, a colocação de quantidades de armadura, para o controlo efetivo da abertura de fendas para valores considerados aceitáveis é, sem dúvida, a vertente que acaba por ser mais eficiente, apesar do incremento de custo de curto prazo a que está associado.

2.1.2.3. Deformação imposta axial e de flexão

O comportamento de uma estrutura sujeita a uma deformação imposta com efeito axial é diferente do comportamento de uma estrutura sujeita a um esforço de tração, por aplicação de cargas.

Quando ocorre a formação da primeira fenda, num elemento sujeito a uma deformação axial imposta, acontece que o esforço N da deformação apresenta uma redução brusca, mantendo-se a deformação constante.

No caso de um esforço axial devido à aplicação de cargas, sucede exatamente o oposto, pois para a mesma força existe um aumento da extensão. Tal situação acontece porque, no caso do carregamento, é necessário manter o equilíbrio da força aplicada. Quando ocorre a diminuição da rigidez através da fendilhação, há um aumento de deformação.

No caso de deformações impostas, o valor da força depende da rigidez da estrutura, sendo que quanto menor for esta, menor é o valor da força. Aquando da abertura de uma fenda, existe uma perda de rigidez, logo uma conseqüente diminuição do valor do esforço.

Devido a este fenómeno, sempre que ocorre a formação de uma nova fenda, ocorrerá uma diminuição brusca no valor do esforço aplicado, até que se torne estável, tal como no caso das ações diretas, para valores de extensão de aproximadamente 1,0 a 1,5 ‰. Estes aspetos são facilmente observáveis na Figura 6.

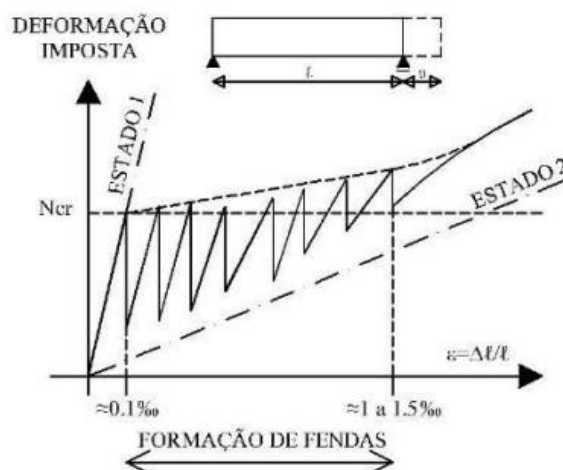


Figura 6 – Comportamento de um tirante de betão armado, sujeito a deformação imposta axial.

Culminando esta sequência de comportamentos, a extensão vai aumentando até atingir a cedência do aço e, posteriormente, a rotura do elemento.

No entanto, estas condições não são atingidas para deformações impostas que, na prática, atingem no máximo valores da ordem dos 0,5 a 0,7 ‰. Por norma, as estruturas apresentam algumas fendas, sem cedência nas armaduras se se tiver pelo menos uma quantidade mínima de armadura.

No caso deste critério de não plastificação não ser cumprido, apenas haveria lugar à formação de uma fenda, seguida da plastificação da armadura e conseqüente risco de formação de uma abertura de grande expressão, caso a estrutura seja hiperestática.

A resposta de um elemento sujeito a uma deformação imposta com efeito de flexão é similar ao comportamento de um elemento sujeito a uma deformação imposta axial, com a diferença da variável de interesse ser a curvatura.

Geralmente, a variação de temperatura diferencial linear e os assentamentos diferenciais na estrutura são as deformações impostas responsáveis por este tipo de efeito, que provocam, em geral, fendilhação de flexão e mais localizada junto aos apoios. O caso dos assentamentos diferenciais pode mesmo originar, por falta de ductilidade, a rotura da estrutura se aqueles forem muito significativos.

Após a formação de uma nova fenda, existe um decréscimo no esforço de flexão, comportamento também observado para o caso da tração. Os decréscimos de momento, devidos à perda de rigidez da estrutura têm, no entanto, menor expressão do que na tração.

2.1.2.4. Deformação imposta axial sobreposta à flexão de cargas

Numa estrutura que esteja sujeita a carregamento aplicado e a uma deformação imposta, os efeitos sobrepõem-se, sendo que a resposta estrutural à ação indireta está condicionada pelo estado de tensão e deformação introduzidos previamente pelas cargas. Neste caso, o incremento de esforços está mais dependente do valor da ação, estando sempre limitada a um valor máximo de N_{cr} . A abertura de fendas concentra-se mais em determinadas zonas que possam estar já fendilhadas.

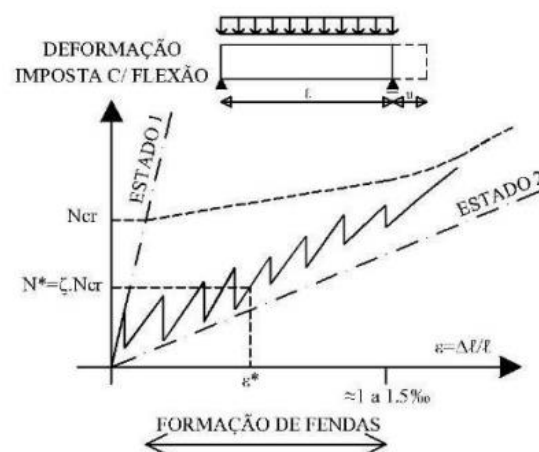


Figura 7 – Comportamento de um elemento de betão armado, sujeito a deformação imposta axial com flexão de cargas.

Devido a esta sobreposição de efeitos, a abertura da fenda é atingida para um esforço de N inferior ao N_{cr} do elemento (Figura 7). Como acima referido, o esforço normal, devido a deformação imposta axial, permanece abaixo do N_{cr} e atinge no máximo valores de 0,5 a 0,7 deste valor.

2.1.3. Armadura mínima

O controlo da abertura de fendas, em particular para a ação de deformações impostas, tem como condição base a adoção de, pelo menos, uma quantidade mínima de armadura. Esta condição é necessária e suficiente quando se analisam estruturas sujeitas a deformações impostas, para evitar uma fenda com abertura não controlável. No caso das ações diretas, esta condição não será, em geral, naturalmente suficiente, dependendo do carregamento a que a estrutura está sujeita.

O objetivo desta armadura é garantir que, quando ocorrer o processo de formação de fendas, a tensão instalada no aço não atinja a cedência (plastificação). Assim, não só fica garantida uma abertura razoável de fenda, como é possível transmitir, por aderência, as tensões de tração para o betão, podendo gerar-se outras fendas sem que ocorra a cedência.

Como as combinações de ações atuantes nem sempre são todas modeladas, em particular as deformações impostas, a adoção daquela área de armadura mínima deve ser o mais generalizável possível a todos os elementos da estrutura passíveis de virem a estar tracionados.

A área de armadura mínima necessária para a tração pura, além de ser necessária nas duas faces da secção, na face tracionada por flexão, é cerca do dobro da necessária para o caso da flexão simples, como será explicitado mais à frente, no próximo capítulo.

Todavia, a área de armadura mínima não será a única variável a considerar neste âmbito. A conceção das secções, geometria e pormenorizações, deve garantir, antes de mais, capacidade resistente para as cargas aplicadas e condições apropriadas de ductilidade e depois ter em conta os efeitos das deformações impostas acima referidos.

A ductilidade das estruturas depende, essencialmente, da capacidade de rotação plástica das secções, conseguida através:

- de uma escolha de aço com características adequadas de ductilidade;
- da criação de secções em que a linha neutra na rotura seja limitada e que o nível de esforço axial reduzido não seja elevado (flexão composta);
- da adoção de armaduras transversais com pequenos espaçamentos, garantindo, por um lado, o confinamento do betão comprimido e, por outro lado, evitando uma rotura frágil por esforço transversal.

2.2. Necessidade de controlar a abertura de fendas

Em geral, quando uma estrutura é bem dimensionada aos Estados Limites Últimos, não apresentará problemas a nível do funcionamento em serviço desde que bem concebida e pormenorizada. Todavia, deve ser realizada uma análise aos Estados Limites de Serviço para avaliar o seu bom funcionamento, em particular devido aos efeitos das deformações impostas.

Esta verificação, em termos de controlo da fendilhação, deve ser realizada por diversos motivos. Os de maior relevância são:

- aspeto visual;
- garantia de estanqueidade;
- proteção contra a corrosão das armaduras.

Os dois primeiros casos podem colocar em causa a aceitabilidade funcional da estrutura. A nível estético, a limitação da largura máxima de fendas é, certamente, mais subjetiva e depende de outros fatores, muitas vezes difíceis de quantificar. São diversos os aspetos que podem ser tidos em conta dependendo, essencialmente, da utilização que é dada à estrutura e a sua visibilidade por parte dos utilizadores. Por exemplo, em termos de aspeto, uma fenda de 0,4mm numa ponte (que se encontra a uma distância considerável) não tem a mesma importância de uma fenda numa parede de betão à vista com o utilizador a um metro de distância.

Relativamente à garantia da estanqueidade de uma estrutura, esta depende de vários fatores como a natureza do próprio fluido que se encontra no interior, da pressão hidrostática exercida, da espessura da parede, da existência de fendas e da sua variação, forma e rugosidade. Por exemplo, estruturas como silos e reservatórios têm um limite máximo admissível inferior aos edifícios correntes devido às suas especificidades quanto à estanqueidade das suas paredes, principalmente para fendas de tração que atravessam toda a largura da parede, as quais promovem fugas. O Eurocódigo 2 – Parte 3 sugere valores limites de abertura de fendas, no sentido de minimizar estes problemas, como será explicado no subcapítulo 4.6 “Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3” desta dissertação.

O facto da fendilhação do betão poder facilitar o acesso dos agentes ambientais às armaduras poderá contribuir para uma corrosão mais rápida das mesmas. Os valores recomendáveis para a largura de fendas varia consoante a zona do edificado. Quanto mais agressivos forem os agentes ambientais, menor seria, em princípio, o limite máximo admissível para a largura de fendas. No entanto, é reconhecido hoje em dia que, para abertura de fendas até 0,3 a 0,4 mm, não existem implicações no processo de possível corrosão, eventualmente em casos muito extremos.

Capítulo 3.

Métodos de controlo da fendilhação

Dispõe-se, atualmente, de diversas formas para promover um controlo adequado da fendilhação. Este controlo visa, essencialmente, aspetos estéticos, a garantia de estanqueidade de estruturas especiais e a proteção das armaduras de modo a não comprometer a durabilidade da estrutura.

No sentido de garantir um bom funcionamento em serviço de uma peça de betão armado, não basta adotar varões e espaçamentos adequados à tensão esperada no elemento estrutural. É necessário adotar um recobrimento eficiente, o qual varia consoante a classe de exposição da estrutura, um betão com boas características de porosidade e varões de aço com boas condições de aderência (varões nervurados).

Exemplificando, se a estrutura se localizar numa zona costeira, estará sujeita a agentes ambientais mais agressivos, sendo portanto necessário um maior recobrimento do que aquele que seria utilizado em zonas interiores.

Seguidamente, será feita uma breve panorâmica acerca da evolução ao longo dos tempos dos métodos para o cálculo da abertura de fendas, apresentando-se, em detalhe, os métodos presentes no Eurocódigo 2.

Os fatores que determinam um bom dimensionamento aos Estados Limites de Serviço de uma estrutura são a ordem de grandeza das larguras de possíveis fendas e a deformação dos elementos.

Atualmente, existem ainda investigações para melhor compreender e quantificar o fenómeno da fendilhação. Não será realizada uma apresentação muito extensiva desses trabalhos, mencionando-se apenas aspetos mais relevantes.

Shiessel, através dos seus trabalhos, constatou que, no caso de aberturas de fendas inferiores a 0,3 mm a 0,4 mm, o processo de corrosão das armaduras é mais acelerado no seu início. No entanto, a longo prazo, este fenómeno não se desenvolve, pelo que o estado de corrosão é praticamente independente da existência, ou não, de fendas (dentro dos limites assinalados). As aberturas de fendas consideradas para este caso são, apenas, as perpendiculares às armaduras. No caso de uma fenda longitudinal à armadura, existe um grande aumento do risco de corrosão. [6]

Para o caso do controlo da fendilhação a nível estético, é muito difícil de estabelecer limites concretos, na medida em que é uma área bastante subjetiva. Ainda assim, Jaccoud, com base em Padilla e Robles e em Kupfer, idealizou um gráfico onde refere uma ordem de grandeza da abertura de fendas em função da distância do observador e o nível de qualidade requerido. Por exemplo, numa instalação industrial, as exigências são menores do que numa instalação turística. [5]

O EC2 refere que a abertura de fendas máxima para condições ambientais agressivas e para a combinação quase-permanente de ações é de 0,3 mm. No caso de um ambiente sem agressividade, a largura de fendas é limitada a 0,4 mm por questões de ordem estética.

Recentemente, as normas usadas para o controlo da abertura de fendas são os métodos que se encontram no Eurocódigo 2 parte 1-1 (para estruturas de betão armado correntes). Este controlo pode ser feito de duas formas diferentes: através de cálculo explícito (parágrafo 7.3.4 do EC2-1) e sem cálculo direto (parágrafo 7.3.3 do EC2-1). [8]

Estas duas vertentes serão apresentadas e explicadas detalhadamente no subcapítulo que se segue. De referir ainda que a prática da Engenharia Civil tem mostrado que fendas com aberturas inferiores entre 0,1 a 0,2 mm podem inicialmente permitir alguma permeabilidade, mas rapidamente conseguem autocolmatar-se, garantindo a estanqueidade da estrutura.

É, também, de salientar que a corrosão não coloca de imediato a estrutura em risco. A corrosão das armaduras resulta em sinais de oxidação do ferro, fendas de início do processo de laminação e até, posteriormente, de destacamento do betão envolvente. É possível observar estes fenómenos e proceder a reparações, caso necessário, com o intuito de não comprometer a funcionalidade e segurança da estrutura.

Nas armaduras de pré-esforço, a problemática da corrosão torna-se um assunto menos consensual. No entanto, este tema não é contemplado nesta dissertação.

3.1. Cálculo direto da abertura de fendas

O cálculo da largura de fendas é efetuado através de expressões presentes no Eurocódigo 2. As expressões têm em conta diversas variáveis dependentes do tipo de ação que está a ser aplicada na estrutura, o tipo de varão utilizado nas pormenorizações, a duração do carregamento, entre outros fatores que afetam a formação de fendas.

A largura da fenda é calculada de acordo com a expressão seguinte, presente na página 140 do EC2- parte 1:

$$w_k = s_{r,m\acute{a}x}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = s_{r,m\acute{a}x} \times \varepsilon_{srm} \quad (2)$$

Em que:

- w_k largura máxima da fenda
- $s_{r,m\acute{a}x}$ distância máxima entre fendas consecutivas
- ε_{sm} extensão média da armadura entre fendas
- ε_{cm} extensão média do betão entre fendas
- ε_{srm} diferenças de extensões médias do aço e do betão

Esta avaliação equivale à máxima largura de fendas que se espera encontrar na estrutura de betão em questão. A abertura máxima é calculada através do produto entre a diferença das extensões médias do aço e do betão e da distância máxima entre fendas consecutivas.

O cálculo do parâmetro $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ pode ser efetuado através da expressão (3) que se encontra de seguida (página 141 do EC2-1):

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3)$$

Em que:

- σ_s tensão de tração presente na armadura, após a fendilhação
- α_e coeficiente de homogeneização, relação dos módulos de elasticidade E_s/E_{cm}
- k_t coeficiente função da duração do carregamento
 - $k_t = 0,6$ – ações de curta duração
 - $k_t = 0,4$ – ações de longa duração
- $\rho_{p,eff}$ percentagem de armadura na peça de betão armado $A_s/A_{c,eff}$
- A_s área de armadura que se encontra à tração
- $A_{c,eff}$ área da secção efetiva de betão tracionado que envolve as armaduras à tração, com uma altura $h_{c,eff}$.
- $h_{c,eff}$ altura da secção efetiva de betão tracionado
 - $h_{c,eff} = \min \left\{ 2,5(h - d); \frac{h - x^{II}}{3}; \frac{h}{2} \right\}$ – flexão
 - $h_{c,eff} = \min \left\{ 2,5(h - d); \frac{h}{2} \right\}$ – tração
- $f_{ct,eff}$ valor médio da resistência à tração do betão, $f_{ct,eff} = f_{ctm}$

Os parâmetros ε_{sm} e ε_{cm} são deformações médias de forma a evitar uma análise que exigisse integrar as extensões ao longo do varão, uma vez que a deformação do aço e do betão apresentam uma variação não linear e complexa ao longo do elemento.

É necessário adotar um especial cuidado no cálculo da área da secção efetiva de betão tracionado ($A_{c,eff}$) não só pela altura desta, mas também pelo afastamento dos varões. Quando a distância entre varões consecutivos é maior do que $5(c + \emptyset/2)$, é necessário calcular uma largura efetiva. Este facto acontece uma vez que a equação do EC2 considera apenas a abertura de fendas que se encontra controlada pelas armaduras e, portanto, a uma certa distância destas.

De facto, para afastamentos entre varões significativos, o varão utilizado deixa de influenciar parte do betão que se encontra à tração, sendo o comportamento nessa zona menos previsível e desaconselhável que este limite seja ultrapassado.

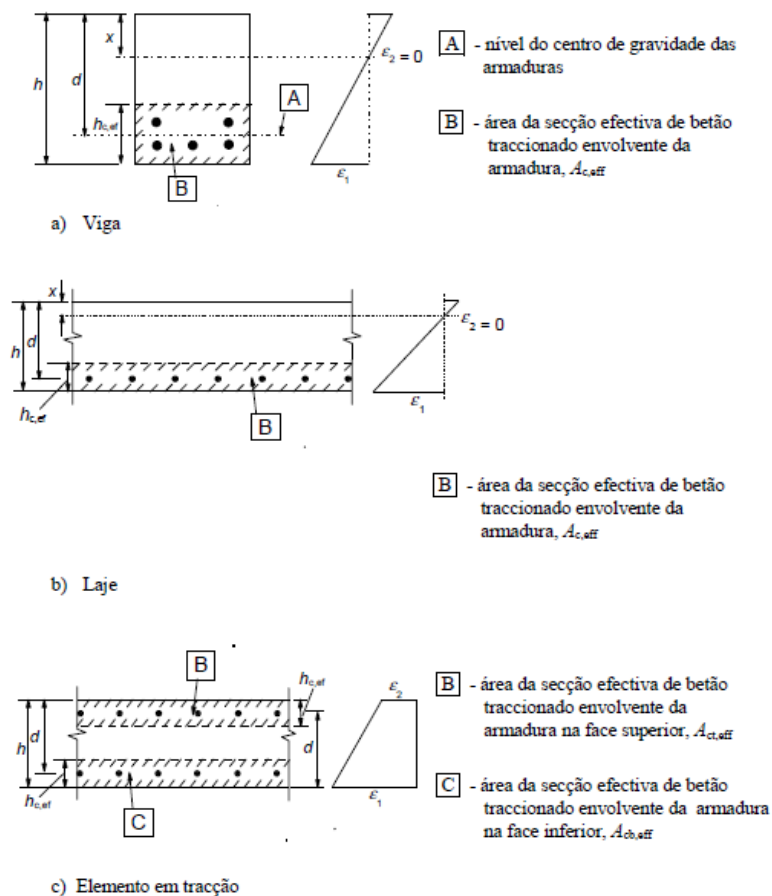


Figura 8 – Modelos esquemáticos com a área efetiva de betão tracionado envolvente da armadura. [8]

Por fim, o último parâmetro, distância máxima entre fendas (página 142 do EC2-1) pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$s_{r,m\acute{a}x} = k_3c + k_1k_2k_4 \frac{\emptyset}{\rho_{p,eff}} \quad (4)$$

Em que:

\emptyset diâmetro do varão utilizado na pormenorização. No caso de se utilizarem diferentes diâmetros deverá utilizar-se um \emptyset_{eq} .

$$\emptyset_{eq} = \frac{n_1\emptyset_1^2 + n_2\emptyset_2^2}{n_1\emptyset_1 + n_2\emptyset_2}$$

c recobrimento da face do betão até à face da primeira camada de armaduras

k_1 coeficiente função da aderência dos varões

$k_1 = 0,8$ – alta aderência (varão nervurado)

$k_1 = 1,6$ – pouca aderência (varão liso)

k_2 coeficiente função da distribuição das extensões

$k_2 = 0,5$ – flexão simples

$k_2 = 1,0$ – tração pura

$k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/(2\varepsilon_1)$ – valores intermédios, sendo ε_1 e ε_2 a maior e a menor extensão de tração nas fibras extremas da secção, respetivamente, após a fendilhação.

k_3 e k_4 coeficientes definidos consoante o país, indicado no Anexo Nacional. Os valores recomendados, em Portugal, são $k_3 = 3,4$ e $k_4 = 0,425$.

Os parâmetros k_3 e k_4 são constantes, sendo que também k_1 toma, correntemente, o valor de 0,8, pois esse é o valor para os varões nervurados e que garantem uma maior ligação entre o aço e o betão. O parâmetro com maior relevância é o k_2 , que varia com o esforço aplicado na estrutura, apresentando um aumento do valor para o dobro, da flexão simples para a tração pura. Este termo avalia o facto desta última ação ser mais desfavorável para a abertura de fendas, uma vez que a peça se encontra, na totalidade, sujeita à tração ao passo que para a flexão simples é apenas metade.

O diâmetro do varão e a percentagem efetiva de armadura influenciam diretamente o valor do espaçamento máximo entre fendas. O diâmetro tem grande importância devido à maior ou menor superfície de contacto entre os dois materiais, para uma dada área de aço. Quanto maior for o varão, menor é a sua área de superfície de contacto entre o betão e as armaduras, para uma determinada área de armadura. De facto, para uma mesma percentagem de armadura, adotando um diâmetro de varão mais reduzido, obter-se-á uma maior área de superfície de contacto devido ao maior número de varões necessários. Por outro lado, quanto maior for a percentagem de armadura, menor será o espaçamento entre fendas, pois a superfície de contacto aço/betão aumenta.

Deste modo, para se obter um valor reduzido para a distância máxima entre fendas, torna-se necessário ter em consideração a importância da percentagem de armadura presente e do diâmetro de varão. Refira-se que nestas escolhas há que ter sempre presente que a solução a adotar deve ter em consideração a obtenção de uma solução que facilite a colocação e vibração do betão em boas condições.

3.2. Controlo indireto da fendilhação, sem cálculos

De entre as várias metodologias disponíveis, esta é a mais expedita, uma vez que não envolve cálculos. Decorre de uma aplicação de um conjunto de quadros que resultam de simplificações baseadas nas expressões anteriormente expostas, evitando, deste modo, a execução exaustiva de cálculos. Os únicos dados que são necessários de conhecer são o nível de tensão na armadura em serviço e qual a abertura de fendas que se pretende garantir.

Este controlo é feito através de dois quadros presentes no Eurocódigo (página 139 do EC2-1) e apresentados, seguidamente, o primeiro com os diâmetros máximos de varões e o segundo com espaçamentos máximos entre ferros.

Quadro 1 – Diâmetros de varão máximos, ϕ_s^* , para controlar a fendilhação. [8]

Tensão no aço [MPa]	Diâmetros máximos de varões [mm]		
	$w_k = 0,4 \text{ mm}$	$w_k = 0,3 \text{ mm}$	$w_k = 0,2 \text{ mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Quadro 2 – Espaçamentos máximos entre varões, s , para controlar a fendilhação. [8]

Tensão no aço [MPa]	Espaçamentos máximos dos varões [mm]		
	$w_k = 0,4 \text{ mm}$	$w_k = 0,3 \text{ mm}$	$w_k = 0,2 \text{ mm}$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

De acordo com a proposta regulamentar, para o caso da fendilhação provocada por cargas aplicadas, é possível utilizar um ou outro quadro. Quando as ações predominantes são as provocadas por deformações impostas, deve usar-se apenas o Quadro 1.

A tensão considerada nos quadros deve ser calculada considerando a secção fendilhada para a combinação de ações em questão. É de salientar que, caso se obtenham tensões elevadas, a primeira preocupação será tentar diminuir esse valor, o que pode ser conseguido através do aumento da quantidade de armadura na secção.

Para a execução destes quadros, foram formuladas algumas hipóteses que se encontram discriminadas no quadro em baixo.

Quadro 3 – Considerações gerais para o controlo indireto.

$c = 25 \text{ mm}$	$k_2 = 0,5$
$f_{ct,eff} = 2,9 \text{ MPa}$	$k_c = 0,4$
$h_{cr} = 0,5 h$	$k = 1,0$
$(h - d) = 0,1 h$	$k_t = 0,4$
$k_1 = 0,8$	$k_4 = 1,0$

Como se depreende pelo quadro anterior, os quadros do controlo indireto da fendilhação foram elaborados para o esforço de flexão (k_2 e h_{cr}). Para casos com particularidades diferentes, o Eurocódigo 2 apresenta expressões que calibram o diâmetro máximo para ter em consideração essas especificidades.

A primeira expressão, referente à flexão (página 140 do EC2-1):

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)} \quad (5)$$

E a segunda, referente à tração pura (página 140 do EC2-1):

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \frac{h_{cr}}{8(h-d)} \quad (6)$$

Em que:

- ϕ_s diâmetro máximo modificado [mm]
- ϕ_s^* diâmetro máximo obtido do Quadro 1 [mm]
- h altura total da secção
- h_{cr} altura da zona tracionada imediatamente antes da fendilhação
- d altura útil da secção

É possível verificar de forma expedita que, para a tração, o fator multiplicativo que se deve considerar, de uma forma aproximada, usando as considerações indicadas anteriormente é dado por:

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \frac{h_{cr}}{8(h-d)} = \phi_s^* \frac{2,9}{2,9} \times \frac{h}{8 \times 0,1h} = 1,25\phi_s^* \quad (7)$$

Para o caso da tração, é permitido, portanto, um varão maior comparativamente ao caso da flexão, levando a pensar que a tração é menos condicionante que a flexão. O facto de se tomar um varão maior irá conduzir a uma abertura de fenda maior, para uma área de armadura constante, o que não parece coerente quando se passa da flexão para a tração, o que é, como sabemos, desfavorável.

No entanto, resulta de uma análise baseada em situações de deformação imposta, sendo que a análise e discussão desta situação será desenvolvida mais à frente no capítulo 4.

Por outro lado, para valores de h_{cr} e $(h-d)$ diferentes, o coeficiente multiplicativo do diâmetro modificado pode ter valores diferentes, podendo mesmo ser inferior ao da flexão.

3.3. Cálculo da armadura mínima

No sentido de promover o controlo da fendilhação, é necessária uma quantidade mínima de área de armadura. Essa área é calculada através da seguinte expressão, presente no EC2-1 (página 136):

$$A_{s,min} = k_c k A_{ct} \frac{f_{ct,eff}}{\sigma_s} \quad (8)$$

Em que:

$A_{s,min}$ área mínima de armadura na zona tracionada

k coeficiente função do efeito das tensões não uniformes não-equilibradas, que resulta numa redução dos esforços de coação.

$k = 1,0$ – para almas ou banzos com $h \leq 300 \text{ mm}$

$k = 0,65$ – para almas ou banzos com $h \geq 800 \text{ mm}$

valores intermédios obtidos por interpolação, sendo h a maior dimensão do elemento em questão.

k_c coeficiente função da distribuição de tensões na secção, antes da fendilhação

$k_c = 1,0$ – tração simples;

$k_c = 0,4 \left[1 - \frac{\sigma_s}{k_1 \left(\frac{h}{h^*} \right) f_{ct,eff}} \right] \leq 1$ – outros, para secções retangulares e almas de secções em caixão e em T;

$k_c = 0,9 \frac{F_{cr}}{A_{ct} f_{ct,eff}} \geq 0,5$ – outros, para banzos de secções em caixão e em T.

σ_s $\sigma_s = \frac{N_{ed}}{bh}$, sendo N_{ed} o esforço normal no ELS na secção (compressão assume o esforço positivo)

h^* $h^* = h$, $h < 1,0 \text{ m}$;

$h^* = 1,0 \text{ m}$, $h > 1,0 \text{ m}$;

k_1 coeficiente função dos esforços normais na distribuição de tensões

$k_1 = 1,5 - N_{ed}$ de compressão;

$k_1 = \frac{2h^*}{3h} - N_{ed}$ de tração;

F_{cr} valor absoluto da força de tração no banzo antes da fendilhação devido a $f_{ct,eff}$

No EC2, é dada a mesma terminologia de “área de armadura mínima” a duas equações distintas, que têm uma origem diferente. Por um lado, a armadura mínima tradicional de flexão está associada à resistência última e à garantia de não fragilidade para a ação de cargas e, por outro lado, as expressões acima descritas para garantia de um controlo mínimo de abertura de fendas para o efeito de fendas por deformações impostas. De qualquer forma, a área da armadura mínima corresponde sempre à garantia de que, para o momento de fendilhação há suficiente aço para a sua não cedência, sendo que as expressões entram em conta com a resistência do betão à tração (f_{ctm}) e a tensão de cedência do aço (f_{syk}).

A área de armadura mínima apresentada anteriormente é a área de armadura necessária para um controlo mínimo da abertura de fendas se a tensão for a de cedência. Para outra tensão de serviço, a abertura de fendas expectável é controlada a valores menores.

Capítulo 4.

Avaliação do método indireto do controlo da fendilhação

4.1. Introdução

O objetivo fundamental dos quadros do controlo indireto da fendilhação, presentes no EC 2 – Parte 1, é a garantia do controlo da abertura de fendas dentro de limites aceitáveis na verificação da segurança aos Estados Limites de Serviço, sem recorrer a cálculos mais desenvolvidos. Estes quadros são também muito úteis como forma de permitir facilmente ter a perceção do nível de tensão e de disposição de armaduras aceitável deste ponto de vista.

O principal objetivo desta dissertação passa pela verificação das opções tomadas no desenvolvimento destes quadros, com a eventual perspetiva de propor algumas adaptações que os tornem mais assertivos relativamente às diferentes situações que se possam encontrar. Através da leitura e análise destes quadros, é intuitiva a noção de que o parâmetro mais importante, aquando da escolha de um determinado diâmetro de varão, ou espaçamento, relaciona-se com a tensão de serviço no aço. Com o intuito de compreender como estes quadros foram efetivamente concebidos, realizaram-se inúmeros exemplos ao longo desta dissertação.

Inicialmente, efetuaram-se algumas análises preliminares para perceber a maior ou menor influência dos vários parâmetros envolvidos no cálculo da abertura de fendas e qual a sua influência. Foram analisadas as aberturas de fendas obtidas para estruturas sujeitas a deformações impostas e cargas aplicadas, tanto para a tração como para a flexão, essencialmente em lajes.

No caso dos exemplos que se seguem, foi necessário definir *a priori* alguns parâmetros essenciais e comuns. Definiram-se as categorias dos materiais, nomeadamente o betão C30/37 e o aço A500, visto serem, atualmente, os mais correntemente adotados na construção.

Os parâmetros destes materiais, com relevância para este trabalho, encontram-se discriminados nos quadros que se seguem.

Quadro 4 – Características do betão adotado.

Betão	f_{cd} [MPa]	E_{cm} [GPa]	f_{ctm} [MPa]
C30/37	20	31	2,9

Quadro 5 – Características da classe de aço adotada.

Aço	f_{yk} [MPa]	E_s [GPa]	f_{yd} [MPa]
A500	500	210	435

Para o recobrimento base para lajes adotou-se 3 cm, medidos entre a face do betão e a face da primeira camada das armaduras longitudinais.

No Quadro 6 encontram-se resumidos os valores dos parâmetros necessários às equações do controlo direto, tanto para o esforço de flexão, como para a tração.

Quadro 6 – Parâmetros para o cálculo da abertura de fendas.

Parâmetro	Flexão	Tração
k_t	0,4	0,4
α_e	6,77	6,77
E_s [GPa]	200	200
k_3	3,4	3,4
k_4	0,425	0,425
k_1	0,8	0,8
k_2	0,5	1,0
c [mm]	30	30

Salienta-se que o único parâmetro que difere para os dois esforços (flexão e tração) é o k_2 , o qual tem em conta a distribuição das extensões na zona tracionada da secção de betão armado.

Assim, de forma simplificada, as análises efectuadas ao longo desta dissertação foram as seguintes:

- 4.2. Avaliação da importância das variáveis no cálculo da abertura de fendas;
- 4.3. Verificação dos quadros do controlo indireto para as deformações impostas;
- 4.4. Verificação dos quadros do controlo indireto para a flexão de cargas;
- 4.5. Verificação dos quadros do controlo indireto para a tração de cargas;
- 4.6. Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3;
- 4.7. Elaboração de gráficos alternativos;

4.2. Avaliação da importância das variáveis no cálculo da abertura de fendas

Como já foi mencionado anteriormente, os quadros relativos ao controlo indireto da fendilhação sugerem que o parâmetro de maior relevância para a escolha da pormenorização é a tensão no aço em serviço.

Com o objetivo de o confirmar e verificar, foram analisados vários exemplos de elementos estruturais de betão armado para perceber a influência de alguns parâmetros no controlo indireto. As análises efetuadas tiveram como objetivos a:

- Distinção entre vigas e lajes;
- Comparação do efeito do esforço de flexão e tração;
- Relevância da altura da laje;

- Importância da área/percentagem de armadura;
- Análise do valor do diâmetro dos varões.

4.2.1. Distinção entre vigas e lajes

Nos quadros do controlo indireto, não é feita qualquer referência a respeito da sua aplicação aos diferentes elementos em betão armado. Neste subcapítulo, serão apenas analisadas algumas particularidades da abertura de fendas em vigas e lajes, uma vez que são elementos estruturais com especificidades, ao nível do seu comportamento, diferentes. Com efeito, o nível de esforços a que estes elementos estão sujeitos são diferentes, o que conduz, em geral, a percentagens de armadura muito superiores nas vigas.

Geralmente, as vigas são elementos estruturais com maiores concentrações de armaduras, sendo função das lajes transmitir essas cargas. Deste modo, as percentagens de armadura são maiores e os diâmetros dos varões escolhidos para este tipo de elementos são superiores (em geral de 16, 20 e 25 mm), na sequência da verificação de segurança aos Estados Limites Últimos.

Nestas circunstâncias, as vigas requerem percentagens de armadura elevadas, em particular, referidas à área efetiva.

Realizou-se um exemplo, com uma percentagem moderada de aço, como indicado na Figura 9, no qual se considera uma viga de dimensões 0,3x0,6 com 2 diâmetros de 25 mm, sujeita a um esforço de flexão simples.

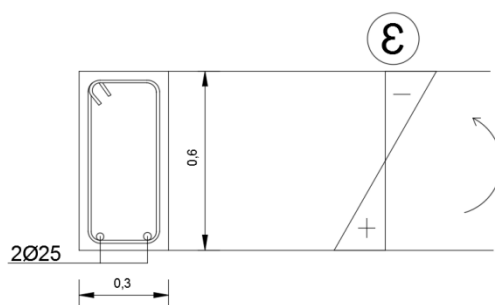


Figura 9 – Exemplo de uma viga de secção 0,3m x 0,6m, sujeito à flexão simples.

A área de armadura considerada neste exemplo é, propositadamente, não muito elevada, com o intuito de poder ser considerada uma pormenorização de armaduras muito natural em vigas.

Os valores dos cálculos complementares encontram-se no quadro abaixo, com a indicação dos parâmetros x'' , o $h_{c,eff}$ e $\rho_{p,eff}$.

Quadro 7 – Parâmetros auxiliares para o cálculo da abertura de fendas.

$A_{adotada}$ (cm ² /m/face)	x'' [m]	$c+\phi/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$\rho_{p,eff}$
2Ø25 (9,82)	0,031	0,0525	0,13	0,025

Na sequência, avaliou-se a largura de fendas para diferentes tensões de serviço, no aço. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 8. No Quadro 9 estão representados os diâmetros dos

varões que, teoricamente, teriam que ser utilizados de modo a obter-se uma largura de fendas máxima de 0,3 mm, através do controlo indireto.

Quadro 8 – Abertura de fendas para as diferentes tensões de serviço.

Tensão no aço [MPa]	w_k [mm]
160	0,13
200	0,18
240	0,22
280	0,27
320	0,31
360	0,36
400	0,41
450	0,46

Quadro 9 – Diâmetros máximos, para uma largura de fendas máxima de 0,3 mm.

Tensão no aço [MPa]	ϕ_{EC2-1} [mm]
160	32
200	25
240	16
280	12
320	10
360	8
400	6
450	5

Para tensões de serviço no aço (de 200 a 320 MPa), o quadro sugere que seria necessário usar diâmetros de varões inferiores aos escolhidos ($\phi 25$). No entanto, o facto de as vigas terem uma largura limitada, conduz a percentagens de armaduras efetivas altas na zona que se encontra à tração, verificando-se o controlo da abertura de fendas (w_k inferior a 0,3 mm) com os diâmetros adotados para tensões até 320 MPa. Se porventura a concentração de armadura fosse superior (e podia-o ser com outras pormenorizações correntes), ainda mais evidente seria esta discrepância.

É possível observar no Quadro 8 que, para tensões de serviço mais elevadas (superiores a 320 MPa), o valor limite de abertura de fendas seria ultrapassado. Contudo, esses níveis de tensão, para as combinações quase-permanentes, não são expectáveis, mesmo nos casos em que se recorre a uma redistribuição de esforços no dimensionamento à rotura.

Verifica-se, portanto, apenas com este exemplo simples e sem uma quantidade elevada de armadura, que os valores do quadro regulamentar são demasiado conservativos e não dão uma perspetiva realista do fenómeno, quando aplicado a vigas dimensionadas e pormenorizadas na sequência da verificação da segurança à rotura.

Este aspeto deverá ser tido em conta nas propostas de melhoria para o controlo indireto da abertura de fendas apresentadas no final desta dissertação.

No caso das lajes, estes aspetos são menos flagrantes, pois a quantidade de armadura necessária ao dimensionamento aos Estados Limites Últimos é bastante inferior e os espaçamentos entre varões têm tendência a ser maiores, o que resulta, em geral, em percentagens efetivas de armadura inferiores.

Embora o dimensionamento das vigas aos Estados Limites Últimos e regras correntes de pormenorização se traduzam, em regra, à garantia do controlo da fendilhação em serviço, estes elementos podem ser afetados por outra problemática. No caso em que as vigas são altas – isto é, para alturas a partir dos 0,8 a 0,9 m – pode ocorrer fendilhação na alma devido ao facto desta se encontrar igualmente à tração. Analisemos o seguinte caso da Figura 10.

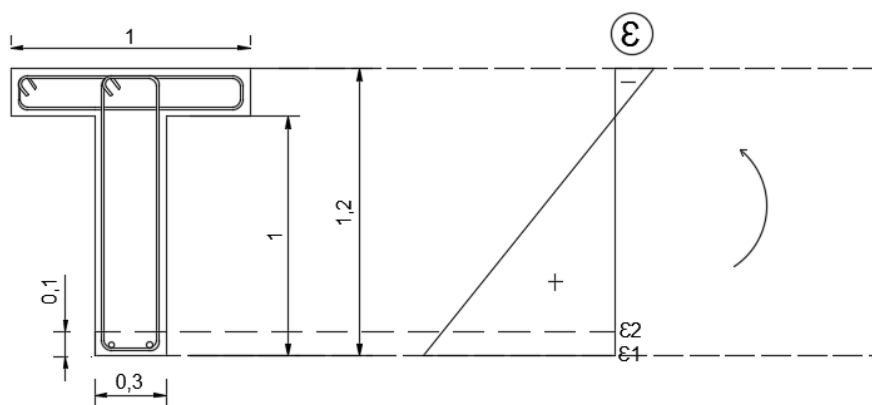


Figura 10 – Exemplo de viga com secção em T, em betão armado, sujeita à flexão simples.

A única parte da secção em “T” que se encontra à compressão é o banzo superior, como se mostra na figura, estando apenas 10 cm da alma sob a influência da armadura longitudinal para controlar a fendilhação. Neste caso particular das vigas, é possível observar que ϵ_2 é aproximadamente igual a ϵ_1 , tornando-se um problema quase de tração pura onde $k_2 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2\epsilon_1} = 1,0$.

Por outro lado, analisando o comportamento limitado a esta zona, não estaríamos a avaliar a restante parte da alma, também tracionada e, certamente, com fendas. Não considerando uma armadura longitudinal distribuída na alma, teria lugar o fenómeno representado na Figura 11. Existe a zona efetiva em torno das armaduras onde há um controlo da abertura de fendas por parte da armadura longitudinal e, por outro lado, onde não existe esta armadura, há condições para se formarem fendas de dimensões muito superiores aos limites aceitáveis, com espaçamentos entre fendas, também eles, bastante maiores.

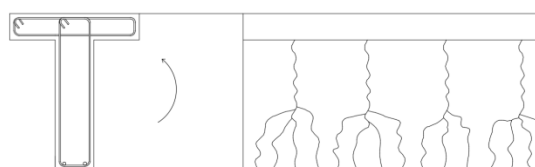


Figura 11 – Propagação das fendas numa viga sem armadura lateral de reforço na alma.

Em virtude do processo descrito, ensaios experimentais têm mostrado ser necessário adotar uma armadura distribuída pelas faces da alma para controlar aí a abertura de fendas, fazendo com que as fendas inferiores se propaguem em altura, com abertura de fendas dentro dos limites aceitáveis (Figura 12).

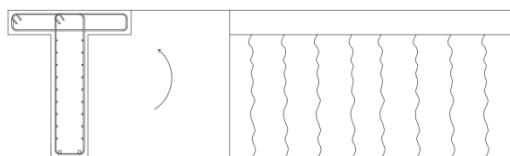


Figura 12 – Propagação das fendas numa viga com armadura lateral de reforço na alma.

Esta armadura pode ser calculada de acordo com a equação que se segue, presente no EC2, página 136 [8].

$$A_{s,alma/face} = k \times k_c \times A_{ct} \frac{f_{ct,eff}}{f_{yk}} = 0,5 \times 100 \times \frac{b}{2} \times \frac{f_{ct,eff}}{f_{yk}} \quad (9)$$

O que se pretende também com este exemplo, é chamar à atenção de que, para vigas com alturas consideráveis sujeitas à flexão simples, o parâmetro k_2 não deve, claramente, ser tomado como 0,5, como proposto como simplificação no regulamento europeu. Nestes casos, deve recorrer-se ao cálculo através da expressão presente no eurocódigo $(k_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2\varepsilon_1})$ ou, por simplificação, adotar simplesmente o valor de 1,0, pois trata-se, nessa zona, de um fenómeno quase equivalente ao da tração pura.

4.2.2. Comparação do efeito do esforço de flexão e tração

Este ponto tem como objetivo evidenciar a diferença no controlo da fendilhação, entre os efeitos de tração e flexão e confirmar a maior sensibilidade no controlo da abertura de fendas para esforços de tração.

Existem alguns parâmetros que variam na avaliação da abertura de fendas para esforços de flexão ou de tração. Para perceber a influência destes parâmetros, foi feito um pequeno exemplo para uma laje de 25 cm de altura, com a mesma área de armadura e a mesma pormenorização, ver Figura 13, para uma tensão de 240 MPa.

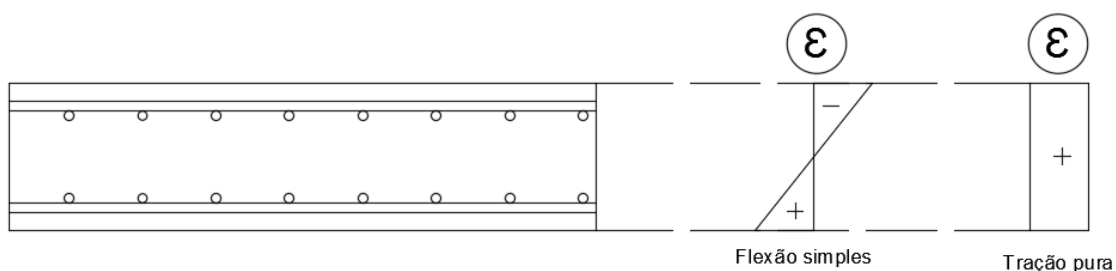


Figura 13 – Diagramas de extensões da flexão simples e tração pura.

Os resultados obtidos para as larguras de fendas para os esforços de flexão e tração estão representados no Quadro 10 com alguns dos cálculos parcelares.

Quadro 10 – Aberturas de fendas para a tração e flexão, com igual pormenorização.

Esforço	Tensão no aço [MPa]	$A_{s,adotado}$ [cm ² /m]	$A_{s,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$s_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
Flexão	240	Ø16//125 (16,08)	0,066	0,024	0,0009	0,21	0,19
Tração	240		0,095	0,017	0,0008	0,42	0,33

Como se pode observar, a abertura de fendas obtida para a tração é mais significativa relativamente à flexão, como seria de esperar.

A principal diferença observada é ao nível do valor de $s_{r,m\acute{a}x}$. O espaçamento máximo entre fendas apresenta uma divergência mais relevante que as extensões do aço e do betão, devido principalmente à diferença observada no valor do parâmetro referente à distribuição das extensões (k_2) que, no caso da tração (1,0), é o dobro da flexão (0,5).

Por sua vez, o parâmetro $\rho_{p,eff}$ apresenta apenas uma pequena variação devido à altura efetiva de betão considerada. No caso da flexão, este parâmetro depende da localização da linha neutra após a fendilhação, visto que o $h_{c,eff}$ depende de $\left(\frac{h-x''}{3}\right)$, diminuindo a parcela de betão envolvido no processo de fendilhação, o que faz aumentar a percentagem efetiva de armadura. O facto desse parâmetro ser ligeiramente inferior para a tração implica, também, o aumento no valor do $s_{r,m\acute{a}x}$. No final, e como se pode observar neste exemplo, o valor de $s_{r,m\acute{a}x}$ é, aproximadamente, o dobro na tração devido ao parâmetro k_2 e à percentagem efetiva de aço.

Fisicamente, é compreensível que a tração origine fendas maiores do que na flexão, para condições semelhantes, visto que a secção no primeiro caso está na sua totalidade submetida à tração, contrariamente à situação de flexão onde a zona comprimida restringe, de certa forma, a deformação da zona tracionada.

Este aspeto faz-nos questionar a razão pela qual o Eurocódigo 2 – parte 1 indica que o diâmetro do varão escolhido para a tração pode ser superior ($\varnothing = \varnothing^* \times 1,25$), sendo o diâmetro \varnothing^* o do varão das tabelas do controlo indireto, para a flexão.

Esta problemática será discutida no subcapítulo 4.6, onde se perceberá a razão pela qual esta indicação regulamentar possibilita a obtenção de bons resultados para a tração.

4.2.3.Relevância da altura da laje

Para averiguar a importância da altura da laje na escolha da pormenorização das armaduras, preparou-se um exemplo com três lajes de diferentes alturas: 25, 50 e 75 cm. Tal exemplo foi realizado considerando que a estrutura se encontra sujeita à **flexão** simples.

Foi admitida a mesma área de armadura para cada altura diferente, com o intuito de compreender a implicação da altura da laje no cálculo da largura de fendas.

Para a escolha das pormenorizações, foram adotados diâmetros e espaçamentos, alguns deles desadequados em termos práticos, mas definidos para que a área de armadura seja praticamente

constante, com pequenas variações. No Quadro 11 estão especificadas as pormenorizações escolhidas.

Quadro 11 – Pormenorizações adotadas para diferentes níveis de tensão.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]
160	Ø25//340 (14,44)
200	Ø20//220 (14,28)
240	Ø18//175 (14,54)
280	Ø16//140 (14,36)
320	Ø14//105 (14,66)
360	Ø12//80 (14,14)
400	Ø10//55 (14,28)
450	Ø8//35 (14,36)

Apresentam-se, de forma sumária, os resultados obtidos no Quadro 12, indicando-se a largura de fendas obtida para cada um dos casos em questão. No anexo A.3 é possível analisar todos os parâmetros calculados individualmente para as diferentes alturas e tensões de serviço no aço.

Quadro 12 – Aberturas de fendas para as diferentes alturas de laje e tensões de serviço.

Tensão no aço [MPa]	w_k [mm]		
	h=25 cm	h=50 cm	h=75 cm
160	0,11	0,14	0,14
200	0,15	0,17	0,17
240	0,19	0,21	0,21
280	0,21	0,22	0,22
320	0,22	0,24	0,24
360	0,26	0,28	0,28
400	0,29	0,32	0,32
450	0,34	0,36	0,36

Para facilitar a visualização dos resultados obtidos, procedeu-se à sua representação sob a forma de gráfico (Figura 14). É possível observar o andamento, para as diferentes tensões no aço, da largura de fendas obtida para três diferentes alturas de laje.

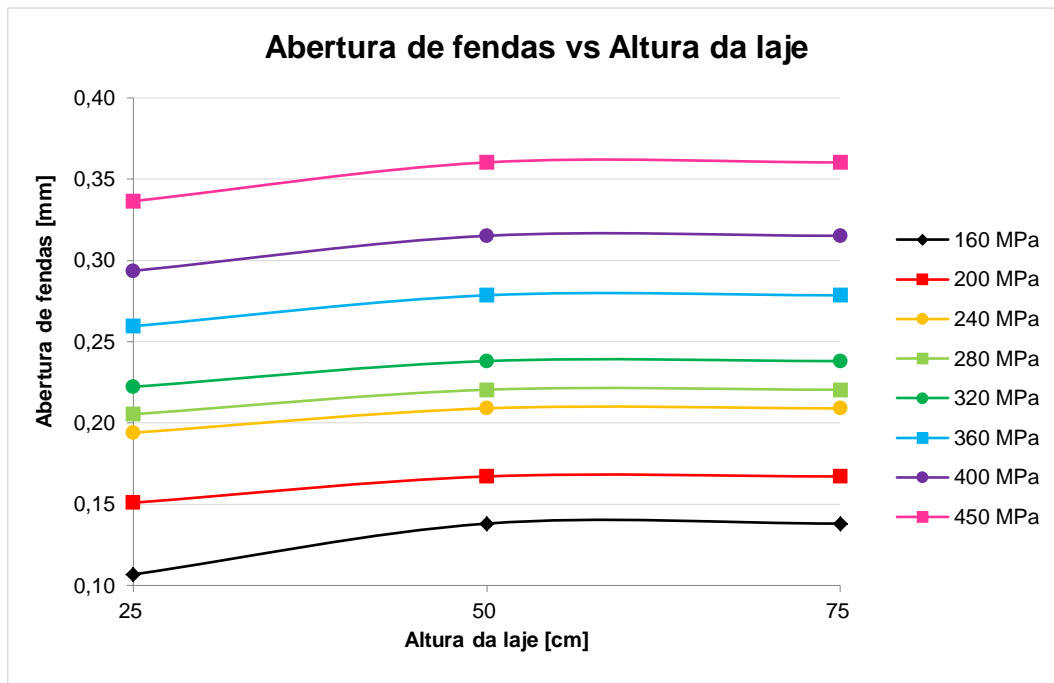


Figura 14 – Variação da abertura de fendas em função da altura da laje.

De acordo com estes resultados, é possível concluir que a altura da laje pouco influencia a abertura de fendas em estruturas de betão armado. A única diferença observada encontra-se na laje de 25 cm devido ao parâmetro que depende da altura da laje, o $h_{c,eff}$.

Este parâmetro, para o caso da flexão, é igual ao mínimo entre $\left\{\frac{h}{2}; 2,5c; \frac{h-x^{II}}{3}\right\}$. Como tal, para lajes com espessuras de dimensões mais correntes (menor valor desta comparação), este parâmetro toma o valor de $\frac{h-x^{II}}{3}$. Por sua vez, este quociente varia consoante a altura, uma vez que o parâmetro x^{II} apenas depende da área de armadura adotada que, neste exemplo, é aproximadamente igual para todos os casos. Para alturas de laje superiores, este parâmetro passa a ser igual a $2,5c$, tornando-se constante pelo facto do recobrimento (c) adotado ser igual nos três casos.

Conclui-se então que, para uma mesma pormenorização, a espessura da laje não influencia a largura de fendas, sendo que, para espessuras inferiores a 0,25 m, as aberturas de fendas terão tendência a ser menores pois a área efetiva varia, em consequência, da percentagem efectiva de armadura.

No entanto, a abertura de fendas avaliada através deste método, é aquela que se dá à superfície da peça de betão e na zona de influência dos varões de aço.

Refira-se que se se tivesse considerado o caso de tração e para espessuras superiores a 20/25 cm, a abertura da fenda no interior do betão poderia ser maior visto que toda a espessura da laje se encontra sob tração. Este aspeto assume maior importância no caso particular de vigas com altura significativa, como referido anteriormente neste subcapítulo.

4.2.4. Importância da área/percentagem de armadura

Concebeu-se, também, um exemplo para compreender qual a influência da área de armadura no cálculo da largura de fendas.

Neste exemplo, adotou-se uma laje de 25 cm de altura, sujeita à **tração**, tendo-se considerado três percentagens de armadura diferentes: $A_s = \{0,0075 \times h; 0,015 \times h; 0,025 \times h\}$. Para este caso específico, obtiveram-se áreas de armadura de 18,75; 37,50 e 62,50 cm²/m.

Neste âmbito, foram adotadas duas abordagens distintas. A primeira, adotando pormenorizações consideradas adequadas, iguais para cada nível de tensão (Caso 1) e a segunda adotando os diâmetros máximos apresentados nos quadros do controlo indireto da fendilhação, para uma abertura de fendas máxima de 0,3 mm (Caso 2).

4.2.4.1. Caso 1

Neste primeiro caso foram adotados os diâmetros e os espaçamentos que se encontram no quadro apresentado abaixo (Quadro 13).

Quadro 13 - Pormenorizações adotadas e respetivas percentagens de armadura.

A_s [cm ² /m]	$A_s/2$ [cm ² /m/face]	ϕ_{adotado} [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotado}}$ [cm ² /m/face]	$P_{p,\text{eff}}$
18,75	9,38	10	80	9,82	0,0112
37,50	18,75	14	80	19,24	0,0203
62,50	31,25	20	100	31,42	0,0314

No anexo A.4 encontram-se todos os cálculos efetuados, apresentando-se, de seguida, uma versão resumida com as larguras de fendas obtidas para os diferentes casos em análise (Quadro 14).

Quadro 14 – Larguras de fendas para diferentes percentagens de armadura e diferentes tensões em serviço.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$s_{r,m\acute{a}x}$ [m]	ϵ_{srm}	w_k [mm]	w_k [mm]
160	9,82	0,41	0,00046	0,19	0,17
	19,24	0,34	0,00046	0,15	
	31,42	0,32	0,00056	0,17	
200	9,82	0,41	0,00057	0,23	0,23
	19,24	0,34	0,00064	0,22	
	31,42	0,32	0,00075	0,24	
240	9,82	0,41	0,00069	0,28	0,29
	19,24	0,34	0,00083	0,28	
	31,42	0,32	0,00094	0,30	
280	9,82	0,41	0,00080	0,33	0,34
	19,24	0,34	0,00102	0,34	
	31,42	0,32	0,00113	0,36	
320	9,82	0,41	0,00099	0,40	0,41
	19,24	0,34	0,00121	0,41	
	31,42	0,32	0,00132	0,42	
360	9,82	0,41	0,00119	0,48	0,48
	19,24	0,34	0,00140	0,47	
	31,42	0,32	0,00151	0,48	
400	9,82	0,41	0,00138	0,56	0,54
	19,24	0,34	0,00160	0,54	
	31,42	0,32	0,00170	0,54	
450	9,82	0,41	0,00161	0,65	0,63
	19,24	0,34	0,00183	0,62	
	31,42	0,32	0,00194	0,61	

Com o intuito de facilitar a leitura dos valores presentes no quadro, procedeu-se à representação destes dados sob a forma de um gráfico, tornando possível a perceção global da sua variação (Figura 15).

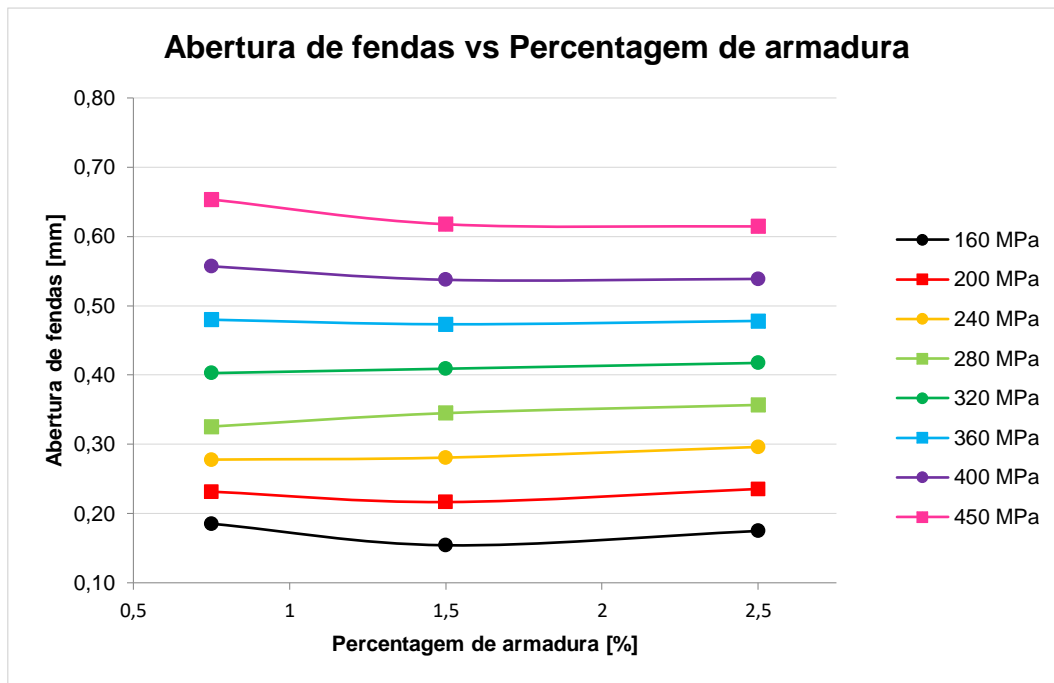


Figura 15 – Variação da abertura de fendas em função da percentagem de armadura.

Como é possível observar, o parâmetro relativo à distância máxima entre fendas ($s_{r,m\acute{a}x}$) diminui com o aumento da percentagem de área de armadura. Esta diminuição apenas se deve à diferença observada no quociente $\frac{\phi}{\rho_{p,eff}}$. Ambos os parâmetros aumentam com o aumento da percentagem de armadura. No entanto, o parâmetro $\rho_{p,eff}$ aumenta mais rapidamente que o diâmetro ϕ . Por outro lado, a diferença entre a extensão média do aço e do betão aumenta com essa percentagem.

$$\varepsilon_{srm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha \rho_{p,eff})}{E_s} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t f_{ct,eff}}{E_s \rho_{p,eff}} - \frac{k_t f_{ct,eff} \alpha}{E_s} \quad (10)$$

Através do desenvolvimento da equação anterior é possível perceber que o aumento do $\rho_{p,eff}$ conduz ao incremento do ε_{srm} , devido ao acréscimo da percentagem efetiva de armadura.

Deste modo, a abertura de fendas é pouco variável com a área de armadura, quando escolhida uma pormenorização adequada, para uma determinada tensão no aço.

Através deste exemplo poderíamos concluir que o termo com maior relevância seria a tensão de serviço no aço, como o controlo indireto da fendilhação indica. No entanto, com o desenvolvimento da segunda situação pode chegar-se a uma conclusão diferente.

4.2.4.2. Caso 2

Neste segundo caso, o objetivo da análise é o de, para uma dada quantidade de armadura e tensão em serviço, pormenorizar tomando os diâmetros máximos relativos aos quadros do controlo indireto. Verifica-se que, para determinadas percentagens de armadura, não se consegue definir nenhuma

pormenorização razoável, devido à limitação do diâmetro máximo pelo EC2 - Parte 1. As pormenorizações escolhidas, bem como as estimativas de largura de fendas correspondentes, encontram-se no Quadro 15.

Quadro 15 – Pormenorizações e aberturas de fendas obtidas para cada tensão.

Tensão no aço [MPa]	$\varnothing_{\text{adotado}}$ [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotado}}$ [cm ² /m]	$\rho_{p,\text{eff}}$	$S_{r,\text{máx}}$ [m]	ϵ_{srm}	W_k [mm]
160	32	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-
		255	31,54	0,032	0,45	0,0006	0,25
200	25	-	-	-	-	-	-
		260	18,88	0,020	0,53	0,0006	0,34
		155	31,67	0,032	0,37	0,0007	0,27
240	16	210	9,57	0,011	0,60	0,0007	0,41
		105	19,15	0,020	0,37	0,0008	0,31
		64	31,42	0,031	0,28	0,0009	0,26
280	12	120	9,42	0,011	0,48	0,0008	0,46
		60	18,85	0,020	0,31	0,0010	0,34
		36	31,42	0,031	0,23	0,0011	0,28
320	10	80	9,82	0,011	0,41	0,0010	0,40
		41	19,16	0,020	0,27	0,0012	0,33
		-	-	-	-	-	-
360	8	53	9,48	0,011	0,35	0,0012	0,41
		-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-
400	6	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-
450	5	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-

É possível verificar que a limitação de um determinado diâmetro de varão condiciona grandemente a escolha da pormenorização, apontando, por vezes, para espaçamentos sem sentido prático (indicados a negrito).

Comparando este quadro com o obtido no caso anterior concluiu-se que, neste enquadramento, condicionado pelos valores do Quadro, a abertura de fendas aparece com alguma dependência da percentagem de armadura (maiores percentagens implicam menores aberturas de fendas pois o diâmetro é o mesmo). Mais adiante nesta dissertação será apresentado um exemplo que mostra claramente como se pode adotar um diâmetro superior e conseguir-se, igualmente, o limite da largura de fendas que se pretende.

Os resultados apontam para o facto de o quadro dos diâmetros máximos terem sido idealizados para efeitos de deformações impostas, onde a área de armadura necessária é reduzida. Na definição de uma pormenorização de armaduras é necessário ter em conta não só o parâmetro da tensão de serviço no aço, mas também a área de armadura necessária. Caso este parâmetro não seja considerado, poder-se-á cair na escolha de uma pormenorização com espaçamentos desnecessariamente baixos ou elevados, levando à conclusão que há que aumentar a quantidade de armadura.

4.2.5. Análise do valor do diâmetro dos varões

Considerando uma laje com 25 cm de altura, sujeita à tração, fez-se variar o diâmetro do varão adotado, mantendo a área de armadura tanto quanto possível constante.

No Quadro 16, indicam-se as pormenorizações escolhidas, para uma dada percentagem de armadura, neste caso de 1,2%, valor um pouco acima do dobro da armadura mínima de tração.

Quadro 16 – Pormenorizações adotadas para as diferentes tensões de serviço.

$\varnothing_{\text{adotado}}$ [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotada}}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,\text{eff}}$
20	215	14,61	0,015
16	135	14,89	0,016
12	77	14,69	0,016
10	53	14,82	0,017
8	34	14,78	0,017

As larguras de fendas obtidas para cada nível de tensão diferente estão apresentadas no Quadro 17. Os cálculos parcelares estão presentes no anexo A.5.

Quadro 17 – Larguras de fendas para diferentes diâmetros de varão com igual área de armadura.

Tensão no aço [MPa]	$\varnothing_{\text{adotado}}$ [mm]	S_{adotado} [mm]	W_k [mm]	Tensão no aço [MPa]	$\varnothing_{\text{adotado}}$ [mm]	S_{adotado} [mm]	W_k [mm]
160	20	215	0,26	320	20	215	0,63
	16	135	0,21		16	135	0,51
	12	77	0,16		12	77	0,40
	10	53	0,14		10	53	0,35
	8	34	0,12		8	34	0,30
200	20	215	0,32	360	20	215	0,74
	16	135	0,26		16	135	0,59
	12	77	0,20		12	77	0,47
	10	53	0,18		10	53	0,41
	8	34	0,15		8	34	0,35
240	20	215	0,41	400	20	215	0,84
	16	135	0,34		16	135	0,68
	12	77	0,27		12	77	0,54
	10	53	0,24		10	53	0,47
	8	34	0,20		8	34	0,40
280	20	215	0,52	450	20	215	0,98
	16	135	0,42		16	135	0,79
	12	77	0,34		12	77	0,62
	10	53	0,29		10	53	0,54
	8	34	0,25		8	34	0,46

Como seria de prever, a diminuição do diâmetro do varão implica uma diminuição da abertura das fendas.

Fisicamente, é fácil de perceber que, para uma área de armadura constante, no caso de se ter um menor diâmetro de varão, a superfície de contacto entre o aço e betão será maior, pois existe um maior número de varões. O facto de haver uma maior superfície de aderência aço-betão para quantidades de armadura semelhantes resulta, no essencial, numa menor distância entre fendas e, conseqüentemente, numa menor abertura de fendas.

No gráfico que se segue, é possível ter uma percepção mais direta dos comentários anteriores.

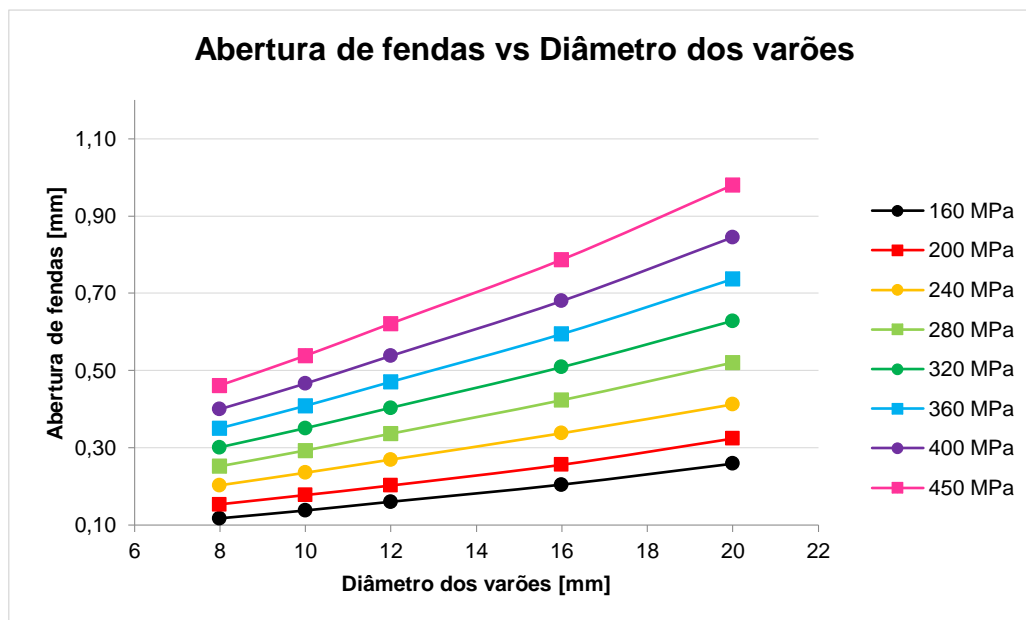


Figura 16 – Variação da abertura de fendas em função do diâmetro do varão.

A figura sugere que, para tensões de serviço mais elevadas, obtém-se um espectro largo para as aberturas de fendas para cada diâmetro de varão, enquanto que para tensões mais baixas é muito inferior. Exemplificando, para uma tensão de 450 MPa, obtém-se aberturas de fendas de 0,46 a 0,98 mm, enquanto que se a tensão for de 160 MPa, a variação das aberturas de fendas é entre 0,12 a 0,26 mm.

Assim, a escolha de um determinado diâmetro de varão torna-se muito mais sensível para tensões de serviço mais elevadas, sendo necessária maior atenção nesta decisão. Quando se trata de tensões de serviço inferiores, o limite da abertura de fendas pode ser assegurado para uma maior gama de diâmetros de varão.

4.3. Verificação dos quadros do controlo indireto para as deformações impostas

No que respeita às deformações impostas, um correto dimensionamento aos Estados Limites de Serviço passa por garantir a área de armadura necessária para uma determinada abertura de fendas máxima pretendida. O controlo indireto da fendilhação, segundo o EC2, admite um diâmetro máximo para estruturas sujeitas predominantemente a deformações impostas, consoante a tensão de serviço no aço.

O exemplo que se segue, cuja aplicação será realizada tanto para a flexão como para a tração, considera uma laje de 25 cm de altura. As armaduras obtidas, para cada nível de tensão no aço, encontram-se no quadro abaixo (Quadro 18), tal como as pormenorizações adotadas. Os diâmetros escolhidos pretendem garantir uma abertura máxima de 0,3 mm. No caso da tração, foi tido em conta um diâmetro máximo modificado, referido na página 21 desta dissertação (página 140 do EC2).

Quadro 18 – Áreas de armaduras adotadas para os dois tipos de esforços críticos.

Tensão no aço [MPa]	Flexão		Tração	
	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	$A_{s,adoptada}$ [cm ² /m]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$A_{s,adoptada}$ [cm ² /m/face]
160	9,06	Ø18//0,280 (9,09)	22,66	Ø20//0,138 (22,77)
200	7,25	Ø16//0,275 (7,31)	18,13	Ø18//0,140 (18,18)
240	6,04	Ø14//0,250 (6,16)	15,10	Ø14//0,100 (15,39)
280	5,18	Ø12//0,210 (5,39)	12,95	Ø10//0,060 (13,09)
320	4,53	Ø10//0,170 (4,62)	11,33	Ø8//0,044 (11,42)
360	4,03	Ø8//0,120 (4,19)	10,07	ØΦ7//0,038 (10,13)
400	3,63	Ø6//0,075 (3,77)	9,06	-
450	3,22	Ø5//0,055 (3,57)	8,06	-

No caso da tração, para as tensões de 400 e 450 MPa, não foi possível definir um espaçamento acima dos 35 mm para os diâmetros máximos exigidos pelo EC2. Refira-se que, mesmo para os níveis de tensão de 320 e 360 MPa, os espaçamentos já não têm sentido prático.

Os resultados obtidos para as aberturas de fendas estão apresentados nos quadros seguintes. Encontram-se, no Quadro 19, os resultados para o esforço de flexão simples e, no Quadro 20, para o esforço de tração pura.

Quadro 19 – Cálculo da abertura de fendas para o esforço de flexão.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,adoptada}$ [cm ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$s_{r,máx}$ [m]	w_k [mm]
160	9,09	0,012	0,0005	0,35	0,16
200	7,31	0,010	0,0006	0,38	0,22
240	6,16	0,008	0,0007	0,40	0,27
280	5,39	0,007	0,0008	0,40	0,32
320	4,62	0,006	0,0009	0,39	0,36
360	4,19	0,005	0,0010	0,36	0,37
400	3,77	0,005	0,0011	0,32	0,36
450	3,57	0,004	0,00130	0,29	0,37

Quadro 20 – Cálculo da abertura de fendas para o esforço de tração.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
160	22,77	0,023	0,0005	0,40	0,19
200	18,18	0,019	0,0006	0,43	0,27
240	15,39	0,017	0,0008	0,39	0,30
280	13,09	0,015	0,0009	0,33	0,31
320	11,42	0,013	0,0011	0,30	0,33
360	10,13	0,012	0,0012	0,30	0,36
400	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-

Uma observação aos resultados anteriormente obtidos permite aferir que a máxima abertura de fendas obtida se encontra num intervalo considerado adequado, variando um pouco acima e abaixo do valor limite definido inicialmente.

Conclui-se, assim, que os quadros regulamentares (EC2) estão bem concebidos para estruturas sujeitas predominantemente às deformações impostas, onde o esforço aplicado é definido pelos valores dos esforços de fendilhação, com base na expressão da área de armadura mínima.

A hipótese presente no Eurocódigo sugere que, para a tração, é possível utilizar um diâmetro maior para garantir um certo nível de abertura de fendas. Tal premissa foi anteriormente colocada em causa na medida em que a tração é mais desfavorável que a flexão, em termos de controlo da abertura de fendas. A adoção de um diâmetro de maiores dimensões na tração, para uma área de armadura, só poderia ser ainda mais desfavorável. No entanto, os quadros terão sido preparados numa óptica da acção ser uma deformação imposta e, nessa situação, no caso da tração pura, a área de armadura mínima necessária é bastante superior (cerca de 2,5 vezes maior). Assim, apesar da distância entre fendas ser da ordem de 2 vezes maior na tração, como se clarificou anteriormente, a relação percentagem/diâmetro, fundamental na definição da distância entre fendas, é de aproximadamente 1,25.

Verificou-se também que, especialmente para a tração, a imposição do limite de abertura de fendas de 0,3 mm para uma deformação imposta, implica a adoção de tensões da ordem de pelo menos 240 a 280 MPa, para se obter uma pormenorização de aplicação prática.

Diminuindo a tensão, a percentagem de armadura efetiva é maior pelo que se deve proceder ao aumento do diâmetro do varão. Verifica-se que a diferença entre extensões médias dos materiais apresenta uma diminuição significativa e o parâmetro $s_{r,m\acute{a}x}$ tem uma variação sem uma clara tendência.

4.4. Verificação dos quadros do controlo indireto para a flexão de cargas

Para o controlo indireto da fendilhação provocada predominantemente por ação de cargas, podem, de acordo com a regulamentação europeia, ser utilizados os dados referentes aos diâmetros máximos ou aos espaçamentos máximos entre varões (quadros da página 139 do EC2).

Neste subcapítulo serão analisados os dados relativos aos dois quadros no sentido de se analisar a sua aplicabilidade e fiabilidade prática.

Para os exemplos que se seguem, foi considerada a mesma laje de 25 cm de altura e uma área de armadura constante de 20 cm²/m sujeita à flexão. Os diâmetros e espaçamentos entre varões máximos adotados, para estes exemplos, correspondem a uma largura de fendas máxima de 0,3 mm.

4.4.1. Diâmetros máximos dos varões

Antes de se iniciar a avaliação pretendida, procedeu-se à verificação da área de armadura mínima para cada nível de tensão, de forma a cumprir este requisito.

Os diâmetros e espaçamentos adotados para as diferentes tensões no aço encontram-se definidos no Quadro 21.

Quadro 21 – Pormenorizações e áreas de armadura adotadas.

Tensão no aço [MPa]	ϕ_{adotado} [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotada}}$ [cm ² /m]	$P_{p,\text{eff}}$
160	25	245	20,04	0,032
200	25	245	20,04	0,032
240	16	100	20,11	0,032
280	12	56	20,20	0,033
320	10	39	20,14	0,033
360	8	-	-	-
400	6	-	-	-
450	5	-	-	-

Como é de fácil constatação, no caso de tensões elevadas, cumprindo o diâmetro máximo exigido pelos quadros do controlo indireto, é impossível encontrar um espaçamento entre varões para perfazer uma área de armadura de 20 cm²/m. Para estas pormenorizações, os resultados obtidos para o cálculo da abertura de fendas encontram-se discriminados no Quadro 22, com os valores de alguns parâmetros parcelares.

A abertura de fendas máxima obtida nestes casos, apesar de se encontrar dentro do limite pretendido, é significativamente inferior a 0,3 mm. Poder-se-iam, assim, adotar diâmetros mais elevados e, portanto, espaçamentos superiores, obtendo-se igualmente valores dentro do limite máximo de 0,3 mm de largura. Conclui-se, portanto, que os dados dos quadros em análise são desnecessariamente conservativos nesta situação concreta de ação de cargas, transmitindo a ideia de um condicionamento escusado, em particular para tensões mais elevadas.

Quadro 22 – Abertura de fendas numa laje de 25 cm com 20 cm²/m de armadura, sujeita à flexão.

Tensão no aço [MPa]	A _{s,adotada} [cm ² /m]	ρ _{p,eff}	ε _{srm}	S _{r,máx} [m]	W _k [mm]
160	20,04	0,032	0,0006	0,23	0,13
200	20,04	0,032	0,0007	0,23	0,17
240	20,11	0,032	0,0009	0,19	0,17
280	20,20	0,033	0,0011	0,16	0,19
320	20,14	0,033	0,0013	0,15	0,20
360	-	-	-	-	-
400	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-

4.4.2. Espaçamento máximo entre varões

No que respeita aos espaçamentos máximos, foram adotados os valores dos quadros, os quais foram posteriormente ajustados para que a área de armadura adotada fosse o mais próxima possível do valor pretendido. Os valores adotados para os espaçamentos (Quadro 23) são novamente meramente académicos, não tendo sentido em termos da prática da Engenharia.

Quadro 23 – Pormenorizações e áreas de armadura adotadas.

Tensão no aço [MPa]	Ø _{adotado} [mm]	S _{adotado} [mm]	A _{s,adotada} [cm ² /m]	ρ _{p,eff}
160	27	286	20,02	0,032
200	25	245	20,04	0,032
240	22	190	20,01	0,032
280	19	141	20,11	0,032
320	16	100	20,11	0,032
360	11	47	20,22	0,033
400	6	-	-	-
450	5	-	-	-

Também neste caso, utilizando os valores presentes nos quadros, não é possível encontrar uma pormenorização para tensões no aço mais elevadas, tratando-se, no entanto, de níveis de tensão raramente atingidos em serviço, para a ação de cargas.

As aberturas de fendas obtidas através das pormenorizações adotadas encontram-se no quadro seguinte (Quadro 24).

Tal como no caso anterior, as aberturas de fendas que se obtêm, para os máximos espaçamentos entre varões, verificam o limite pretendido, embora os valores se mantenham conservativos.

Quadro 24 – Largura de fendas numa laje de 25 cm com 20 cm²/m de armadura, sujeita à flexão.

Tensão no aço [MPa]	A _{s,adotada} [cm ² /m]	ρ _{p,eff}	ε _{srm}	S _{r,máx} [m]	W _k [mm]
160	20,02	0,032	0,0006	0,24	0,14
200	20,04	0,032	0,0007	0,23	0,17
240	20,01	0,032	0,0009	0,22	0,20
280	20,11	0,032	0,0011	0,20	0,23
320	20,11	0,032	0,0013	0,19	0,24
360	20,22	0,033	0,0015	0,16	0,24
400	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-

Pode assim concluir-se que o controlo indireto da fendilhação do EC2, em casos de flexão provocada por cargas aplicadas, e com percentagens de armadura médias a elevadas, é demasiado conservativo.

Na prática corrente da Engenharia Civil pretende-se chegar a uma solução eficiente com o menor custo possível. Fazendo uso dos dados dos quadros, pode chegar-se à conclusão da ineficiência de soluções de pormenorização do ponto de vista do controlo da fendilhação, quando efectivamente não é o caso. Naturalmente que se pode argumentar que é normal estas disposições serem conservativas por natureza, no entanto crê-se que é demasiado, condicionando mal decisões de pormenorização.

4.5. Verificação dos quadros do controlo indireto para a tração de cargas

Os quadros do controlo indireto da fendilhação, presentes na parte 1 do Eurocódigo 2, podem ser aplicados a estruturas sujeitas a esforços de tração aplicando uma equação que permite a calibração dos diâmetros máximos, como descrito anteriormente. Em relação aos espaçamentos máximos entre varões, não existe, porém, nenhum fator de calibração, pelo que serão usados os valores presentes nos quadros, da mesma forma que foram utilizados para o esforço de flexão no subcapítulo anterior.

4.5.1. Diâmetro máximo dos varões

Para avaliar os dados presentes nos quadros do EC2 – parte 1 para a tração, foi elaborado um pequeno exemplo para comparar as aberturas de fendas obtidas usando os valores diretamente dos quadros e estes mesmos dados multiplicados por 1,25.

Foi admitida uma laje de 25 cm de altura, com uma área de armadura de 25 cm²/m, para cada nível de tensão. Com esta armadura foram concebidos dois casos com pormenorizações distintas, a primeira tendo por base os diâmetros dos quadros do controlo indireto (para uma abertura máxima de 0,3 mm) – Caso 1, e a segunda um diâmetro de varão modificado multiplicado pelo fator 1,25 – Caso 2.

As pormenorizações adotadas encontram-se no Quadro 25 e Quadro 26 para os diâmetros máximos presentes nos quadros e para os diâmetros modificados, respetivamente.

Quadro 25 – Pormenorizações adotadas com base nos diâmetros máximos das tabelas – Caso 1.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$\emptyset_{adotado}$ [mm]	$S_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]
160	22,66	25	195	25,17
200	18,13	25	195	25,17
240	15,10	16	80	25,13
280	12,95	12	45	25,13
320	11,33	10	-	-
360	10,07	8	-	-
400	9,06	6	-	-
450	8,06	5	-	-

Quadro 26 – Pormenorizações adotadas com base nos diâmetros máximos modificados – Caso 2.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$\emptyset_{modificado}$ [mm]	$\emptyset_{adotado}$ [mm]	$S_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]
160	22,66	40	25	195	25,17
200	18,13	31	25	195	25,17
240	15,10	20	20	125	25,13
280	12,95	15	14	60	25,66
320	11,33	13	12	45	25,13
360	10,07	10	10	-	-
400	9,06	8	8	-	-
450	8,06	6	6	-	-

Note-se que nem todos os espaçamentos adotados nas pormenorizações têm valores considerados adequados. No entanto, o objetivo deste exemplo é académico, tendo a escolha do espaçamento como objetivo perfazer a área de armadura mínima necessária ao controlo da abertura de fendas.

As aberturas de fendas obtidas estão no Quadro 27 e Quadro 28 para os casos 1 e 2, respetivamente.

Quadro 27 – Cálculo da abertura de fendas - Caso 1.

Tensão no aço [MPa]	$\varnothing_{\text{adotado}}$ [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotada}}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,\text{eff}}$	ϵ_{srm}	$S_{r,\text{máx}}$ [m]	W_k [mm]
160	25	195	25,17	0,024	0,0005	0,46	0,23
200	25	195	25,17	0,024	0,0007	0,46	0,31
240	16	80	25,13	0,026	0,0009	0,31	0,28
280	12	45	25,13	0,028	0,0011	0,25	0,27
320	10	-	-	-	-	-	-
360	8	-	-	-	-	-	-
400	6	-	-	-	-	-	-
450	5	-	-	-	-	-	-

Quadro 28 – Cálculo da aberturas de fendas - Caso 2.

Tensão no aço [MPa]	$\varnothing_{\text{modificado}}$ [mm]	$\varnothing_{\text{adotado}}$ [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotado}}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,\text{eff}}$	ϵ_{srm}	$S_{r,\text{máx}}$ [m]	W_k [mm]
160	40	25	195	25,17	0,024	0,0005	0,46	0,23
200	31	25	195	25,17	0,024	0,0007	0,46	0,31
240	20	20	125	25,13	0,025	0,0009	0,37	0,33
280	15	14	60	25,66	0,028	0,0011	0,27	0,30
320	13	12	45	25,13	0,028	0,0013	0,25	0,32
360	10	10	-	-	-	-	-	-
400	8	8	-	-	-	-	-	-
450	6	6	-	-	-	-	-	-

Como se pode observar, as larguras de fendas obtidas em ambos os casos estão dentro dos limites admissíveis. Seria também de prever que, no Caso 2, se obtivessem valores superiores aos do Caso 1, uma vez que é maior o diâmetro do varão. Como em ambos os casos a área de armadura é a mesma, a um diâmetro menor corresponde uma maior área de superfície de contacto, pelo que a abertura de fendas é inferior.

No entanto, tanto num caso como no outro, para tensões de serviço mais elevadas não existe pormenorização possível, devido à limitação do diâmetro do varão.

Sendo o esforço de tração mais condicionante que o de flexão, seria de prever que o diâmetro fosse ainda mais reduzido. No entanto, como analisado anteriormente, a área de armadura mínima necessária na tracção é superior, pelo que é possível adotar um diâmetro maior e obter aberturas de fendas da mesma gama que na flexão com diâmetros inferiores. De facto com maior área de armadura, há um aumento de $\rho_{p,\text{eff}}$ e uma diminuição significativa da distância máxima entre fendas ($S_{r,\text{máx}}$), que é mais significativa que o aumento de k_2 de 0,5 para 1,0.

4.5.2. Espaçamento máximo entre varões

Em relação aos espaçamentos máximos entre varões apresentados no controlo indireto do EC2, o exercício realizado foi muito semelhante. A altura de laje considerada foi 25cm, com uma área de

armadura de 25cm²/m. No quadro abaixo, encontram-se as pormenorizações e áreas de armadura adotadas.

Quadro 29 – Pormenorizações adotadas com base nos espaçamentos máximos do controlo indireto.

Tensão no aço [MPa]	Ø _{adotado} [mm]	S _{adotado} [mm]	A _{s,adotada} [cm ² /m/face]
160	31	300	25,16
200	28	240	25,66
240	25	190	25,84
280	22	150	25,34
320	18	100	25,45
360	12,5	50	24,54
400	-	-	-
450	-	-	-

As áreas de armadura adotadas para cada nível de tensão de serviço apresentam alguma variação, embora não sejam significativas.

Quadro 30 – Cálculo da abertura de fendas.

Tensão no aço [MPa]	Ø _{adotado} [mm]	S _{adotado} [mm]	A _{s,adotada} [cm ² /m/face]	ρ _{p,eff}	ε _{srm}	S _{r,máx} [m]	W _k [mm]
160	31	300	25,16	0,022	0,0005	0,5785	0,27
200	28	240	25,66	0,023	0,0007	0,5102	0,35
240	25	190	25,84	0,024	0,0009	0,4516	0,40
280	22	150	25,34	0,025	0,0011	0,4045	0,43
320	18	100	25,45	0,026	0,0013	0,3365	0,43
360	12,5	50	24,54	0,027	0,0015	0,2589	0,38
400	-	-	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-	-	-

Com os resultados obtidos, pode concluir-se que existe uma variação importante nas aberturas de fendas obtidas, de 0,27 mm a 0,43 mm. Neste caso específico, existem espaçamentos máximos entre varões que resultam em aberturas de fendas que ultrapassam os limites admissíveis.

Neste caso, como nos anteriores, a limitação do espaçamento impede a escolha de uma pormenorização para tensões de serviço elevadas.

Através da elaboração dos exemplos para o esforço de tração pura, devido a cargas aplicadas, percebe-se que a abertura de fendas obtida para as diferentes análises apresentam um valor superior relativamente à da flexão simples, tendo como referência o controlo indireto.

4.6. Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3

Na parte 3 do Eurocódigo 2 “Reservatórios e Silos” apresentam-se duas figuras com gráficos relativos aos diâmetros e espaçamentos máximos que se devem adotar com o intuito de obter uma determinada abertura máxima de fendas, apenas para o esforço de tração e, claramente, pensados para a situação corrente de efeitos de deformações impostas, sendo este o efeito mais importante para aquelas estruturas.

Estes gráficos possuem quatro curvas diferentes para as larguras de fendas de 0,05; 0,1; 0,2 e 0,3 mm. Tais figuras apresentam curvas com exigências de aberturas de fendas menores em relação ao caso da parte 1 do EC2, uma vez que os reservatórios e os silos são estruturas especiais onde são necessárias maiores restrições à abertura de fendas de forma a garantir níveis adequados de estanqueidade (Figura 17 e Figura 18).

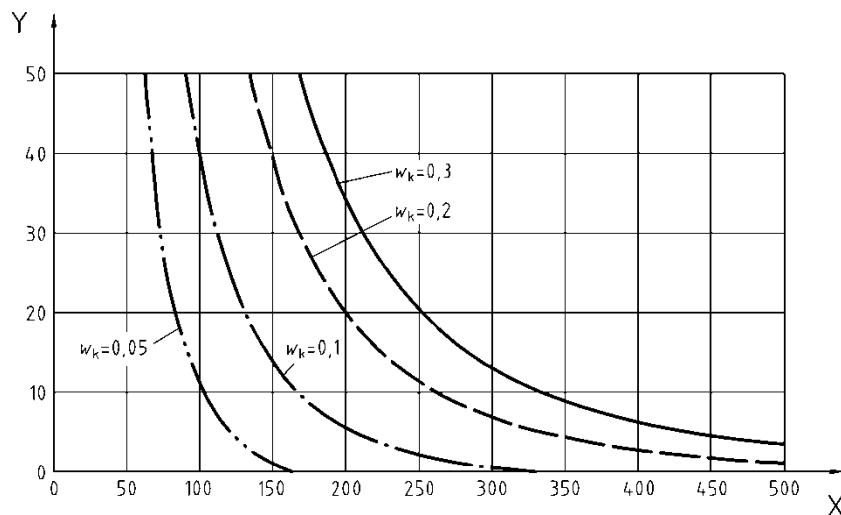


Figura 17 – Diâmetro máximo dos varões, em função da tensão no aço. [9]

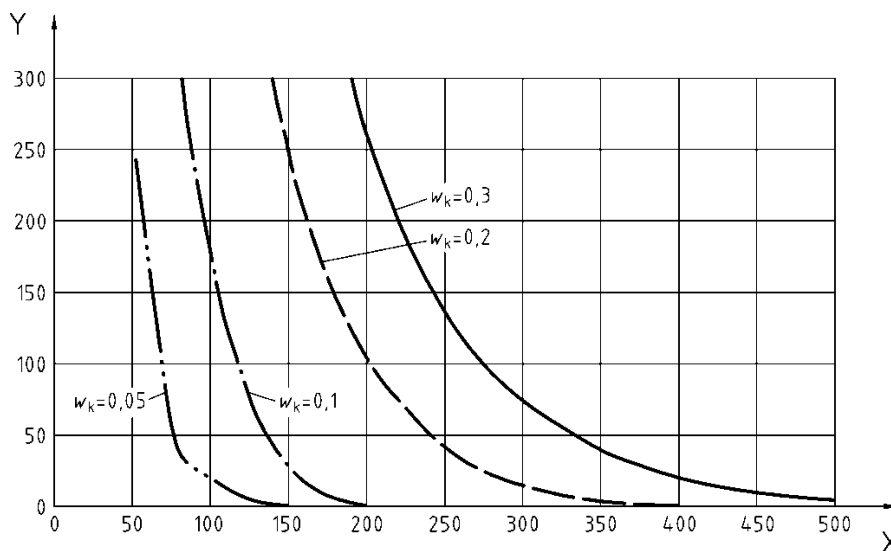


Figura 18 – Espaçamento máximo entre varões, em função da tensão no aço. [9]

Foi realizada uma comparação entre os valores máximos dos varões do EC2, parte 1 e parte 3. Os resultados obtidos podem ser observados na figura que se segue (Figura 19).

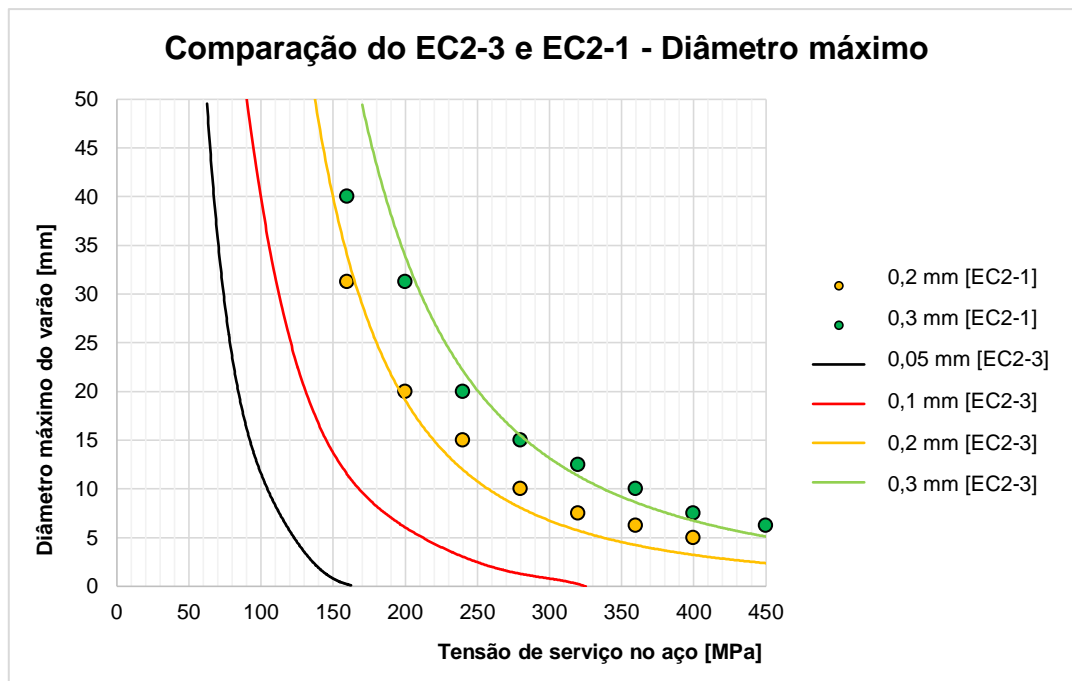


Figura 19 – Comparação dos dados do EC2 da parte 3 com a parte 1, para o diâmetro máximo dos varões.

Para os valores da Figura 19, relativos ao EC2 parte 1, foi utilizado o fator de calibração anteriormente indicado de 1,25 para os diâmetros dos varões sujeitos à tração.

Na figura é notória a coerência entre a parte 3 e a parte 1, referente aos diâmetros máximos dos varões. A análise gráfica da figura sugere que os pontos se vão dispendo à direita e à esquerda da curva, sem nunca se afastarem para valores muito diferentes das curvas em questão.

De seguida, apresenta-se a verificação dos valores relativos aos diâmetros e espaçamentos máximos, representados nos gráficos anteriores (Figura 17 e Figura 18). Na execução destes exemplos foi considerada, também, como base uma laje de 25 cm de altura.

4.6.1. Diâmetro máximo dos varões

O presente exemplo foi realizado para aberturas de fendas de 0,05; 0,1; 0,2 e 0,3 mm. A área de armadura utilizada foi a armadura mínima para cada nível de tensão. As pormenorizações de armadura obtidas, bem como as larguras de fendas resultantes, são apresentadas nos quadros seguintes.

Quadro 31 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,3 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$\varnothing_{adotado}$ [mm]	$S_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	50	-	-	-	-	-	-
200	18,13	35	-	-	-	-	-	-
240	15,10	22	250	15,21	0,055	0,0010	0,20	0,20
280	12,95	16	155	12,97	0,065	0,0012	0,19	0,23
320	11,33	12	100	11,31	0,075	0,0014	0,17	0,25
360	10,07	8	50	10,05	0,101	0,0016	0,16	0,25
400	9,06	6	-	-	-	-	-	-
450	8,06	5	-	-	-	-	-	-

Quadro 32 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,2 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$\varnothing_{adotado}$ [mm]	$S_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	32	-	-	-	-	-	-
200	18,13	20	170	18,48	0,074	0,0008	0,18	0,15
240	15,10	12	74	15,28	0,102	0,0011	0,16	0,16
280	12,95	8	38	13,23	0,132	0,0013	0,14	0,18
320	11,33	6	-	-	-	-	-	-
360	10,07	5	-	-	-	-	-	-

Quadro 33 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,1 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$\varnothing_{adotado}$ [mm]	$S_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	12	50	22,62	0,151	0,0007	0,14	0,09
200	18,13	6	-	-	-	-	-	-

Como se pode observar, os valores limite da largura de fendas são cumpridos em todos os casos. À medida que são necessários limites de larguras de fendas mais reduzidos, torna-se mais difícil de encontrar um diâmetro de varão e o respetivo espaçamento que consiga garantir esse limite, cumprindo o limite máximo dado pelo gráfico. Para o caso de uma abertura de fendas de 0,05 mm, não foi sequer possível encontrar uma pormenorização para os níveis de tensão adotados, sendo claro que para objetivos muito exigentes de estanqueidade então a solução é recorrer ao pré-esforço. Uma última ilação a referir será a de que é possível observar a existência de alguma folga na largura de fendas obtida em alguns casos, embora esta não seja significativa.

4.6.2. Espaçamento máximo entre varões

Para o caso dos espaçamentos máximos, o exercício realizado foi semelhante ao anterior. Os resultados obtidos para as diferentes tensões e curvas encontram-se nos quadros seguintes.

Quadro 34 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,3 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$\varnothing_{adotado}$ [mm]	$S_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	29	290	22,78	0,063	0,0006	0,19	0,12
200	18,13	24	245	18,46	0,062	0,0008	0,19	0,16
240	15,10	17	150	15,13	0,071	0,0010	0,18	0,18
280	12,95	12	87	13,00	0,087	0,0012	0,16	0,20
320	11,33	9	55	11,57	0,103	0,0014	0,15	0,22
360	10,07	7	38	10,13	0,116	0,0016	0,15	0,24

Quadro 35 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,2 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$\varnothing_{adotado}$ [mm]	$S_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	25	215	22,83	0,073	0,0006	0,18	0,11
200	18,13	15	95	18,60	0,099	0,0009	0,16	0,13
240	15,10	9	42	15,15	0,135	0,0011	0,14	0,15
280	12,95	8	30	16,76	0,168	0,0013	0,13	0,17

Quadro 36 – Cálculo da abertura de fendas para fenda máxima de 0,1 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m/face]	$\varnothing_{adotado}$ [mm]	$S_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	10	35	22,44	0,180	0,0007	0,13	0,09

Tal como no exemplo anterior, os limites máximos estabelecidos foram cumpridos, recorrendo-se à parte 3 do EC2. Mais uma vez, para as tensões admitidas, não foi possível encontrar uma pormenorização para o limite de largura de fendas de 0,05 mm.

Estas últimas análises, referentes à avaliação dos quadros do diâmetro e do espaçamento máximo foram realizadas tendo em conta apenas a área de armadura mínima visto que, para este tipo de estruturas, a situação mais condicionante é, por norma, os efeitos das deformações impostas.

4.7. Elaboração de gráficos alternativos

Através das análises anteriores, conclui-se que os quadros do controlo indireto da fendilhação, embora apresentem valores bastante aceitáveis - e dentro dos limites admissíveis - para lajes sujeitas essencialmente a deformações impostas (subcapítulo 4.3) e, portanto, com baixas percentagens de armadura, tornam-se bastante conservativos no caso de estruturas sujeitas a cargas aplicadas (subcapítulos 4.4 e 4.5), muitas vezes com taxas superiores de aço.

Para corrigir esta indicação recorreu-se à elaboração de dois tipos distintos de gráficos:

- Gráficos *Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões* – concebidos para aplicação específica em lajes, correlacionando os diâmetros dos ferros e os espaçamentos máximos dos varões, em função da tensão de serviço no aço. Porém, dependem da área de armadura para aumentar a assertividade da consulta, sendo este parâmetro apresentado em cm²/m.

Deste modo, o utilizador chega rapidamente a uma pormenorização adequada para a área de armadura que necessita independentemente de se tratar de uma situação dependente de cargas aplicadas ou deformações impostas.

- Gráficos *Diâmetro dos varões vs Percentagem efetiva de armadura* – generalizados para aplicação em qualquer elemento estrutural, correlacionando os diâmetros dos varões e a percentagem efetiva de armadura, em função da tensão de serviço no aço. Ao contrário dos gráficos anteriores, estes poderão ser aplicados a vigas uma vez que não consideram o espaçamento entre varões, parâmetro que está condicionado devido à geometria do elemento.

4.7.1. Gráficos *Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões*

Conceberam-se estes gráficos com base numa laje de betão armado com 30 cm de altura, apresentando bons resultados para lajes de diferentes alturas, para tensões de serviço normais (160 MPa a 320 MPa).

Procedeu-se, pois, à representação de seis gráficos distintos: três para a flexão e três para a tração, para cada limite de abertura de fendas diferente (0,2; 0,3 e 0,4 mm). Com o objetivo de tornar os gráficos adimensionais, procedeu-se igualmente à sua representação utilizando a percentagem efetiva de armadura em detrimento da área de armadura necessária.

Neste subcapítulo apenas se apresentará o gráfico correspondente à abertura de fendas de 0,3 mm (Figura 20) para a flexão, estando todos os outros casos apresentados em anexo. Nos anexos F.1 e F.2 encontram-se os gráficos em função da área de armadura e nos anexos F.3 e F.4 os mesmos gráficos em função da percentagem efetiva de armadura.

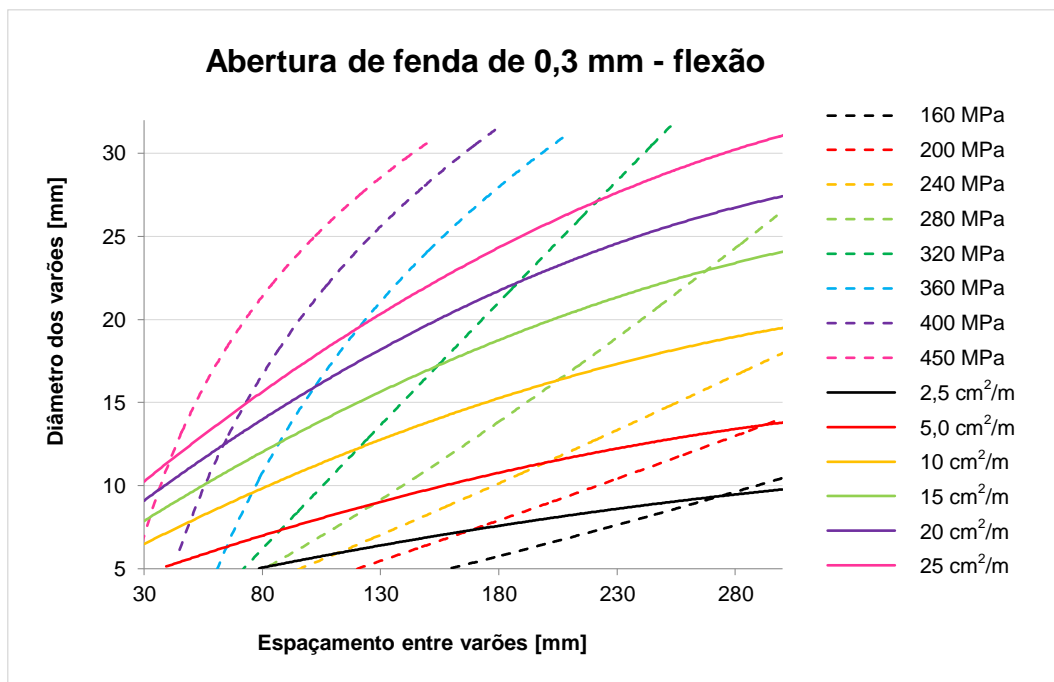


Figura 20 – Correlação entre diâmetro e espaçamento dos varões, para uma largura de fenda de 0,3 mm.

Pela consulta do gráfico anterior, torna-se evidente que existe um grande espectro de combinações de diâmetros e espaçamentos que permitem obter uma abertura de fendas limite de 0,3 mm, para diferentes tensões de serviço no aço. Este é um dos aspetos que se colocou em causa no início desta dissertação, isto é, como pode ser razoável não considerar a área de armadura necessária para se ter uma resposta fiável na opção a tomar.

Os quadros do EC2 podem conduzir, como se concluiu anteriormente, à adoção de diâmetros muito pequenos e, conseqüentemente, a espaçamentos reduzidos que levam a pormenorizações fora do normal ou até mesmo não haver um espaçamento possível para o diâmetro máximo tabelado.

Nos quadros regulamentares verificou-se que embora a largura de fendas fique, em geral, dentro dos limites pretendidos para a largura de fendas, poder-se-iam adotar diâmetros e espaçamentos maiores sem colocar em causa o referido limite.

Exemplificando, para o caso de uma tensão de serviço de 320 MPa e uma área de armadura de 15 cm²/m, o gráfico deve ser lido da seguinte maneira:

- Determina-se o ponto de interseção – assinalado na Figura 21 com um “X” – entre a curva correspondente à tensão pretendida e a curva relativa à área de armadura necessária para garantir o cumprimento dos ELU;
- Determinado este ponto de interseção, a gama de pormenorizações possíveis corresponde à região do gráfico delimitada pelas curvas intersectadas, o eixo das ordenadas e o limite superior do gráfico (região a amarelo, na Figura 21).

Recorrendo a este gráfico, é possível compreender claramente as implicações da opção a tomar, pelo que a decisão resultante apresentará uma maior fiabilidade.

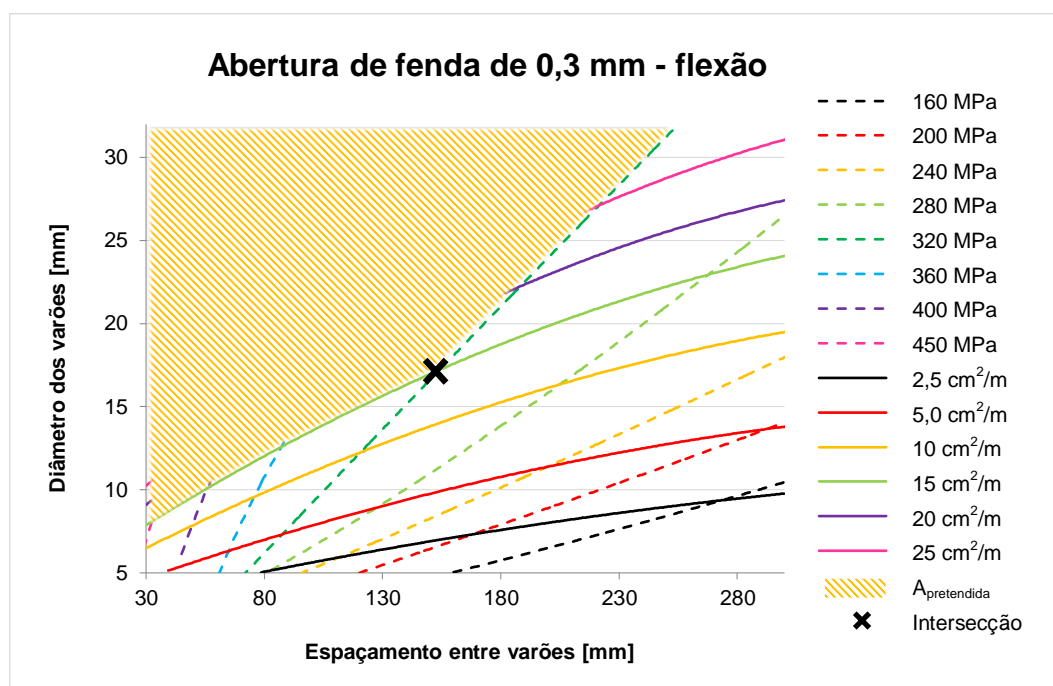


Figura 21 – Determinação gráfica da gama de pormenorizações possíveis, para uma tensão de serviço de 320 MPa e uma área de armadura de 15 cm²/m.

Com o intuito de comprovar a aplicabilidade e a fiabilidade dos gráficos anteriormente elaborados, concebeu-se um exemplo onde foram comparados os resultados obtidos com a informação correspondente ao controlo indireto da fendilhação, presente no EC2. Neste caso, o gráfico utilizado é aquele que correlaciona o espaçamento entre varões e o diâmetro dos varões, aplicável a lajes.

Neste sentido, realizou-se um exemplo para uma laje com 20cm de altura com uma área de armadura de $15\text{cm}^2/\text{m}/\text{face}$, para as diferentes tensões de serviço no aço, para uma abertura de fendas máxima de 0,3mm.

Encontram-se indicadas nos quadros abaixo as pormenorizações adotadas para ambos os casos e a largura de fendas obtida.

Quadro 37 – Largura de fendas com base nos resultados do gráfico.

Tensão no aço [MPa]	ϕ_{adotado} [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotada}}$ [$\text{cm}^2/\text{m}/\text{face}$]	$\rho_{p,\text{eff}}$	$S_{r,\text{máx}}$ [m]	ϵ_{srm}	W_k [mm]
160	-	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-
280	23	260	15,98	0,032	0,22	0,0011	0,25
320	17	150	15,13	0,030	0,20	0,0013	0,26
360	13	90	14,75	0,029	0,18	0,0015	0,27
400	10	50	15,71	0,032	0,16	0,0017	0,26
450	8	33	15,23	0,030	0,15	0,0019	0,28

Quadro 38 – Largura de fendas com base nos quadros do EC2.

Tensão no aço [MPa]	ϕ_{adotado} [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotada}}$ [$\text{cm}^2/\text{m}/\text{face}$]	$\rho_{p,\text{eff}}$	$S_{r,\text{máx}}$ [m]	ϵ_{srm}	W_k [mm]
160	-	-	-	-	-	-	-
200	25	300	16,36	0,033	0,23	0,0007	0,17
240	16	130	15,47	0,031	0,19	0,0009	0,18
280	12	75	15,08	0,030	0,17	0,0011	0,19
320	10	50	15,71	0,032	0,16	0,0013	0,20
360	8	33	15,23	0,030	0,15	0,0015	0,22
400	6	-	-	-	-	-	-
450	5	-	-	-	-	-	-

A observação do primeiro quadro permite verificar que a largura de fendas obtida pela aplicação do gráfico anterior se encontra dentro do limite pretendido. Para tensões de serviço mais baixas, os valores da largura de fendas são ainda mais folgados relativamente ao limite admissível, podendo usar-se qualquer pormenorização.

Conclui-se que é notória a diferença nos valores das larguras de fendas quando se compara a aplicação dos quadros do controlo indireto com os gráficos propostos nesta dissertação. Para níveis

de tensões mais elevados, não é possível adotar os diâmetros máximos indicados nos quadros, pois não existem espaçamentos viáveis que perfaçam a área de armadura necessária.

Pretende-se, deste modo, demonstrar que os quadros do EC2 são fundamentalmente vocacionados para o caso das ações predominantes serem as deformações impostas e, portanto, com percentagens de armadura baixas a moderadas. Quando as ações predominantes passam a ser as cargas aplicadas e com maiores percentagens de armadura, estes quadros são demasiado conservativos e podem desaconselhar determinadas pormenorizações, quando seriam possíveis. É de notar, que o facto anteriormente descrito ganha especial relevância no caso da flexão.

Posteriormente, realizou-se uma comparação entre estes gráficos e a informação relativa aos diâmetros máximos dos varões, presente no EC2. Encontram-se assinalados nas figuras seguintes os diâmetros máximos dos varões, em função da tensão no aço, com o intuito de compreender em que gama de valores da área de armadura estes se encontram. Esta análise foi efetuada para as aberturas de fendas máximas de 0,2, 0,3 e 0,4 mm, para o caso da flexão e tração.

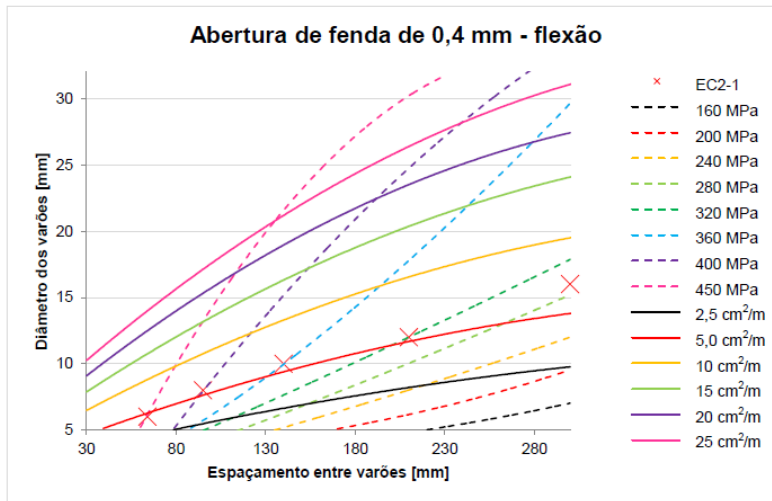


Figura 22 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,4 mm, com os diâmetros máximos do controle indireto do EC2, para a flexão.

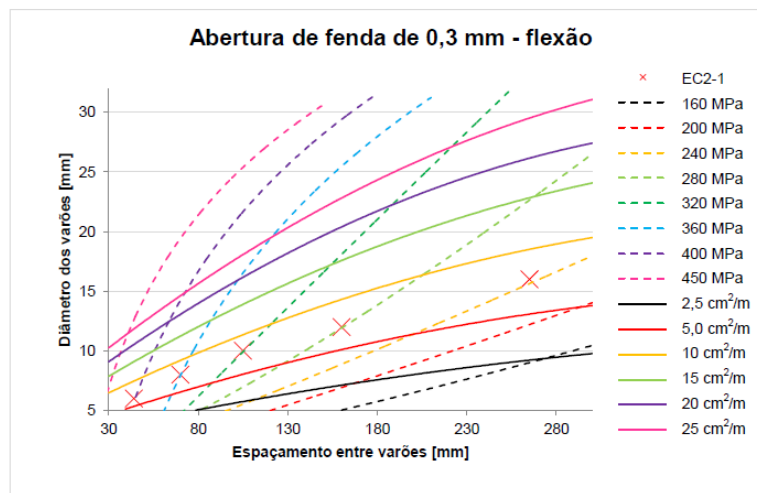


Figura 23 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,3 mm, com os diâmetros máximos do controle indireto do EC2, para a flexão.

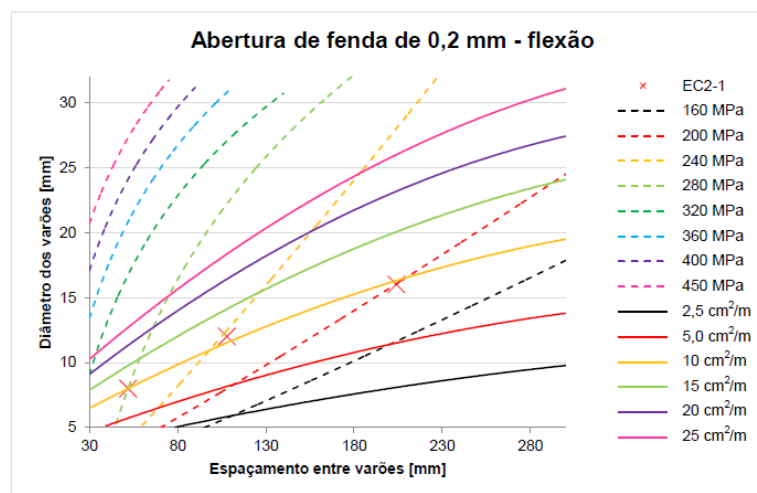


Figura 24 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,2 mm, com os diâmetros máximos do controle indireto do EC2, para a flexão.

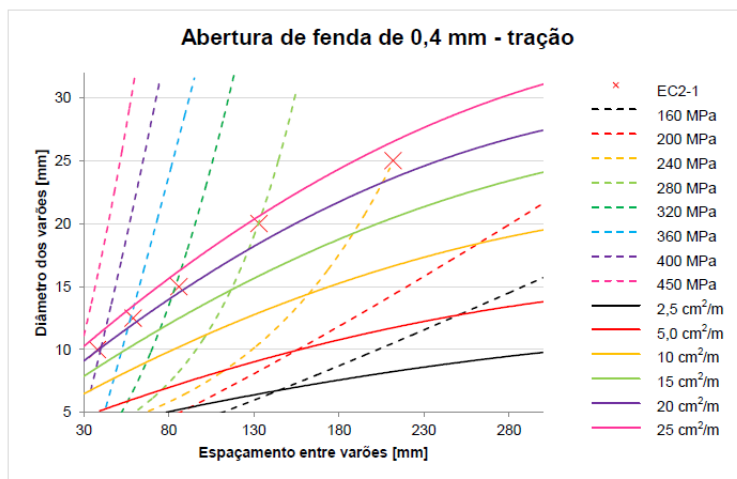


Figura 25 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,4 mm, com os diâmetros máximos do controle indireto do EC2, para a tração.

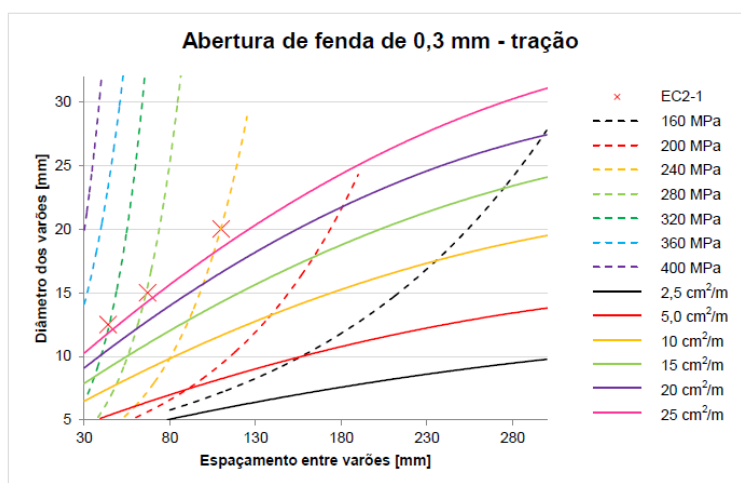


Figura 26 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,3 mm, com os diâmetros máximos do controle indireto do EC2, para a tração.

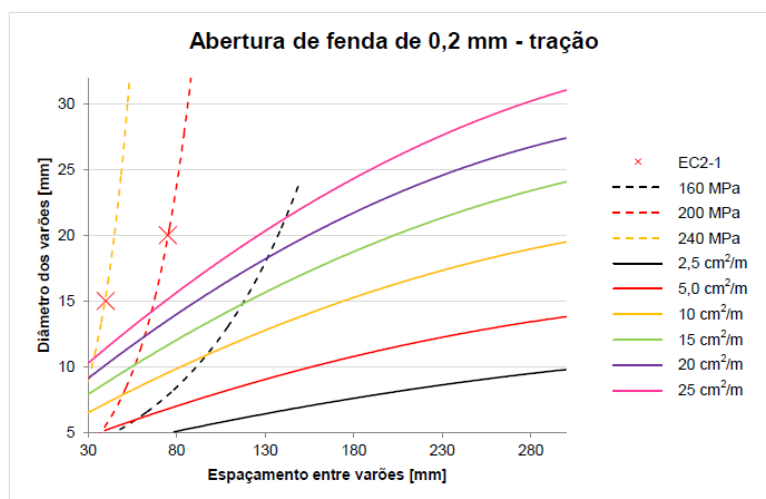


Figura 27 - Comparação dos gráficos que correlacionam os diâmetros e espaçamentos dos varões para a largura de fendas de 0,2 mm, com os diâmetros máximos do controle indireto do EC2, para a tração.

Verifica-se que os diâmetros máximos, presentes no controlo indireto da fendilhação regulamentar, localizam-se em valores de área de armadura reduzidos, de 5 a 10 cm²/m, no caso da flexão. Esta conclusão tinha sido obtida anteriormente, através dos valores obtidos para deformações impostas. No caso da tração, como seria de supor, as áreas de armadura obtidas para os diâmetros máximos presentes no EC2 são, naturalmente, maiores (acima de 20/25 cm²/m), visto que a área de armadura necessária numa face da laje é bastante superior que no caso da flexão. Observando os valores assinalados nos gráficos, podemos perceber que a área de armadura necessária para a tração é três vezes maior que a da flexão. Para comprovar a veracidade desta afirmação, foi efetuado um exemplo para abertura máxima de 0,3 mm, para uma tensão em serviço de 320 MPa. No quadro que se segue apresentam-se as pormenorizações sugeridas pelos gráficos e as respectivas aberturas de fendas.

Quadro 39 – Cálculo da abertura de fendas para os pares diâmetro/espacamento dos varões dos gráficos.

Esforço	Tensão no aço [MPa]	$\phi_{adotado}$ [mm]	$s_{adotado}$ [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m/face]	$\rho_{p,eff}$	$s_{r,m\acute{a}x}$ [m]	$\epsilon_{sr,m}$	W_k [mm]
Flexão	320	16	150	13,40	0,016	0,272	0,0011	0,30
Tração	320	16	45	44,68	0,047	0,218	0,0014	0,31

Como se pode observar, as aberturas de fendas obtidas para os dois casos apresentam valores muito satisfatórios e confirmam que a área de armadura necessária para a tração, para uma mesma tensão de serviço, é superior a 3 (neste caso em particular 3,3).

4.7.2. Gráficos Diâmetro dos varões vs Percentagem efetiva de armadura

Para o caso particular das vigas, e devido às diferentes variáveis que são precisas ter em conta, realizaram-se gráficos em que apenas se dispõem os diâmetros máximos dos varões em função da área/percentagem efetiva de armadura. Tais gráficos permitem encontrar o diâmetro máximo possível de usar para determinadas tensão de serviço e área de armadura. Estes gráficos apresentam a vantagem de poderem ser usados para qualquer elemento de betão armado.

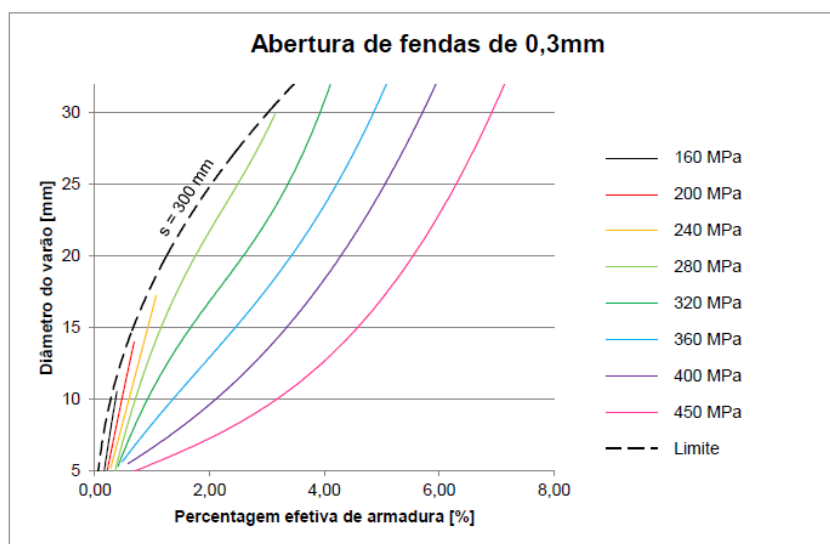


Figura 28 - Correlação entre diâmetro do varão e área de armadura, para uma largura de fenda de 0,3 mm.

Estes gráficos, tal como no caso anterior, foram elaborados para a flexão e para a tração, para as aberturas de fendas de 0,2; 0,3 e 0,4mm, tendo por base o caso explicitado anteriormente para as lajes. Observando o gráfico anterior, Figura 28, é possível perceber que, para tensões de serviço mais elevadas, a limitação dos diâmetros máximos dos varões é maior. Por este motivo, a escolha de um determinado diâmetro torna-se mais sensível para uma tensão de serviço mais elevada. A linha a tracejado, representada no gráfico, delimita a zona em que o espaçamento dos varões seria superior a 300 mm. Espaçamentos superiores a este valor são desaconselhados visto que o varão deixa de ter influência no controlo da abertura da fenda sobre o betão mais afastado dos ferros.

Capítulo 5.

Conclusões

A presente dissertação permitiu a análise de diversos aspetos relativos ao controlo do fenómeno da fendilhação e, em particular, da abertura de fendas em estruturas de betão armado.

Este trabalho teve como objetivo inicial analisar a consistência do processo do controlo indireto da fendilhação na regulamentação europeia, com avaliação da diferenciação entre os efeitos das cargas e das deformações impostas, tendo sido avaliados diferentes parâmetros que afetam a abertura de fendas.

Estas análises vieram confirmar que o esforço de tração pura é mais gravoso no contexto do controlo da abertura de fendas que o esforço de flexão simples, na medida em que o elemento se encontra todo tracionado e a distância entre fendas tende a ser maior.

A altura da laje revelou-se um parâmetro com pouca importância nesta análise, uma vez que a abertura de fendas analisada por estas expressões é relativa à fendilhação controlada pelas armaduras. No caso particular de vigas altas (a partir de 0,8 ou 0,9 m), é necessário, por um lado, considerar o controlo de fendas na zona tracionada como uma situação de “quase” tração pura e, por outro lado, ter em conta o controlo da abertura de fendas nas faces laterais da alma. Se este último aspeto for ignorado, poderão surgir fendas não admissíveis nas almas por efeito da deformação imposta a esta zona, pela deformação global da peça.

Aquando da escolha da pormenorização e, considerando os Estados Limites de Serviço, um aspeto crucial a analisar diz respeito ao espaçamento entre varões. Este parâmetro não deve ser superior a $5 \left(c + \frac{\phi}{2} \right)$ (cerca de 250/300 mm), visto que, para valores superiores, o comportamento do betão, entre varões, deixa de ser influenciado pelas armaduras. Consequentemente, as fendas poderão apresentar aberturas superiores, nas zonas mais afastadas dos ferros. O controlo indireto da fendilhação não tem em conta o comportamento do betão nas zonas onde este limite é ultrapassado, pelo que se torna necessário e recomendável ter em conta esta indicação.

Este trabalho permitiu concluir que estes quadros do controlo indireto foram elaborados, essencialmente, para estruturas sujeitas a deformações impostas restringidas, ou seja, que consideram quantidades de armadura resultante de se admitir como esforço atuante um valor próximo do de fendilhação (expressão base da armadura mínima). Nestes casos, as percentagens de armaduras são baixas e correspondem a diâmetros e espaçamentos reduzidos, para que se consiga ter uma malha bem distribuída e pouco espaçada, o que impõe limites, em geral, bastante conservativos. Esta confirmação tem maior relevância para o caso da flexão, visto que para a tração os valores das aberturas de fendas obtidos são bastante mais razoáveis e perto dos limites admissíveis.

Para estruturas sujeitas a cargas (ações diretas), a área de armadura necessária pode ser muito superior à da armadura mínima. Neste caso, em particular, os diâmetros poderão ser maiores, garantindo-se igualmente a necessária limitação da abertura de fendas. Considerando os diâmetros do controlo indireto, poderíamos ser conduzidos a cometer o erro de adotar uma pormenorização com diâmetros e espaçamentos reduzidos, sem qualquer necessidade e, ainda com o inconveniente em termos práticos da betonagem dos elementos de betão.

Com o recurso aos gráficos elaborados nesta dissertação, compreende-se que, quando se trata de estruturas sujeitas a cargas aplicadas e com áreas de armadura mais significativas, se pode e deve utilizar diâmetros maiores sem inconvenientes. Os quadros do controlo indireto regulamentares são adequados para efeitos de deformações impostas e demasiado conservativos, tornando-se irrealistas para o caso de ações devidas a cargas.

Verifica-se que as tabelas do controlo indireto fazem, assim, pouco sentido quando aplicadas a vigas. Estes elementos, correntemente, suportam cargas significativas, sendo necessárias quantidades de armadura expressivas para resistirem aos Estados Limites Últimos. Analisando os quadros, os diâmetros dos varões máximos que se poderiam adotar, são muito inferiores aos que normalmente se utilizariam, tais como diâmetros de 20 e 25 mm. No entanto, embora as armaduras utilizadas tenham maiores dimensões, a abertura de fendas estimada, pelo controlo direto, encontra-se claramente dentro nos limites admissíveis.

Para níveis de tensão no aço em serviço mais elevadas, o que se pode verificar especialmente quando se adopta uma distribuição de esforços no dimensionamento à rotura diferente da elástica, é interessante ter um meio fiável e rápido de avaliar a adequabilidade da opção. Para abordar esta situação, que sucede no dimensionamento para cargas, os quadros de controlo indireto não são adequados, pois são muito conservativos. No sentido de uma melhor clarificação destes aspetos, foram desenvolvidos gráficos complementares que permitem uma muito mais eficiente forma de controlo indireto da fendilhação.

Importa referir que o controlo da abertura de fendas não é certamente a única variável na pormenorização de estruturas de betão, a qual comporta outras condicionantes como a salvaguarda do correto envolvimento das armaduras pelo betão e da execução de vibração em boas condições.

Relativamente às restrições às deformações impostas, responsáveis por algumas situações de fendilhação, há opções de conceção para diminuir os seus efeitos como é o caso da adoção de juntas de dilatação, em particular em edifícios de grande extensão. Por outro lado, a junta de dilatação configura sempre um ponto fraco no edifício e deve ser, sempre que razoável, evitado, sendo que se houver restrição importante ter-se-á que dimensionar as armaduras para um correto controlo da abertura de fendas.

Analisando agora a parte 3 do EC2, a qual se dedica a estruturas como silos e reservatórios, onde o fenómeno da abertura de fendas por deformações impostas ganha particular relevância, procedeu-se à análise dos gráficos apresentados na página 13 deste regulamento [9]. Tais resultados revelaram-se satisfatórios, embora para limites de aberturas de fendas de ordem muito reduzida se torne impossível encontrar uma pormenorização que esteja de acordo com as curvas que os gráficos em

apreço apresentam, concluindo-se que a opção de adotar pré-esforço é, sem dúvida, uma boa solução.

Após estas análises preliminares, tornou-se óbvia a necessidade de esboçar gráficos adequados que consigam ilustrar, de forma suficientemente abrangente, uma formulação alternativa de controlo indireto da abertura de fendas que, não só se aplique para o caso de deformações impostas, como também para a ação de cargas. Neste sentido, foram elaborados dois tipos distintos de gráficos com o objetivo de generalizar os resultados a qualquer elemento de betão. Os primeiros gráficos correlacionam o espaçamento entre varões e o diâmetro dos varões, sendo os dados de entrada a tensão de serviço no aço, a área de armadura necessária para cumprir os ELU de segurança (dada em cm^2/m) e o limite de abertura de fendas pretendido. Tais gráficos foram elaborados para o caso específico das lajes. Os segundos gráficos têm por base os primeiros, mas relacionam agora a percentagem efetiva de armadura e o diâmetro dos varões, sendo aplicáveis a qualquer elemento de betão armado. A aplicação destes gráficos permite um procedimento expedito alternativo que generaliza a sua aplicabilidade a qualquer caso de cargas, pelo que configura certamente uma contribuição importante nesta dissertação.

Assim, desenvolveu-se um trabalho que permitiu compreender bem as influências dos diversos parâmetros envolvidos na fendilhação, perceber a razão de ser e as insuficiências dos quadros regulamentares e, especialmente propor um formato alternativo, rápido, eficiente e geral, válido para ações diretas e indiretas, para o controlo indireto das aberturas de fendas.

Referências Bibliográficas

- [1] Appleton, Júlio; Almeida, João; *“Fendilhação e deformação em Estruturas de Betão”*, Livro, 1983
- [2] Appleton, Júlio; Marchão, Carla; *“Modelo 3 – Verificação da Segurança aos Estados Limites de Utilização”*, Folhas de Apoio às Aulas de Estruturas de Betão I, IST, 2008
- [3] Câmara, José; *“Estruturas de Betão I – Folhas de apoio às aulas”*, Sebenta, IST, 2004
- [4] Câmara, José; *“Análise não linear de estruturas de Betão Armado nas condições de serviço”*, Tese de Mestrado em Engenharia Estrutural, IST, 1983
- [5] Câmara, José; *“Comportamento em serviço de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado”*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, IST, 1988
- [6] Câmara, José; *“Deformações Impostas em Edifícios com Plantas com Dimensões Consideráveis”*, Diapositos, IST, 2014
- [7] Câmara, José; *“Dimensionamento das Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado às deformações impostas”*, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas v.10 n.30 1990/01, LNEC, 1990
- [8] Comité Europeu de Normalização, *“Eurocódigo 2 – Parte 1: Dimensionamento de estruturas de betão”*, EN1992-1-1, 2003
- [9] Comité Europeu de Normalização, *“Eurocódigo 2 – Parte 3: “Parte 3: Silos e Reservatórios”*, EN1993-1-1, 2005
- [10] Favre, R.; Jaccoud, J.; Burdet, O.; Charif, H.; *“Dimensionnement des structures en béton: Aptitude au service et elements de structures”*, EPF Lausann, 1997
- [11] Figueiras, Joaquim; *“Estruturas de Betão 2 – Verificação aos Estados Limites de Utilização”*, FEUP, 2002
- [12] Tavares, Rodolfo; *“State-of-Art sobre o Controlo da Fendilhação devido a Deformações Impostas”*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST, 2010
- [13] Teixeira, Wilson; *“Controlo de fendilhação para deformações impostas em depósitos”*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST, 2008

Anexos

Índice de Anexos

Anexo A.1 – Distinção entre vigas e lajes

Anexo A.2 – Comparação do efeito do esforço de flexão e tração

Anexo A.3 – Relevância da altura da laje

Anexo A.4 – Importância da área/percentagem de armadura

Anexo A.5 – Análise do valor do diâmetro dos varões

Anexo B.1 – Verificação dos quadros do controlo indireto para deformações impostas

Anexo C.1 – Verificação dos quadros do controlo indireto da fendilhação para a flexão de cargas

Anexo D.1 – Verificação dos quadros do controlo indireto da fendilhação para a tração de cargas

Anexo E.1 – Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3

Anexo E.2 – Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3 – Diâmetros máximos dos varões

Anexo E.3 – Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3 – Espaçamentos máximos entre varões

Anexo F.1 – Verificação dos gráficos alternativos Diâmetro do varão vs Espaçamento entre varões

Anexo F.2 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões, para lajes sujeitas ao esforço de flexão, em função da área de armadura

Anexo F.3 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões, para lajes sujeitas ao esforço de tração, em função da área de armadura

Anexo F.4 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Espaçamentos entre varões, para lajes sujeitas ao esforço de flexão, em função da percentagem efetiva de armadura

Anexo F.5 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões, para lajes sujeitas ao esforço de tração, em função da percentagem efetiva de armadura

Anexo F.6 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões, para lajes sujeitas ao esforço de flexão – Eurocódigo 2 – Parte 1

Anexo F.7 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões, para lajes sujeitas ao esforço de tração – Eurocódigo 2 – Parte 1

Anexo G.1 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Percentagem efetiva de armadura, para estruturas sujeitas ao esforço de flexão

Anexo G.2 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Percentagem efetiva de armadura, para estruturas sujeitas ao esforço de tração

Anexo A

Anexo A.1 – Distinção entre vigas e lajes

Quadro A.1. 1 – Cálculo da abertura de fendas para uma viga com secção 0,3mx0,6m, sujeita ao esforço de flexão.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,adotado}$ [cm ² /m]		$c+\phi/2$ [m]	x'' [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	2Ø25	9,82	0,043	0,031	0,106	0,031	0,0006	0,0005	0,24	0,13
200	2Ø25	9,82	0,043	0,031	0,106	0,031	0,0007	0,0006	0,24	0,18
240	2Ø25	9,82	0,043	0,031	0,106	0,031	0,0009	0,0007	0,24	0,22
280	2Ø25	9,82	0,043	0,031	0,106	0,031	0,0011	0,0008	0,24	0,27
320	2Ø25	9,82	0,043	0,031	0,106	0,031	0,0013	0,0009	0,24	0,31
360	2Ø25	9,82	0,043	0,031	0,106	0,031	0,0015	0,0010	0,24	0,36
400	2Ø25	9,82	0,043	0,031	0,106	0,031	0,0017	0,0011	0,24	0,41
450	2Ø25	9,82	0,043	0,031	0,106	0,031	0,0019	0,0013	0,24	0,46

Anexo A.2 – Comparação do efeito do esforço de flexão e tração

Quadro A.2. 1 – Dados para o cálculo da fendilhação para os esforços de flexão simples e tração pura.

Tração pura		Flexão simples	
k_1	0,8	k_1	0,8
k_2	1	k_2	0,5
k_t	0,4	k_t	0,4
$f_{ct,eff}$ [MPa]	2,9	$f_{ct,eff}$ [MPa]	2,9
E_s [GPa]	210	E_s [GPa]	210
E_{cm} [GPa]	31	E_{cm} [GPa]	31
α_e	6,77	α_e	6,77

Quadro A.2. 2 – Comparação da abertura de fendas obtida para o esforço de tração pura e flexão simples.

Esforço	Tensão no aço [MPa]	A _{s,adotada} [cm ² /m]		c+Ø/2 [m]	x'' [m]	h _{c,eff} [m]	5(c+Ø/2) [m]	A _{c,eff} [m ² /m]	ρ _{p,eff}	ε _{srm}	ε _{srm} (min)	S _{r,máx} [m]	W _k [mm]
		Ø16//125	16,08										
FLEXÃO	240	Ø16//125	16,08	0,038	0,051	0,066	0,19	0,066	0,024	0,0009	0,0007	0,21	0,19
TRAÇÃO	240	Ø16//125	16,08	0,038	-	0,095	0,19	0,095	0,017	0,0008	0,0007	0,42	0,33

Anexo A.3 – Relevância da altura da laje

Quadro A.3. 1 – Cálculo da abertura de fendas para uma laje com 0,25m de espessura.

h [m]	0,25	Tensão no aço [MPa]	Ø [mm]	s [mm]	A _{s,adotada} [cm ² /m]	c+Ø/2 [m]	x'' [m]	h _{c,eff} [m]	5(c+Ø/2) [m]	A _{c,eff} [m ² /m]	ρ _{p,eff}	ε _{srm}	ε _{srm} (min)	S _{r,máx} [m]	W _k [mm]
c [m]	0,03														
k ₁	0,8	160	25	340	14,44	0,043	0,046	0,068	0,21	0,068	0,021	0,0005	0,0005	0,23	0,11
k ₂	0,5	200	20	220	14,28	0,040	0,046	0,068	0,20	0,068	0,021	0,0007	0,0006	0,23	0,15
k _t	0,4	240	18	175	14,54	0,039	0,047	0,068	0,20	0,068	0,021	0,0008	0,0007	0,23	0,19
f _{ct,eff} [MPa]	2,9	280	16	140	14,36	0,038	0,046	0,068	0,19	0,068	0,021	0,0010	0,0008	0,20	0,21
E _s [GPa]	210	320	14	105	14,66	0,037	0,047	0,068	0,19	0,068	0,022	0,0012	0,0009	0,18	0,22
E _{cm} [GPa]	31	360	12	80	14,14	0,036	0,045	0,068	0,18	0,068	0,021	0,0014	0,0010	0,18	0,26
α _e	6,77	400	10	55	14,28	0,035	0,046	0,068	0,18	0,068	0,021	0,0016	0,0011	0,18	0,29
		450	8	35	14,36	0,034	0,046	0,068	0,17	0,068	0,021	0,0018	0,0013	0,18	0,34

Quadro A.3. 2 – Cálculo da abertura de fendas para uma laje com 0,5m de espessura.

h [m]	0,5	Tensão no aço [MPa]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	c+ \emptyset /2 [m]	x'' [m]	$h_{c,eff}$ [m]	5(c+ \emptyset /2) [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
c [m]	0,03	160	25	340	14,44	0,043	0,046	0,106	0,21	0,106	0,014	0,0003	0,0005	0,30	0,14
k_1	0,8	200	20	220	14,28	0,040	0,046	0,100	0,20	0,100	0,014	0,0005	0,0006	0,29	0,17
k_2	0,5	240	18	175	14,54	0,039	0,047	0,098	0,20	0,098	0,015	0,0007	0,0007	0,28	0,21
k_t	0,4	280	16	140	14,36	0,038	0,046	0,095	0,19	0,095	0,015	0,0009	0,0008	0,24	0,22
$f_{ct,eff}$ [MPa]	2,9	320	14	105	14,66	0,037	0,047	0,093	0,19	0,093	0,016	0,0011	0,0009	0,21	0,24
E_s [GPa]	210	360	12	80	14,14	0,036	0,045	0,090	0,18	0,090	0,016	0,0013	0,0010	0,21	0,28
E_{cm} [GPa]	31	400	10	55	14,28	0,035	0,046	0,088	0,18	0,088	0,016	0,0015	0,0011	0,21	0,32
α_e	6,77	450	8	35	14,36	0,034	0,046	0,085	0,17	0,085	0,017	0,0018	0,0013	0,20	0,36

Quadro A.3. 3 – Cálculo da abertura de fendas para uma laje de 0,75m de espessura.

h [m]	0,75	Tensão no aço [MPa]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	c+ \emptyset /2 [m]	x'' [m]	$h_{c,eff}$ [m]	5(c+ \emptyset /2) [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
c [m]	0,03	160	25	340	14,44	0,043	0,046	0,106	0,21	0,106	0,014	0,0003	0,0005	0,30	0,14
k_1	0,8	200	20	220	14,28	0,040	0,046	0,100	0,20	0,100	0,014	0,0005	0,0006	0,29	0,17
k_2	0,5	240	18	175	14,54	0,039	0,047	0,098	0,20	0,098	0,015	0,0007	0,0007	0,28	0,21
k_t	0,4	280	16	140	14,36	0,038	0,046	0,095	0,19	0,095	0,015	0,0009	0,0008	0,24	0,22
$f_{ct,eff}$ [MPa]	2,9	320	14	105	14,66	0,037	0,047	0,093	0,19	0,093	0,016	0,0011	0,0009	0,21	0,24
E_s [GPa]	210	360	12	80	14,14	0,036	0,045	0,090	0,18	0,090	0,016	0,0013	0,0010	0,21	0,28
E_{cm} [GPa]	31	400	10	55	14,28	0,035	0,046	0,088	0,18	0,088	0,016	0,0015	0,0011	0,21	0,32
α_e	6,77	450	8	35	14,36	0,034	0,046	0,085	0,17	0,085	0,017	0,0018	0,0013	0,20	0,36

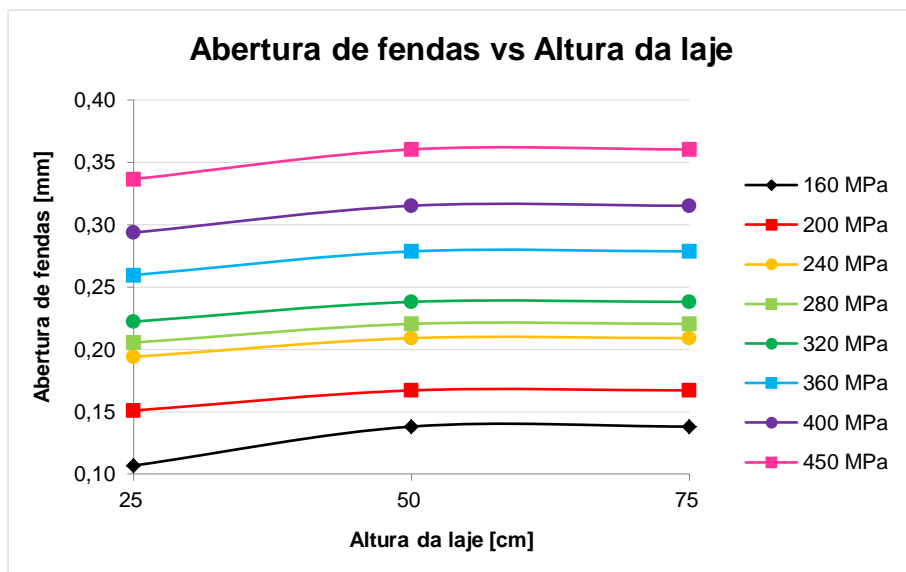


Figura A.3. 1 – Variação da altura da laje com a variação da abertura de fendas.

Anexo A.4 – Importância da área/percentagem de armadura

Quadro A.4. 1 – Cálculo da abertura de fendas para diferentes percentagens de armadura, para diferentes tensões de serviço – Caso 1.

Tensão no aço [MPa]	% de armadura	A_s [cm ² /m]	$A_s/2$ [cm ² /m]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\emptyset/2$ [m]	$5(c+\emptyset/2)$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$\rho_{p,eff}$	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	W_k [mm]	W_k [mm]
160	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0002	0,0005	0,19	0,17
	1,5	37,5	18,75	14	80	19,24	0,038	0,19	0,10	0,020	0,34	0,0005		0,15	
	2,5	62,5	31,25	20	100	31,42	0,04	0,20	0,10	0,031	0,32	0,0005		0,17	
200	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0004	0,0006	0,23	0,23
	1,5	37,5	18,75	14	80	19,24	0,038	0,19	0,10	0,020	0,34	0,0006		0,22	
	2,5	62,5	31,25	20	100	31,42	0,04	0,20	0,10	0,031	0,32	0,0007		0,24	
240	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0006	0,0007	0,28	0,28
	1,5	37,5	18,75	14	80	19,24	0,038	0,19	0,10	0,020	0,34	0,0008		0,28	
	2,5	62,5	31,25	20	100	31,42	0,04	0,20	0,10	0,031	0,32	0,0009		0,30	
280	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0008	0,0008	0,33	0,34
	1,5	37,5	18,75	14	80	19,24	0,038	0,19	0,10	0,020	0,34	0,0010		0,34	
	2,5	62,5	31,25	20	100	31,42	0,04	0,20	0,10	0,031	0,32	0,0011		0,36	
320	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0010	0,0009	0,40	0,41
	1,5	37,5	18,75	14	80	19,24	0,038	0,19	0,10	0,020	0,34	0,0012		0,41	
	2,5	62,5	31,25	20	100	31,42	0,04	0,20	0,10	0,031	0,32	0,0013		0,42	
360	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0012	0,0010	0,48	0,48
	1,5	37,5	18,75	14	80	19,24	0,038	0,19	0,10	0,020	0,34	0,0014		0,47	
	2,5	62,5	31,25	20	100	31,42	0,04	0,20	0,10	0,031	0,32	0,0015		0,48	
400	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0014	0,0011	0,56	0,54
	1,5	37,5	18,75	14	80	19,24	0,038	0,19	0,10	0,020	0,34	0,0016		0,54	
	2,5	62,5	31,25	20	100	31,42	0,04	0,20	0,10	0,031	0,32	0,0017		0,54	
450	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0016	0,0013	0,65	0,63
	1,5	37,5	18,75	14	80	19,24	0,038	0,19	0,10	0,020	0,34	0,0018		0,62	
	2,5	62,5	31,25	20	100	31,42	0,04	0,20	0,10	0,031	0,32	0,00193		0,61	

Quadro A.4. 2 – Cálculo da abertura de fendas para diferentes percentagens de armadura, para diferentes tensões de serviço, de acordo com os quadros do controlo indireto – Caso 2.

Tensão no aço [MPa]	% de armadura	A_s [cm ² /m]	$A_s/2$ [cm ² /m]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\emptyset/2$ [m]	$5(c+\emptyset/2)$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$\rho_{p,eff}$	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	W_k [mm]
160	0,75	18,75	9,38	32	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0005	-
	1,5	37,5	18,75	32	-	-	-	-	-	-	-	-		-
	2,5	62,5	31,25	32	255	31,54	0,040	0,20	0,10	0,032	0,45	0,0005		0,25
200	0,75	18,75	9,38	25	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0006	-
	1,5	37,5	18,75	25	260	18,88	0,038	0,19	0,10	0,020	0,53	0,0006		0,34
	2,5	62,5	31,25	25	155	31,67	0,040	0,20	0,10	0,032	0,37	0,0007		0,27
240	0,75	18,75	9,38	16	210	9,57	0,035	0,18	0,09	0,011	0,60	0,0006	0,0007	0,41
	1,5	37,5	18,75	16	105	19,15	0,038	0,19	0,10	0,020	0,37	0,0008		0,31
	2,5	62,5	31,25	16	64	31,42	0,040	0,20	0,10	0,031	0,28	0,0009		0,26
280	0,75	18,75	9,38	12	120	9,42	0,035	0,18	0,09	0,011	0,48	0,0008	0,0008	0,38
	1,5	37,5	18,75	12	60	18,85	0,038	0,19	0,10	0,020	0,31	0,0010		0,31
	2,5	62,5	31,25	12	36	31,42	0,040	0,20	0,10	0,031	0,23	0,0011		0,26
320	0,75	18,75	9,38	10	80	9,82	0,035	0,18	0,09	0,011	0,41	0,0010	0,0009	0,40
	1,5	37,5	18,75	10	41	19,16	0,038	0,19	0,10	0,020	0,27	0,0012		0,33
	2,5	62,5	31,25	10	-	-	-	-	-	-	-	-		-
360	0,75	18,75	9,38	8	53	9,48	0,035	0,18	0,09	0,011	0,35	0,0012	0,0010	0,41
	1,5	37,5	18,75	8	-	-	-	-	-	-	-	-		-
	2,5	62,5	31,25	8	-	-	-	-	-	-	-	-		-
400	0,75	18,75	9,38	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,5	37,5	18,75	6	-	-	-	-	-	-	-	-		-
	2,5	62,5	31,25	6	-	-	-	-	-	-	-	-		-
450	0,75	18,75	9,38	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,5	37,5	18,75	5	-	-	-	-	-	-	-	-		-
	2,5	62,5	31,25	5	-	-	-	-	-	-	-	-		-

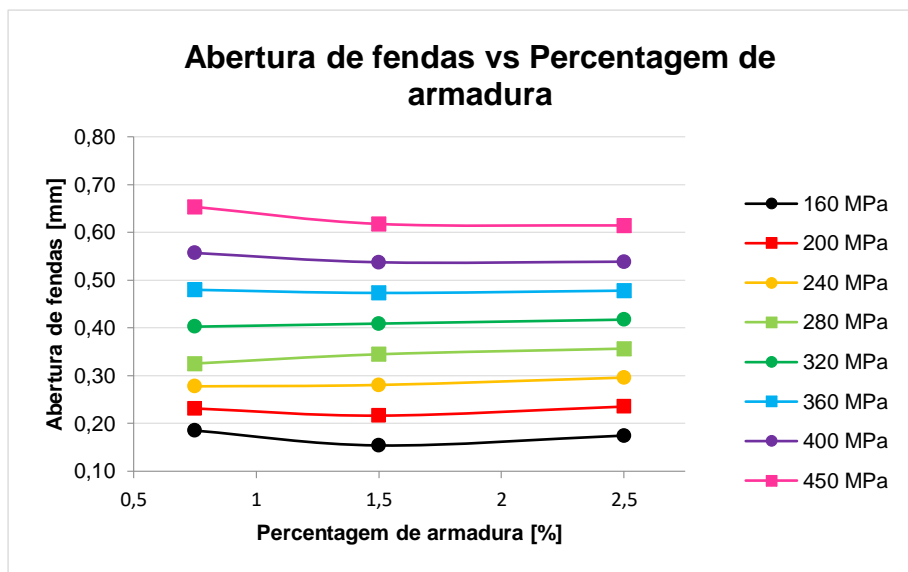


Figura A.4. 1 – Abertura de fendas, em função da percentagem de armadura.

Anexo A.5 – Análise do valor do diâmetro dos varões

Quadro A.5. 1 – Cálculo da abertura de fendas para diferentes diâmetros de varões, para diferentes tensões de serviço.

Tensão no aço [MPa]	\varnothing [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\varnothing/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\varnothing/2)$ [m]	$A_{s,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	W_k [mm]
160	20	215	14,61	0,040	0,10	0,20	0,100	0,015	0,57	0,0003	0,0005	0,26
	16	135	14,89	0,038	0,10	0,19	0,095	0,016	0,45	0,0004		0,21
	12	77	14,69	0,036	0,09	0,18	0,090	0,016	0,35	0,0004		0,16
	10	53	14,82	0,035	0,09	0,18	0,088	0,017	0,30	0,0004		0,14
	8	34	14,78	0,034	0,09	0,17	0,085	0,017	0,26	0,0004		0,12
200	20	215	14,61	0,040	0,10	0,20	0,100	0,015	0,57	0,0005	0,0006	0,32
	16	135	14,89	0,038	0,10	0,19	0,095	0,016	0,45	0,0006		0,26
	12	77	14,69	0,036	0,09	0,18	0,090	0,016	0,35	0,0006		0,20
	10	53	14,82	0,035	0,09	0,18	0,088	0,017	0,30	0,0006		0,18
	8	34	14,78	0,034	0,09	0,17	0,085	0,017	0,26	0,0006		0,15
240	20	215	14,61	0,040	0,10	0,20	0,100	0,015	0,57	0,0007	0,0007	0,41
	16	135	14,89	0,038	0,10	0,19	0,095	0,016	0,45	0,0008		0,34
	12	77	14,69	0,036	0,09	0,18	0,090	0,016	0,35	0,0008		0,27
	10	53	14,82	0,035	0,09	0,18	0,088	0,017	0,30	0,0008		0,24
	8	34	14,78	0,034	0,09	0,17	0,085	0,017	0,26	0,0008		0,20
280	20	215	14,61	0,040	0,10	0,20	0,100	0,015	0,57	0,0009	0,0008	0,52
	16	135	14,89	0,038	0,10	0,19	0,095	0,016	0,45	0,0009		0,42
	12	77	14,69	0,036	0,09	0,18	0,090	0,016	0,35	0,0010		0,34
	10	53	14,82	0,035	0,09	0,18	0,088	0,017	0,30	0,0010		0,29
	8	34	14,78	0,034	0,09	0,17	0,085	0,017	0,26	0,0010		0,25

Quadro A.5. 2 – Cálculo da abertura de fendas para diferentes diâmetros de varões, para diferentes tensões de serviço.

Tensão no aço [MPa]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\emptyset/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\emptyset/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	W_k [mm]
320	20	215	14,61	0,040	0,10	0,20	0,100	0,015	0,57	0,0011	0,0009	0,63
	16	135	14,89	0,038	0,10	0,19	0,095	0,016	0,45	0,0011		0,51
	12	77	14,69	0,036	0,09	0,18	0,090	0,016	0,35	0,0011		0,40
	10	53	14,82	0,035	0,09	0,18	0,088	0,017	0,30	0,0012		0,35
	8	34	14,78	0,034	0,09	0,17	0,085	0,017	0,26	0,0012		0,30
360	20	215	14,61	0,040	0,10	0,20	0,100	0,015	0,57	0,0013	0,0010	0,74
	16	135	14,89	0,038	0,10	0,19	0,095	0,016	0,45	0,0013		0,59
	12	77	14,69	0,036	0,09	0,18	0,090	0,016	0,35	0,0013		0,47
	10	53	14,82	0,035	0,09	0,18	0,088	0,017	0,30	0,0014		0,41
	8	34	14,78	0,034	0,09	0,17	0,085	0,017	0,26	0,0014		0,35
400	20	215	14,61	0,040	0,10	0,20	0,100	0,015	0,57	0,0015	0,0011	0,84
	16	135	14,89	0,038	0,10	0,19	0,095	0,016	0,45	0,0015		0,68
	12	77	14,69	0,036	0,09	0,18	0,090	0,016	0,35	0,0015		0,54
	10	53	14,82	0,035	0,09	0,18	0,088	0,017	0,30	0,0015		0,47
	8	34	14,78	0,034	0,09	0,17	0,085	0,017	0,26	0,0016		0,40
450	20	215	14,61	0,040	0,10	0,20	0,100	0,015	0,57	0,0017	0,0013	0,98
	16	135	14,89	0,038	0,10	0,19	0,095	0,016	0,45	0,0018		0,79
	12	77	14,69	0,036	0,09	0,18	0,090	0,016	0,35	0,0018		0,62
	10	53	14,82	0,035	0,09	0,18	0,088	0,017	0,30	0,0018		0,54
	8	34	14,78	0,034	0,09	0,17	0,085	0,017	0,26	0,0018		0,46

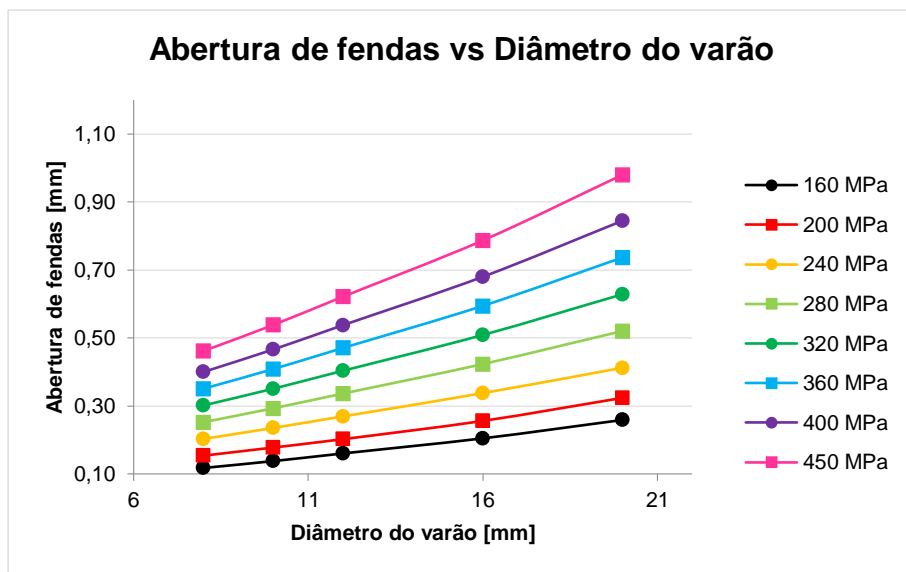


Figura A.5. 1 – Abertura de fendas em função do diâmetro do varão.

Anexo B

Anexo B.1 – Verificação dos quadros do controlo indireto para deformações impostas

Quadro B.1. 1 – Cálculo da abertura de fendas para a tração pura, devido a deformações impostas.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	ϕ_{mod} [mm]	ϕ [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,max}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	25	20	138	22,77	0,040	0,10	0,200	0,100	0,023	0,0005	0,0005	0,40	0,19
200	18,13	20	18	140	18,18	0,039	0,10	0,195	0,098	0,019	0,0006	0,0006	0,43	0,27
240	15,10	14	14	100	15,39	0,037	0,09	0,185	0,093	0,017	0,0008	0,0007	0,39	0,30
280	12,95	11	10	60	13,09	0,035	0,09	0,175	0,088	0,015	0,0009	0,0008	0,33	0,31
320	11,33	9	8	44	11,42	0,034	0,09	0,170	0,085	0,013	0,0011	0,0009	0,30	0,33
360	10,07	7	7	38	10,13	0,034	0,08	0,168	0,084	0,012	0,0012	0,0010	0,30	0,36
400	9,06	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	8,06	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro B.1. 2 – Cálculo da abertura de fendas para a flexão simples, devido a deformações impostas.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	ϕ [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	x'' [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,max}$ [m]	W_k [mm]
160	9,06	18	280	9,09	0,039	0,029	0,074	0,195	0,074	0,012	0,0003	0,0005	0,35	0,16
200	7,25	16	275	7,31	0,038	0,023	0,076	0,19	0,076	0,010	0,0003	0,0006	0,38	0,22
240	6,04	14	250	6,16	0,037	0,020	0,077	0,185	0,077	0,008	0,0004	0,0007	0,40	0,27
280	5,18	12	210	5,39	0,036	0,017	0,078	0,18	0,078	0,007	0,0005	0,0008	0,40	0,32
320	4,53	10	170	4,62	0,035	0,015	0,078	0,175	0,078	0,006	0,0005	0,0009	0,39	0,36
360	4,03	8	120	4,19	0,034	0,013	0,079	0,17	0,079	0,005	0,0006	0,0010	0,36	0,37
400	3,63	6	75	3,77	0,033	0,012	0,079	0,165	0,079	0,005	0,0007	0,0011	0,32	0,36
450	3,22	5	55	3,57	0,0325	0,011	0,080	0,1625	0,080	0,004	0,0009	0,0013	0,29	0,37

Anexo C

Anexo C.1 – Verificação dos quadros do controlo indireto da fendilhação para a flexão de cargas

Quadro C.1. 1 – Cálculo da abertura de fendas com base nos diâmetros máximos dos varões dos quadros do controlo indireto.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	ϕ [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	x'' [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
160	18,13	25	245	20,04	0,043	0,064	0,062	0,21	0,062	0,032	0,0006	0,0005	0,23	0,13
200	14,50	25	245	20,04	0,043	0,064	0,062	0,21	0,062	0,032	0,0007	0,0006	0,23	0,17
240	12,08	16	100	20,11	0,038	0,064	0,062	0,19	0,062	0,032	0,0009	0,0007	0,19	0,17
280	10,36	12	56	20,20	0,036	0,065	0,062	0,18	0,062	0,033	0,0011	0,0008	0,16	0,19
320	9,06	10	39	20,14	0,035	0,064	0,062	0,18	0,062	0,033	0,0013	0,0009	0,15	0,20
360	8,06	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400	7,25	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	6,44	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro C.1. 2 – Cálculo da abertura de fendas com base nos espaçamentos máximos entre varões dos quadros do controlo indireto.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	ϕ [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	x'' [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
160	18,13	27	286	20,02	0,044	0,064	0,062	0,22	0,062	0,032	0,0006	0,0005	0,24	0,14
200	14,50	25	245	20,04	0,043	0,064	0,062	0,21	0,062	0,032	0,0007	0,0006	0,23	0,17
240	12,08	22	190	20,01	0,041	0,064	0,062	0,21	0,062	0,032	0,0009	0,0007	0,22	0,20
280	10,36	19	141	20,11	0,040	0,064	0,062	0,20	0,062	0,032	0,0011	0,0008	0,20	0,23
320	9,06	16	100	20,11	0,038	0,064	0,062	0,19	0,062	0,032	0,0013	0,0009	0,19	0,24
360	8,06	11	47	20,22	0,036	0,065	0,062	0,18	0,062	0,033	0,0015	0,0010	0,16	0,24
400	7,25	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	6,44	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo D

Anexo D.1 – Verificação dos quadros do controlo indireto da fendilhação para a tração de cargas

Quadro D.1. 1 – Cálculo da abertura de fendas com base nos diâmetros máximos dos quadros do controlo indireto.

Tensão no aço [MPa]	ϕ_{adotado} [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotada}}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	$h_{c,\text{eff}}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,\text{eff}}$ [m ² /m]	$\rho_{p,\text{eff}}$	ϵ_{srm}	$\epsilon_{srm} \text{ (min)}$	$S_{r,\text{máx}}$ [m]	W_k [mm]
160	25	195	25,17	0,043	0,106	0,21	0,106	0,024	0,0005	0,0005	0,46	0,23
200	25	195	25,17	0,043	0,106	0,21	0,106	0,024	0,0007	0,0006	0,46	0,31
240	16	80	25,13	0,038	0,095	0,19	0,095	0,026	0,0009	0,0007	0,31	0,28
280	12	45	25,13	0,036	0,090	0,18	0,090	0,028	0,0011	0,0008	0,25	0,27
320	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
360	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro D.1. 2 – Cálculo da abertura de fendas com base nos diâmetros máximos modificados dos quadros do controlo indireto.

Tensão no aço [MPa]	$\phi_{\text{modificado}}$ [mm]	ϕ_{adotado} [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotada}}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	$h_{c,\text{eff}}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,\text{eff}}$ [m ² /m]	$\rho_{p,\text{eff}}$	ϵ_{srm}	$\epsilon_{srm} \text{ (min)}$	$S_{r,\text{máx}}$ [m]	W_k [mm]
160	40	25	195	25,17	0,043	0,106	0,21	0,106	0,024	0,0005	0,0005	0,46	0,23
200	31	25	195	25,17	0,043	0,106	0,21	0,106	0,024	0,0007	0,0006	0,46	0,31
240	20	20	125	25,13	0,040	0,100	0,20	0,100	0,025	0,0009	0,0007	0,37	0,33
280	15	14	60	25,66	0,037	0,093	0,19	0,093	0,028	0,0011	0,0008	0,27	0,30
320	13	12	45	25,13	0,036	0,090	0,18	0,090	0,028	0,0013	0,0009	0,25	0,32
360	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro D.1. 3 – Cálculo da abertura de fendas com base nos espaçamentos máximos entre varões dos quadros do controlo indireto.

Tensão no aço [MPa]	ϕ_{adotado} [mm]	S_{adotado} [mm]	$A_{s,\text{adotada}}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	$h_{c,\text{eff}}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,\text{eff}}$ [m ² /m]	$\rho_{p,\text{eff}}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,\text{máx}}$ [m]	W_k [mm]
160	31	300	25,16	0,046	0,114	0,23	0,114	0,022	0,0005	0,0005	0,58	0,27
200	28	240	25,66	0,044	0,110	0,22	0,110	0,023	0,0007	0,0006	0,51	0,35
240	25	190	25,84	0,043	0,106	0,21	0,106	0,024	0,0009	0,0007	0,45	0,40
280	22	150	25,34	0,041	0,103	0,21	0,103	0,025	0,0011	0,0008	0,40	0,43
320	18	100	25,45	0,039	0,098	0,20	0,098	0,026	0,0013	0,0009	0,34	0,43
360	12,5	50	24,54	0,036	0,091	0,18	0,091	0,027	0,0015	0,0010	0,26	0,38
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo E

Anexo E.1 – Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3

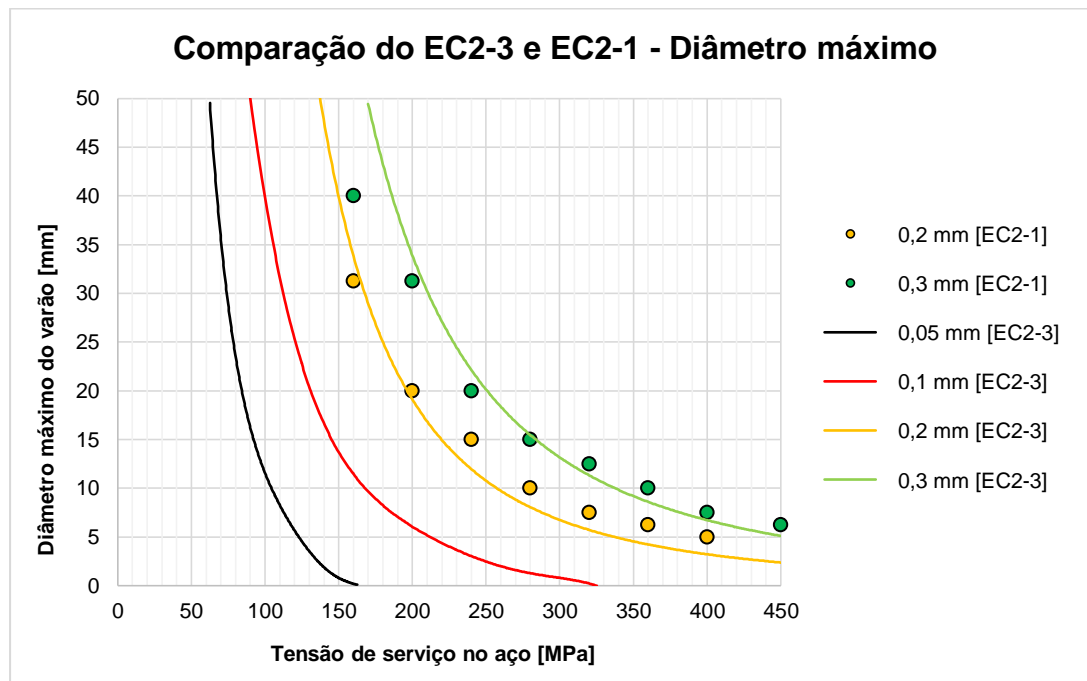


Figura E.1. 1 – Comparação dos dados da Parte 3 do EC2, com a Parte 1, relativamente aos diâmetros máximos dos varões.

Anexo E.2 – Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3 – Diâmetros máximos dos varões

Quadro E.2. 1 – Cálculo da abertura de fendas com base nos diâmetros máximos dos varões, para uma largura de fenda máxima de 0,3 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	ϕ [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	18,13	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
240	15,10	22	250	15,21	0,011	0,028	0,06	0,028	0,055	0,0010	0,0007	0,20	0,20
280	12,95	16	155	12,97	0,008	0,020	0,04	0,020	0,065	0,0012	0,0008	0,19	0,23
320	11,33	12	100	11,31	0,006	0,015	0,03	0,015	0,075	0,0014	0,0009	0,17	0,25
360	10,07	8	50	10,05	0,004	0,010	0,02	0,010	0,101	0,0016	0,0010	0,16	0,25
400	9,06	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	8,06	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro E.2. 2 – Cálculo da abertura de fendas com base nos diâmetros máximos dos varões, para uma largura de fenda máxima de 0,2 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	ϕ [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	18,13	20	170	18,48	0,010	0,025	0,05	0,025	0,074	0,0008	0,0006	0,18	0,15
240	15,10	12	74	15,28	0,006	0,015	0,03	0,015	0,102	0,0011	0,0007	0,16	0,16
280	12,95	8	38	13,23	0,004	0,010	0,02	0,010	0,132	0,0013	0,0008	0,14	0,18
320	11,33	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
360	10,07	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro E.2. 3 – Cálculo da abertura de fendas com base nos diâmetros máximos dos varões, para uma largura de fendas máxima de 0,1 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	ϕ [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\phi/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\phi/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,m\acute{a}x}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	12	50	22,62	0,006	0,015	0,03	0,015	0,151	0,0007	0,0005	0,14	0,09
200	18,13	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo E.3 – Verificação do controlo da fendilhação segundo o EC2 – Parte 3 – Espaçamentos máximos entre varões

Quadro E.3. 1 – Cálculo da abertura de fendas com base nos espaçamentos máximos entre varões, para uma largura de fendas máxima de 0,3 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\emptyset/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\emptyset/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	29	290	22,78	0,015	0,036	0,07	0,036	0,063	0,0006	0,0005	0,19	0,12
200	18,13	24	245	18,46	0,012	0,030	0,06	0,030	0,062	0,0008	0,0006	0,19	0,16
240	15,10	17	150	15,13	0,009	0,021	0,04	0,021	0,071	0,0010	0,0007	0,18	0,18
280	12,95	12	87	13,00	0,006	0,015	0,03	0,015	0,087	0,0012	0,0008	0,16	0,20
320	11,33	9	55	11,57	0,005	0,011	0,02	0,011	0,103	0,0014	0,0009	0,15	0,22
360	10,07	7	38	10,13	0,004	0,009	0,02	0,009	0,116	0,0016	0,0010	0,15	0,24

Quadro E.3. 2 – Cálculo da abertura de fendas com base nos espaçamentos máximos entre varões, para uma largura de fendas máxima de 0,2 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\emptyset/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\emptyset/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	25	215	22,83	0,013	0,031	0,06	0,031	0,073	0,0006	0,0005	0,18	0,11
200	18,13	15	95	18,60	0,008	0,019	0,04	0,019	0,099	0,0009	0,0006	0,16	0,13
240	15,10	9	42	15,15	0,005	0,011	0,02	0,011	0,135	0,0011	0,0007	0,14	0,15
280	12,95	8	30	16,76	0,004	0,010	0,02	0,010	0,168	0,0013	0,0008	0,13	0,17

Quadro E.3. 3 – Cálculo da abertura de fendas com base nos espaçamentos máximos entre varões, para uma largura de fendas máxima de 0,1 mm.

Tensão no aço [MPa]	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	$c+\emptyset/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\emptyset/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	$S_{r,máx}$ [m]	W_k [mm]
160	22,66	10	35	22,44	0,005	0,013	0,03	0,013	0,180	0,0007	0,0005	0,13	0,09

Anexo F

Anexo F.1 – Verificação da fiabilidade dos gráficos alternativos *Diâmetro do varão vs Espaçamento entre varões*

Quadro F.1. 1 – Cálculo da abertura de fendas utilizando os gráficos elaborados na dissertação.

Tensão no aço [MPa]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	x'' [m]	$c+\emptyset/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\emptyset/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	$S_{r,máx}$ [m]	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	W_k [mm]
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
280	23	260	15,98	0,051	0,042	0,050	0,21	0,050	0,032	0,22	0,0011	0,0008	0,25
320	17	150	15,13	0,048	0,039	0,051	0,19	0,051	0,030	0,20	0,0013	0,0009	0,26
360	13	90	14,75	0,047	0,037	0,051	0,18	0,051	0,029	0,18	0,0015	0,0010	0,27
400	10	50	15,71	0,050	0,035	0,050	0,18	0,050	0,032	0,16	0,0017	0,0011	0,26
450	8	33	15,23	0,049	0,034	0,050	0,17	0,050	0,030	0,15	0,0019	0,0013	0,28

Quadro F.1. 2 – Cálculo da abertura de fendas utilizando os dados dos quadros do controlo indireto.

Tensão no aço [MPa]	\emptyset [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	x'' [m]	$c+\emptyset/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\emptyset/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	$S_{r,máx}$ [m]	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	W_k [mm]
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	25	300	16,36	0,052	0,043	0,049	0,21	0,049	0,033	0,23	0,0007	0,0006	0,17
240	16	130	15,47	0,049	0,038	0,050	0,19	0,050	0,031	0,19	0,0009	0,0007	0,18
280	12	75	15,08	0,048	0,036	0,051	0,18	0,051	0,030	0,17	0,0011	0,0008	0,19
320	10	50	15,71	0,050	0,035	0,050	0,18	0,050	0,032	0,16	0,0013	0,0009	0,20
360	8	33	15,23	0,049	0,034	0,050	0,17	0,050	0,030	0,15	0,0015	0,0010	0,22
400	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro F.1. 3 – Cálculo da abertura de fendas com base nos gráficos alternativos para o valor dos diâmetros dos quadros do controlo indireto.

Esforço	Tensão no aço [MPa]	\varnothing [mm]	s [mm]	$A_{s,adotada}$ [cm ² /m]	x'' [m]	$c+\varnothing/2$ [m]	$h_{c,eff}$ [m]	$5(c+\varnothing/2)$ [m]	$A_{c,eff}$ [m ² /m]	$\rho_{p,eff}$	$S_{r,máx}$ [m]	ϵ_{srm}	ϵ_{srm} (min)	W_k [mm]
Flexão	320	16	150	13,40	0,043	0,038	0,086	0,19	0,086	0,016	0,27	0,0011	0,0009	0,30
Tração	320	16	45	44,68	-	0,038	0,095	0,19	0,095	0,047	0,22	0,0014	0,0009	0,31

Anexo F.2 – Gráficos *Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões*, para lajes sujeitas ao esforço de flexão, em função da área de armadura

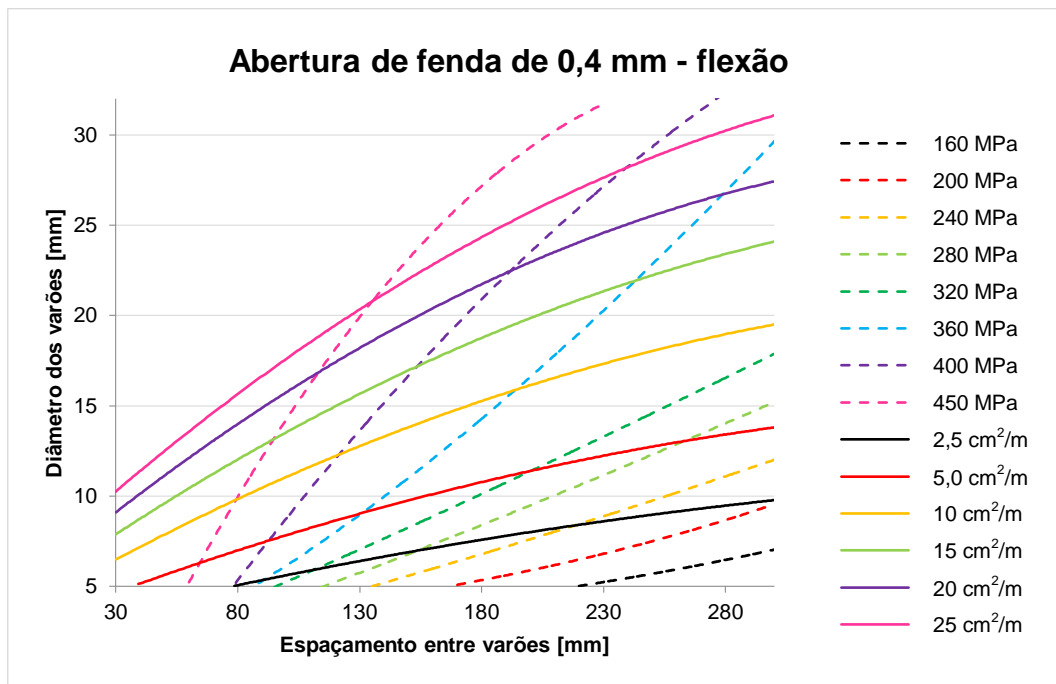


Figura F.2. 1 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,4mm, para o esforço de flexão.

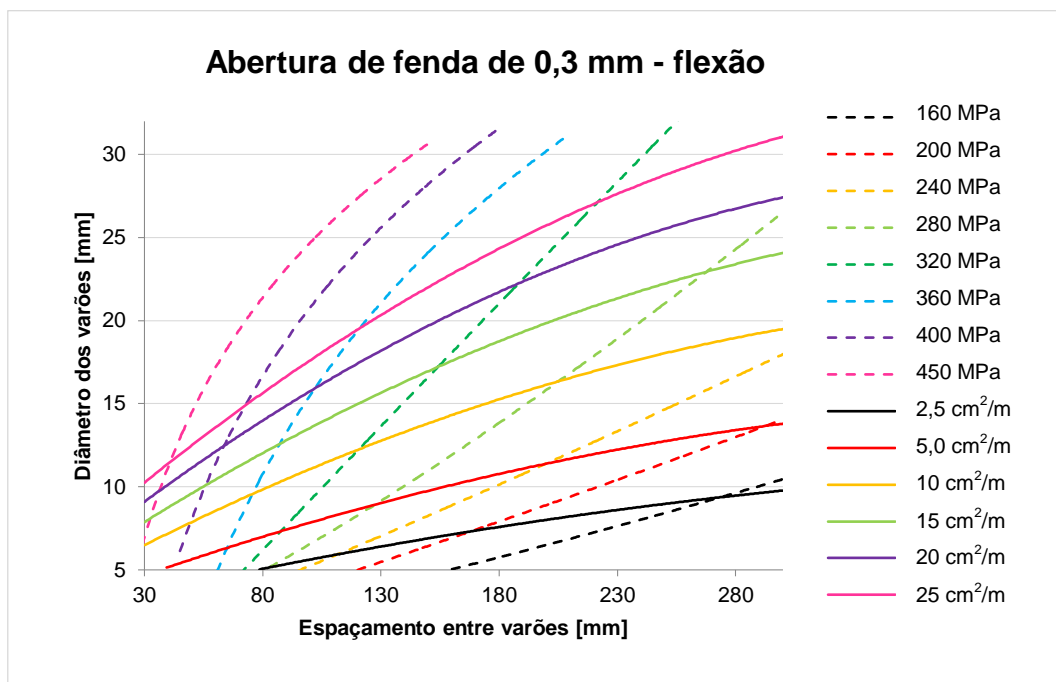


Figura F.2. 2 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,3mm, para o esforço de flexão.

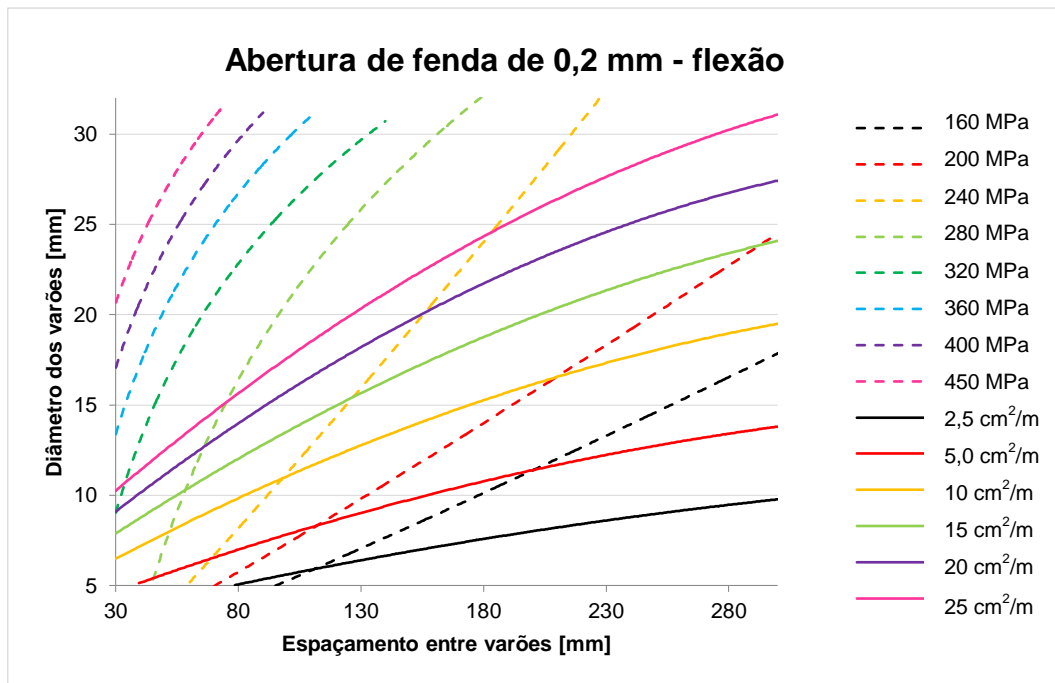


Figura F.2. 3 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,2mm, para o esforço de flexão.

Anexo F.3 – Gráficos *Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões*, para lajes sujeitas ao esforço de tração, em função da área de armadura

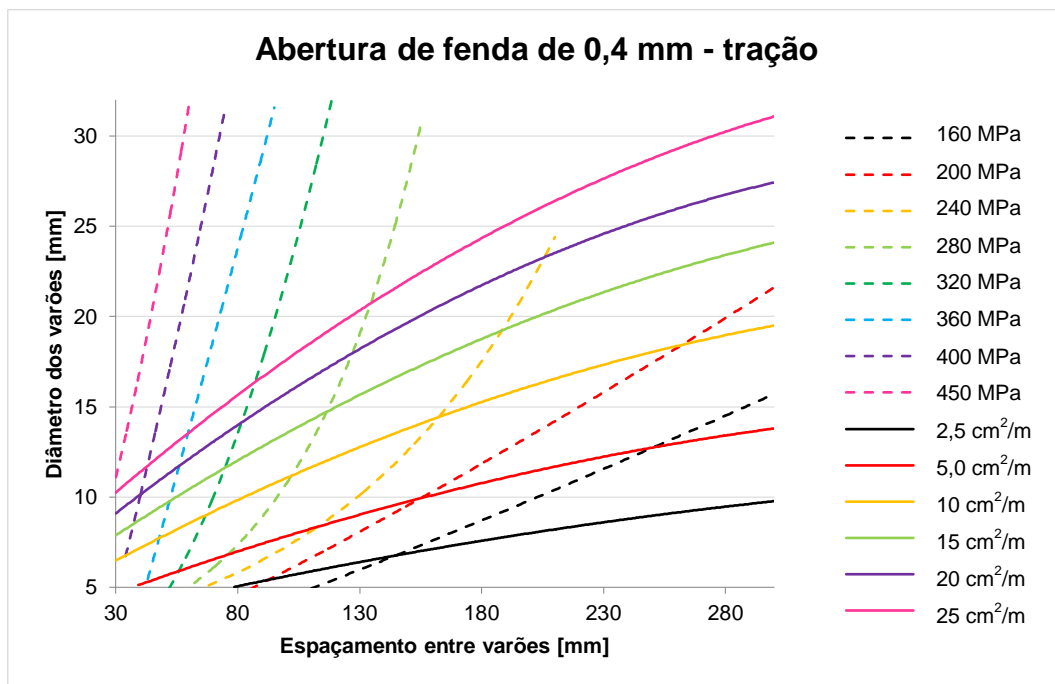


Figura F.3. 1 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,4mm, para um esforço de tração.

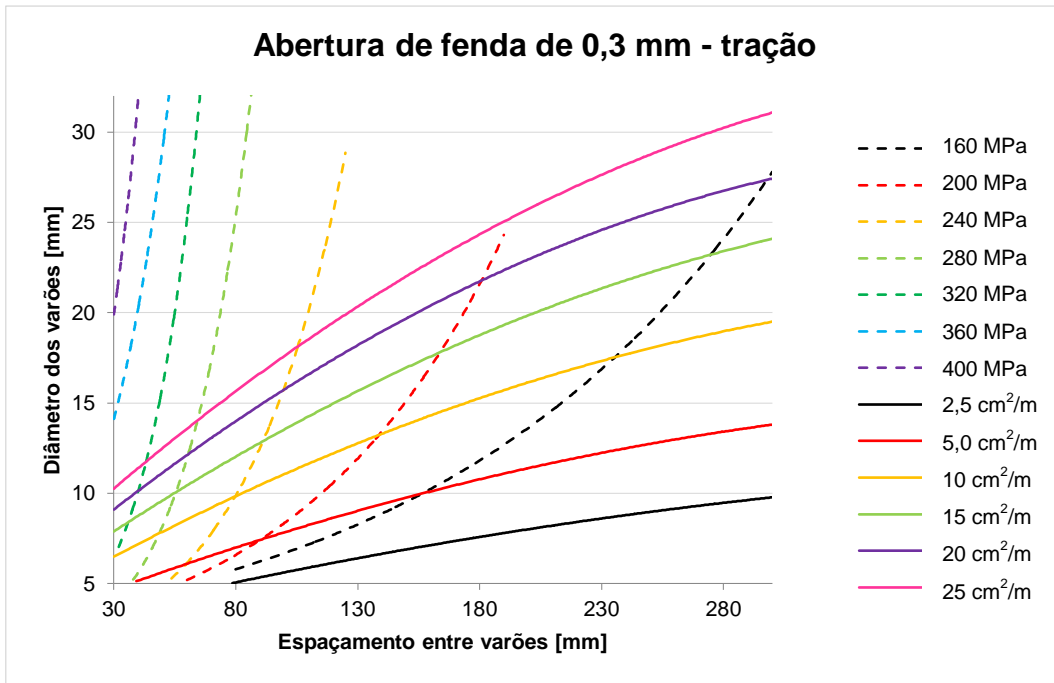


Figura F.3. 2 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,3mm, para um esforço de tração.

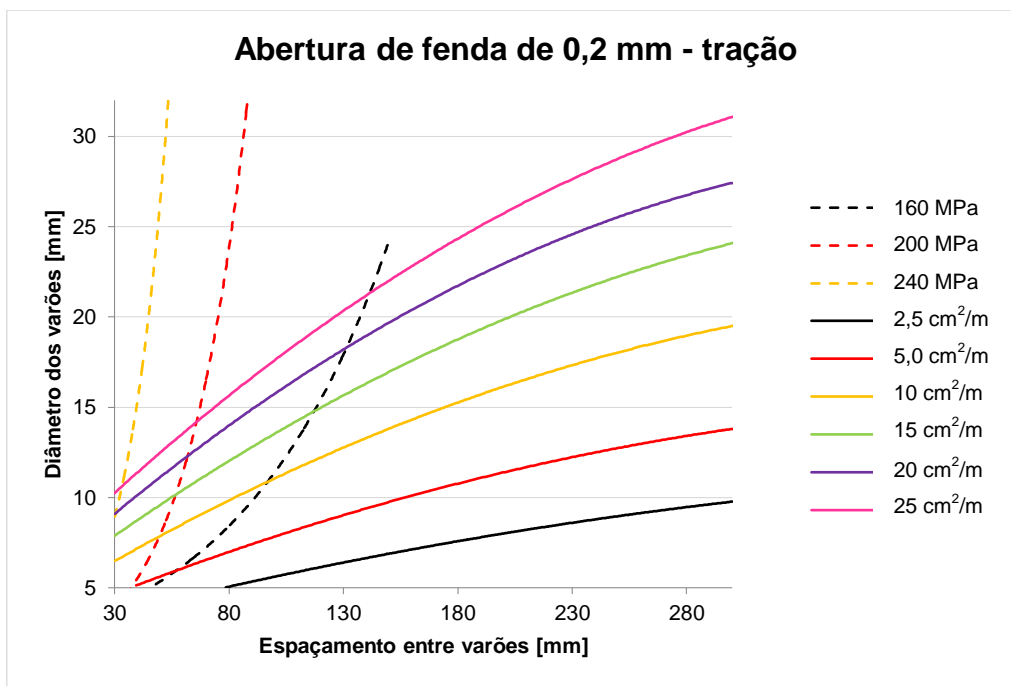


Figura F.3. 3 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,2mm, para um esforço de tração.

Anexo F.4 – Gráficos *Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões*, para lajes sujeitas ao esforço de flexão, em função da percentagem efetiva de armadura

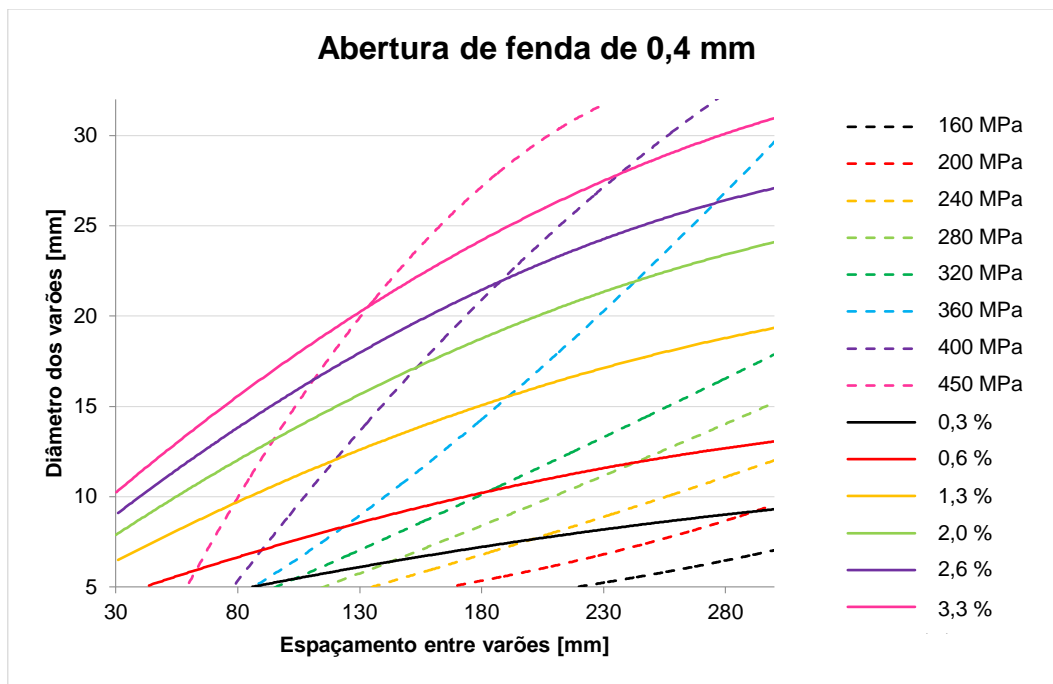


Figura F.4. 1 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,4mm, para um esforço de flexão.

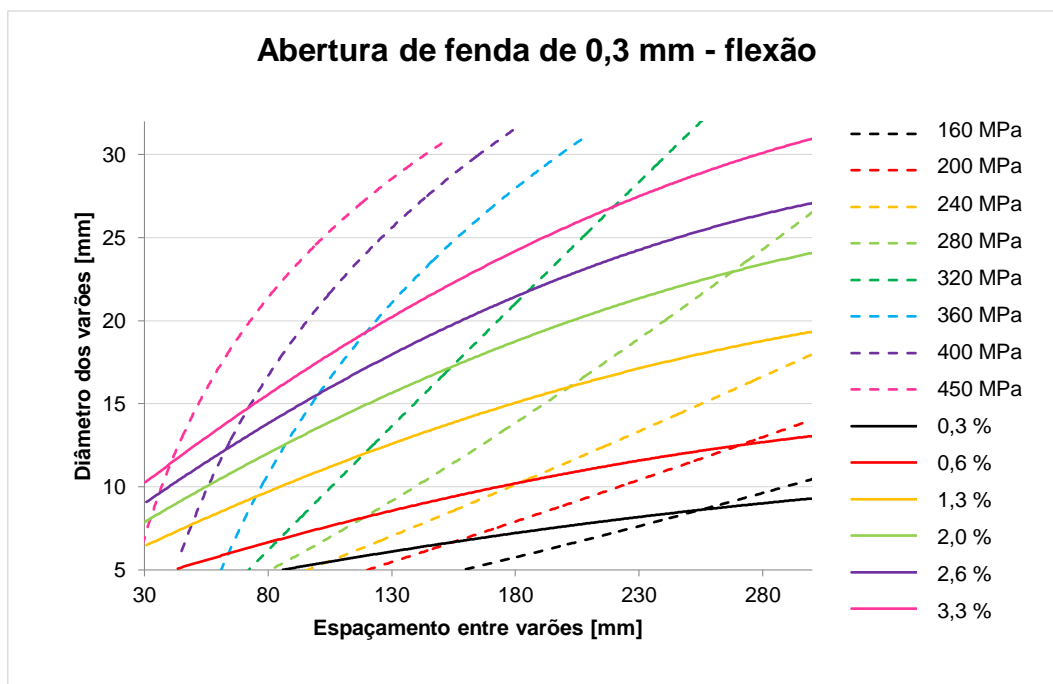


Figura F.4. 2 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,3mm, para um esforço de flexão.

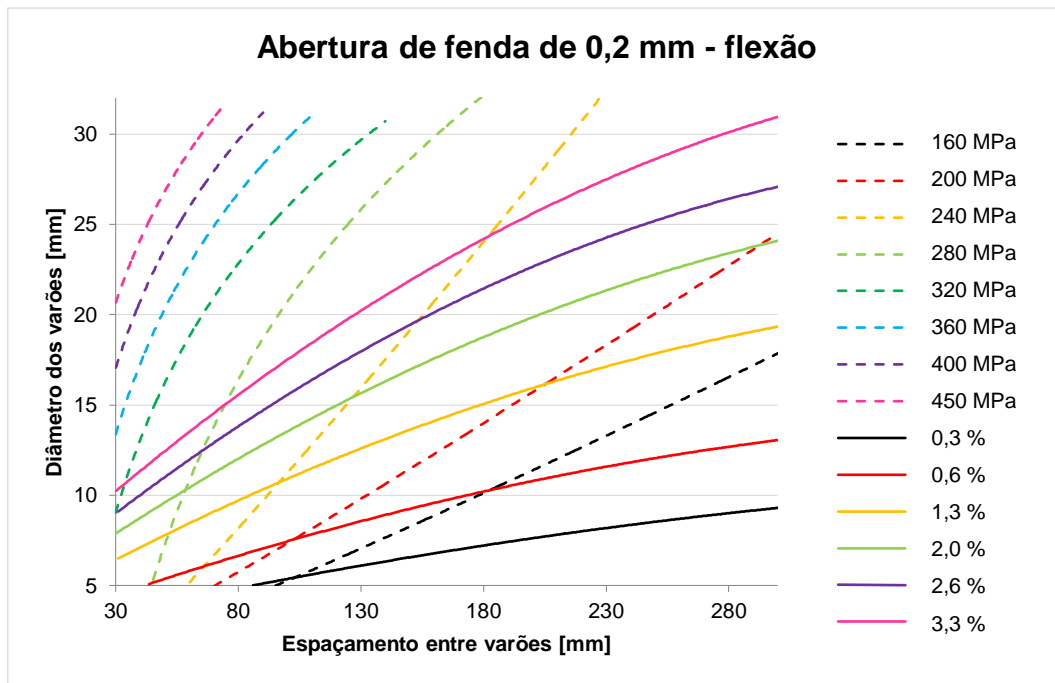


Figura F.4. 3 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,2mm, para um esforço de flexão.

Anexo F.5 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões, para lajes sujeitas ao esforço de tração, em função da percentagem efetiva de armadura

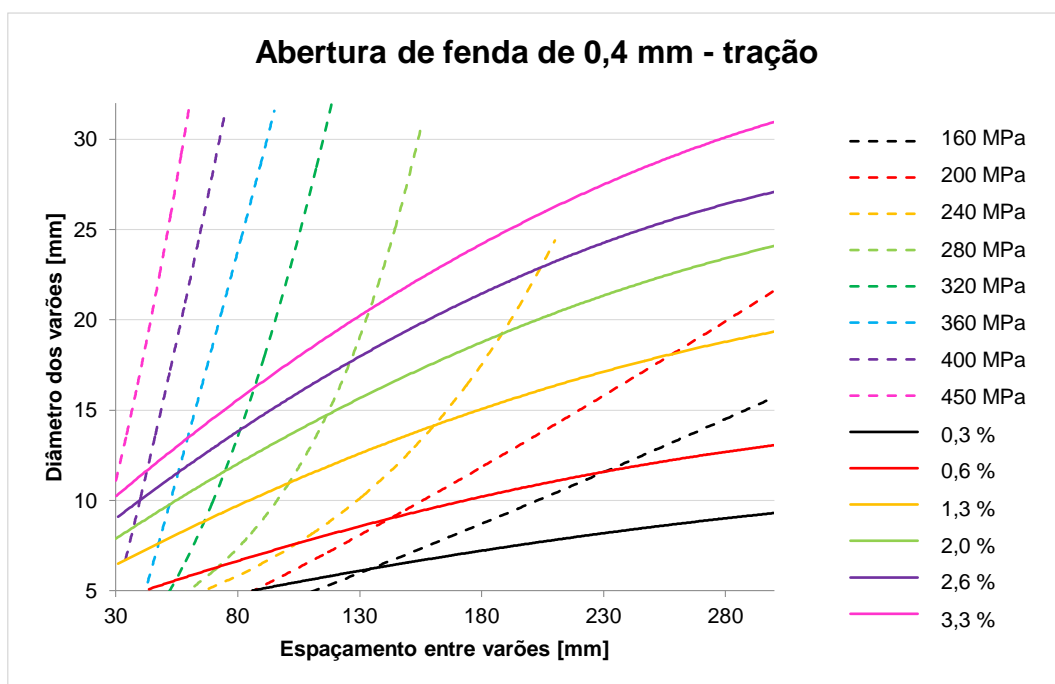


Figura F.5. 1 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,4mm, para um esforço de tração.

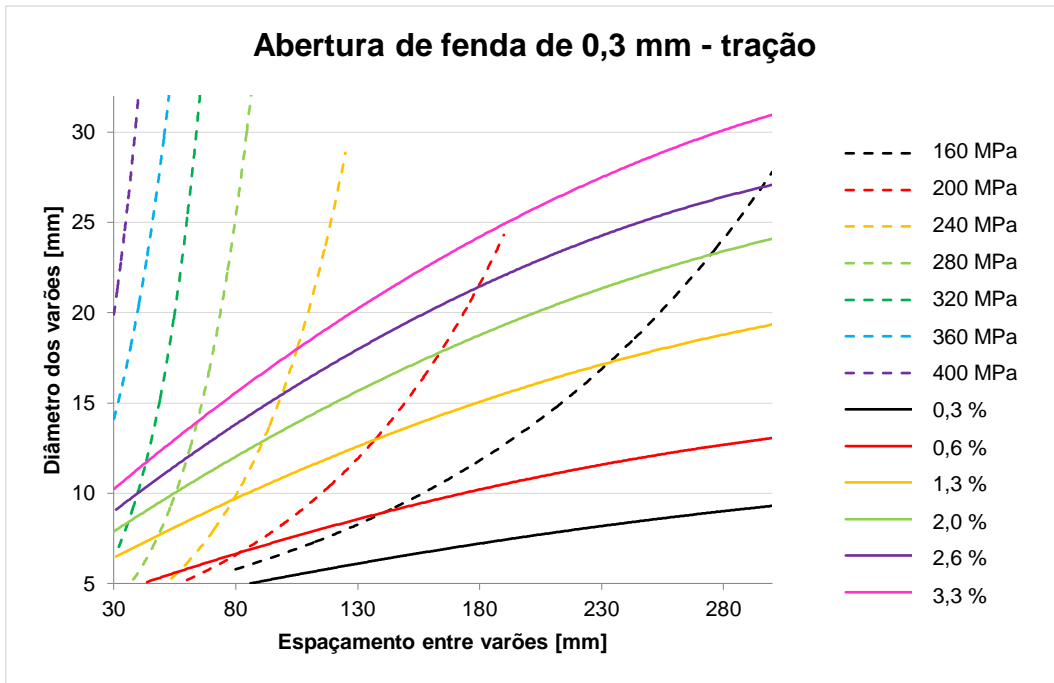


Figura F.5. 2 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,3mm, para um esforço de tração.

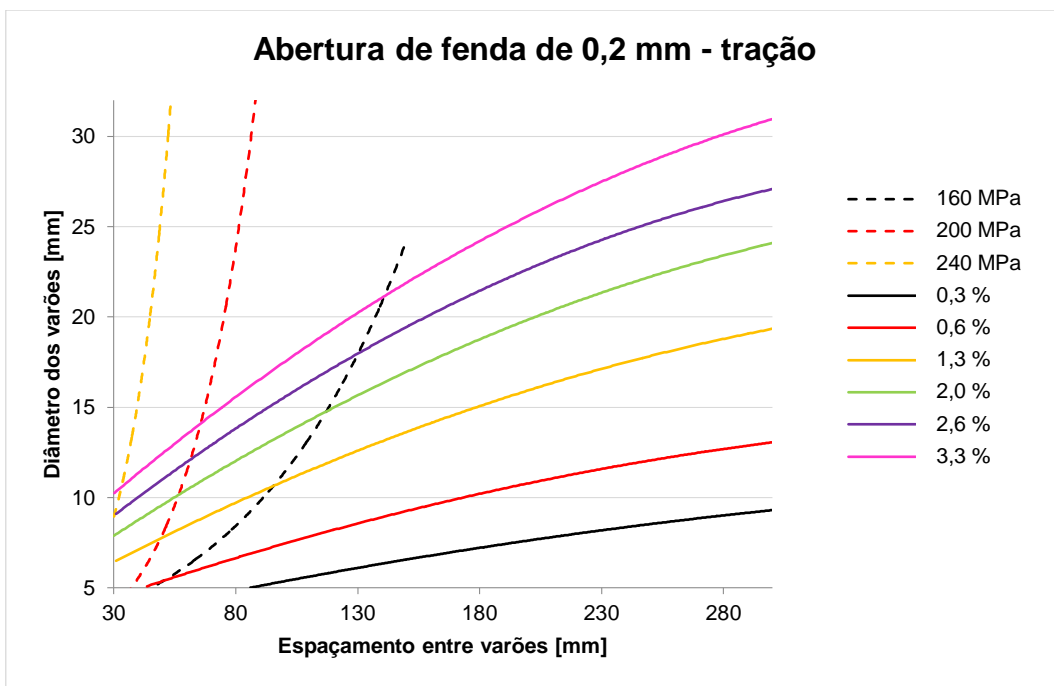


Figura F.5. 3 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,2mm, para um esforço de tração.

Anexo F.6 – Gráficos *Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões*, para lajes sujeitas ao esforço de flexão – Eurocódigo 2 – Parte 1

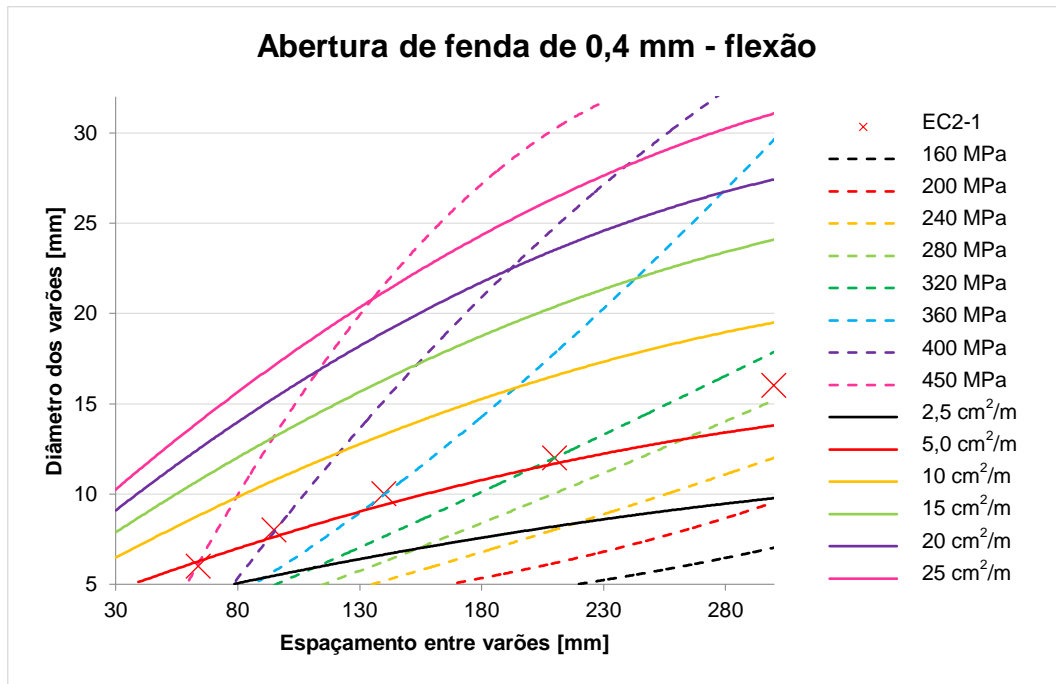


Figura F.6. 1 – Comparação entre o gráfico para uma abertura de fendas de 0,4mm, para um esforço de flexão, e a informação do controle indireto da fendilhação, presente no EC2.

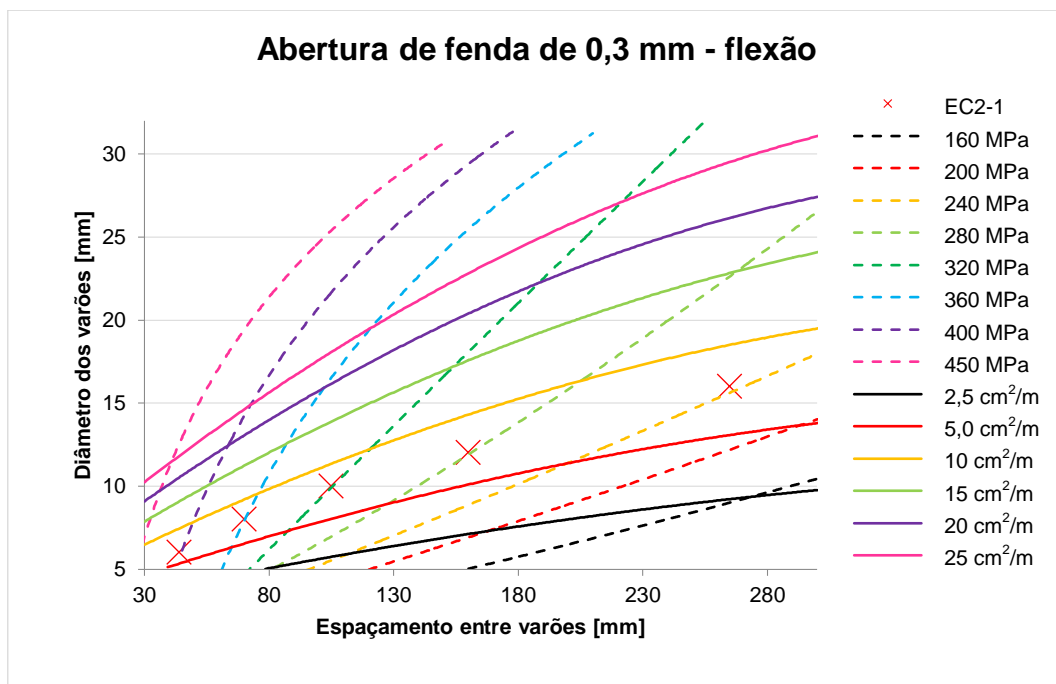


Figura F.6. 2 – Comparação entre o gráfico para uma abertura de fendas de 0,3mm, para um esforço de flexão, e a informação do controle indireto da fendilhação, presente no EC2.

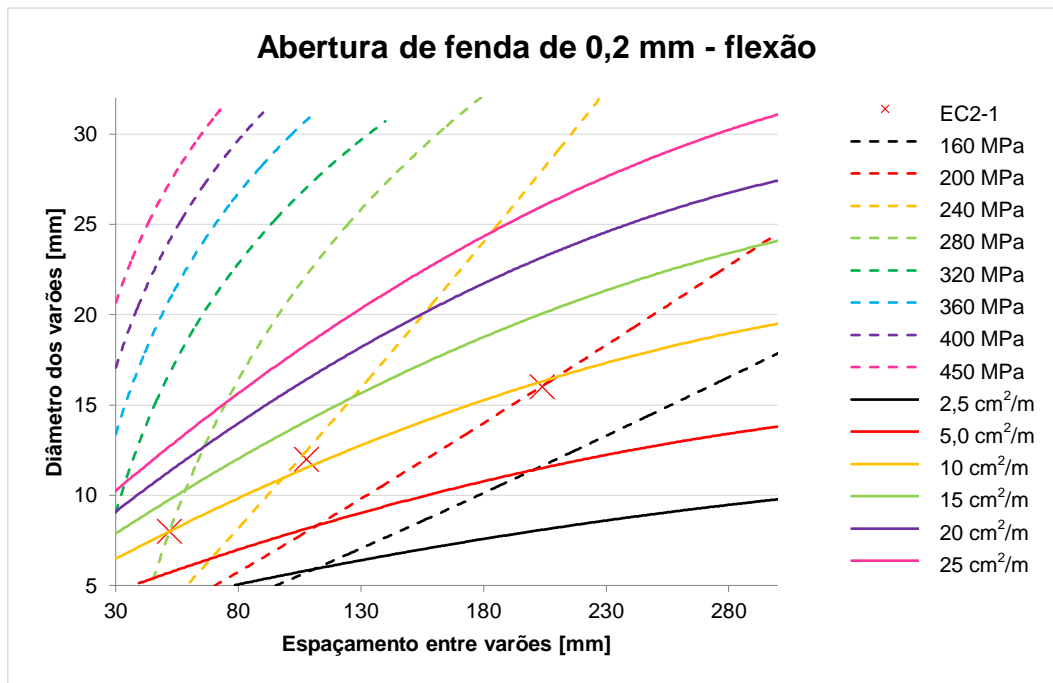


Figura F.6. 3 – Comparação entre o gráfico para uma abertura de fendas de 0,2mm, para um esforço de flexão, e a informação do controlo indireto da fendilhação, presente no EC2.

Anexo F.7 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Espaçamento entre varões, para lajes sujeitas ao esforço de tração – Eurocódigo 2 – Parte 1

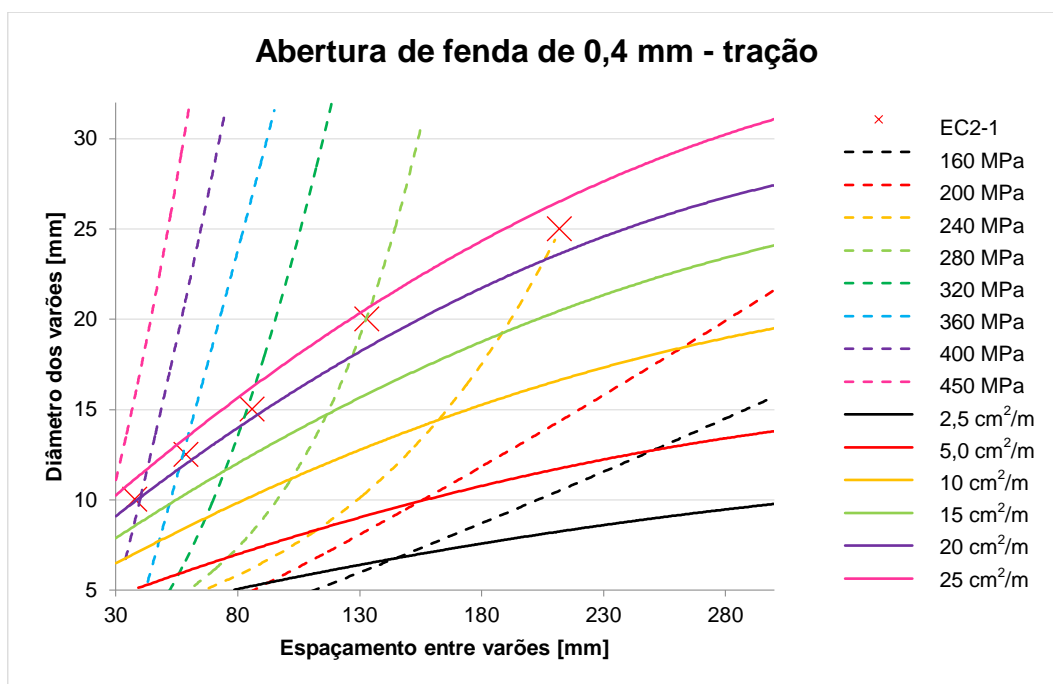


Figura F.7. 1 – Comparação entre o gráfico para uma abertura de fendas de 0,4mm, para um esforço de tração, e a informação do controlo indireto da fendilhação, presente no EC2.

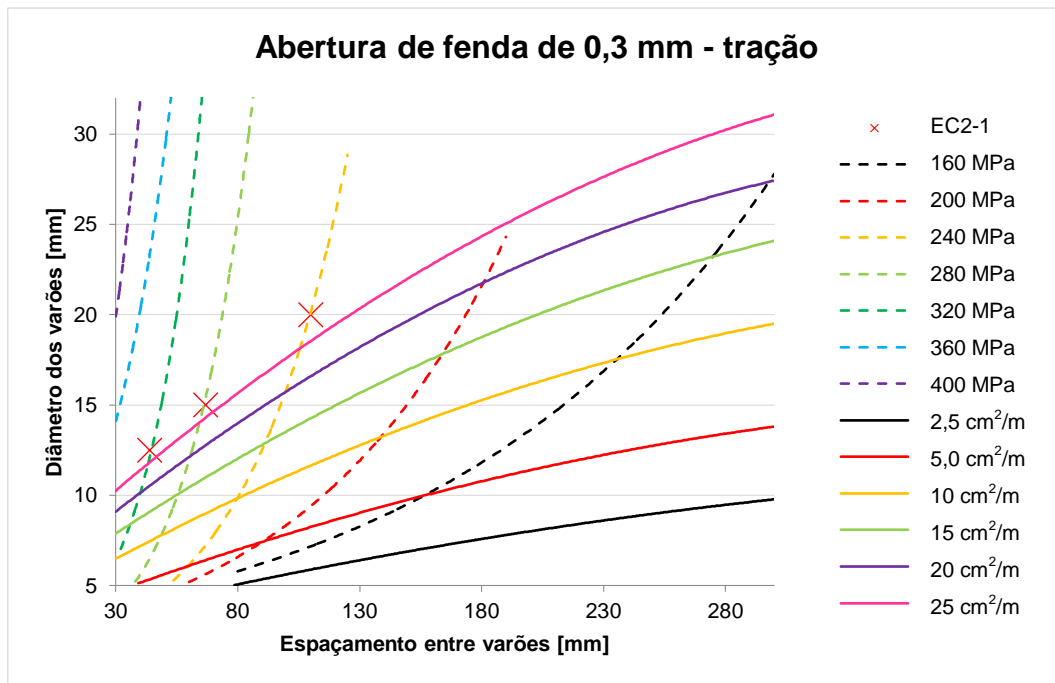


Figura F.7. 2 – Comparação entre o gráfico para uma abertura de fendas de 0,3mm, para um esforço de tração, e a informação do controle indireto da fendilhação, presente no EC2.

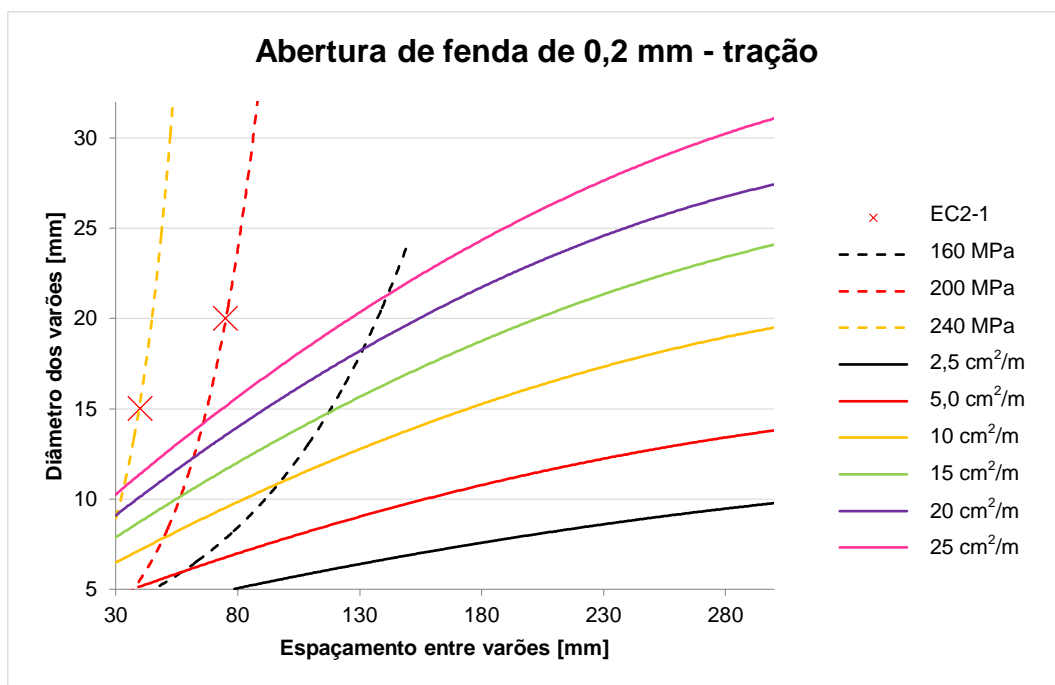


Figura F.7. 3 – Comparação entre o gráfico para uma abertura de fendas de 0,2mm, para um esforço de tração, e a informação do controle indireto da fendilhação, presente no EC2.

Anexo G

Anexo G.1 – Gráficos *Diâmetro dos varões vs Percentagem efetiva de armadura*, para estruturas sujeitas ao esforço de flexão

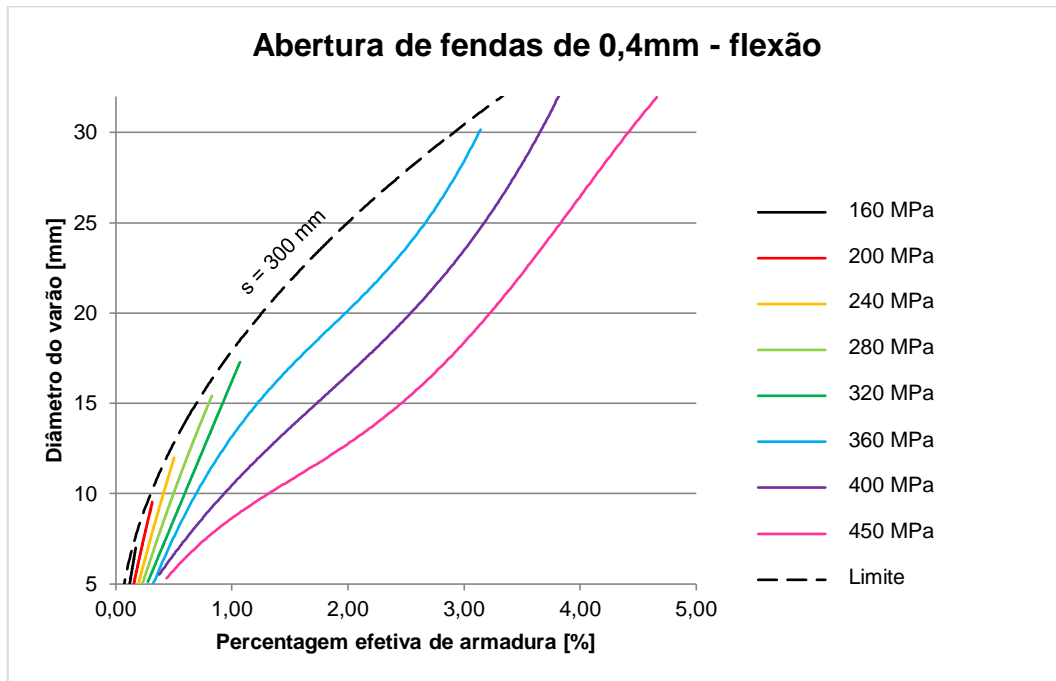


Figura G.1. 1 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,4 mm, para o esforço de flexão.

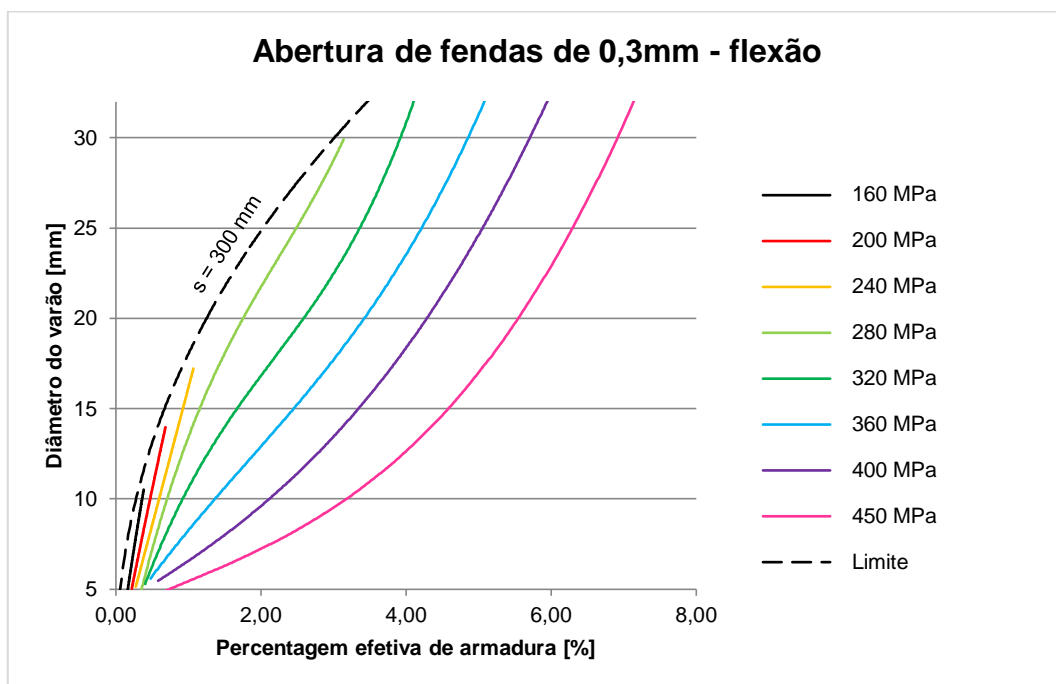


Figura G.1. 2 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,3 mm, para o esforço de flexão.

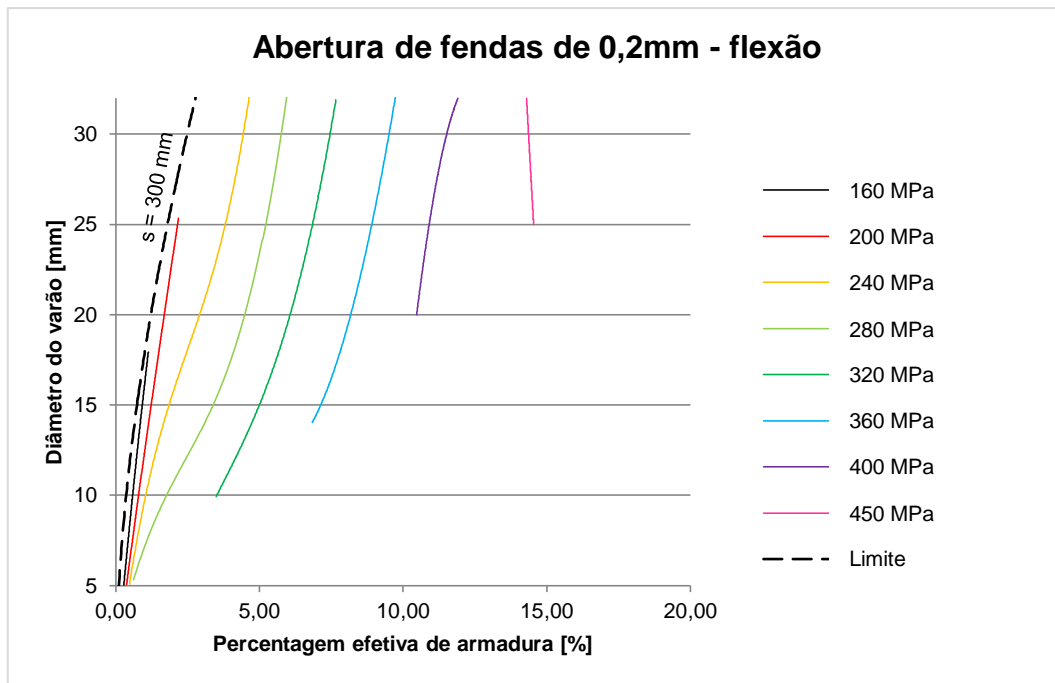


Figura G.1. 3 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,2 mm, para o esforço de flexão.

Anexo G.2 – Gráficos Diâmetro dos varões vs Percentagem efetiva de armadura, para estruturas sujeitas ao esforço de tração

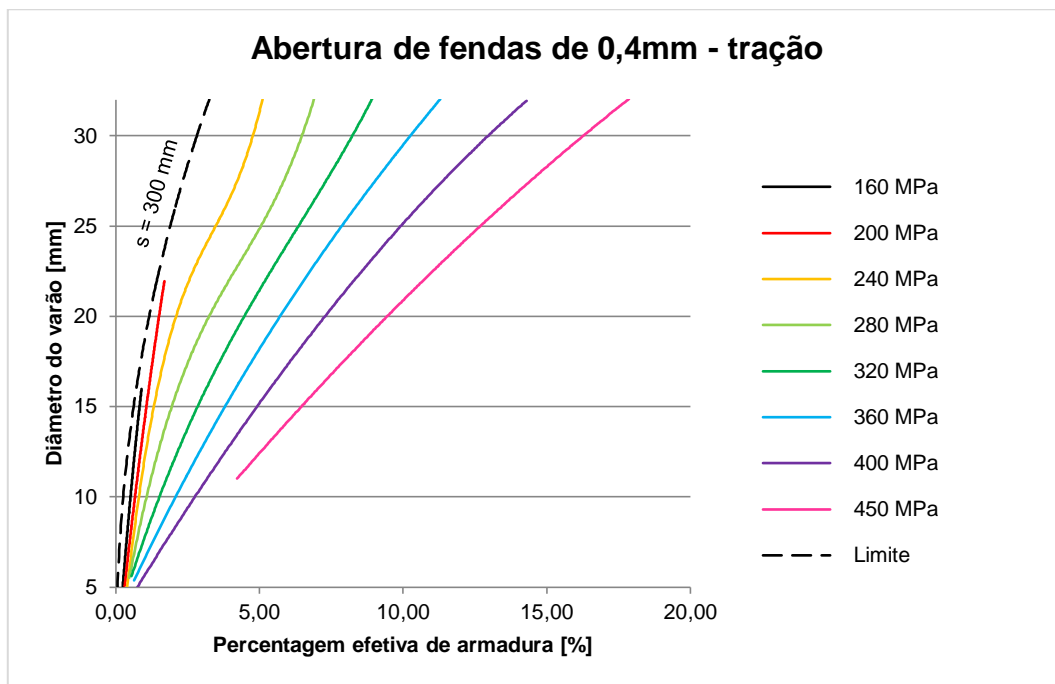


Figura G.2. 1 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,4 mm, para um esforço de tração.

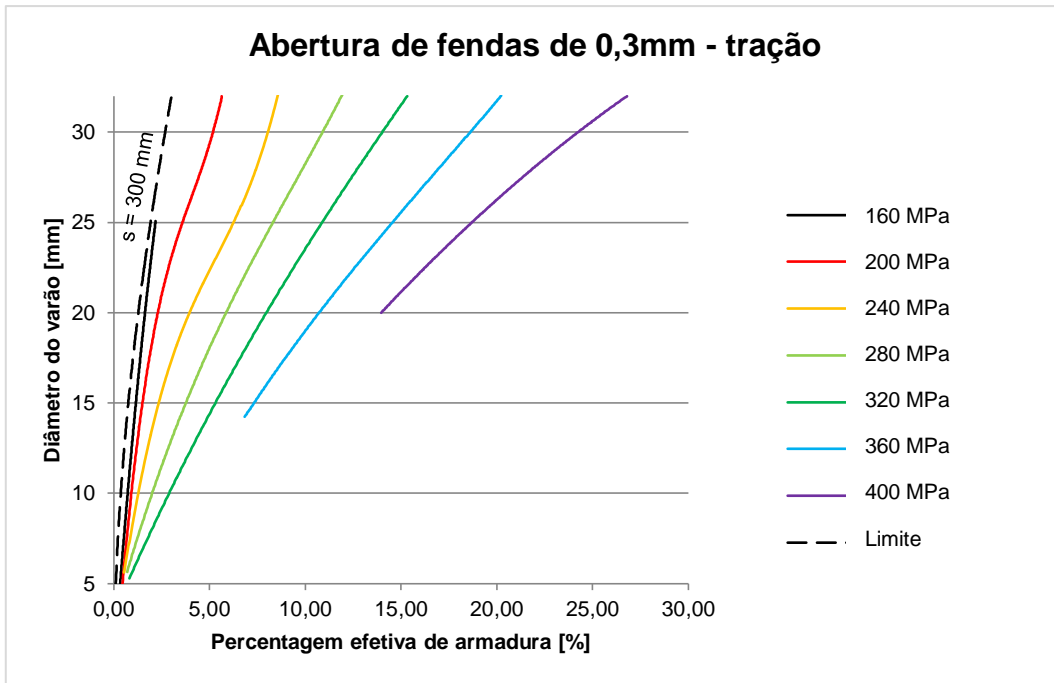


Figura G.2. 2 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,3 mm, para o esforço de tração.

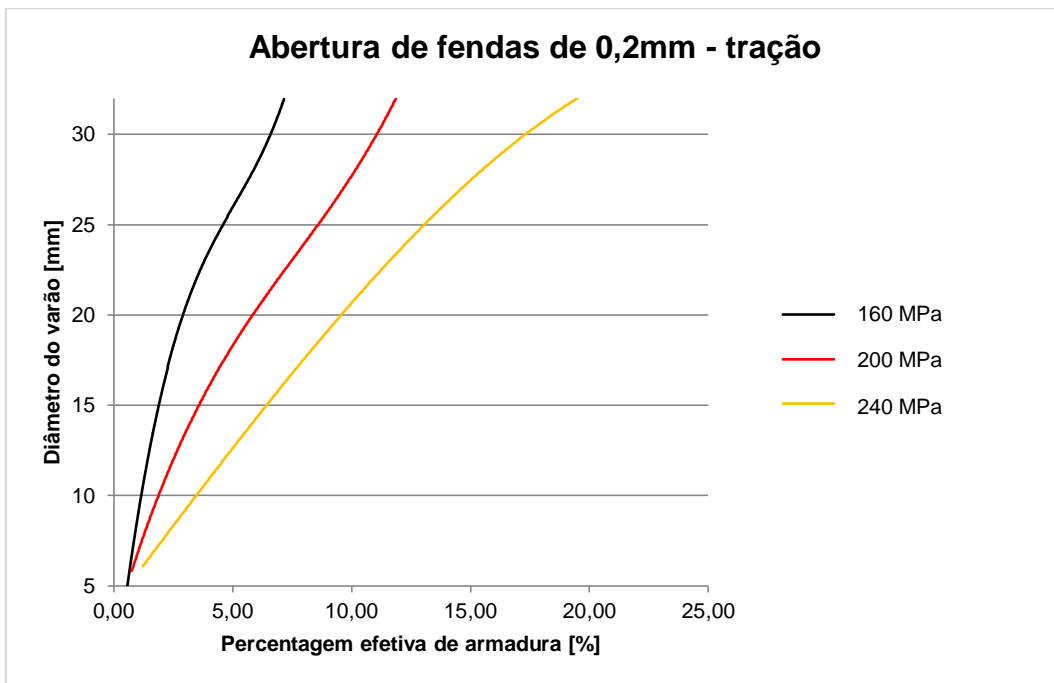


Figura G.2. 3 – Gráfico para uma abertura de fendas de 0,2 mm, para o esforço de tração.