

**Efeito de Recobrimentos Elevados em Vigas de Betão
Armado na Fendilhação**

Filipa Maria Carneiro Pacheco Marques Guedes

Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Rui Vaz Rodrigues

Júri

Presidente: Prof. Doutor José Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro

Orientador: Prof. Doutor Rui Vaz Rodrigues

Vogal: Prof. Doutor António José da Silva Costa

Abril 2016

RESUMO

O presente trabalho incide sobre o efeito de recobrimentos elevados na fendilhação, de vigas de betão armado. A motivação deste trabalho surgiu da necessidade de esclarecer as implicações da utilização destes elevados recobrimentos.

Para tal, recorreu-se aos Regulamentos REBAP, EC2-2010, NBR 6118, ACI 318-95 e aos códigos modelo CEB-FIP 1990 e Model Code 2010, que são analisados individualmente para o cálculo da abertura de fendas e com eles calcularam-se os valores das mesmas para um leque de valores de recobrimentos.

Com este estudo realizou-se a comparação entre os regulamentos e os códigos modelo, determinando quais os que consideram directamente este parâmetro nos seus cálculos e quais os termos preponderantes para o resultado final da abertura de fendas. No respeitante à análise dos modelos associados aos regulamentos, concluiu-se que em geral a abertura de fendas aumenta com a espessura do recobrimento sendo um parâmetro importante, na perspectiva dos valores obtidos.

Com os ensaios realizados por Pérez Caldentey, publicados no artigo “Cracking of RC members revisited: influence of cover, ϕ/ρ_s , e_f and stirrup spacing - an experimental and theoretical study” [7] da autoria de Alejandro Pérez Caldentey, Hugo Corres Peiretti, Joan Peset Iribarren e Alejandro Giraldo, fez-se uma comparação com os modelos segundo os Regulamentos.

Os resultados dos ensaios confirmam que o recobrimento é um parâmetro importante no desenvolvimento de um modelo para o cálculo da abertura de fendas e confirmam também que a abertura de fendas é superior ao nível da superfície do betão em comparação com o nível das armaduras.

Um dos aspectos que se concluiu da comparação dos ensaios [7] com os modelos dos regulamentos e códigos modelo acima referidos foi que os Regulamentos dão valores de aberturas de fendas inferiores aos encontrados nos ensaios.

PALAVRAS-CHAVE

Recobrimento das armaduras, Betão Armado, Abertura de fendas, Fendilhação, REBAP, EC2-2010, NBR 6118, ACI 318-95, CEB-FIP 1990, Model Code 2010.

ABSTRACT

This study focuses on the effect of large covers in reinforced concrete beams or slabs on crack width. The motivation for this work came from the need to clarify the implications of using these high cover.

To this end, and with the help of Regulations such as REBAP, EC2-2010, NBR 6118, ACI 318-95, CEB-FIP Model Code 1990 and Model Code 2010, which were analyzed individually for the calculation of crack width, for a range of values of covers.

These results confirm that cover is an important factor in the development of the cracking pattern.

This study was able to make the comparison between the six models, determining which ones consider this parameter, cover, directly in the calculations of crack width.

With the tests performed by Pérez Caldentey presented in the article "Cracking of RC members revisited: influence of cover, ϕ/ρ_s , $_{eff}$ and stirrup spacing - Experimental and theoretical study," written by Alejandro Pérez Caldentey, Hugo Corres Peiretti, Joan Peset Iribarren and Alejandro Giraldo, it was possible to make a comparison with the calculations carried out according to regulations.

The tests carried out at the Structures Laboratory of the Civil Engineering school of Madrid, designed to confirm, or discard, the effect of cover on crack width, have confirmed that cover is indeed an important parameter regarding this matter. Experimental evidence supports the fact that a large increase in the crack width happens as the crack is measured further away from the bar.

KEY WORDS

Cover, Reinforced Concrete, Crack Width, REBAP, EC2-2010, NBR 6118, ACI 318-95, CEB-FIP Model Code 1990 and Model Code 2010

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Rui Rodrigues, por toda a disponibilidade, colaboração e paciência demonstrada durante a realização do presente trabalho.

À minha família, e em especial ao meu marido, por todo o apoio incondicional que me transmitiram.

Aos meus amigos mais chegados que, à sua maneira deram o contributo para este trabalho.

ÍNDICE

Resumo	ii
Palavras-chave	ii
Abstract	iii
Keywords	iii
Agradecimentos	iv
Índice de Tabelas	vii
Índice de Figuras	viii
Anexos	ix
Simbologia	x
1. Introdução	1
1.1. Principais Objectivos	1
1.2. Estrutura da Dissertação	1
1.3. Enquadramento Geral	2
1.3.1. Recobrimento das armaduras	2
1.3.2. Comportamento de uma barra de betão armado sujeita a um esforço axial aplicado	3
2. Estimativa da abertura de fendas-Regulamentos	6
2.1. REBAP- Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado D.L 348-c/83 de 30 de Julho	6
2.2. Eurocódigo 2- Projecto de Estruturas de betão NP1992-1-1:2010	9
2.3. NBR 6118- Projecto de Estruturas de Concreto- Procedimento 2003	11
2.4. ACI 318-95	13
2.5. CEB-FIP 1990/MC 90	15
2.6. Model Code 2010- Final Draft September 2011	19
3. Avaliação da abertura de fendas- Exemplo segundo os vários Regulamentos	23
3.1. Definição do Exemplo a analisar	23
3.2. Exemplo detalhado para o cálculo da estrutura	25
3.2.1. REBAP	27
3.2.2. Eurocódigo 2	29
3.2.3. Norma Brasileira	31
3.2.4. ACI 318-95-Control of cracking in Concrete Structures	33

3.2.5. CEB-FIP 1990/MC 90	36
3.2.6. Model code 2010- Final Draft.....	38
3.3. Influência do Recobrimento na abertura de fendas – Comparação entre Regulamentos	40
4. Comparação com resultados experimentais.....	45
4.1. Ensaios realizados por Pérez Caldentey et al	45
4.1.1. Definição do Ensaio	46
4.1.2. Resultados do ensaio	48
4.1.3. Influência do Recobrimento	50
4.2. Comparação dos resultados experimentais com os Regulamentos	52
5. Conclusão	57
Referências Bibliograficas.....	60
Anexos	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-1: Recobrimentos mínimos e nominais para períodos de vida de 50 anos e de 100 anos [2].....	2
Tabela 1-2: Localização do cálculo das aberturas de fendas.....	5
Tabela 3-1: Cálculo da abertura de fendas segundo o REBAP.....	27
Tabela 3-2: Aberturas de fendas para o REBAP.....	28
Tabela 3-3: Cálculo da abertura de fendas segundo o EC2.....	29
Tabela 3-4: Aberturas de fendas para o EC2.....	30
Tabela 3-5: Cálculo da abertura de fendas segundo o NBR.....	31
Tabela 3-6: Aberturas de fendas para a NBR.....	32
Tabela 3-7: Cálculo da abertura de fendas segundo o ACI.....	33
Tabela 3-8: Aberturas de fendas, ao nível da armadura, para ACI.....	34
Tabela 3-9: Aberturas de fendas, à superfície, para ACI.....	35
Tabela 3-10: Cálculo da abertura de fendas segundo o CEB-FIP 90.....	36
Tabela 3-11: Aberturas de fendas para CEB-FIP 90.....	37
Tabela 3-12: Cálculo da abertura de fendas, ao nível das armaduras, segundo o MC 2010.....	38
Tabela 3-13: Aberturas de fendas, ao nível das armaduras e à superfície da viga, para MC 2010.....	39
Tabela 3-14: Aberturas de fendas, ao nível das armaduras, para todos os regulamentos estudados.....	40
Tabela 3-15: Resumo do cálculo da abertura de fendas para REBAP, EC2,CEB-FIP 90 e MC 2010.....	42
Tabela 3-16: Distância máxima e média entre fendas para o REBAP, EC2, CEB-FIP 90 e MC 2010.....	44
Tabela 3-17: Extensão relativa para o REBAP, EC2, CEB-FIP 90 e MC 2010.....	44
Tabela 4-1: Valores das aberturas de fendas dos ensaios realizados em laboratório, retirados do artigo acima referido, para.....	52
Tabela 4-2: Valores das aberturas de fendas dos ensaios realizados em laboratório, retirados do artigo acima referido, para recobrimentos de 2 cm.....	52
Tabela 4-3: Valores das aberturas de fendas calculadas segundo os Regulamentos, para recobrimentos de 2 cm.....	53
Tabela 4-4: Valores das aberturas de fendas calculadas segundo os Regulamentos, para recobrimentos de 7 cm.....	53
Tabela 4-5: Valores das aberturas de fendas, calculados ao nível da superfície, para recobrimentos de 2 cm.....	56
Tabela 4-6: Valores das aberturas de fendas, calculados ao nível da superfície, para recobrimentos de 7 cm.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Comportamento de uma barra de betão armado sujeita a um esforço axial.....	3
Figura 1-2: Comportamento de uma barra sujeita a um aumento de deformação imposta-tirante.....	3
Figura 1-3: Comportamento de uma barra sujeita a um aumento de deformação imposta.....	4
Figura 2-1: Cálculo da área de betão efectiva [1].....	7
Figura 2-2: Cálculo da área de betão efectiva [2].....	10
Figura 2-3: Cálculo da área de betão efectiva [3].....	11
Figura 2-4: Valor limite da abertura de fendas segundo [4].....	15
Figura 2-5: Tabela que indica os valores de β e τ_{bk} [5].....	17
Figura 2-6: Cálculo da área de betão efectiva para vigas de betão armado [5].....	18
Figura 2-7: Valores de β e τ_{bk} [6].....	21
Figura 2-8: Distribuição de tensões num comprimento $2.L_{s,m\acute{a}x}$ [6].....	21
Figura 2-9: Cálculo da área de betão efectiva para vigas de betão armado [6].....	22
Figura 3-1: Laje de soleira com altura de 2,0 m.....	23
Figura 3-2: Secção transversal do exemplo a analisar	23
Figura 3-3: Secção transversal da viga de betão armado a analisar	25
Figura 3-4: Diagrama de extensões da viga a analisar	26
Figura 3-5: Gráfico da abertura de fendas, ao nível das armaduras, para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento REBAP	28
Figura 3-6: Gráfico da abertura de fendas para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento EC2.....	30
Figura 3-7: Gráfico da abertura de fendas para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento NBR	32
Figura 3-8: Gráfico da abertura de fendas, ao nível da armadura, para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento ACI	34
Figura 3-9: Gráfico da abertura de fendas, à superfície, para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento ACI	35
Figura 3-10: Gráfico da abertura de fendas para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento CEB-FIP 90.....	37
Figura 3-11: Gráfico da abertura de fendas, ao nível das armaduras e na superfície da viga, para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento MC 2010	39
Figura 3-12: Comparação da abertura de fendas, ao nível das armaduras, para todos os Regulamentos.....	41
Figura 3-13: Relação entre $L_{s,m\acute{a}x}$ e $S_{r,m\acute{a}x}$ [5]	43
Figura 3-14: Relação entre $L_{s,m\acute{a}x}$ do CEB-FIP 90 e $L_{s,m\acute{a}x}$ do Model Code 2010 [6].....	43
Figura 4-1: Preparação dos testes a realizar no Ensaio de Pérez Caldentey [7].....	46
Figura 4-2: Valores da tensão do betão medidos no ensaio aos 7º e 28º dia [7].....	46
Figura 4-3: Secções transversais das vigas de betão armado a ensaiar [7].....	47
Figura 4-4: Características principais das vigas testadas [7].....	47

Figura 4-5: Espaçamento médio e máximo das fendas, medido nos ensaios [7]..	48
Figura 4-6: Efeito do espaçamento entre estribos no espaçamento de fendas, em vigas de diâmetros de 12 mm de armadura longitudinal (c=20 mm) [7].....	48
Figura 4-7: Efeito do espaçamento entre estribos no espaçamento de fendas, em vigas de diâmetros de 12 mm de armadura longitudinal (c=70 mm) [7].....	49
Figura 4-8: Efeito do espaçamento entre estribos no espaçamento de fendas, em vigas de diâmetros de 25 cm de armadura longitudinal (c=20 mm) [7].....	49
Figura 4-9: Efeito do espaçamento entre estribos no espaçamento de fendas, em vigas de diâmetros de 25 cm de armadura longitudinal (c= 70mm) [7].....	49
Figura 4-10: Efeito do recobrimento na abertura de fendas [7].	51
Figura 4-11: Efeito do recobrimento no espaçamento entre fendas [7].....	51
Figura 4-12: Comparação do tamanho das aberturas de fendas dos ensaios com os Regulamentos (c= 2cm).....	54
Figura 4-13: Comparação do tamanho das aberturas de fendas dos ensaios com os Regulamentos (c= 7cm).....	54
Figura 5-1: Evolução da abertura de fenda ao longo do betão de recobrimento (ensaios de Borosnyói and Snóbli) [7].....	57
Figura 5-2: Ensaios de Husain and Ferguson, mostrando o aumento na abertura de fendas com a distância à armadura [7].	57
Figura 5-3: Padrão de fendilhação em testes realizados por Gómez Navarro [7].....	58
Figura 5-4: Padrão de fendilhação, com e sem recobrimentos elevados (Caldentey et al.) [7].	58

ANEXOS

Anexo 1: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o REBAP, para as vigas 25-20-XX.....	62
Anexo 2: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o REBAP, para as vigas 25-70-XX.....	63
Anexo 3: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o EC2, para as vigas 25-20-XX.....	64
Anexo 4: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o EC2, para as vigas 25-70-XX.....	65
Anexo 5: Cálculo da abertura de fendas, Segundo a NBR, para as vigas 25-20-XX.....	66
Anexo 6: Cálculo da abertura de fendas, Segundo a NBR, para as vigas 25-70-XX.....	67
Anexo 7: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o ACI, para as vigas 25-20-XX.....	68
Anexo 8: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o ACI, para as vigas 25-70-XX.....	69
Anexo 9: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o CEB-FIP, para as vigas 25-20-XX.....	70
Anexo 10: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o CEB-FIP, para as vigas 25-70-XX.....	71
Anexo 11: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o MODEL CODE 2010, para as vigas 25-20-XX	72
Anexo 12: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o MODEL CODE 2010, para as vigas 25-70-XX	73

SIMBOLOGIA

- S_{rm} : distância média entre fendas;
- c : recobrimento da armadura;
- s : espaçamento dos varões da armadura;
- η_1 : coeficiente dependente das características de aderência dos varões;
- η_2 : coeficiente dependente da distribuição de tensões de tracção na secção;
- ϕ : diâmetro da armadura;
- ρ_r : taxa de armadura;
- w_m : valor médio da largura de fendas;
- ε_{sm} : extensão média da armadura;
- σ_s : tensão de tracção na armadura, a tensão deve ser calculada em secção fendilhada;
- E_s : módulo de elasticidade do aço;
- σ_{sr} : tensão de tracção na armadura, calculada em secção fendilhada, correspondente ao esforço que provoca o início da fendilhação;
- β_1 : coeficiente dependente das características de aderência dos varões da armadura;
- β_2 : coeficiente dependente da permanência ou da repetição das acções;
- $S_{r,m\acute{a}x}$: distância máxima entre fendas;
- ε_{cm} : extensão média do betão entre fendas;
- α_e : relação E_s/E_{cm} ;
- $A_{c,eff}$: área da secção efectiva de betão traccionado que envolve as armaduras;
- k_t : coeficiente função da duração do carregamento;
- w_b : tamanho máximo espectável, da fenda na base da viga, in; (ACI)
- w_s : tamanho máximo espectável, da fenda ao nível da armadura, in; (ACI)
- f_s : tensão no aço; (ACI)
- A : área de betão efectiva, dividida pelo número de barras, in^2 ; (ACI)
- t_b : distância entre a base e o centro da armadura, in; (ACI)

- t_s : distância entre a face lateral da viga e o centro da armadura, in; (ACI)
- d : altura útil;
- ε_{cs} : extensão do betão devido à retracção;
- $l_{s,máx}$: comprimento onde se verifica escorregamento entre o aço e o betão, considerada a zona de descontinuidade;
- σ_{s2} : tensão do aço na fenda; (MC90)
- τ_{bk} : valor da tensão de escorregamento entre o aço e o betão; (MC90)
- ε_{s2} : extensão do aço na fenda; (MC90)
- β : coeficiente que depende do tipo de carregamento; (MC90)
- ε_{sr2} : extensão relativa ao esforço associado à fendilhação do betão; (MC90)
- $f_{ctm}(t)$: f_{ctm} no instante (t) em que a fenda aparece;
- τ_{bms} : tensão tangencial média entre o aço e o betão; (MC2010)
- η_r : coeficiente que considera a contribuição da retracção; (MC2010)
- ε_{sh} : extensão de retração; (MC2010)

1. INTRODUÇÃO

1.1. PRINCIPAIS OBJECTIVOS

Este trabalho apresenta como principal objectivo avaliar a importância do recobrimento no cálculo da abertura de fendas em estruturas do tipo vigas ou lajes em betão armado. Constituem exemplos de estruturas com recobrimentos elevados, as estruturas hidráulicas onde de acordo com [9] se preconiza adoptar 10 cm de recobrimento mínimo para estruturas sujeitas a correntes de água em alta velocidade ($v \geq 12$ m/s). Para esta velocidade recobrimentos de 10 cm são adoptados devido a fenómenos de abrasão e cavitação.

Com recurso aos regulamentos REBAP, EC2, NBR 6118:2003, ACI e aos Códigos modelo MC 90 e Model Code 2010, e com a comparação entre os mesmos, pretender determinar a avaliação com a realidade, tendo em conta os ensaios experimentais [7].

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente documento encontra-se organizado nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 : Breve introdução ao tema e o seu enquadramento geral.

Capítulo 2: No capítulo 2 mostra-se resumidamente o processo de cálculo da abertura de fendas, segundo os regulamentos REBAP, EC2, NBR, ACI e os Códigos Modelo MC 90 e Model Code 2010.

Capítulo 3: Neste capítulo faz-se a avaliação da abertura de fendas, com recurso à análise de um exemplo, para todos os 6 modelos dos regulamentos e códigos referidos no ponto anterior, e com a comparação entre os resultados obtidos, efectua-se uma breve nota sobre a influência do recobrimento na abertura de fendas.

Capítulo 4: Neste capítulo referem-se os ensaios realizados por Pérez Caldentey et al. [7] e faz-se a comparação dos resultados experimentais, com os resultados dos Regulamentos, e uma breve conclusão sobre quais os que melhor representam a realidade.

Capítulo 5: Neste capítulo fazem-se as conclusões sobre o tema estudado.

1.3. ENQUADRAMENTO GERAL

1.3.1. Recobrimento das armaduras

O recobrimento das armaduras é um parâmetro importante para a durabilidade das estruturas, em particular pela protecção contra a corrosão por carbonatação, ou por acção dos cloretos.

A corrosão das armaduras é um dos defeitos mais frequentes das construções de betão armado, resultando da carbonatação de CO_2 com conseqüente abaixamento de pH do betão, do seu efeito protector ou da presença de cloretos no betão que envolve as armaduras. Estas causas podem ser agravadas pela presença de fissuras ou defeitos de compacidade, que permitem a penetração de agentes agressivos, pelo recobrimento insuficiente.

De acordo com Appleton [8], a qualidade do betão, as condições de exposição, assim como o tempo de exposição dos elementos de betão, influenciam a evolução dos valores do coeficiente de difusão de cloretos. De facto, as estruturas de betão armado localizadas em ambientes marítimos encontram-se em situações mais oportunas de sofrer corrosão de armaduras provindo do ataque de cloretos. Porém, os iões cloreto poderão encontrar-se no ligante aplicado no betão armado, devido à utilização de areias inadequadas no mesmo. No entanto, a espessura do recobrimento e o estado de conservação superficial dos elementos construtivos de betão armado, influenciam a progressão da penetração dos cloretos nos elementos em questão. No que diz respeito à espessura do recobrimento, este parâmetro não dificulta a penetração dos cloretos no betão armado, apenas atrasa o início da corrosão das armaduras.

De acordo com o Anexo Nacional do Eurocódigo 2, Quadro NA II. os recobrimentos mínimos e nominais para períodos de vida de 50 anos (Classe Estrutural S4) e de 100 anos (Classe Estrutural S6) são os preconizados no Quadro 1-1. (c_{min} : recobrimento mínimo, c_{nom} : recobrimento nominal) reflectindo a adopção de maiores recobrimentos para situações relacionadas com a carbonatação (XC), ou relacionadas com a exposição cloretos em ambientes marítimos (XD):

Tabela 1-1: Recobrimentos mínimos e nominais para períodos de vida de 50 anos e de 100 anos [2].

		X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
Tempo de vida útil de projecto de 50 anos (Classe Estrutural S4)	Recobrimento mínimo (mm)	10	15	25	30	35	40	45
	Recobrimento nominal (mm)	20	25	35	40	45	50	55
Tempo de vida útil de projecto de 100 anos (Classe Estrutural S6)	Recobrimento mínimo (mm)	20	25	35	40	45	50	55
	Recobrimento nominal (mm)	30	35	45	50	55	60	65

1.3.2. Comportamento de uma barra de betão armado sujeita a um esforço axial aplicado

Começa por se apresentar o comportamento de um tirante de betão armado, tirante esse que está presente na zona traccionada de qualquer peça de betão armado, a análise do comportamento do tirante é generalizada para o estudo do comportamento de uma viga sujeita à flexão.

As Figuras 1-1 e 1-2 mostram o comportamento de um tirante de betão armado sujeito a um esforço axial aplicado. Na zona das fendas, o aço suporta as tensões a 100%, para ambos os lados da fenda, o carregamento é parcialmente transmitido ao betão, chamada área de descontinuidade. A uma distância de $L_{s,máx}$ da fenda, é chegada novamente a situação de “continuidade”. Sob um aumento de deformação, mais fendas aparecerão ao longo do elemento.

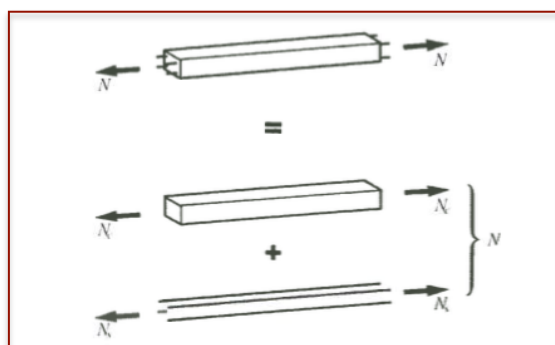


Figura 1-1: Comportamento de um tirante de betão armado sujeita a um esforço axial – tirante [10].

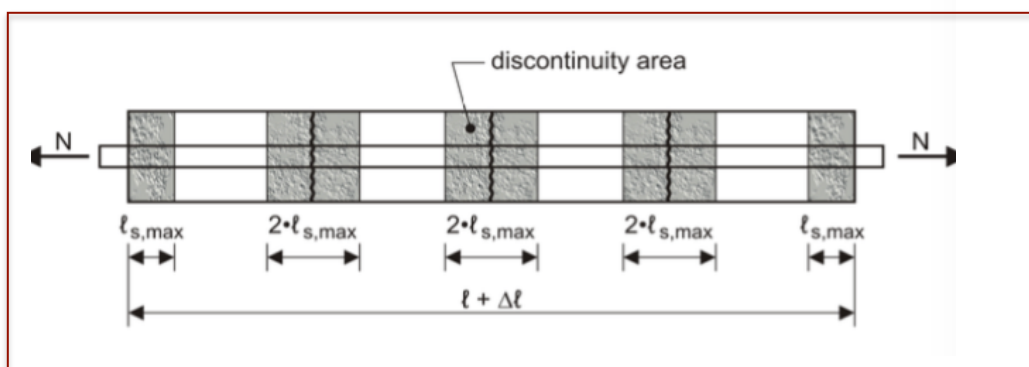


Figura 1-2: Comportamento de um tirante sujeita a um aumento de esforço axial – tirante [6].

O cálculo da abertura de fendas é baseado no comportamento de um tirante de betão armado, sujeito a um carregamento axial. Quando a barra é sujeita a um aumento de tensão, são verificados quatro comportamentos distintos, analisados no gráfico da Figura 1-3.

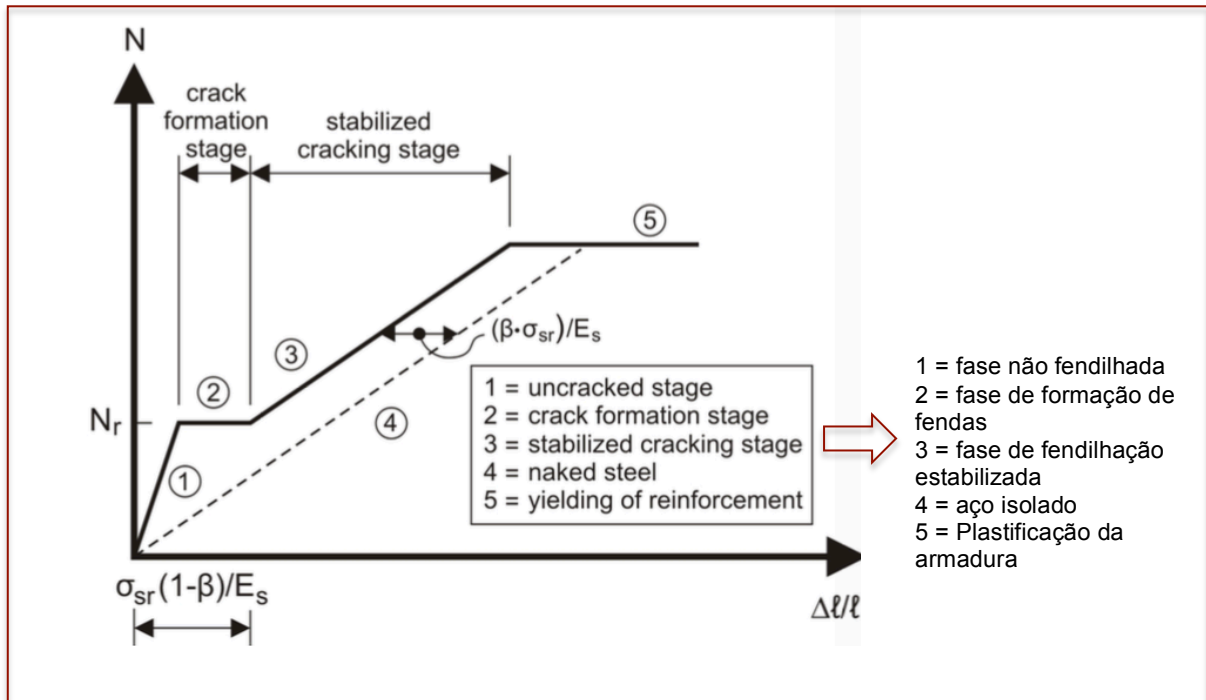


Figura 1-3: Comportamento de uma barra sujeita a um aumento de carga imposta [6]

As quatro fases são as seguintes:

- 1) Fase não fendilhada, o elemento apresenta um comportamento linear elástico.
- 2) Início e formação da fendilhação, em que após a formação da primeira fenda devido a ser ultrapassada a tensão de rotura à tracção do betão num dado ponto, o elemento perde rigidez de forma considerável.
- 3) Fendilhação estabilizada, nesta fase não existe o aparecimento de novas fendas, mas ocorre um aumento na abertura de fendas existentes.
- 4) Esta fase está representada no gráfico com o número 5 e representa a fase de rotura, em que as armaduras atingem o seu limite de elasticidade e entram em regime plástico.

Conforme se referiu, a primeira fenda aparece quando se atinge a resistência à tracção do ponto mais fraco do elemento, fase 2) do gráfico da Figura 1-3. A formação desta fenda origina uma alteração profunda do estado de tensão no elemento, ou seja, na secção da fenda a totalidade da força passa a ser suportada pelo aço e a tensão no betão adjacente à fenda passa para zero. Localmente, junto à fenda, existe uma perda de aderência entre as armaduras e o betão. A aderência é, à medida que a

distância em relação à fenda vai aumentando, a responsável pela progressiva transferência de tensão entre a armadura e o betão.

A uma distância s_0 da fenda a distribuição de tensões entre o betão e o aço passa a ser igual à do betão não fendilhado, esta redistribuição de tensões traduz-se num aumento de tensão no elemento. À medida que a carga aumenta vão se formando novas fendas, o processo continuará até que todas as fendas estejam formadas.

A rigidez final, depois de formadas todas as fendas, será semelhante à do comportamento do aço isoladamente, sendo esse o valor mínimo possível para a rigidez.

Para efeitos de comparação entre regulamentos, importa distinguir onde é avaliada a abertura de fendas. Alguns regulamentos dão a possibilidade de efectuar a avaliação ao nível das armaduras, ou ao nível da superfície, conforme se indica na Tabela 1-1.

Tabela 1-2: Localização do cálculo das aberturas de fendas.

	w_k (ao nível das armaduras)	w_k (ao nível da superfície)
REBAP	X	
EC2	$X^{(1)}$	
NBR	$X^{(1)}$	
ACI	X	X
MC 90	$X^{(1)}$	
MC 2010	X	X

(1) Não se refere explicitamente onde é avaliada a abertura de fendas.

No âmbito desta comparação, apresentam-se os resultados ao nível das armaduras.

2. ESTIMATIVA DA ABERTURA DE FENDAS-REGULAMENTOS

2.1. REBAP- REGULAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO D.L 348-C/83 DE 30 DE JULHO

A determinação do valor característico da abertura de fendas, w_k , pode ser efectuada pelas expressões (2.1.1) e (2.1.2):

$$w_k = 1,7 \cdot w_m \quad (2.1.1)$$

$$w_m = S_{rm} \cdot \varepsilon_{sm} \quad (2.1.2)$$

Em que:

w_m : valor médio da largura de fendas.

S_{rm} : distância média entre fendas.

ε_{sm} : extensão média da armadura.

No caso de elementos sujeitos à tracção ou à flexão, simples ou composta, a distância média entre fendas pode ser calculada do modo a seguir indicado (2.1.3).

$$S_{rm} = 2 \times \left(c + \frac{s}{10} \right) + \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_r} \quad (2.1.3)$$

Em que:

c : recobrimento da armadura.

s : espaçamento dos varões da armadura; "s" deve ser considerado igual a 15ϕ quando o espaçamento exceder este limite.

η_1 : coeficiente dependente das características de aderência dos varões, que deve ser igual a 0,4 para varões de alta aderência e igual a 0,8 para varões de aderência normal.

η_2 : coeficiente dependente da distribuição de tensões de tracção na secção, dado por (2.1.4):

$$\eta_2 = 0,25 \cdot \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2\varepsilon_1} \quad (2.1.4)$$

em que ε_1 e ε_2 são, as extensões aos níveis inferior e superior da área do betão envolvente da armadura, respectivamente, calculadas em secção fendilhada.

ϕ : diâmetro dos varões da armadura.

ρ_r : relação $A_s/A_{c,r}$, em que A_s é a área da secção da armadura e $A_{c,r}$ é a área da secção do betão tracionado envolvente da armadura.

“A área $A_{c,r}$ é definida como o somatório das áreas de influência de cada varão da armadura, cada uma das quais deve estar contida num rectângulo centrado no varão e com igual lado, no máximo, a 15ϕ e deve ser limitada pelo contorno da secção, não devendo sobrepor-se às áreas de influência de varões contíguos; além disso, as áreas de influência devem situar-se totalmente na zona tracionada da secção” . [1]

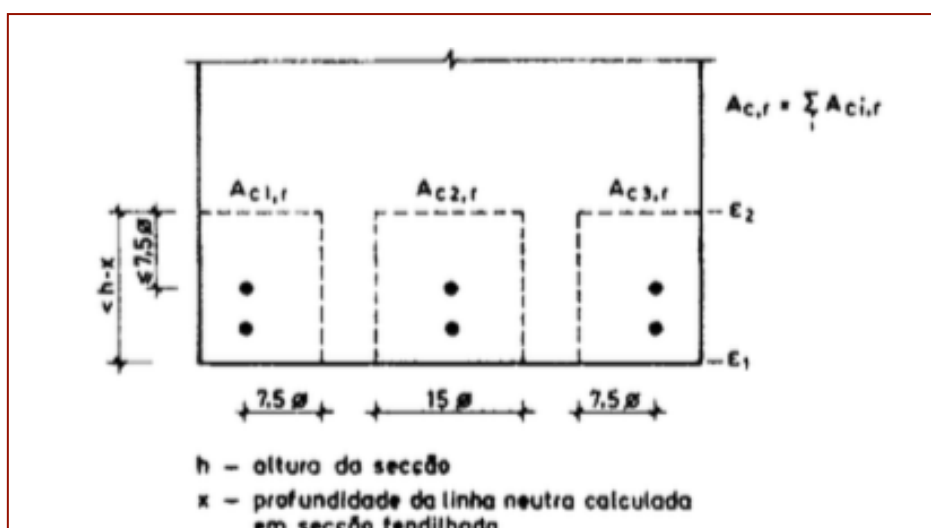


Figura 2-1: Cálculo da área de betão efectiva [1].

A extensão média das armaduras tracionadas é dada por (2.1.5):

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot (1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot (\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s})^2) \quad (2.1.5)$$

Em que:

σ_s : tensão de tracção na armadura, a tensão deve ser calculada em secção fendilhada.

E_s : módulo de elasticidade do aço.

σ_{sr} : tensão de tracção na armadura, calculada em secção fendilhada, correspondente ao esforço que provoca o início da fendilhação.

β_1 : coeficiente dependente das características de aderência dos varões da armadura, que deve ser igual à unidade para varões de alta aderência e igual a 0,5 para varões de aderência normal.

β_2 : coeficiente dependente da permanência ou da repetição das acções, que deve ser igual a 0,5 no caso de combinações frequentes ou quase permanentes e igual a 1,0 no caso de combinações raras de acções.

O valor da extensão média das armaduras não pode, em caso algum, ser considerado inferior a $0,4 \cdot (\sigma_s / E_s)$.

As expressões indicadas no regulamento para o cálculo da distância média entre fendas, S_{rm} , e da extensão média das armaduras, ε_{sm} , embora deduzidas para fendilhação estabilizada, podem ser aplicadas a casos de fendilhação não estabilizada [1].

2.2. EUROCÓDIGO 2- PROJECTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO NP1992-1-1:2010

A largura de fendas, w_k , poderá ser calculada pela expressão (2.2.1),

$$w_k = S_{r,máx} \times (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2.2.1)$$

Em que:

$S_{r,máx}$: distância máxima entre fendas.

ε_{sm} : extensão média da armadura para a combinação de acções considerada.

ε_{cm} : extensão média do betão entre fendas.

$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ poderá ser calculado pela expressão (2.2.2):

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (2.2.2)$$

Em que:

σ_s : tensão na armadura de tracção admitindo a secção fendilhada.

α_e : relação E_s/E_{cm} .

$\rho_{p,eff}$: $(A_s + \xi_1^2 \cdot A'_p) / A_{c,eff}$ (2.2.3)

$A_{c,eff}$: área da secção efectiva de betão traccionado que envolve as armaduras para betão armado ou de pré-esforço com uma altura $h_{c,eff}$, em que $h_{c,eff}$ é o menor dos valores $2,5 \cdot (h-d)$, $(h-x)/3$ ou $h/2$.

k_t : coeficiente função da duração do carregamento:

$k_t = 0,6$ para acções de curta duração;

$k_t = 0,4$ para acções de longa duração;

A área de betão efectiva é calculada com recurso à Figura 2-2.

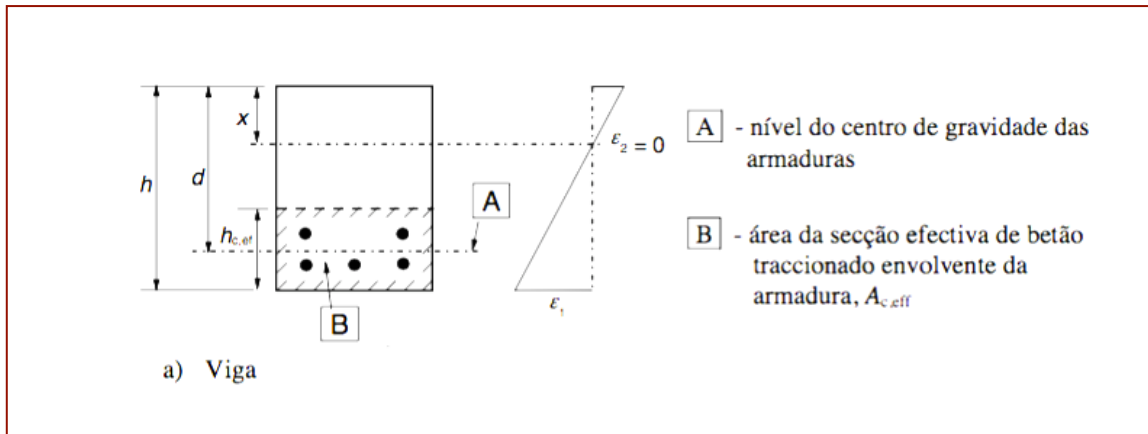


Figura 2-2: Cálculo da área de betão efectiva [2].

$S_{r,máx}$ poderá ser calculado pelas expressões e expressões (2.2.4) e (2.2.5), caso o espaçamento entre as armaduras seja inferior ou superior a $5(c + \Phi/2)$, respectivamente.

$$S_{r,máx} = k_3 \times c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \times \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (2.2.4)$$

$$S_{r,máx} = 1,3 \times (h - x) \quad (2.2.5)$$

Em que:

ϕ : diâmetro dos varões.

c: recobrimento das armaduras longitudinais.

k_1 : coeficiente que tem em conta as propriedades de aderência das armaduras:

= 0,8 para varões de alta aderência.

= 1,6 para armaduras com uma superfície efectivamente lisa (por exemplo, armaduras de pré-esforço).

k_2 : coeficiente que tem em conta a distribuição das extensões:

= 0,5 para a flexão.

= 1,0 para a tracção simples.

Os valores de k_3 e k_4 podem ser indicados no Anexo Nacional, os valores recomendados são, respectivamente, 3,4 e 0,425.

2.3. NBR 6118- PROJECTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO- PROCEDIMENTO 2003

Conforme se refere no regulamento Brasileiro, o valor da abertura de fendas pode sofrer a influência de restrições às variações volumétricas da estrutura, na avaliação da abertura de fendas essa influência é difícil de ser considerada de uma forma precisa. O valor da abertura de fendas é também influenciado pelas condições de execução da estrutura.

Por estas razões, os critérios apresentados pela norma NBR 6118:2003 são referidos como avaliações aceitáveis do comportamento geral do elemento, mas não garantem a avaliação precisa da abertura de uma fenda em específico.

Para cada elemento de armadura que controla a fissuração do elemento estrutural, deve ser considerada uma área de betão efectiva, A_{cri} , constituída por um retângulo, cujos lados não distam mais de $7,5 \times \phi$ do eixo do varão, como mostra a Figura 2-3.

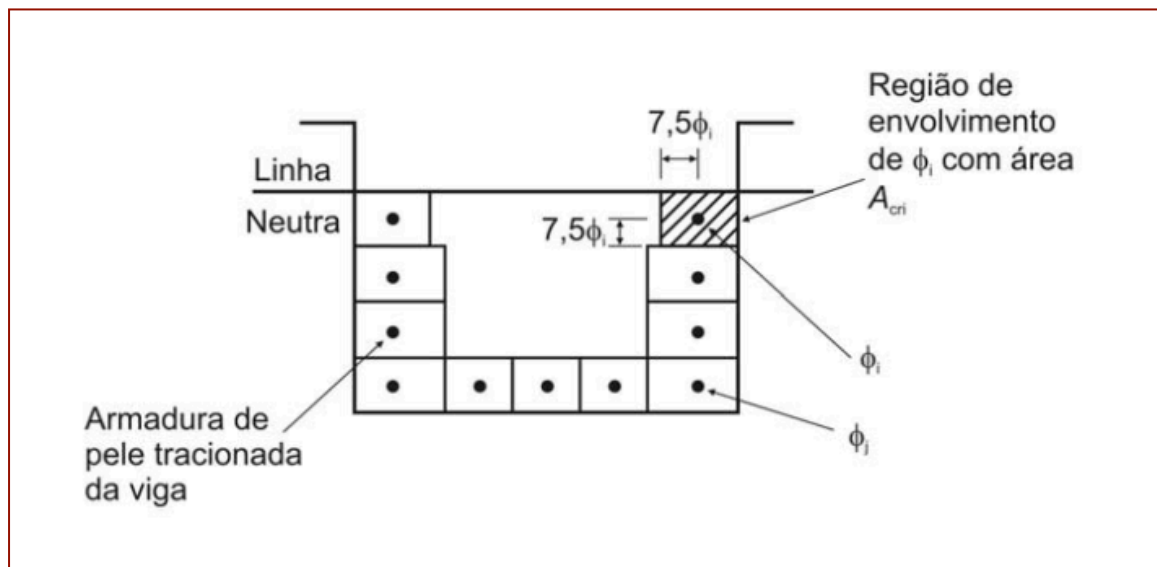


Figura 2-3: Cálculo da área de betão efectiva [3].

O valor característico da abertura de fendas, w_k , é o menor valor calculado segundo as expressões (2.3.1) e (2.3.2).

$$w_k = \frac{\phi_i}{12,5\eta_1} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}} \quad (2.3.1)$$

$$w_k = \frac{\phi_i}{12,5\eta_1} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \quad (2.3.2)$$

Em que:

σ_{si} : é a tensão de tracção no centro de gravidade da armadura considerada, calculada no Estado II.

ϕ_i : é o diâmetro do varão que protege a região de envolvimento.

E_{si} : é o módulo de elasticidade do aço do varão considerado, de diâmetro ϕ_i .

ρ_{ri} : é a taxa de armadura passiva ou activa aderente (que não esteja dentro da bainha) em relação à área da região de envolvimento (A_{cri}).

A_{cri} : é a área de região de envolvimento protegida pelo varão ϕ_i .

η_1 : é o coeficiente de conformação superficial da armadura considerada, igual a 2,25 para varões nervurados.

O cálculo no Estado II, que admite comportamento linear dos materiais e despreza a resistência à tracção do betão, pode ser feito considerando a relação α_e entre módulos de elasticidade do aço e do betão igual a 15.

2.4. ACI 318-95

Segundo a comit  de ACI 224, o controlo da fendilha o   tão importante como o controlo da flexão. A fendilha o numa zona tensionada pode começar com valores de tensões no aço tão baixos como 20 MPa. No entanto, a fendilha o assume um papel controverso no que respeita   corrosão do aço, havendo dois pontos de vista.

O primeiro, defende que a fendilha o reduz o tempo de vida de uma estrutura, permitindo uma mais rápida penetra o da carbonata o. O segundo ponto de vista defende, que o facto da fendilha o acelerar o processo de corrosão,   localizada e com o tempo, a água e cloretos penetram zonas não fendilhadas e a corrosão "espalha-se" por toda a estrutura, não havendo, passando uns anos diferenças significativas entre as zonas fendilhadas e não fendilhadas.

Refere-se também que mais importante do que haver um sofisticado método de cáculo para a fendilha o   importante haver um especial cuidado nos detalhes de uma estrutura, como uma adequada selec o de diâmetros dos varões das armaduras, um adequado espaçamento entre elas, uma redu o na deforma o.

O método de cáculo da fendilha o para o regulamento ACI, detalhado abaixo,   constituído por um leque de equa o es onde se prevê que 90% da abertura de fendas numa estrutura de betão armado seja inferior ao valor calculado por este mesmo leque de equa o es. No entanto, refere-se também que, experimentalmente, fendas isoladas podem chegar a ter o dobro do tamanho que as calculadas segundo o regulamento, de acordo com os estudos de Hilmeberg e Lindgren, membros da comit  de ACI [4]. Esta diferença entre o cáculo computacional e o experimental pode aumentar com o tamanho do elemento avaliado.

As conclusões chegadas pela Comit  deste regulamento são as seguintes:

- A variável mais importante para o tamanho da abertura de fendas   a tensão aplicada no aço (σ_s).
- As duas variáveis geométricas importantes são o recobrimento das armaduras (c) e a área de betão efectiva ($A_{c,eff}$).
- O diâmetro da armadura não   uma variável fundamental para este cáculo.
- $\frac{w_b}{w_s}$   proporcional a $\frac{\epsilon_b}{\epsilon_s}$.

Sendo,

$$w_b = 0,091 \cdot \sqrt[3]{t_b \cdot A} \cdot \beta \cdot (f_s - 5) \cdot 10^{-3} \quad (\text{in}) \quad (2.4.1)$$

$$w_s = \frac{0,091 \cdot \sqrt[3]{t_b \cdot A}}{1 + \frac{t_s}{h_1}} \cdot (f_s - 5) \cdot 10^{-3} \quad (\text{in}) \quad (2.4.2)$$

Em que:

w_b : Tamanho máximo espectável, da fenda na base da viga, in.

w_s : Tamanho máximo espectável, da fenda ao nível da armadura, in.

f_s : tensão no aço.

A: área de betão efectiva, dividida pelo número de barras, in^2 .

t_b : distância entre a base e o centro da armadura, in.

t_s : distância entre a face lateral da viga e o centro da armadura, in.

β : aproximadamente 1,2 para vigas.

d: altura útil.

$h_1 = d - x$.

Quando é usada a deformação do aço em vez da sua tensão, como acção, a equação pode ser alterada para:

$$w_b = 2,2 \cdot \beta \cdot \varepsilon_s \cdot \sqrt{d_c \cdot A} \quad (\text{in}) \quad (2.4.3)$$

Em que:

d_c : recobrimento da armadura, in.

No entanto, sendo feita uma reavaliação do cálculo da fendilhação, o comité 218 deste regulamento acredita que as equações atrás apresentadas só são válidas para recobrimentos até 6,3 cm (2,5 in), e sublinha que os parâmetros mais importantes para a fendilhação em vigas de betão armado, devido à flexão, são a tensão no aço (f_s), o recobrimento da armadura (c) e o espaçamento entre barras (s). Esta comité indica que o espaçamento da armadura mais chegada à face tensionada não deve ser superior ao dado em (2.4.4).

$$s(\text{in}) = \frac{540}{f_s} - 2,5c_c \leq 12 \quad (\text{in}) \quad (2.4.4)$$

Em que:

c_c : menor valor entre os recobrimentos vertical e horizontal, in.

$f_s = 0,6$.

2.5. CEB-FIP 1990/MC 90

A abertura característica de fendas, w_k , é expressa em função do comprimento $l_{s,máx}$, comprimento onde existe escorregamento entre o aço e o betão, que se refere, aproximadamente, em fendilhação estabilizada, à zona em que a viga está fendilhada.

A expressão (2.5.1) que, segundo o regulamento CEB-FIP 1990/MC 90, nos dá uma boa aproximação para o valor da abertura de fendas é a apresentada a baixo.

$$w_k = l_{s,máx} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) \leq w_{lim} \quad (2.5.1)$$

Em que:

ε_{sm} : extensão média do aço num comprimento $l_{s,máx}$.

ε_{cm} : extensão média do betão num comprimento $l_{s,máx}$.

ε_{cs} : extensão do betão devido à retracção.

$l_{s,máx}$: comprimento onde se verifica escorregamento entre o aço e o betão, considerada a zona de descontinuidade.

A abertura de fendas para dimensionamento é limitada por um valor máximo w_{lim} , que depende do ambiente onde se insere a estrutura, este valor limite pode ser consultado na tabela Figura da 2-4, retirada do Regulamento CEB-FIP MC 90 [5].

Exposure condition	Crack width	
	in.	mm
Dry air or protective membrane	0.016	0.41
Humidity, moist air, soil	0.012	0.30
Deicing chemicals	0.007	0.18
Seawater and seawater spray, wetting and drying	0.006	0.15
Water-retaining structures [†]	0.004	0.10

Figura 2-4: Valor limite da abertura de fendas segundo CEB-FIP 90 [5].

Quando não existe informação detalhada sobre as condições ambientais onde a estrutura se insere, um limite de 0,3 mm para a abertura de fendas é recomendado. Este limite satisfaz os critérios referentes à durabilidade e aparência.

O comprimento onde se verifica escorregamento entre o betão e o aço, $l_{s,m\acute{a}x}$, é calculado segundo as expressões (2.5.2) e (2.5.3), para fendilhação estabilizada e não estabilizada, respectivamente.

$$l_{s,m\acute{a}x} = \frac{\phi_s}{3,6 \cdot \rho_{s,eff}} \quad , \text{ para fendilhação estabilizada.} \quad (2.5.2)$$

$$l_{s,m\acute{a}x} = \frac{\sigma_{s2}}{2 \cdot \tau_{bk}} \cdot \phi_s \cdot \frac{1}{1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}} \quad , \text{ para fendilhação não estabilizada.} \quad (2.5.3)$$

Em que:

σ_{s2} : tensão do aço na fenda.

τ_{bk} : valor da tensão de escorregamento entre o aço e o betão, que pode ser retirado da Figura 2-5.

ϕ_s : diâmetro da barra, ou diâmetro equivalente de um conjunto de varões de armadura.

Para se saber se a fendilhação está estabilizada tem de se verificar a expressão (2.5.4), dada por:

$$\rho_{s,eff} \cdot \sigma_{s2} > f_{ctm} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}) \quad (2.5.4)$$

Em que:

$\rho_{s,eff}$: taxa de armadura ($A_s/A_{c,eff}$).

σ_{s2} : tensão do aço na fenda.

f_{ctm} : valor médio da resistência à tracção do betão.

Para o cálculo da extensão média, a expressão usada por CEB-FIB/MC 90 é a expressão (2.5.5).

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \varepsilon_{s2} - \beta \cdot \varepsilon_{sr2} \quad (2.5.5)$$

com,

$$\varepsilon_{sr2} = \frac{f_{ctm}(t)}{\rho_{s,eff} \cdot E_s} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}) \quad (2.5.6)$$

ε_{s2} : extensão do aço na fenda.

β : coeficiente retirado da Tabela 2-5 que depende do tipo de carregamento.

ε_{sr2} : extensão relativa ao esforço associado à fendilhação do betão.

$f_{ctm}(t)$: f_{ctm} no instante (t) em que a fenda aparece.

Note-se que, para a fendilhação estabilizada, a distância média entre fendas pode ser considerada aproximadamente igual a:

$$S_{rm} = \frac{2}{3} \cdot l_{s,m\acute{a}x} \quad (2.5.7)$$

Na tabela representada na Figura 2-5, podemos retirar os valores de β e τ_{bk} , anteriormente referidos, para o cálculo de $l_{s,m\acute{a}x}$ e $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$.

	Single crack formation		Stabilized cracking	
	β	τ_{bk}	β	τ_{bk}
Short term/instantaneous loading	0.6	$1.8f_{ctm}(t)$	0.6	$1.8f_{ctm}(t)$
Long term/repeated loading	0.6	$1.35f_{ctm}(t)$	0.38	$1.8f_{ctm}(t)$

Figura 2-5: Tabela que indica os valores de β e τ_{bk} [5].

Para o cálculo da abertura de fendas, com base no regulamento CEB-FIB/MC90, é necessário o cálculo da área efectiva de betão $A_{c,eff}$, que é realizada com recurso à Figura 2-6.

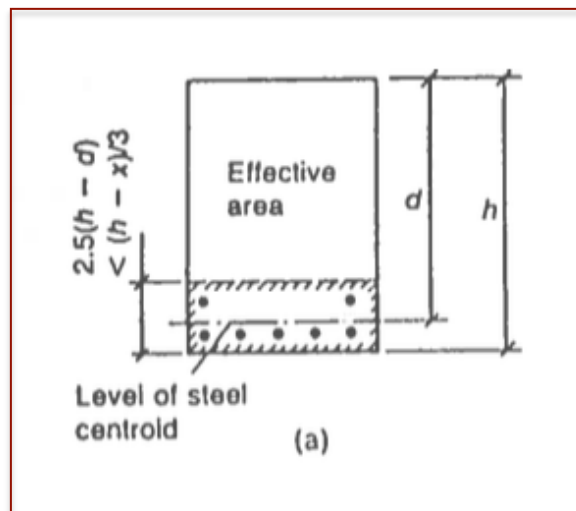


Figura 2-6: Cálculo da área de betão efectiva para vigas de betão armado [5].

2.6. MODEL CODE 2010- FINAL DRAFT SEPTEMBER 2011

Conforme se refere no regulamento deve ser assegurado, com uma adequada probabilidade, que a fendilhação não afecte o comportamento em serviço ou a durabilidade de uma estrutura.

No entanto a existência de fendilhação não indica, necessariamente, que a estrutura se comporte de forma deficiente em serviço ou que esta afecte a sua durabilidade.

Existem por isso limitações ao tamanho das aberturas de fendas para dimensionamento, que satisfaçam requisitos de durabilidade, funcionalidade e aparência.

Para todos os estados de fendilhação, utilizando a notação do Código modelo MC 90, o cálculo da abertura de fendas para dimensionamento é expresso da seguinte forma (2.6.1).

$$w_d = 2 \times l_{s,m\acute{a}x} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) \quad (2.6.1)$$

Em que:

ε_{sm} : deformação média do aço, num comprimento $l_{s,m\acute{a}x}$.

ε_{cm} : deformação média do betão, num comprimento $l_{s,m\acute{a}x}$.

ε_{cs} : deformação do betão devido à retracção, sendo considerado aproximadamente zero neste regulamento.

O comprimento $l_{s,m\acute{a}x}$ é calculado segundo a expressão (2.6.2).

$$l_{s,m\acute{a}x} = k \times c + \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{ctm}}{\tau_{bms}} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,eff}} \quad (2.6.2)$$

Em que:

k: valor que tem em conta a influência do recobrimento, considerado igual a 1.

c: recobrimento das armaduras.

τ_{bms} : tensão tangencial média entre o aço e o betão.

NOTA: Esta equação só é válida para estruturas onde o recobrimento das armaduras não excede os 75 mm, para recobrimentos superiores a 75 mm é pedida uma análise mais detalhada.

Estas equações fornecem o valor da abertura de fendas ao nível das armaduras, para sabermos o seu valor na superfície da viga, é necessário multiplicar o valor obtido por $(h-x)/(d-x)$.

Por fim, o cálculo da extensão média é dado pela equação (2.6.3).

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \frac{\sigma_s - \beta \cdot \sigma_{sr}}{E_s} + \eta_r \cdot \varepsilon_{sh} \quad (2.6.3)$$

Em que:

σ_s : tensão do aço na fenda.

σ_{sr} : máxima tensão do aço na fenda, na fase de formação de fendas, calculado por:

$$\sigma_{sr} = \frac{f_{ctm}}{\rho_{s,eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}) \quad (2.6.4)$$

onde:

$$\rho_{s,eff} = \frac{A_s}{A_{c,ef}} \quad (2.6.5)$$

α_e : é o quociente entre E_s/E_c .

β : é um coeficiente que depende do tipo de carregamento.

η_r : é um coeficiente que considera a contribuição da retração.

ε_{sh} : é a extensão de retração.

Os valores de β , τ_{bms} e η_r são retirados da tabela representada pela Figura 2-7, para carregamento de curto prazo, longo prazo e fase estabilizada e de formação de fendas.

	Crack formation stage	Stabilized cracking stage
Short term, instantaneous loading	$\tau_{bms} = 1,8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1,8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$
Long term, repeated loading	$\tau_{bms} = 1,35 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1,8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.4$ $\eta_r = 1$

Figura 2-7: Valores de β e τ_{bk} [6].

A Figura 2-8 mostra em pormenor, a distribuição de tensões no aço, no betão e tensão de aderência.

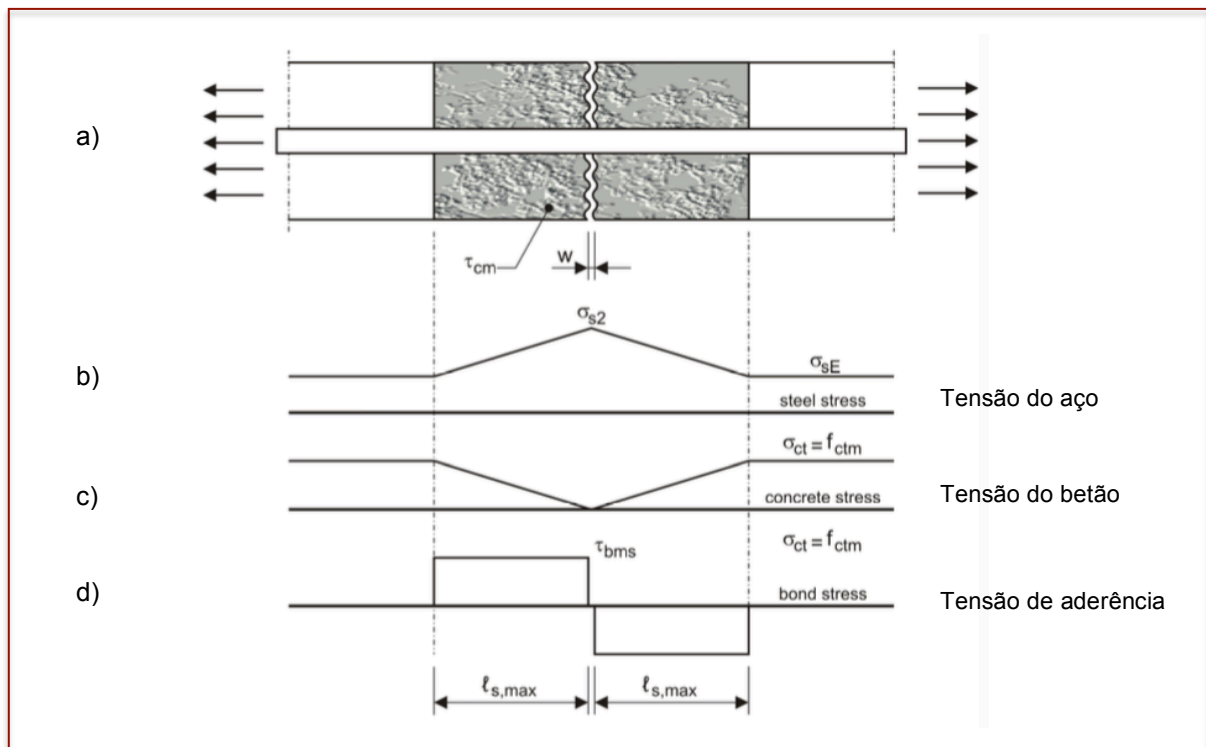


Figura 2-8: Distribuição de tensões num comprimento de $2 \cdot l_{s,max}$ [6].

sendo:

- (a) Zona de descontinuidade, $l_{s,m\acute{a}x}$;
- (b) Tens\~ao do a\~co na zona de descontinuidade, $l_{s,m\acute{a}x}$;
- (c) Tens\~ao do bet\~ao na zona de descontinuidade, $l_{s,m\acute{a}x}$;
- (d) Tens\~ao de ader\~encia entre o a\~co e o bet\~ao na zona de descontinuidade, $l_{s,m\acute{a}x}$.

A \~area de bet\~ao efectiva \~e calculada com o recurso \~a imagem da Figura 2-9.

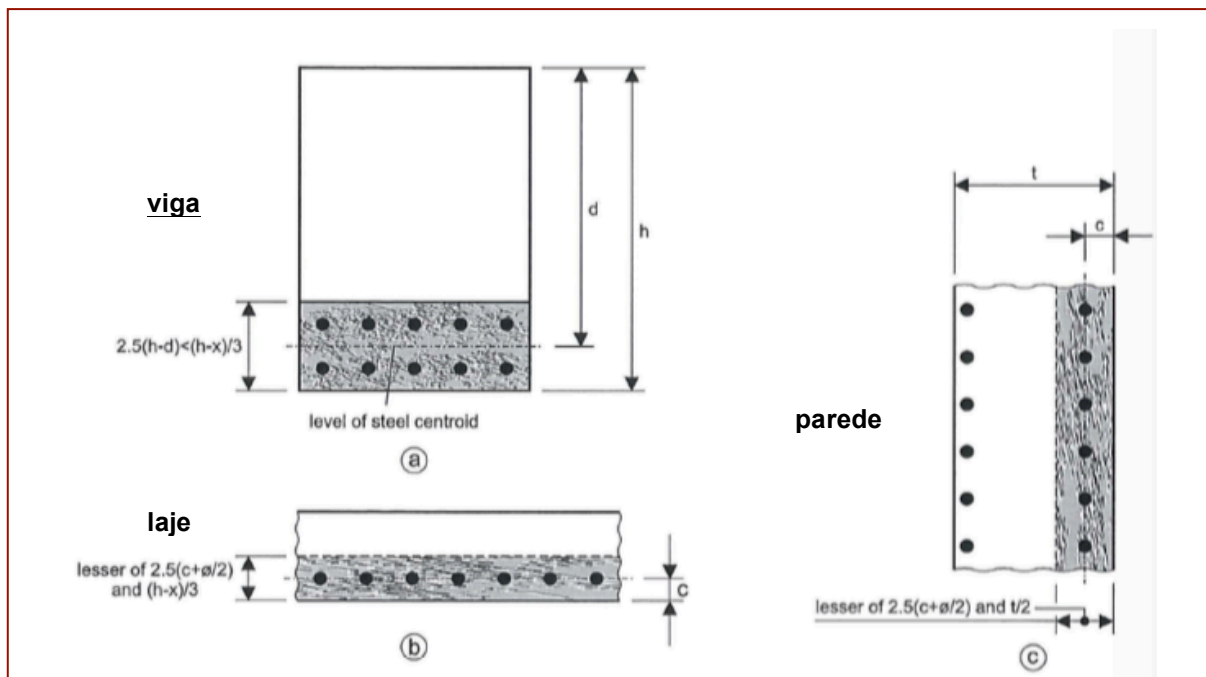


Figura 2-9: C\~alculo das \~areas efectivas em vigas, lajes e paredes de bet\~ao armado [6].

3. AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FENDAS- EXEMPLO SEGUNDO OS VÁRIOS REGULAMENTOS

3.1. DEFINIÇÃO DO EXEMPLO A ANALISAR

Ilustra-se na Figura 3-1 o elemento relativo ao exemplo em causa, uma laje de soleira com altura de 2,00 m.



Figura 3-1: Laje de soleira com altura de 2,0 m.

Para o elemento seguinte vai ser calculado o tamanho da abertura de fendas w_k , para os seis regulamentos apresentados anteriormente, começando com um recobrimento das armaduras elevado, usado em estruturas hidráulicas, neste caso de 10 cm, seguido de 7, 5 e 3 cm, e analisar o que acontece à medida que se diminui o recobrimento.

O elemento a analisar mostra-se na Figura 3-2, assim como os materiais e esforços aplicados.

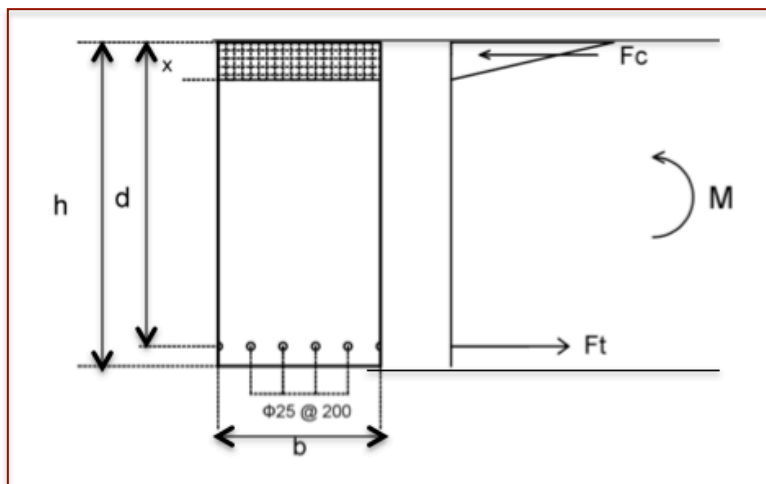


Figura 3-2: Secção transversal do exemplo a analisar.

<u>Materiais:</u>	Aço A500 NR
	Betão C25/30 XC4 Cl0,20 $D_{máx}$ 32 S3
<u>Armadura Longitudinal:</u>	Área igual a 24,544 cm^2/m^*
<u>Cargas aplicadas:</u>	Momento flector de 1090 kN.m/m
	Curto prazo.
<u>Características geométricas da secção do elemento:</u>	h= 2,0 m
	b=1,0 m
<u>Combinação de ações:</u>	Combinação característica de ações
<u>Recobrimento:</u>	c= 10,0 cm

* Área de armadura longitudinal é equivalente à armadura mínima da secção.

3.2. EXEMPLO DETALHADO PARA O CÁLCULO DA ESTRUTURA

O primeiro passo é a realização do cálculo, em Estado II, posição da linha neutra e das tensões nos materiais, σ_s e σ_c . Estes são calculados com recurso às equações (3.2.1), (3.2.2), (3.2.3) e (3.2.4).

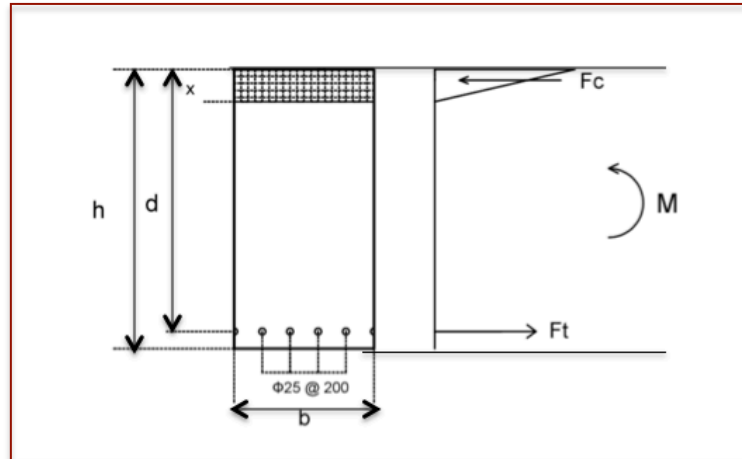


Figura 3-3: Seção transversal da viga de betão armado a analisar.

- $\Sigma M=0 \Rightarrow \frac{x^2 \cdot b}{2} = (d - x) \cdot \frac{E_s}{E_c} \cdot A_s$ (3.2.1)
- $F_t = \frac{M}{z} = \frac{M}{d - \frac{x}{3}}$ (3.2.2)
- $F_c = F_t \Rightarrow \sigma_s = \frac{F_t}{A_s}$ (3.2.3)
- $F_c = \sigma_c \cdot x \cdot \frac{b}{2} \Rightarrow \sigma_c = \frac{2 \cdot F_t}{x \cdot b}$ (3.2.4)

Para encontrar qual a extensão do aço, ϵ_s , assim como ϵ_1 e ϵ_2 , necessários para o cálculo da abertura de fendas recorreremos ao gráfico da extensão, representado na Figura 3-4 e ao cálculo da curvatura (1/R) usando as expressões (3.2.5), (3.2.6), (3.2.7) e (3.2.8).

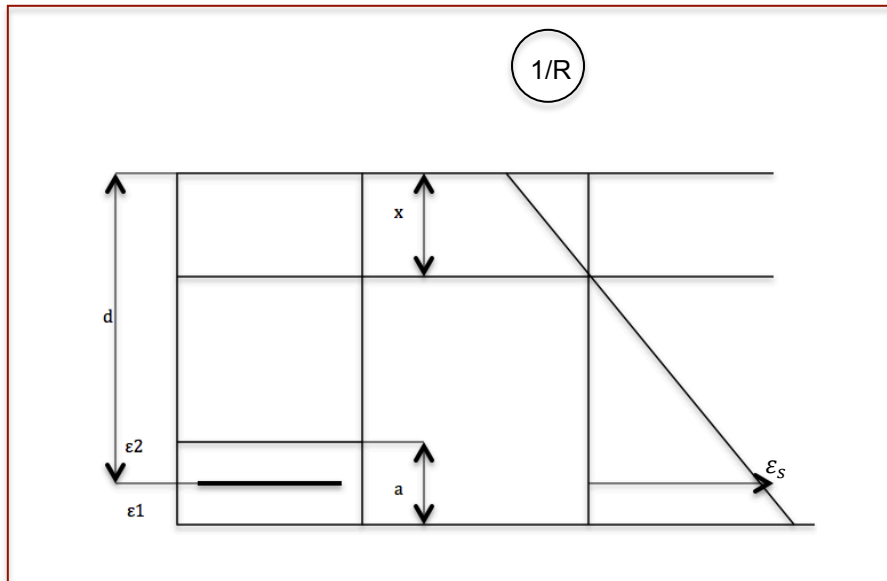


Figura 3-4: Diagrama de extensões da viga a analisar.

$$\bullet \quad 1/R = \frac{\frac{|\sigma_s|}{E_s} + \frac{|\sigma_c|}{E_c}}{d} \quad (3.2.5)$$

$$\bullet \quad \varepsilon_s = (1/R) \cdot (h-x-c-\phi/2) \quad (3.2.6)$$

$$\bullet \quad \varepsilon_1 = (1/R) \cdot (h-x) \quad (3.2.7)$$

$$\bullet \quad \varepsilon_2 = (1/R) \cdot (h-x-a) \quad (3.2.8)$$

Cálculos auxiliares

$$\bullet \quad M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{bh^2}{6} \quad (3.2.9)$$

$$\bullet \quad \sigma_{sr} = \frac{M_{cr}}{M} \cdot \sigma_s \quad (3.2.10)$$

$$\bullet \quad \rho_s = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (3.2.11)$$

$$\bullet \quad d = h-x-\phi/2 \quad (3.2.12)$$

3.2.1. REBAP

A Tabela 3-1 , apresenta os resultados para as aberturas de fendas ao nível das armaduras, para a laje de betão armado apresentada em 3.2, segundo recobrimentos de 10, 7, 6,3, 5 e 3 cm. O recobrimento de 6,3 cm foi acrescentado devido a uma nota na norma Americana ACI, referida mais à frente.

Tabela 3-1: Cálculo da abertura de fendas segundo o REBAP.

	c (m)				
	0,1	0,07	0,05	0,03	0,063
E_s (GPa)	200	200	200	200	200
E_c (GPa)	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5
A_s (m ²)	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544
M (kN.m)	1090	1090	1090	1090	1090
d (m)	1,888	1,9175	1,9375	1,9575	1,9245
z (m)	1,81	1,84	1,86	1,88	1,85
x (m)	0,231	0,233	0,234	0,235	0,2333
F_t (kN)	602,04	592,44	586,18	580,04	590,23
F_c (kN)	602,04	592,44	586,18	580,04	590,23
σ_s (MPa)	245,29	241,38	238,83	236,33	240,48
σ_c (MPa)	5,21	5,09	5,01	4,94	5,06
ε_s ($\times 10^{-3}$)	1,22600	1,20672	1,19434	1,18221	1,20242
ε_1 ($\times 10^{-3}$)	1,30930	1,26582	1,23816	1,21138	1,25610
ε_2 ($\times 10^{-3}$)	1,14277	1,14762	1,15052	1,15304	1,14874
1/R (m ⁻¹)	0,74014	0,71637	0,70111	0,68633	0,71099
a (m)	0,225	0,165	0,125	0,085	0,151
Φ (m)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
η_1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
η_1	0,23410119	0,23832767	0,2411523	0,24398017	0,23931624
ρ_s	0,01090844	0,01487515	0,0196352	0,02887529	0,01625430
S_{rm} (m)	0,45460547	0,34021865	0,2628163	0,18449444	0,31323253
f_{ctm} (MPa)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
σ_{sr} (MPa)	375,064	369,084	365,180	361,358	367,705
ε_{sm} '(m/m)	-0,00164100	-0,0016148	-0,0015977	-0,0015810	-0,0016088
w_k (mm)	0,3791	0,2792	0,2134	0,1482	0,2561
M_{cr} (kN.m)	1666,67	1666,67	1666,67	1666,67	1666,67
ε_{sm} (m/m)	0,000490584	0,00048276	0,0004776	0,00047265	0,00048095

É importante fazer uma avaliação da abertura de fendas mesmo quando o momento de fendilhação, M_{cr} , é inferior ao Momento aplicado, devido às deformações impostas restringidas, pois a

secção pode encontrar-se a funcionar em estado II pelo efeito das deformações impostas restringidas, ou existência de juntas de construção na secção em causa.

Resultados finais para o REBAP

Tabela 3-2: Aberturas de fendas para o REBAP.

c (m)	3	5	6,3	7	10
w_k (mm)	0,148	0,213	0,256	0,279	0,379

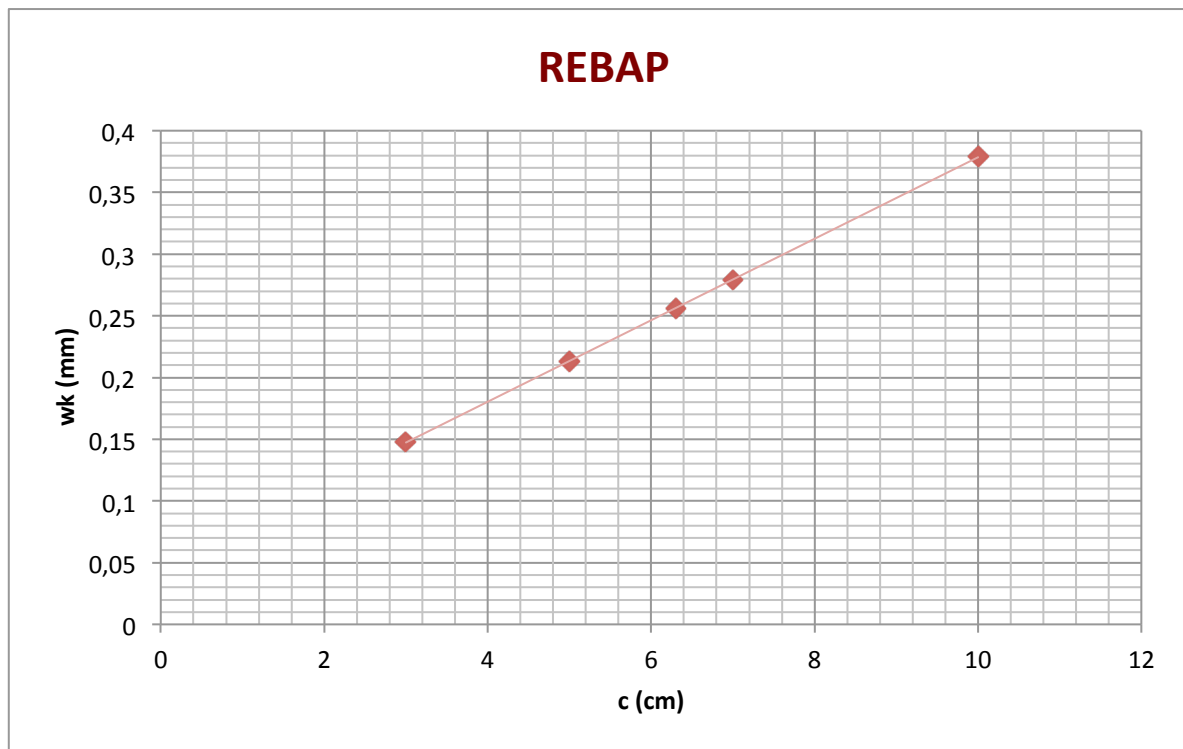


Figura 3-5: Gráfico da abertura de fendas, ao nível das armaduras, para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento REBAP.

Nota:

O valor da extensão média das armaduras utilizado para os cálculos de w_k foi o mínimo indicado no Regulamento, igual a $0,4 \cdot (\sigma_s / E_s)$.

3.2.2. Eurocódigo 2

A Tabela 3-3 , apresenta os resultados para as aberturas de fendas, que se considerou ao nível das armaduras, como indica a figura 7.2 do EC2, para a laje de betão armado apresentada em 3.2, segundo recobrimentos de 10, 7, 6,3, 5 e 3 cm.

Tabela 3-3: Cálculo da abertura de fendas segundo o EC2.

		c (m)				
		0,1	0,07	0,05	0,03	0,063
EC2	E_s (GPa)	200	200	200	200	200
	E_c (GPa)	31	31	31	31	31
	A_s (m ²)	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544
	M (kN.m)	1090	1090	1090	1090	1091
	d (m)	1,888	1,9175	1,9375	1,9575	1,9245
	z (m)	1,812	1,840	1,860	1,880	1,847
	x (m)	0,229	0,2311	0,2324	0,2337	0,232
	F_t (kN)	601,656	592,241	586,011	579,911	590,634
	F_t (kN)	601,656	592,241	586,011	579,911	590,634
	σ_s (MPa)	245,134	241,298	238,759	236,274	240,643
	σ_c (MPa)	5,255	5,125	5,043	4,963	5,092
	$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	1,22558	1,20649	1,19377	1,18131	1,20261
	k_1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	k_2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	1/R	0,7389685	0,7154234	0,7001178	0,6852934	0,7105549
	$h_{c,ef}$ (m)	0,280	0,206	0,156	0,106	0,189
	Φ (m)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	s (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	k_3	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
	k_4	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425
	ρ_s	0,0087657	0,0119001	0,0157082	0,0231002	0,0130034
	S_{rm} (m)	0,8248435	0,5951392	0,4405600	0,2859808	0,5410365
	f_{ctn} (MPa)	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
	k_t	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})'$	0,000285515	0,00050071	0,000646917	0,000793388	0,000553052
	w_k (mm)	0,6066	0,4308	0,3156	0,2269	0,3906
	α_e	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
	$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})_{min}$	0,000735401	0,000723893	0,000716278	0,000708822	0,000721929
$5(c+\Phi/2)$ (m)	0,5625	0,4125	0,3125	0,2125	0,3775	

Resultados finais para o Eurocódigo 2

Tabela 3-4: Aberturas de fendas para o EC2.

c (cm)	3	5	6,3	7	10
w_k (mm)	0,227	0,316	0,391	0,431	0,607

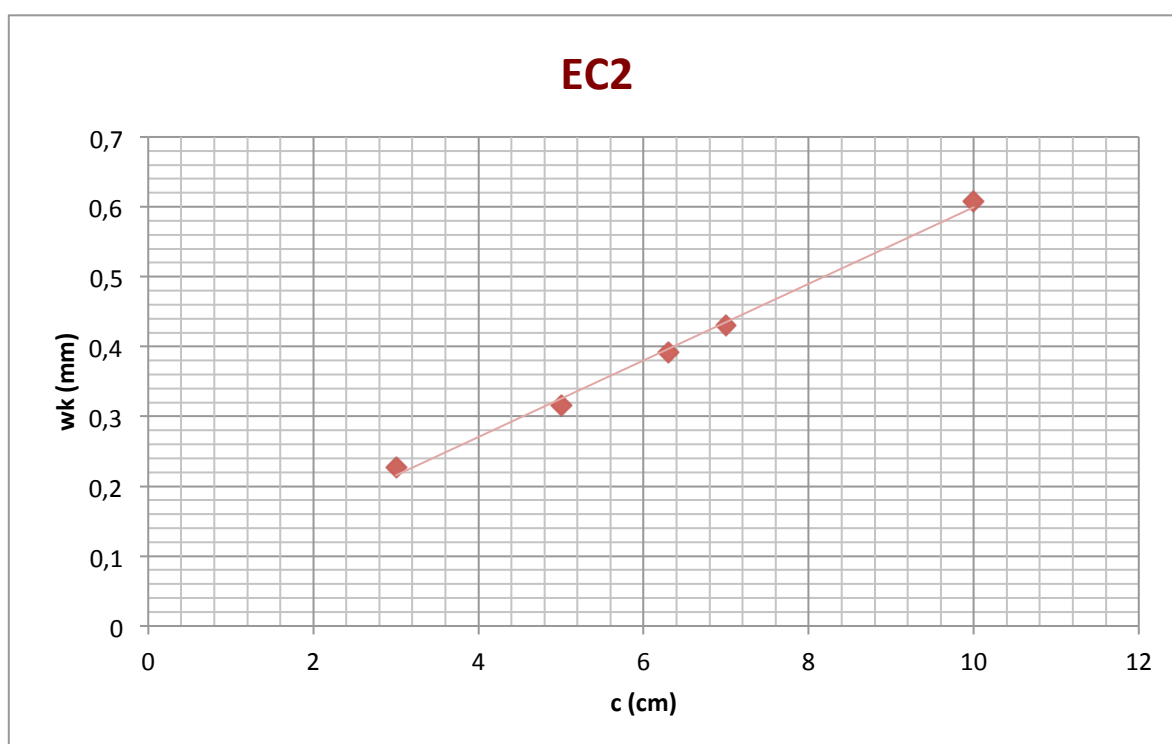


Figura 3-6: Gráfico da abertura de fendas para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento EC2.

Notas:

O valor da extensão média das armaduras utilizado para os cálculos de w_k foi o mínimo indicado no Regulamento, igual a $0,6 \cdot (\sigma_s / E_s)$, excepto para o recobrimento de 3 cm, cujo valor de $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})'$ era superior ao mínimo estabelecido.

Também se verificou que o espaçamento era inferior a $5 \times (c + \Phi / 2)$, pelo que a expressão usada para o cálculo de $S_{r,m\acute{a}x}$ foi a (2.2.4).

3.2.3. Norma Brasileira

Para este regulamento foram feitos cálculos auxiliares para as áreas de influência dos varões internos e externos.

A largura efectiva de um varão externo é dada por: $b_{eff,ext} = c + \phi + \frac{(s-\phi)}{2}$ (3.2.3.1)

A largura efectiva de um varão interno é dada por: $b_{eff,int} = \phi + 2 \cdot \frac{(s-\phi)}{2} = s$ (3.2.3.2)

Concluimos que: $b_{eff,m\acute{a}x} \rightarrow \rho_{s,min} \rightarrow w_{k2,m\acute{a}x}$

$b_{eff,min} \rightarrow \rho_{s,m\acute{a}x} \rightarrow w_{k2,min}$

Pelo que, a escolha final para o tamanho da abertura de fendas é feita entre w_{k1} , e $w_{k2,m\acute{a}x}$, usando, portanto a maior área de betão efectiva.

A Tabela 3-5, apresenta os resultados para as aberturas de fendas ao nível das armaduras, para a viga de Betão Armado apresentada em 3.2, segundo recobrimentos de 10, 7, 6,3, 5 e 3 cm.

Tabela 3-5: Cálculo da abertura de fendas segundo o NBR.

		c (m)				
		0,1	0,07	0,05	0,03	0,063
NBR	E_s (GPa)	210	210	210	210	210
	E_c (GPa)	28	28	28	28	28
	A_s (m ²)	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544
	M (kN.m)	1090	1090	1090	1090	1090
	d (m)	1,888	1,918	1,938	1,958	1,925
	z (m)	1,806	1,835	1,855	1,874	1,842
	x (m)	0,246	0,248	0,249	0,251	0,2484
	F_t (kN)	603,544	594,059	587,760	581,695	591,844
	F_c (kN)	603,544	594,059	587,760	581,695	591,844
	σ_s (MPa)	245,903	242,039	239,472	237,001	241,136
	σ_c (MPa)	4,907	4,791	4,721	4,635	4,765
	$\epsilon_s (\times 10^{-3})$	1,22600	1,15247	1,14073	1,12818	1,14828
	$b_{eff,int}$ (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	$b_{eff,ext}$ (m)	0,2125	0,1825	0,1625	0,1425	0,1755
	$1/R(m^{-1})$	0,7130352	0,6903075	0,6755858	0,6611048	0,6850896
	h_{eff} (m)	0,3	0,27	0,25	0,23	0,263
	Φ (m)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	s (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	η_1	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25

$A_{cri} (m^2)$	0,06375	0,054	0,05	0,046	0,0526
ρ_s	0,00769998	0,00909025	0,00981747	0,0106711	0,009332203
$f_{ctm} (MPa)$	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
$w_{k1} (mm)$	0,2999	0,2906	0,2845	0,2786	0,2884
$w_{k2,m\acute{a}x} (mm)$	0,5875	0,4969	0,4586	0,4212	0,4834
$w_{k,min} (mm)$	0,2999	0,2906	0,2845	0,2786	0,2884
$A_{s,\phi i} (m^2)$	0,00049087	0,00049087	0,00049087	0,0004908	0,000490874
π	3,142	3,142	3,142	3,142	3,142
$w_{k2,min} (mm)$	0,5557	0,4575	0,3812	0,3131	0,4298
$A_{cri,min} (m^2)$	0,06	0,049275	0,040625	0,032775	0,0461565
$\rho_{s,m\acute{a}x}$	0,00818123	0,00996192	0,01208304	0,0149770	0,010634989

A norma Brasileira impõe que o cálculo da abertura de fendas se faça escolhendo o mínimo entre as equações (2.3.1) e (2.3.2), sendo que neste exemplo de cálculo, e com a observação dos valores atrás encontrados pelos outros Regulamentos, seria mais realista a escolha de w_{k2} para o valor dessa abertura.

Resultados Finais para Norma Brasileira

Tabela 3-6: Aberturas de fendas para a NBR.

c (cm)	3	5	6,3	7	10
$w_k (mm)$	0,279	0,284	0,288	0,291	0,3

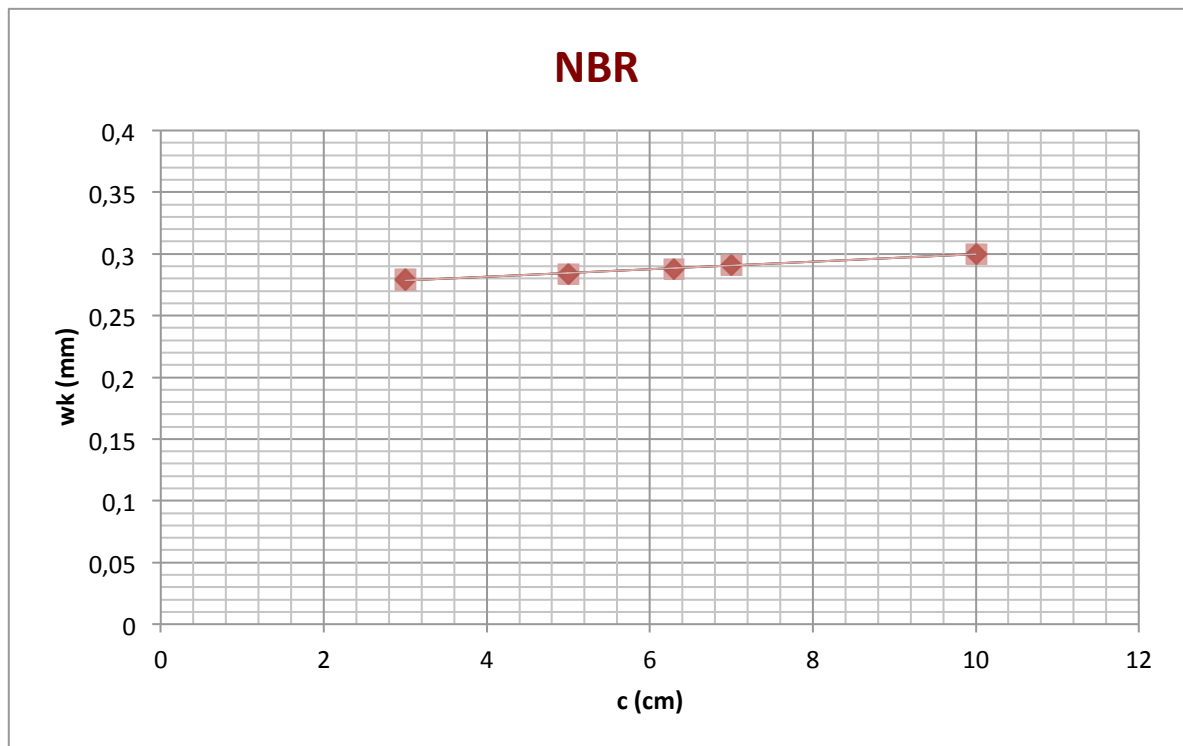


Figura 3-7: Gráfico da abertura de fendas para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento NBR.

3.2.4. ACI 318-95-Control of cracking in Concrete Structures

As expressões numéricas apresentadas por ACI, para o cálculo da abertura de fendas, não são recomendadas para recobrimentos superiores a 6,3 cm, pelo que foi adicionado um novo valor de recobrimento aos cálculos já efectuados, para haver um maior leque de comparação entre regulamentos, esse valor é de 6,3 cm. A Tabela 3-7, apresenta os resultados para as aberturas de fendas ao nível das armaduras e na superfície, para a viga de Betão Armado apresentada em 3.2, segundo recobrimentos de 10, 7, 6,3, 5 e 3 cm.

Tabela 3-7: Cálculo da abertura de fendas segundo o ACI.

		c (m)				
		0,1	0,07	0,05	0,03	0,063
ACI	E_s (GPa)	199,95	199,95	199,95	199,95	199,95
	E_c (GPa)	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9
	A_s (m ²)	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544
	M (kN.m)	1090	1090	1090	1090	1090
	d (m)	1,888	1,9175	1,9375	1,9575	1,9245
	z (m)	1,8103	1,8392	1,8588	1,8782	1,8460
	x (m)	0,233	0,235	0,236	0,238	0,2355
	F_t (kN)	602,10	592,66	586,39	580,35	590,47
	F_c (kN)	602,10	592,66	586,39	580,35	590,47
	σ_s (MPa)	245,31	241,47	238,91	236,45	240,57
	σ_c (MPa)	5,17	5,04	4,97	4,88	5,01
	$\varepsilon_s(\times 10^{-3})$	1,226	1,20765856	1,195280218	1,182062247	1,203130007
	1 in (m)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	1 psi (Pa)	6894,757	6894,757	6894,757	6894,757	6894,757
	1/R(m ⁻¹)	0,741381	0,717776	0,702486	0,687445	0,712333
	$h_{c,eff}$ (m)	0,225	0,165	0,125	0,085	0,151
	Φ (m)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	s (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	nº barras	5	5	5	5	5
	A_{cri} (m ²)	0,045	0,033	0,025	0,017	0,0302
	ρ_s	0,010911	0,014879	0,019640	0,028882	0,016258
	f_{ctm} (MPa)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
	t_b (in)	3,750	2,750	2,083	1,417	2,517
	β	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	t_b (in)	3,75	2,75	2,08	1,42	2,52
	h_1 (in)	55,167	56,083	56,717	57,317	56,300
	w_b (in)	0,0213576	0,0170513	0,0139953	0,0106922	0,0160032
w_b (mm)	0,5425	0,4331	0,3555	0,2716	0,4065	

f_s (ksi)	35,580	35,022	34,651	34,295	34,892
A (in^2)	69,767	51,163	38,760	26,357	46,822
w_s (in)	0,016665	0,013545	0,011250	0,008695	0,012765
w_s (mm)	0,4233	0,3440	0,2857	0,2209	0,3242
$1 in^2$ (m^2)	0,000645	0,000645	0,000645	0,000645	0,000645
1 in (mm)	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4

Resultados Finais para ACI

Tabela 3-8: Aberturas de fendas, ao nível da armadura, para ACI.

c (cm)	3	5	6,3	7	10
w_k (mm)	0,221	0,286	0,324	0,344	0,423

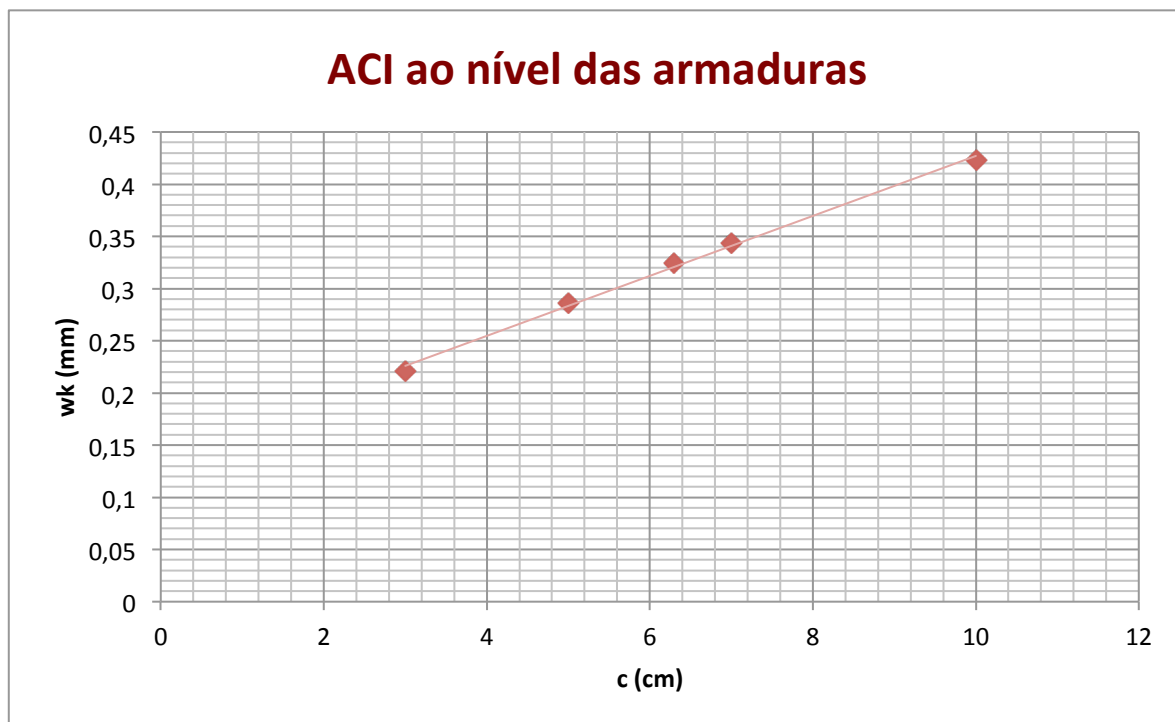


Figura 3-8: Gráfico da abertura de fendas, ao nível da armadura, para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento ACI.

Tabela 3-9: Aberturas de fendas, à superfície, para ACI.

c (cm)	3	5	6,3	7	10
w_k (mm)	0,272	0,356	0,407	0,433	0,543

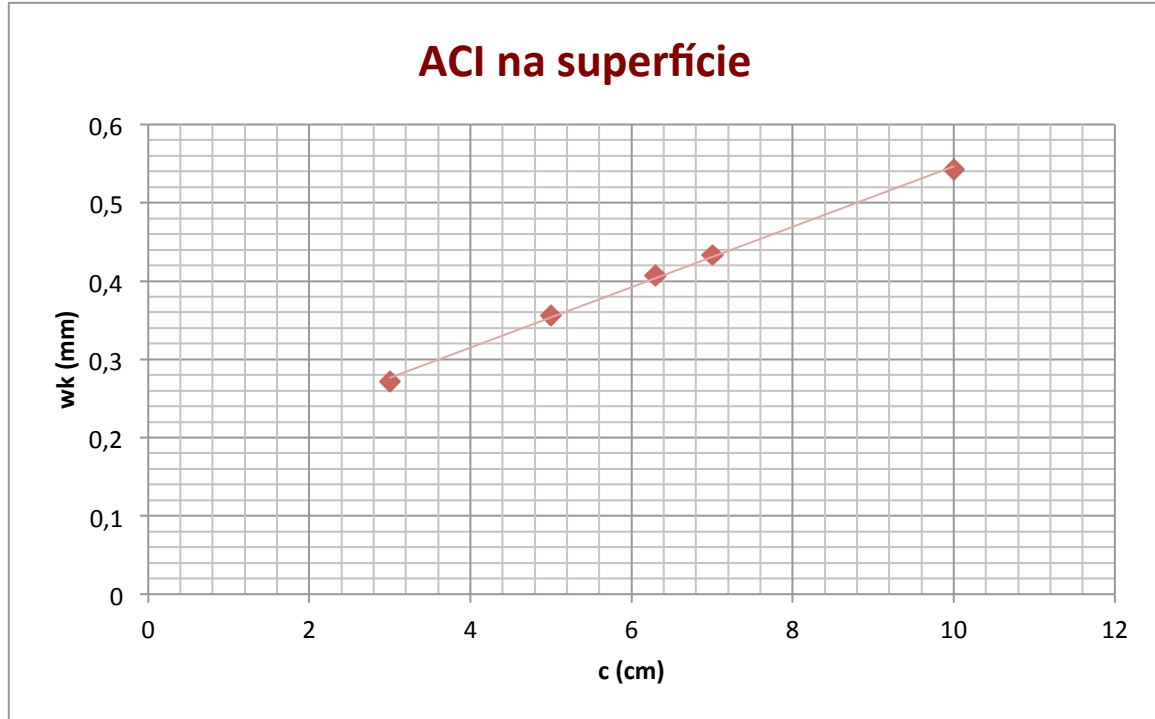


Figura 3-9: Gráfico da abertura de fendas, à superfície, para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento ACI.

Notas:

Como seria de esperar, o tamanho da abertura de fendas é superior na base da viga, em comparação com o tamanho das mesmas ao nível da armadura.

3.2.5. CEB-FIP 1990/MC 90

Neste regulamento, é diferenciada a fendilhação estabilizada da não estabilizada para o cálculo da abertura de fendas, neste caso só o elemento com recobrimento de 10 cm não tem a fendilhação estabilizada, ou seja, $\rho_{s,eff} \cdot \sigma_{s2} < f_{ctm} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff})$, quando sujeito aos esforços aplicados, devido a não estar estabilizada a fendilhação.

Na Tabela 3-10, apresentam-se os resultados pretendidos, ao nível das armaduras, para recobrimentos de 10, 7, 6,3, 5 e 3 cm.

Tabela 3-10: Cálculo da abertura de fendas segundo o CEB-FIP 90.

	c (m)				
	0,1	0,07	0,05	0,03	0,063
E_s (GPa)	200	200	200	200	200
E_c (GPa)	29	29	29	29	29
A_s (m ²)	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544
M (kN.m)	1090	1090	1090	1090	1090
d (m)	1,888	1,9175	1,9375	1,9575	1,9245
z (m)	1,809	1,838	1,858	1,877	1,845
x (m)	0,236	0,238	0,24	0,241	0,239
F_t (kN)	602,432	592,982	586,810	580,662	590,839
F_c (kN)	602,432	592,982	586,810	580,662	590,839
σ_s (MPa)	245,450	241,600	239,085	236,580	240,727
σ_c (MPa)	5,105	4,983	4,890	4,819	4,944
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	1,22751	1,20856	1,19508	1,18297	1,20347
$\varepsilon_1 (\times 10^{-3})$	1,31113	1,26793	1,23908	1,21226	1,25738
$\varepsilon_2 (\times 10^{-3})$	1,10301	1,11951	1,12908	1,13904	1,12261
1/R (m ⁻¹)	0,74327	0,71960	0,70403	0,68918	0,71402
$h_{c,eff}$ (m)	0,28	0,20625	0,15625	0,10625	0,18875
Φ (m)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
(h-x)/3 (m)	0,588	0,587	0,587	0,586	0,587
$A_{c,eff}$ (m ²)	0,280	0,206	0,156	0,106	0,189
ρ_s	0,00877	0,01190	0,01571	0,02310	0,01300
f_{ctm} (MPa)	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
ε_{sr2}	0,0014831	0,0010924	0,0008276	0,0005628	0,0009997
$\rho_{s,ef} \cdot \sigma_{s2}$	2,151542	2,875065	3,755585	5,465057	3,130274
$L_{s,m\acute{a}x}$ (m)	0,655582	0,583561	0,442092	0,300622	0,534047
β	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
α_e	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) (\times 10^{-3})$	1,226622	1,207908	1,194586	1,182636	1,202875
w_k (mm)	0,8042	0,7049	0,5281	0,3555	0,6424
τ_{bk} (MPa)	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68

Resultados Finais para CEB-FIP 1990/MC 90

Tabela 3-11: Aberturas de fendas para CEB-FIP 90.

c (cm)	3	5	6,3	7	10
w_k (mm)	0,356	0,528	0,642	0,705	0,804

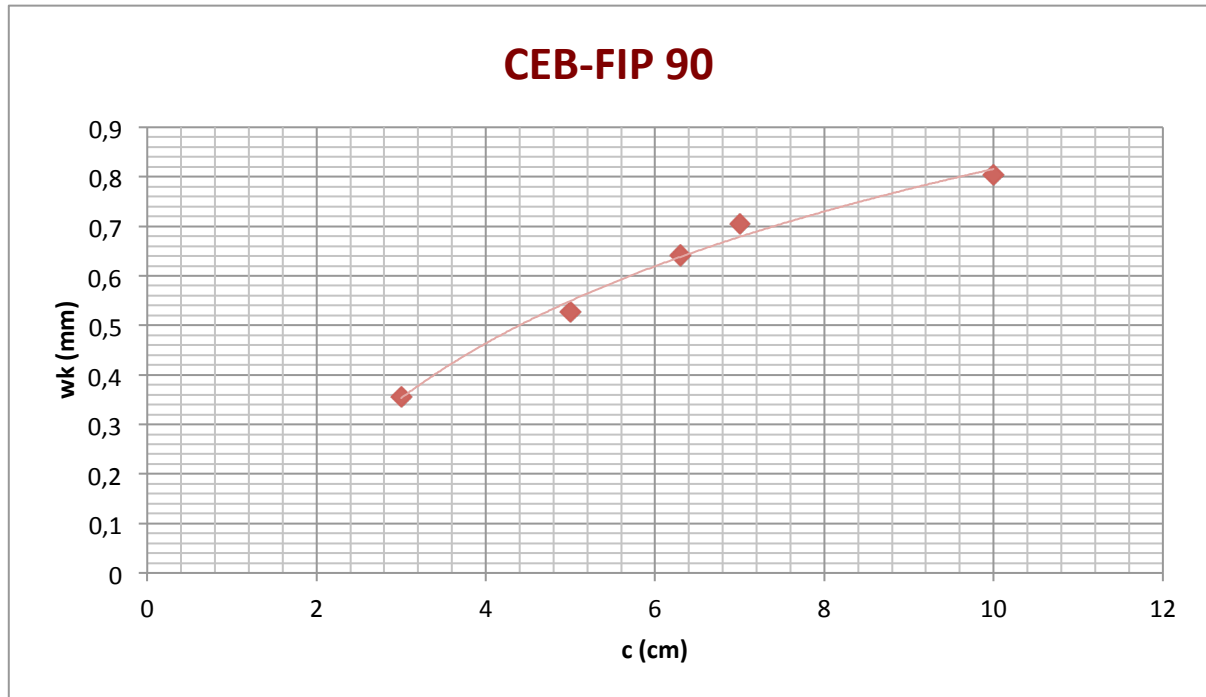


Figura 3-10: Gráfico da abertura de fendas para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento CEB-FIP 90.

Nota:

Para o recobrimento de 10 cm foi usada a expressão (2.5.3) para o cálculo de $L_{s,máx}$, visto a fendilhação não estar ainda estabilizada.

3.2.6. Model code 2010- Final Draft

O regulamento não aconselha o cálculo da abertura de fendas, w_k , com as equações propostas, para recobrimentos superiores a 7,5 cm.

Daí ter sido acrescentado o cálculo de w_k para o máximo recobrimento aconselhado, 7,5 cm.

Neste caso, não há diferenciação no modo de cálculo para w_k , no que diz respeito ao estado da fendilhação, mas é importante saber quando esta está ou não estabilizada. Para sabermos se está estabilizada recorreremos à seguinte expressão:

$$N > N_r, \quad (3.2.6.1)$$

com:

$$N_r = A_{c,eff} \cdot f_{ctm} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}) \quad (3.2.6.2)$$

Comparando o valor de N_r com o valor de F_t , para cada recobrimento, conclui-se que só para o recobrimento de 7,5 cm, e superiores, a fendilhação ainda não está estabilizada.

Os resultados do cálculo da abertura de fendas, ao nível das armaduras, e dos cálculos auxiliares apresentam-se na Tabela 3-12.

Tabela 3-12: Cálculo da abertura de fendas, ao nível das armaduras, segundo o MC 2010.

		c (m)					
		0,1	0,07	0,05	0,03	0,063	0,075
MC 2010	E_s (GPa)	200	200	200	200	200	200
	E_c (GPa)	29	29	29	29	29	29
	A_s (m ²)	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544	0,0024544
	M (kN.m)	1090	1090	1090	1090	1090	1090
	d (m)	1,888	1,9175	1,9375	1,9575	1,9245	1,9125
	z (m)	1,809	1,838	1,858	1,877	1,845	1,833
	x (m)	0,236	0,238	0,24	0,241	0,239	0,2381
	F_t (kN)	602,43	592,98	586,81	580,66	590,84	594,61
	F_c (kN)	602,43	592,98	586,81	580,66	590,84	594,61
	σ_s (MPa)	245,45	241,60	239,09	236,58	240,73	242,26
	σ_c (MPa)	5,11	4,98	4,89	4,82	4,94	4,99
	$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	1,227512	1,208563	1,195083	1,182974	1,203475	1,211297
	$\varepsilon_1 (\times 10^{-3})$	1,311130	1,267930	1,239084	1,212264	1,257383	1,274596
	$\varepsilon_2 (\times 10^{-3})$	1,103014	1,119513	1,129080	1,139039	1,122612	1,116348
$1/R (m^{-1})$	0,743271	0,719597	0,704025	0,689178	0,714016	0,723421	
$h_{c,eff}$ (m)	0,28	0,20625	0,15625	0,10625	0,18875	0,21875	

Φ (m)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
(h-x)/3 (m)	0,588	0,587	0,587	0,586	0,587	0,587
$A_{c,eff}$ (m ²)	0,28	0,20625	0,15625	0,10625	0,18875	0,21875
ρ_s	0,008766	0,011900	0,015708	0,023100	0,013003	0,011220
f_{ctm} (MPa)	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
k	1	1	1	1	1	1
σ_{sr} (MPa)	314,54	236,42	183,45	130,48	217,88	249,66
$L_{s,m\acute{a}x}$ (m)	0,496114	0,361780	0,271046	0,180311	0,330023	0,384464
β	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
α_e	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90
$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs}) (\times 10^{-6})$	283,625	498,750	645,075	791,449	549,999	462,342
w_k (mm)	0,2814	0,3609	0,3497	0,2854	0,3630	0,3555
τ_{bms}	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68
$\sigma_{sr} \cdot (1-\beta)/E_s$	0,6291	0,4728	0,3669	0,2610	0,4358	0,4993
N_r (kN)	772,01	580,26	450,26	320,26	534,76	612,76
(h-x)/(d-x)	1,06780	1,04912	1,03682	1,02476	1,04479	1,05226
$w_{k,sup}$ (mm)	0,3005	0,3786	0,3626	0,2925	0,3793	0,3741

Resultados Finais para Model Code 2010- Final Draft

Tabela 3-13: Aberturas de fendas, ao nível das armaduras e à superfície da viga, para MC 2010.

c (cm)	3	5	6,3	7	7,5
wk,sup (mm)	0,293	0,363	0,3793	0,379	0,374
wk, arm (mm)	0,285	0,35	0,363	0,361	0,356

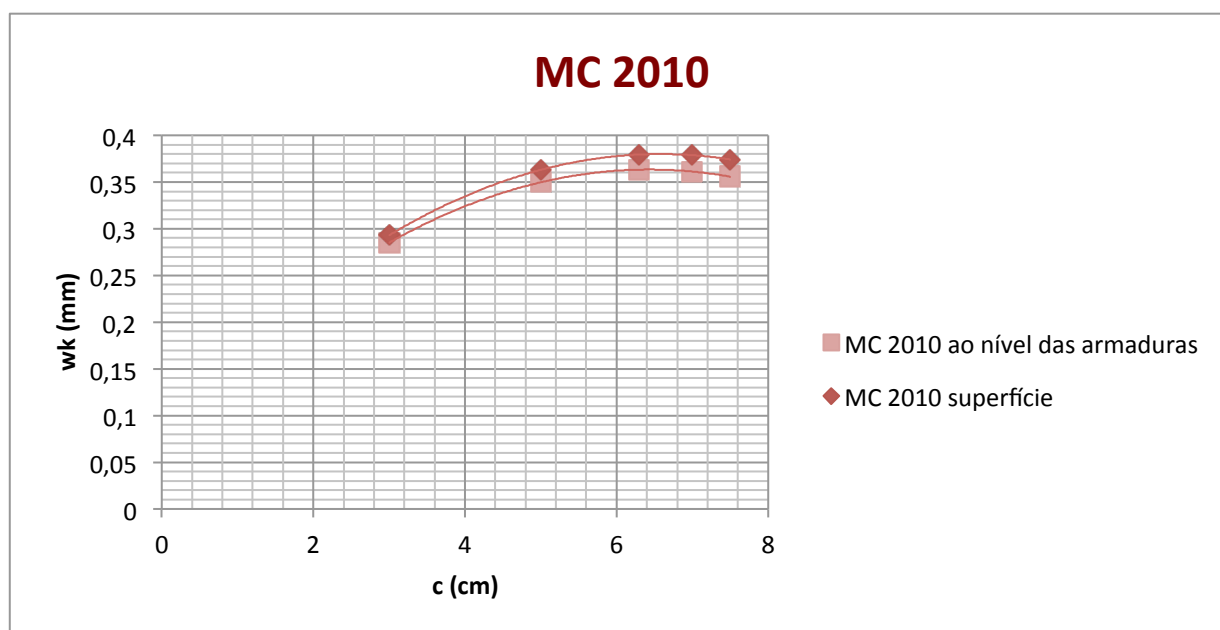


Figura 3-11: Gráfico da abertura de fendas, ao nível das armaduras e na superfície da viga, para diferentes valores de recobrimento, usando o regulamento MC 2010.

3.3. INFLUÊNCIA DO RECOBRIMENTO NA ABERTURA DE FENDAS – COMPARAÇÃO ENTRE REGULAMENTOS

Apresenta-se de seguida a comparação final, do cálculo da abertura de fendas w_k ao nível das armaduras longitudinais, para todos os regulamentos e códigos estudados. Os resultados finais apresentam-se na Tabela 3-14 e no gráfico da Figura 3-12.

Tabela 3-14: Aberturas de fendas, ao nível das armaduras, para todos os regulamentos estudados.

		c (cm)					
		3	5	6,3	7	7,5	10
w_k (mm)	REBAP	0,148	0,213	0,256	0,279	-	0,379
	EC2	0,227	0,316	0,391	0,431	-	0,607
	NBR 6118-2003	0,279	0,284	0,288	0,291	-	0,3
	ACI 318-95	0,221	0,286	0,324	0,344	-	0,543
	CEB-FIP MC90	0,356	0,528	0,642	0,705	-	0,804
	MC 2010 final draft	0,285	0,35	0,363	0,361	0,356	-

Considerou-se para os Regulamentos REBAP, EC2, NBR e CEB-FIP 90 que as formulações dadas pelos mesmos para o cálculo da abertura de fendas, se referiam ao nível das armaduras. Concluiu-se rapidamente também, que o tamanho da abertura de fendas aumenta com o aumento do recobrimento.

Refere-se ainda que o regulamento ACI não aconselha o uso das suas equações para recobrimentos superiores a 6,3 cm, e por isso, os resultados superiores a 6,3 apresentam-se a claro na Tabela 3-14.

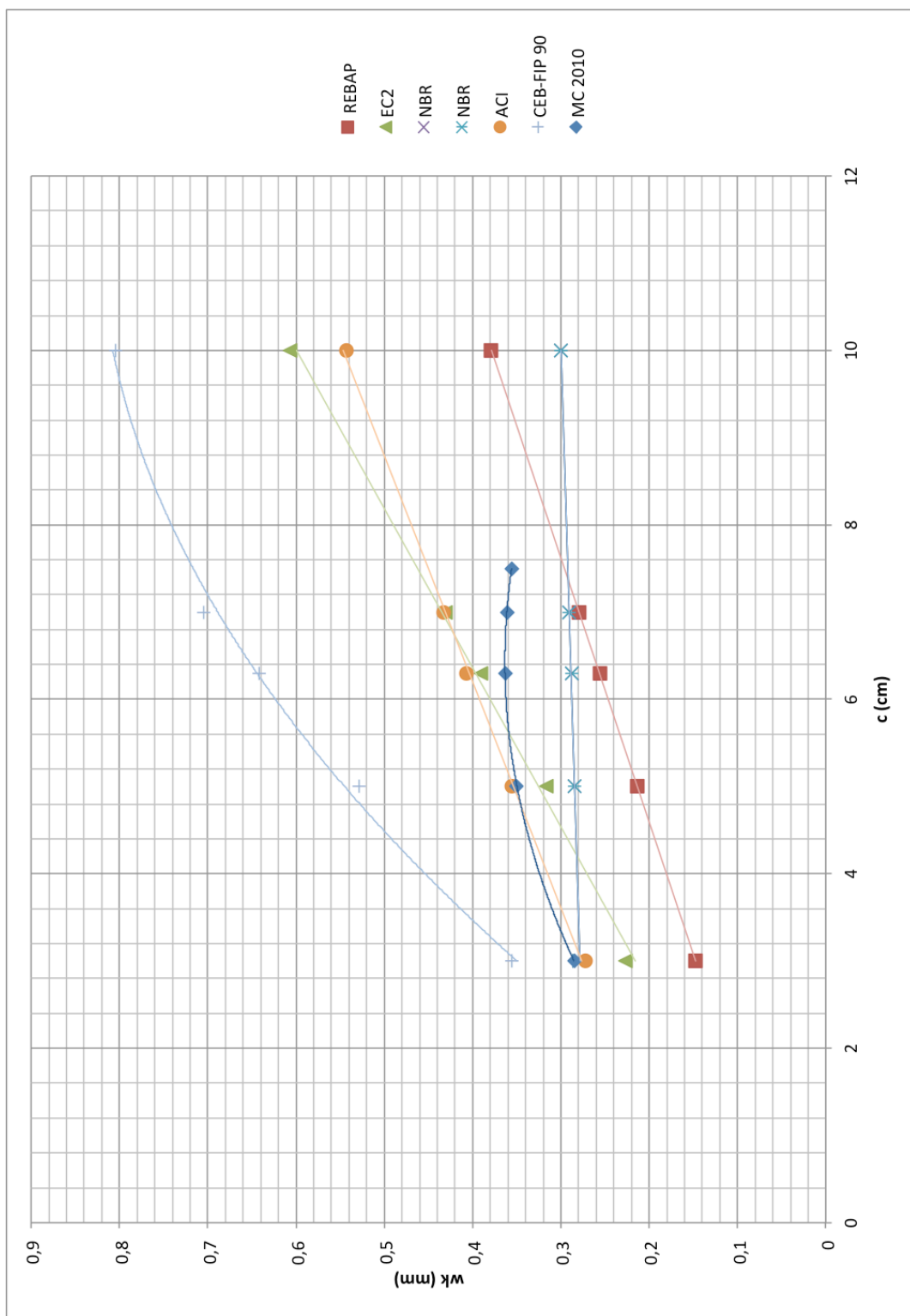


Figura 3-12: Comparação da abertura de fendas, ao nível das armaduras, para todos os Regulamentos.

Análise dos resultados

Por forma a facilitar a comparação dos resultados obtidos aprofundou-se o método de cálculo da abertura de fendas para o REBAP, EC2, CEB-FIP 90 e MODEL CODE 2010, pois são aqueles que apresentam um método de cálculo similar. Todos eles indicam um valor de abertura de fendas multiplicando uma distância (média ou máxima entre fendas) por uma extensão relativa, como se mostra resumidamente na Tabela 3-15.

Tabela 3-15: Resumo do cálculo da abertura de fendas para REBAP, EC2,CEB-FIP 90 e MC 2010.

REBAP	<ol style="list-style-type: none"> 1. $w_k = 1,7 \cdot w_m$ 2. $w_m = S_{rm} \cdot \epsilon_{sm}$ 3. $S_{rm} = 2 \cdot \left(c + \frac{s}{10} \right) + \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_r}$ 4. $\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left(1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right) \geq 0,4 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$
EC2	<ol style="list-style-type: none"> 1. $w_k = S_{r,m\acute{a}x} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ 2. $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$ 3. $S_{r,m\acute{a}x} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \Phi / \rho_{p,eff} , s < 5(c + \Phi/2),$ 4. $S_{r,m\acute{a}x} = 1,3 \cdot (h - x) , s \geq 5(c + \Phi/2),$
CEB-FIP/MC90	<ol style="list-style-type: none"> 1. $w_k = l_{s,m\acute{a}x} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs}) \leq w_{lim}$ 2. $l_{s,m\acute{a}x} = \frac{\phi_s}{3,6 \cdot \rho_{s,eff}} , \text{ para fendilha\c{c}o estabilizada}$ 3. $l_{s,m\acute{a}x} = \frac{\sigma_{s2}}{2 \cdot \tau_{bk}} \cdot \phi_s \cdot \frac{1}{1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}} , \text{ para fendilha\c{c}o n\c{a}o estabilizada}$ 4. $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \epsilon_{s2} - \beta \cdot \epsilon_{sr2}$ 5. $\epsilon_{sr2} = \frac{f_{ctm}(t)}{\rho_{s,eff} \cdot E_s} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff})$
MC 2010	<ol style="list-style-type: none"> 1. $w_d = 2 \cdot l_{s,m\acute{a}x} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs})$ 2. $\sigma_{sr} = \frac{f_{ctm}}{\rho_{s,eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff})$ 3. $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs} = \frac{\sigma_s - \beta \cdot \sigma_{sr}}{E_s} + \eta_r \cdot \epsilon_{sh}$ 4. $l_{s,m\acute{a}x} = k \cdot c + \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{ctm}}{\tau_{bms}} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,eff}}$ <p>NOTA: Esta equa\c{c}o s\c{o} \c{e} v\c{a}lida para estruturas onde o recobrimento das armaduras n\c{a}o excede os 75mm</p>

No âmbito desta comparação, vai-se considerar simplesmente os valores correspondentes à fendilhação estabilizada para o CEB-FIP 90 e Model Code 2010, e portanto excluindo os resultados para recobrimentos de 10 cm.

Na tabela 3-16 apresentam-se os resultados para a distância média entre fendas, para o REBAP, e máxima para EC2, CEB-FIP 90 e Model Code 2010.

É notória a diferença de resultados da abertura de fendas do CEB-FIP 90 para os restantes regulamentos, e este aumento está relacionado com o termo da extensão relativa, $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$, que em comparação com a média das restantes extensões relativas é bastante superior, como se pode observar com a Tabela 3-17.

Nota-se também que para o regulamento REBAP os valores de S_{rm} e de ε_{sm} são inferiores a todos os restantes, esta diferença deve-se, no caso da distância entre fendas, a esta ser a média e não a máxima como nos restantes regulamentos. Outra razão para estes valores serem inferiores é a afectação do coeficiente 1,7 no cálculo final da abertura de fendas, o que faz que o seu valor aumente, mas mantendo-se o Regulamento que apresenta, para o exemplo analisado, menores valores para a abertura de fendas.

A Figura 3-13 mostra a relação entre $L_{s,m\acute{a}x}$ e $S_{r,m\acute{a}x}$ e a Figura 3-14 mostra que $L_{s,m\acute{a}x}$ do Model Code 2010 é equivalente a metade de $L_{s,m\acute{a}x}$ do CEB-FIP 90, como se vê nas equações apresentadas na Tabela 3-15.

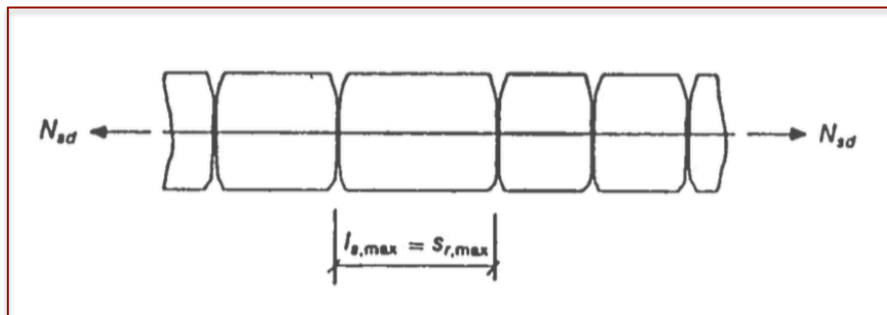


Figura 3-13: Relação entre $L_{s,m\acute{a}x}$ e $S_{r,m\acute{a}x}$ [5].

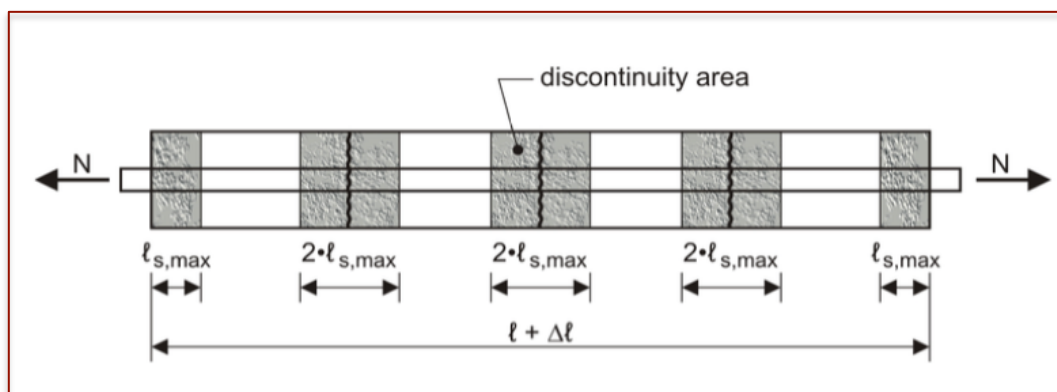


Figura 3-14: Relação entre $L_{s,m\acute{a}x}$ do CEB-FIP 90 e $L_{s,m\acute{a}x}$ do Model Code 2010 [6].

Tabela 3-16: Distância máxima e média entre fendas para o REBAP, EC2, CEB-FIP 90 e MC 2010.

c	(m)	0,03	0,05	0,063	0,07	0,1
REBAP	S_{rm}	0,184	0,263	0,313	0,340	0,455
EC2	$S_{rm\acute{a}x}$	0,286	0,441	0,541	0,595	0,825
CEB-FIP 90	$L_{s,m\acute{a}x}$	0,301	0,442	0,534	0,584	-
MC 2010	$L_{s,m\acute{a}x}$	0,180	0,271	0,330	0,362	-

Tabela 3-17: Extensão relativa para o REBAP, EC2, CEB-FIP 90 e MC 2010.

c	($\times 10^{-3}$)	0,03	0,05	0,063	0,07	0,1
REBAP	ϵ_{sm}	0,473	0,478	0,481	0,483	0,491
EC2	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$	0,793	0,716	0,722	0,724	0,735
CEB-FIP 90	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$	1,183	1,195	1,203	1,208	1,227
MC 2010	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs})$	0,791	0,645	0,550	0,499	-

Outra observação clara dos resultados finais, é a estabilização dos valores da abertura de fendas para MC 2010, isto acontece devido à parcela da extensão relativa, que neste caso, em vez de ser aproximadamente constante como nos restantes códigos, diminui com o aumento do recobrimento, compensando assim, o aumento da distância máxima entre fendas com o aumento do recobrimento.

Como se pode concluir, a abertura de fendas aumenta com o aumento do recobrimento, e este aumento está directamente relacionado com a distância máxima entre fendas que também aumenta com o aumento do recobrimento, como podemos observar na Tabela 3-16.

É importante referir que, a análise de resultados, é feita, para o exemplo analisado, esta análise poderia ser diferente caso as características de secção e carregamentos fossem também, diferentes.

4. COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. ENSAIOS REALIZADOS POR PÉREZ CALDENTY ET AL

Os ensaios realizados por Pérez Caldentey que foram publicados no artigo “Cracking of RC members revisited: influence of cover, $\phi/\rho_s,ef$ and stirrup spacing - an experimental and theoretical study”, escrito por Alejandro Pérez Caldentey, Hugo Corres Peiretti, Joan Peset Iribarren e Alejandro Giraldo Soto.

Este artigo tem como objectivo avaliar experimentalmente o efeito do recobrimento, do quociente $\phi/\rho_{s,eff}$ e a influência do espaçamento entre estribos, na abertura de fendas em elementos de betão armado. Alguns aspectos teóricos importantes são discutidos neste artigo, como quando o cálculo da abertura de fendas é estimada por Regulamentos correntes e qual a relevância que isso pode ter na correlação entre a abertura de fendas e a durabilidade de estruturas em betão armado, especialmente em estruturas com elevados recobrimentos. É discutido também, a ausência nos Regulamentos, da variável que contabiliza o espaçamento dos estribos, para o cálculo de abertura de fendas.

Têm havido várias discussões sobre qual será o melhor modelo de cálculo para a abertura de fendas, Borosnyói e Balázs compilaram um total de 23 equações matemáticas distintas para o cálculo da distância entre fendas e 33 fórmulas para o cálculo da abertura de fendas. Ocorre assim falta de consenso no que diz respeito à modelação para a abertura de fendas em estruturas de betão armado.

Outro aspecto de elevada importância é referido no artigo, é a localização da abertura de fendas dada pelos regulamentos, se esta é calculada ao nível da armadura ou na superfície do betão.

4.1.1. Definição do Ensaio

O ensaio experimental foi desenvolvido no laboratório de estruturas da Universidade Politécnica de Madrid - “Civil Engineering School”, realizado de Maio a Outubro de 2009 e envolveu 12 vigas, todas com 5,22 m de comprimento, assim como todas tinham uma secção transversal rectangular com 0,45m de altura e 0,35m de largura, os ensaios foram realizados como mostra a Figura 4-1. Foram colocados extensómetros de 20 em 20 cm na zona de momento flector constante, isto é, entre apoios.

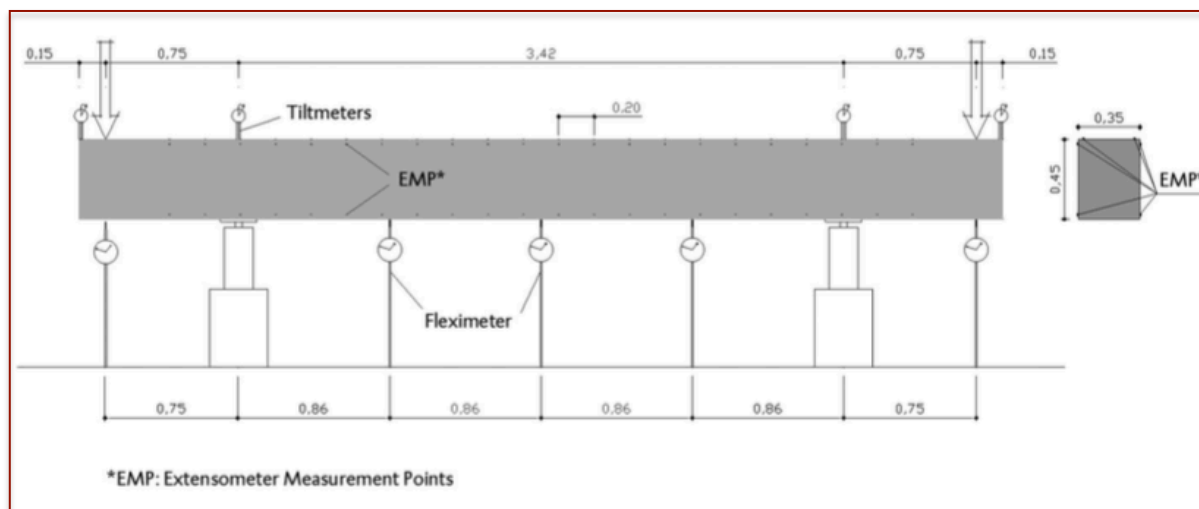


Figura 4-1: Preparação dos testes a realizar no Ensaio de Pérez Caldentey [7].

Todas as vigas foram betonadas ao mesmo tempo, utilizando-se o mesmo tipo de betão, de classe com resistência à compressão de 25 MPa. Na Tabela da figura 4-2 encontram-se os resultados dos testes de compressão, realizados 7 e 28 dias depois da betonagem.

Specimen	Date of Test	Age of concrete [days]	Density [t/m ³]	Measured compressive stress f_c [MPa]	Mean Value [fcm]
1	04/02/2009	7	2.29	21.3	21.9
2	04/02/2009	7	2.28	22.3	
3	04/02/2009	7	2.27	22.0	
4	04/23/2009	28	2.29	26.2	26.9
5	04/23/2009	28	2.28	27.1	
6	04/23/2009	28	2.29	27.4	

Figura 4-2: Valores da tensão do betão medidos no ensaio aos 7º e 28º dia [7].

Os parâmetros estudados foram, recobrimentos de 2 e 7 cm, o quociente $\phi/\rho_{s,eff}$, para armaduras de diâmetros de 12 mm e de 25 mm, e o espaçamento dos estribos. Para o espaçamento dos estribos, três configurações foram consideradas, numa foi a ausência de estribos, noutras estribos espaçados de 10 cm e por 30 cm, o diâmetro dos estribos era de 8 mm.

As vigas foram distinguidas pela seguinte nomenclatura XX-YY-ZZ, sendo XX referente ao diâmetro de 12 ou 25 mm, YY referentes a recobrimentos de 2 ou 7 cm e ZZ referente aos estribos (00 para a ausência de estribos, 10 e 30 para estribos espaçados de 10 e de 30 cm, respectivamente).

A secção transversal das vigas é mostrada na Figura 4-3.

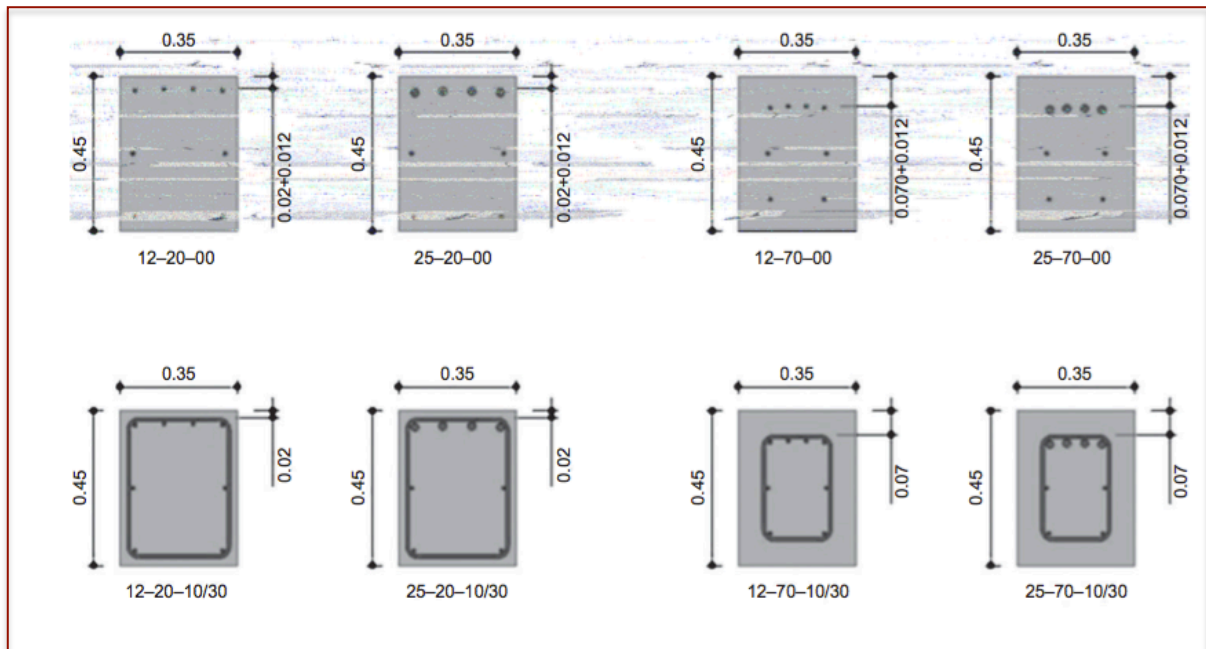


Figura 4-3: Secções transversais das vigas de betão armado a ensaiar [7].

Na tabela da figura 4-4 apresentam-se os valores para o recobrimento, c , $\phi/\rho_{s,eff}$ e para o espaçamento dos estribos, s_w , para cada viga. Todas as vigas foram carregadas até à rotura, para que o comportamento em serviço e em rotura seja analisado na totalidade.

Beam ID	ϕ [mm]	c [mm]	$\phi/\rho_{s,eff}$ [mm]	s_w [mm]
25-20-00	25	20	460	–
25-20-10	25	20	460	100
25-20-30	25	20	460	300
12-20-00	12	20	882	–
12-20-10	12	20	882	100
12-20-30	12	20	882	300
25-70-00	25	70	473 (*)	–
25-70-10	25	70	473 (*)	100
25-70-30	25	70	473 (*)	300
12-70-00	12	70	1172	–
12-70-10	12	70	1172	100
12-70-30	12	70	1172	300

* $hef = (h-x)/3$

Figura 4-4: Características principais das vigas testadas [7].

4.1.2. Resultados do ensaio

A Figura 4-5 mostra os resultados para a espaçamento médio entre fendas, $s_{r,m}$, e máximo, $s_{r,máx}$, do ensaio para as 12 vigas, apresentados em mm.

Beam ID	ϕ [mm]	c [mm]	$\phi/\rho_{s,ef}$ [mm]	s_w [mm]	$s_{r,m}$ [mm]	$s_{r,max}$ [mm]
25-20-00	25	20	460	–	131	234
25-20-10	25	20	460	100	114	230
25-20-30	25	20	460	300	152	258
12-20-00	12	20	882	–	173	269
12-20-10	12	20	882	100	182	320
12-20-30	12	20	882	300	274	358
25-70-00	25	70	473	–	227	423
25-70-10	25	70	473	100	189	460
25-70-30	25	70	473	300	200	442
12-70-00	12	70	1172	–	236	412
12-70-10	12	70	1172	100	260	381
12-70-30	12	70	1172	300	281	383

Figura 4-5: Espaçamento médio e máximo das fendas, medido nos ensaios [7].

Podemos observar que quanto maior o recobrimento, maior o espaçamento entre fendas, seja médio ou máximo.

As figuras 4-6, 4-7, 4-8 e 4-9 mostram fotografias das vigas após os ensaios.

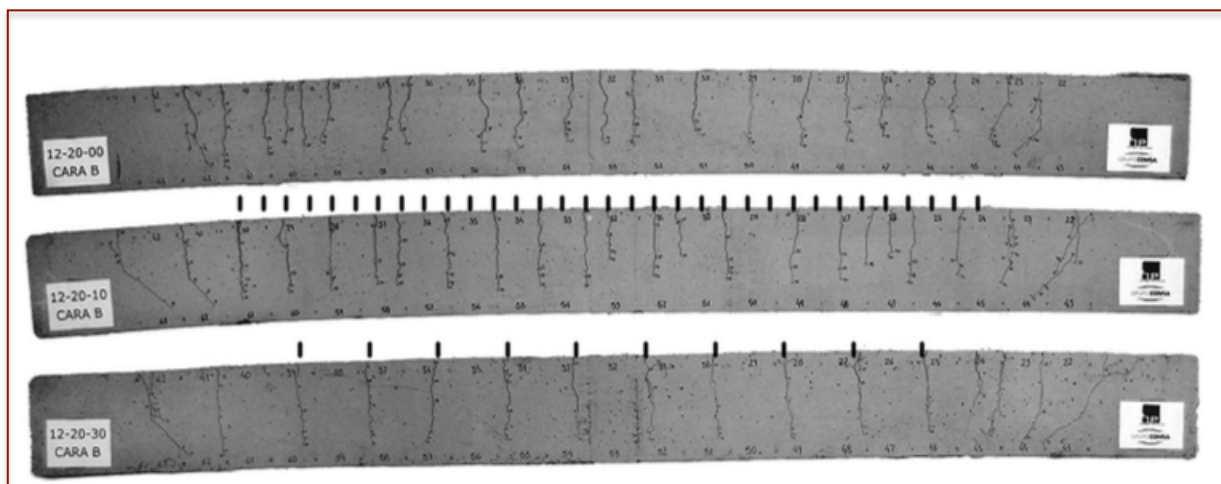


Figura 4-6: Efeito do espaçamento entre estribos no espaçamento de fendas, em vigas de diâmetros de 12 mm de armadura longitudinal (c=20 mm) [7].

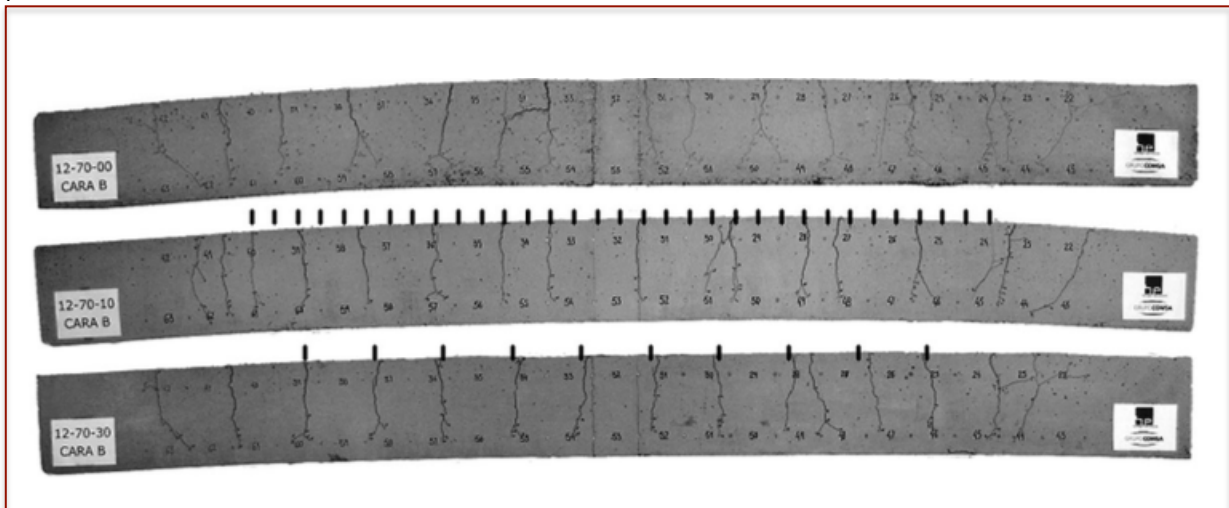


Figura 4-7: Efeito do espaçamento entre estribos no espaçamento de fendas, em vigas de diâmetros de 12 mm de armadura longitudinal ($c=70$ mm) [7].

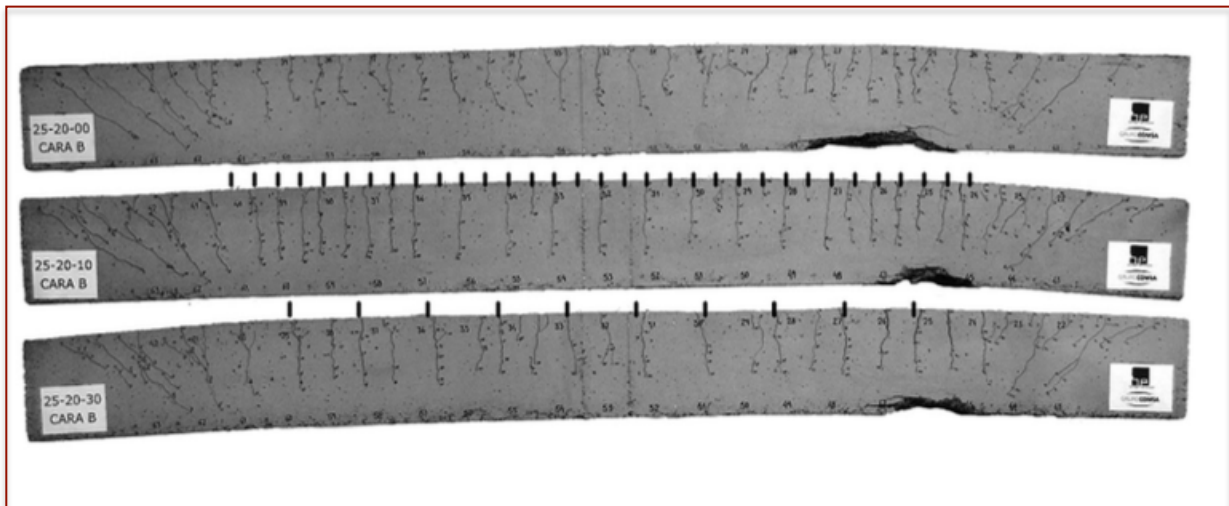


Figura 4-8: Efeito do espaçamento entre estribos no espaçamento de fendas, em vigas de diâmetros de 25 cm de armadura longitudinal ($c=20$ mm) [7].

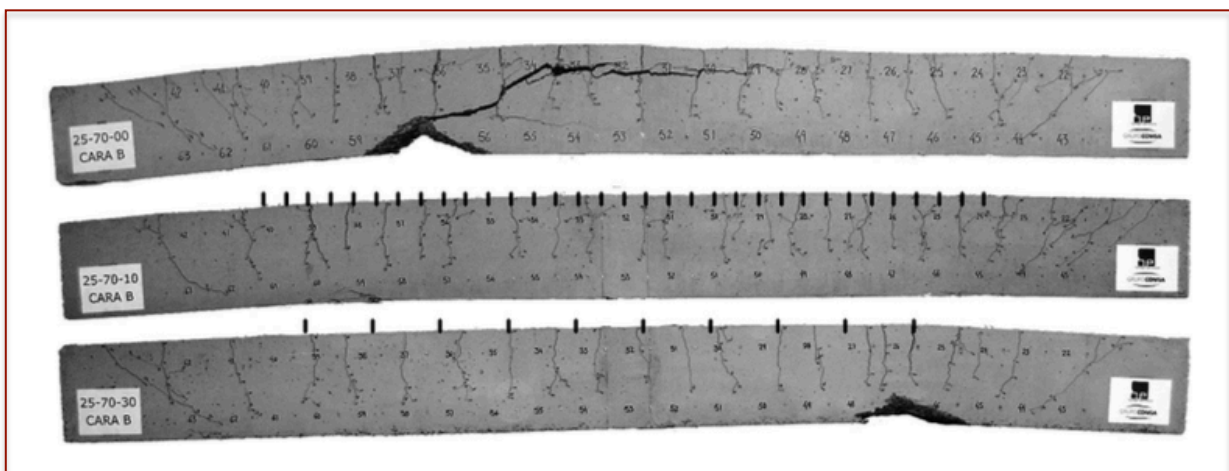


Figura 4-9: Efeito do espaçamento entre estribos no espaçamento de fendas, em vigas de diâmetros de 25 cm de armadura longitudinal ($c=70$ mm) [7].

No ensaio, a abertura de fendas foi estimada com base na medição das extensões do aço e do betão na face superior e lateral das vigas, no comprimento L. A abertura média de fendas foi determinada dividindo a extensão média pelo número de fendas. O espaçamento entre fendas foi determinado por observação directa. Foi também observado que, a partir de um certo ponto no ensaio não se verificou o aparecimento de novas fendas, chegando assim a um estado de fendilhação estabilizada.

As equações seguintes foram usadas para estimar a abertura média e máxima de fendas.

$$\varepsilon_{tension} \times L = \sum \omega + \varepsilon_c \times L \rightarrow w_m = \frac{\sum \omega}{n_{cracks}} = (\varepsilon_{tension} - \varepsilon_c) \frac{L}{n_{cracks}} \approx \varepsilon_{tension} \frac{L}{n_{cracks}} \quad (4.1.1)$$

$$w_{m\acute{a}x} \approx \varepsilon_{m\acute{a}x} \times l \quad (4.1.2)$$

onde,

$\varepsilon_{tension}$: extensão média medida entre apoios;

L: comprimento de momento flector constante;

$\varepsilon_{m\acute{a}x}$: extensão máxima medida entre apoios;

l: comprimento de leitura dos extensômetros, 20 cm;

$\sum w$: somatório do tamanho das aberturas de fendas no comprimento L;

n_{cracks} : número de fendas localizadas no comprimento L;

As equações simplificadas (4.1.1) e (4.1.2) ignoram o efeito da extensão do betão, estando portanto, em princípio, a sobrestimar o tamanho da abertura de fendas.

4.1.3. Influência do Recobrimento

A influência do recobrimento no tamanho da abertura de fendas faz-se, comparando os resultados dos ensaios 25-20-XX e 25-70-XX. A Figura 4-10 mostra muito claramente como o tamanho da abertura de fendas aumenta com o tamanho do recobrimento. Este aumento está relacionado com o aumento no espaçamento entre fendas, como se mostra na figura 4-11. O espaçamento médio entre fendas aumentou de 13,1 cm, na viga 25-20-00, com um total de 28 fendas para 22,7 cm, na viga 25-70-00, com um total de 16 fendas.

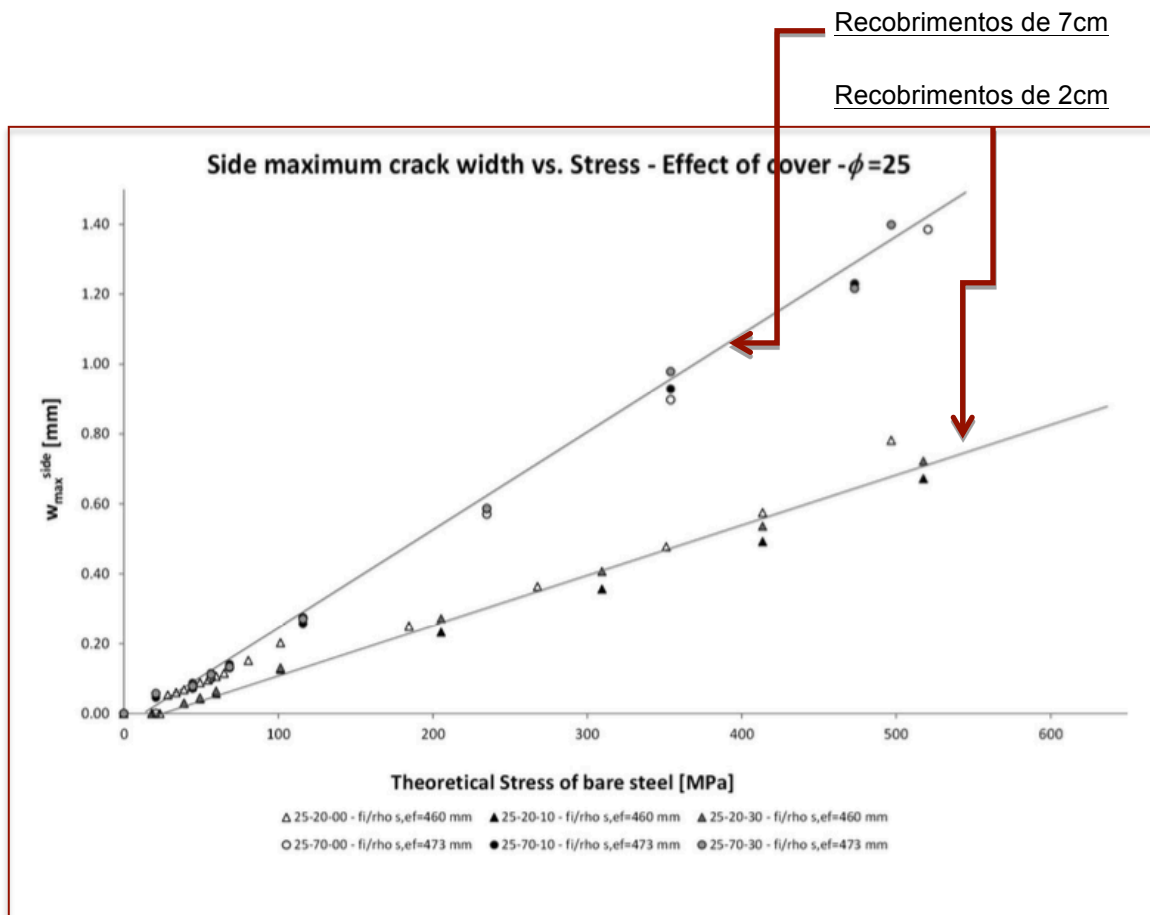


Figura 4-10: Efeito do recobrimento na abertura de fendas [7].

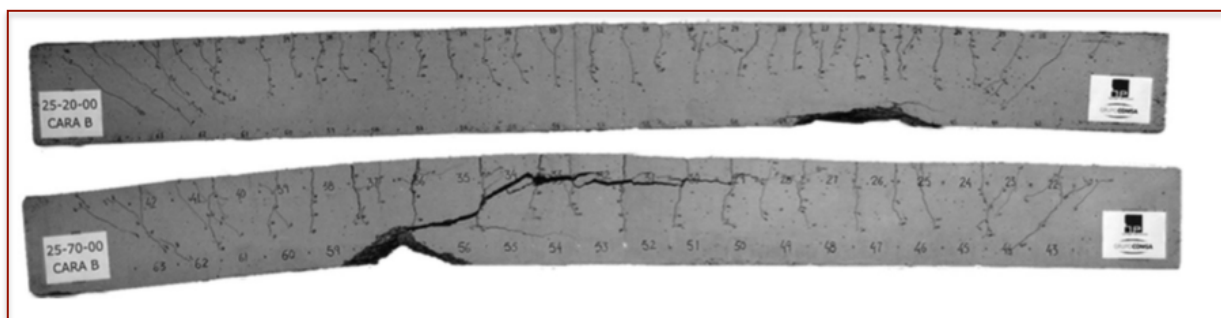


Figura 4-11: Efeito do recobrimento no espaçamento entre fendas [7].

Estes resultados confirmam que o recobrimento é um parâmetro muito importante no desenvolvimento de um modelo para o cálculo da abertura de fendas.

4.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS REGULAMENTOS

Por forma a realizar a comparação com os resultados experimentais, retiraram-se da Figura 4-10, os valores das aberturas de fendas para tensões do aço iguais a 350 MPa e 415 MPa.

Para a tensão no aço de 350 MPa retiramos os valores das aberturas de fendas para os ensaios com recobrimentos de 7 cm, (25-70-00; 25-70-10; 25-70-30). Para valores de tensão do aço de 415 MPa retiraram-se os valores experimentais dos tamanhos das aberturas de fendas para os ensaios com recobrimentos de 2 cm (25-20-00; 25-20-10; 25-20-30).

Estes valores estão apresentados nas Tabelas 4-1 e 4-2.

Os valores dos diâmetros das armaduras longitudinais são de 25 mm e 12mm para a armadura transversal.

Tabela 4-1: Valores das aberturas de fendas dos ensaios realizados em laboratório, retirados do artigo acima referido, para recobrimentos de 7 cm.

σ_s (Mpa)	Ensaio	w_k exp. (mm)
350	w_k (25-70-00)	0,98
350	w_k (25-70-10)	0,94
350	w_k (25-70-30)	0,9

Tabela 4-2: Valores das aberturas de fendas dos ensaios realizados em laboratório, retirados do artigo acima referido, para recobrimentos de 2 cm.

σ_s (Mpa)	Ensaio	w_k exp. (mm)
415	w_k (25-20-00)	0,575
415	w_k (25-20-10)	0,5
415	w_k (25-20-30)	0,55

Para estes dois grupos de valores determinou-se, para cada regulamento, o valor da abertura de fendas w_k , que serão apresentados nas Tabelas 4-3 e 4-4 . É importante referir, que a presença de estribos para este cálculo, segundo os regulamentos, só altera o valor do verdadeiro recobrimento, isto é, nos ensaios 25- 20-00 e 25-70-00, os recobrimentos passam de 2 e 7 cm para 3,2 e 8,2 cm, respectivamente, correspondente ao valor inicial do recobrimento mais o valor do diâmetro da armadura transversal, que neste caso é inexistente. Pelo que, nos restantes ensaios e segundo todos os regulamentos, na presença de estribos, não existe qualquer indicação para a sua contabilização

no cálculo da abertura de fendas. Sendo então iguais os valores calculados para os ensaios com estribos afastados de 10 e de 30 mm.

Tabela 4-3: Valores das aberturas de fendas calculadas segundo os Regulamentos, para recobrimentos de 2 cm.

Ensaio	Ensaio em Laboratório	REBAP	EC2	NBR	ACI	MC 90	MC 2010
w_k (25-20-00)	0,575	0,422	0,352	0,371	0,286	0,262	0,358
w_k (25-20-10)	0,5	0,301	0,276	0,318	0,277	0,274	0,313
w_k (25-20-30)	0,55	0,301	0,276	0,318	0,277	0,274	0,313

Tabela 4-4 : Valores das aberturas de fendas calculadas segundo os Regulamentos, para recobrimentos de 7 cm.

Ensaio	Ensaio em Laboratório	REBAP	EC2	NBR	ACI	MC 90	MC 2010
w_k (25-70-00)	0,98	0,752	0,558	0,48	0,322	0,51	(0,452)
w_k (25-70-10)	0,94	0,656	0,494	0,423	0,320	0,538	0,414
w_k (25-70-30)	0,9	0,656	0,494	0,423	0,320	0,538	0,414

A representação gráfica, para melhor interpretação é apresentada nos gráficos das Figuras 4-12 e 4-13 . Os cálculos detalhados, para os 4 regulamentos e 2 códigos modelo analisados, apresentam-se em anexo.

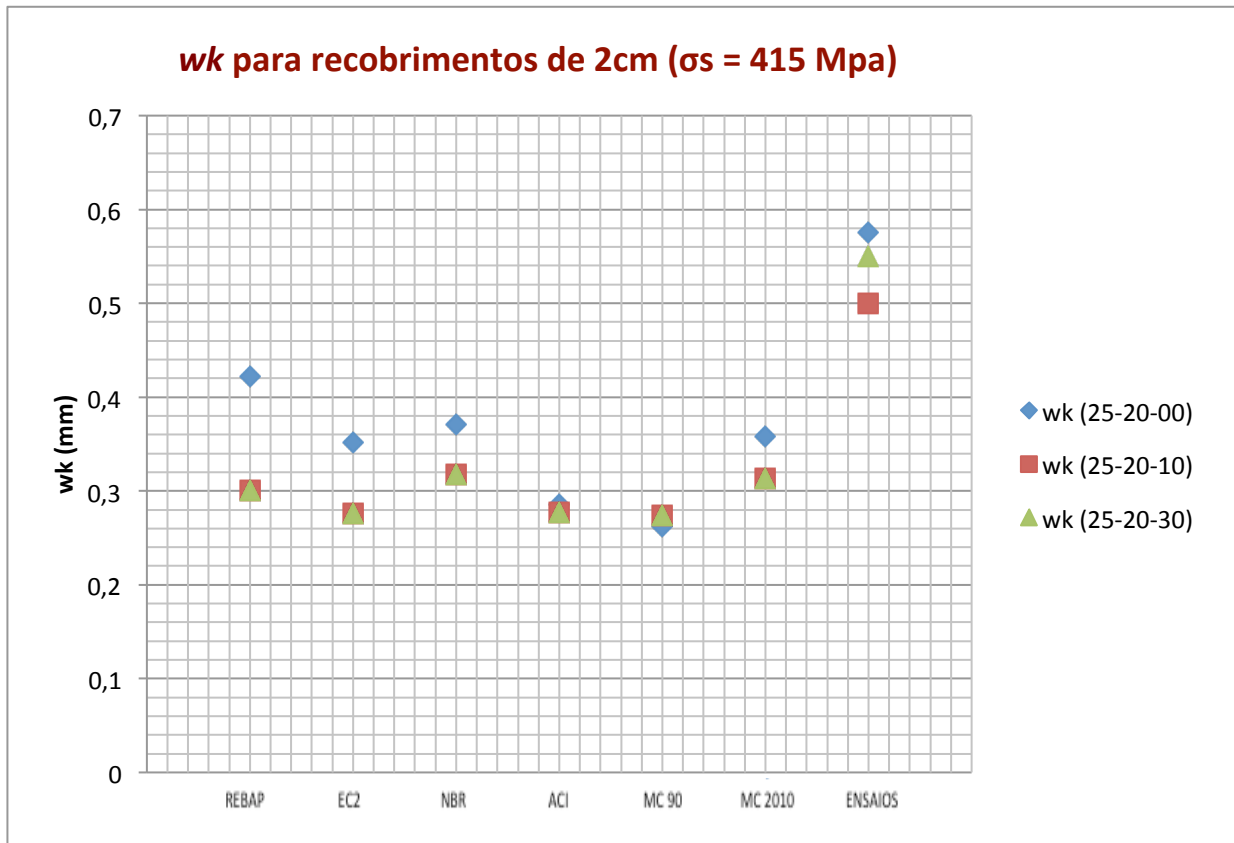


Figura 4-12: Comparação do tamanho das aberturas de fendas dos ensaios com os Regulamentos ($c = 2$ cm).

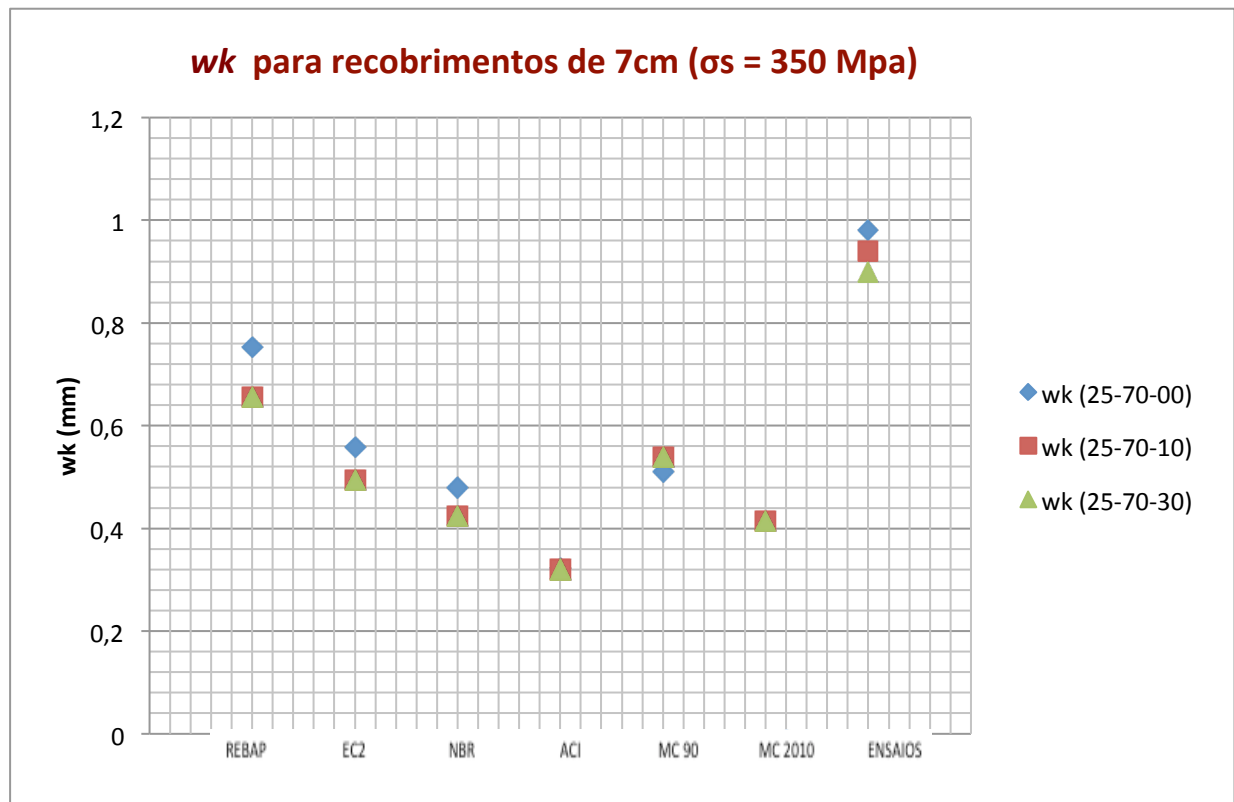


Figura 4-13: Comparação do tamanho das aberturas de fendas dos ensaios com os Regulamentos ($c = 7$ cm).

A primeira conclusão global que se pode observar, é a grande diferença de resultados a nível de regulamentos e a nível de ensaios experimentais, dando este último, resultados superiores aos obtidos segundo os regulamentos. Esta diferença é ainda maior no caso de recobrimentos mais elevados.

Sabe-se também que para esta secção o Momento de fendilhação, M_{cr} , é aproximadamente 30 kN.m, para todos os códigos, sendo muito inferior ao Momento aplicado, de aproximadamente 290 kN.m, pelo que se esperaria grandes aberturas de fendas como mostra o resultado do ensaio.

Como referido no capítulo anterior, a análise de resultados, é feita, para um exemplo em específico. Esta análise será diferente caso as características de secção e carregamentos também o sejam, como se pode verificar com a diferença de resultados do exemplo analisado no Capítulo 3 e no Capítulo 4.

Constituem também de interesse as seguintes observações sobre cada regulamento, no cálculo da abertura de fendas, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 4-3 e 4-4:

- 1) No respeitante ao REBAP, para grandes recobrimentos, é o Regulamento que melhor representa o valor da abertura de fendas, segundo os resultados do ensaio em questão.
- 2) Para recobrimentos maiores é o ACI o regulamento que apresenta menores aberturas de fendas, sendo portanto, o que mais se afasta da realidade dos ensaios.
- 3) Para o MC 2010, não é calculada a abertura de fendas para a viga 25-70-00, visto o recobrimento ser igual a 8,2 cm (7 + 1,2), equivalente ao recobrimento inicial e o diâmetro dos estribos. Para este recobrimento não é calculado o valor da abertura de fendas, pois o Regulamento aconselha a um cálculo mais detalhado quando os recobrimentos excedem os 7,5 cm. Mas para efeito de comparação, o valor seria de 0,452 mm, estando em sintonia com os resultados chegados segundo os outros Regulamentos.
- 4) Para MC 2010, é dada a possibilidade de cálculo, da abertura de fendas ao nível das armaduras assim como ao nível da superfície. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4-5 e 4-6, apresentadas a seguir.

Tabela 4-5: Valores das aberturas de fendas, calculados ao nível da superfície, para recobrimentos de 2 cm.

	25-20-00	25-20-10	25-20-30
w_k ACI (mm)	0,4	0,361	0,361
w_k MC 2010 (mm)	0,419	0,366	0,366

Tabela 4-6: Valores das aberturas de fendas, calculados ao nível da superfície, para recobrimentos de 7 cm.

	25-70-00	25-70-10	25-70-30
w_k ACI (mm)	0,549	0,524	0,524
w_k MC 2010 (mm)	0,653	0,599	0,599

Como se pode observar, a abertura de fendas é sempre superior na superfície da viga em comparação com o nível das armaduras.

5. CONCLUSÃO

O que podemos concluir acerca do estudo efectuado, com base nos cálculos e nos ensaios realizados, é que o tamanho da abertura de fendas aumenta com o aumento do recobrimento. Esse aumento está relacionado com o aumento do espaçamento entre fendas, como nos mostra o resultado dos ensaios, onde o espaçamento médio entre fendas, por exemplo, na viga 25-20-00, aumentou de 13,1 cm para 22,7 cm, quando se aumentou o recobrimento para 7 cm.

Com isto, podemos assumir que o parâmetro recobrimento, é um parâmetro importante na fendilhação. Evidências experimentais confirmam que o tamanho da abertura de fendas aumenta quando estas são medidas mais afastadas do nível das armaduras, como mostra a Figura 5-1 relativa aos ensaios de Borosnyói and Snóbli e a Figura 5-2 relativa aos ensaios de Husain and Ferguson.

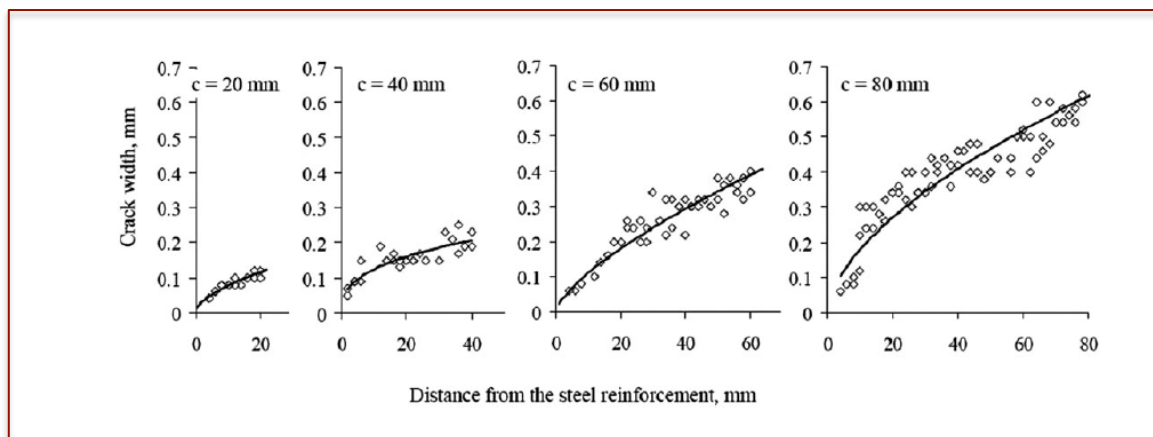


Figura 5-1: Evolução da abertura de fenda ao longo do betão de recobrimento (ensaios de Borosnyói and Snóbli) [7].

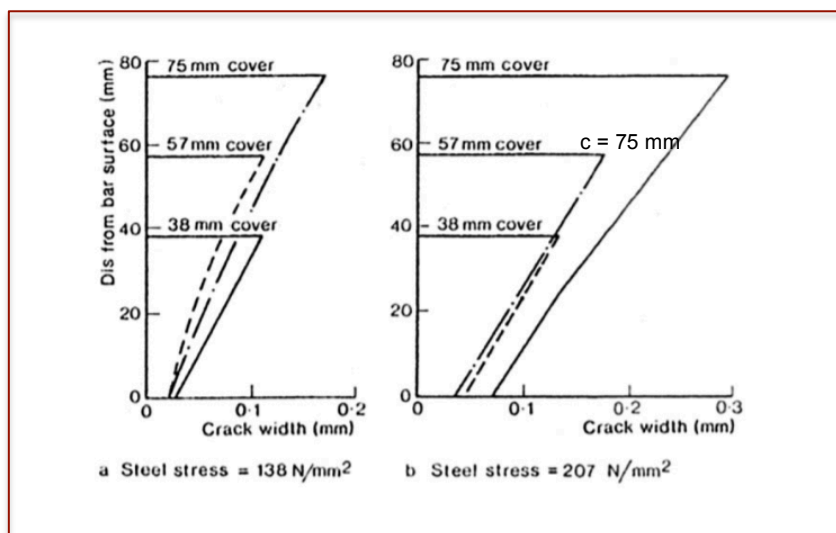


Figura 5-2: Ensaios de Husain and Ferguson, mostrando o aumento na abertura de fendas com a distância à armadura [7].

Refere-se ainda a influência do espaçamento dos estribos, aspecto ausente na generalidade dos Regulamentos, no respeitante à influência dos estribos no cálculo da abertura de fendas e no espaçamento entre as mesmas. A influência que foi observada segundo testes realizados por Gómez Navarro em Lausanne, foi que existe uma relação sobre a localização dos estribos e a localização das fendas, como mostra a Figura 5-3.

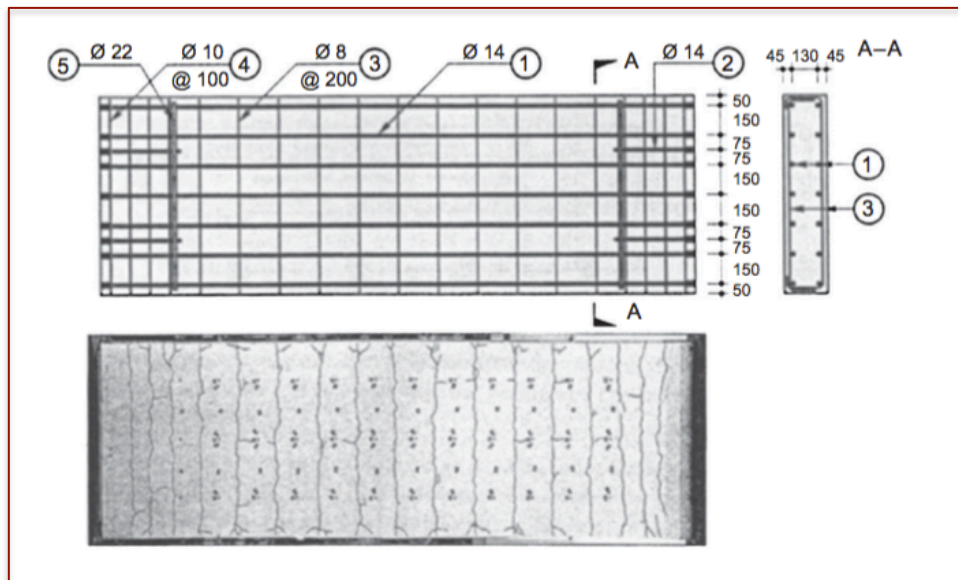


Figura 5-3: Padrão de fendilhação em testes realizados por Gómez Navarro [7].

Com a observação das Figuras 4-6, 4-7, 4-8 e 4-9, observa-se que as fendas tendem a aparecer na localização dos estribos mas que esta tendência é mais forte em vigas com recobrimentos mais pequenos, mas que esta observação não se pode tornar numa regra pois o contrário também se pode verificar.

A razão pela qual não existe um parâmetro, nos presentes Regulamentos, que tenha em conta a influência dos estribos na fendilhação, julga-se ser devida a estes só influenciarem o espaçamento médio entre fendas, mas não o máximo, e para o controlo da fendilhação o espaçamento máximo entre fendas é que é realmente importante.

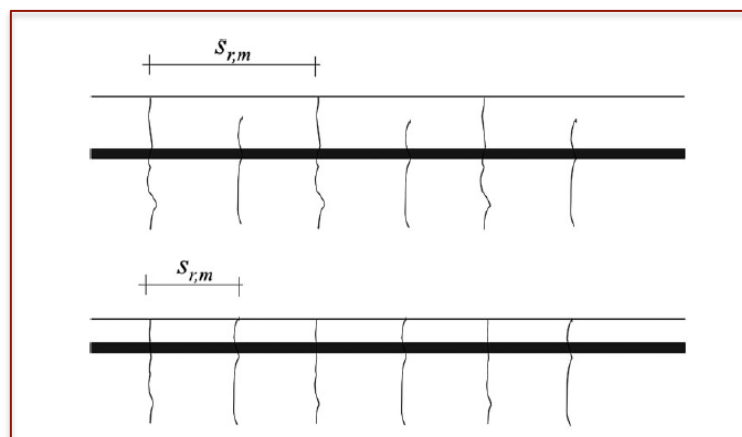


Figura 5-4: Padrão de fendilhação, com e sem recobrimentos elevados (Caldentey et al.) [7].

Conforme referido, evidências experimentais mostram que o tamanho da abertura de fendas aumenta quando estas são medidas mais afastadas do nível das armaduras, como mostra a Figura 5-2 , uma possível explicação para isto seria devido ao efeito de “shear lag”, porém este efeito não é preponderante de acordo com Caldentey.

A principal justificativa residirá no efeito semelhante ao observado na alma das vigas, resultante de uma arborescência, ou agrupamento de fendas ao nível do betão de recobrimento (Figura 5-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP). Decreto-Lei no 349 C/83
- [2] Versão portuguesa da EN 1992-1-1:2004 (Março 2010): NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2- Projecto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e Regras para edifícios
- [3] ABNT NBR 6118: 2003 Norma Brasileira, Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento
- [4] ACI 224R – 01 Control of Cracking in Concrete Structures
- [5] CEB-FIP Model Code – 1990 Comité Euro – International Du Beton
- [6] Special Activity Group 5 (September 2011): Model Code 2010 Final Draft
- [7] A. Caldentey; H. Peiretti; J. Iribarren; A. Soto: Cracking of RC members revisited: Influence of cover, Φ , and stirrup spacing – an experimental and theoretical study, Structural Concrete Journal, 2013
- [8] Appleton, J. (2013): Estruturas de betão - Volumes 1 e 2, Edições Orion, Amadora
- [9] Critérios de Projecto civil de usinas hidrelétricas. Eletrobrás. CBDB. Outubro 2003
- [10] Muttoni A. ; Burdet O. (2001-2002): Eléments de structures, Béton armé, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse;

ANEXOS

Anexo 1: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o REBAP, para as vigas 25-20-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @ 30
c (m)	0,032	0,02	0,02
E_s (GPa)	200	200	200
E_c (GPa)	30,5	30,5	30,5
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	292,3217808	292,3217808	292,3217808
d (m)	0,4055	0,4055	0,4055
z (m)	0,358833333	0,358833333	0,358833333
x (m)	0,14	0,14	0,14
F_t (kN)	814,645	814,645	814,645
F_c (kN)	814,645	814,645	814,645
σ_s (MPa)	415	415	415
σ_c (MPa)	33,25081633	33,25081633	33,25081633
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	14,17115589	14,26482368	14,26482368
$\varepsilon_1 (\times 10^{-3})$	14,51850728	14,51850728	14,51850728
$\varepsilon_2 (\times 10^{-3})$	14,27536131	14,34092876	14,34092876
$1/R$ (m ⁻¹)	7,805649073	7,805649073	7,805649073
a (m)	0,03115	0,02275	0,02275
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,087	0,087	0,087
η_1	0,4	0,4	0,4
η_1	0,247906586	0,248471102	0,248471102
ρ_s	0,063017657	0,086285714	0,086285714
S_{rm} (m)	0,120739226	0,08619632	0,08619632
f_{ctm} (MPa)	2,5	2,5	2,5
σ_{sr} (MPa)	41,92458295	41,92458295	41,92458295
ε_{sm} '(m/m)	0,002053823	0,002053823	0,002053823
w_k (mm)	0,421560951	0,300954409	0,300954409
M_{cr} (kN.m)	29,53125	29,53125	29,53125
ε_{sm} (m/m)	0,00083	0,00083	0,00083

REBAP

Anexo 2: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o REBAP, para as vigas 25-70-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @ 30
c (m)	0,082	0,07	0,07
E_s (GPa)	200	200	200
E_c (GPa)	30,5	30,5	30,5
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	214,703125	214,703125	214,703125
d (m)	0,3555	0,3555	0,3555
z (m)	0,3125	0,3125	0,3125
x (m)	0,129	0,129	0,129
F_t (kN)	687,05	687,05	687,05
F_c (kN)	687,05	687,05	687,05
σ_s (MPa)	350	350	350
σ_c (MPa)	30,43410853	30,43410853	30,43410853
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	1,226	13,82422269	13,82422269
$\varepsilon_1 (\times 10^{-3})$	14,46190699	14,46190699	14,46190699
$\varepsilon_2 (\times 10^{-3})$	13,95060013	14,01552798	14,01552798
1/R (m ⁻¹)	7,729506677	7,729506677	7,729506677
a (m)	0,06615	0,05775	0,05775
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,053666667	0,0537	0,0537
η_1	0,4	0,4	0,4
η_1	0,245580572	0,246141769	0,246141769
ρ_s	0,029674981	0,033991342	0,033991342
S_{rm} (m)	0,257490108	0,223153078	0,223153078
f_{ctm} (MPa)	2,5	2,5	2,5
σ_{sr} (MPa)	48,14060112	48,14060112	48,14060112
ε_{sm} '(m/m)	0,001716893	0,001716893	0,001716893
w_k (mm)	0,751540866	0,651320778	0,651320778
M_{cr} (kN.m)	29,53125	29,53125	29,53125
$\varepsilon_{sm,min}$ (m/m)	0,0007	0,0007	0,0007
h_{ceff} (m)	0,189	0,165	0,165
h-x (m)	0,321	0,321	0,321

Anexo 3: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o EC2, para as vigas 25-20-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @30
c (m)	0,032	0,02	0,02
E_s (GPa)	200	200	200
E_c (GPa)	31	31	31
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	292,5933292	292,5933292	292,5933292
d (m)	0,4055	0,4055	0,4055
z (m)	0,359166667	0,359166667	0,359166667
x (m)	0,139	0,139	0,139
F_t (kN)	814,645	814,645	814,645
F_c (kN)	814,645	814,645	814,645
σ_s (MPa)	415	415	415
σ_c (MPa)	33,49003083	33,49003083	33,49003083
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	14,13476023	14,22813602	14,22813602
EC2 k_1	0,8	0,8	0,8
k_2	0,5	0,5	0,5
1/R	7,781315845	7,781315845	7,781315845
$h_{c,ef}$ (m)	0,103666667	0,103666667	0,103666667
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,087	0,087	0,087
k_3	3,4	3,4	3,4
k_4	0,425	0,425	0,425
ρ_s	0,054101975	0,054101975	0,054101975
S_{rm} (m)	0,187355357	0,146555357	0,146555357
f_{ctn} (MPa)	2,6	2,6	2,6
k_t	0,6	0,6	0,6
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})'$	0,001880505	0,001880505	0,001880505
w_k (mm)	0,35232273	0,275598117	0,275598117
α_e	6,451612903	6,451612903	6,451612903
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})_{min}$	0,001245	0,001245	0,001245
$5(c+\Phi/2)$ (m)	0,2225	0,1625	0,1625

Anexo 4: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o EC2, para as vigas 25-70-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @30
c (m)	0,082	0,07	0,07
E_s (GPa)	200	200	200
E_c (GPa)	31	31	31
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	214,9321417	214,9321417	214,9321417
d (m)	0,3555	0,3555	0,3555
z (m)	0,312833333	0,312833333	0,312833333
x (m)	0,128	0,128	0,128
F_t (kN)	687,05	687,05	687,05
F_c (kN)	687,05	687,05	687,05
σ_s (MPa)	350	350	350
σ_c (MPa)	30,671875	30,671875	30,671875
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	13,69707661	13,78954633	13,78954633
k_1	0,8	0,8	0,8
k_2	0,5	0,5	0,5
1/R	7,705809628	7,705809628	7,705809628
$h_{c,ef}$ (m)	0,107333333	0,107333333	0,107333333
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,053666667	0,0537	0,0537
k_3	3,4	3,4	3,4
k_4	0,425	0,425	0,425
ρ_s	0,052253771	0,052253771	0,052253771
S_{rm} (m)	0,360133843	0,319333843	0,319333843
f_{ctn} (MPa)	2,6	2,6	2,6
k_t	0,6	0,6	0,6
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})'$	0,001550406	0,001550406	0,001550406
w_k (mm)	0,558353633	0,495097073	0,495097073
α_e	6,451612903	6,451612903	6,451612903
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})_{min}$	0,00105	0,00105	0,00105
$5(c+\Phi/2)$ (m)	0,4725	0,4125	0,4125

EC2

Anexo 5: Cálculo da abertura de fendas, Segundo a NBR, para as vigas 25-20-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @ 30
c (m)	0,032	0,02	0,02
E_s (GPa)	210	210	210
E_c (GPa)	28	28	28
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	290,4209425	290,4209425	290,4209425
d (m)	0,4055	0,4055	0,4055
z (m)	0,3565	0,3565	0,3565
x (m)	0,147	0,147	0,147
F_t (kN)	814,645	814,645	814,645
F_c (kN)	814,645	814,645	814,645
σ_s (MPa)	415	415	415
σ_c (MPa)	31,66744412	31,66744412	31,66744412
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	1,226	13,9497019	13,9497019
$b_{eff,int}$ (m)	0,087	0,087	0,087
$b_{eff,ext}$ (m)	0,088	0,076	0,076
1/R(m ⁻¹)	7,662566272	7,662566272	7,662566272
h_{eff} (m)	0,232	0,22	0,22
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,087	0,087	0,087
η_1	2,25	2,25	2,25
A_{cri} (m ²)	0,020184	0,01914	0,01914
ρ_s	0,024319949	0,025646492	0,025646492
f_{ctm} (MPa)	2,56	2,56	2,56
w_{k1} (mm)	0,854290675	0,854290675	0,854290675
$w_{k2,m\acute{a}x}$ (mm)	0,36796496	0,35302096	0,35302096
$w_{k,min}$ (mm)	0,371285849	0,318380652	0,318380652
$A_{s,\phi i}$ (m ²)	0,000490874	0,000490874	0,000490874
π	3,141592654	3,141592654	3,141592654
$w_{k2,min}$ (mm)	0,371285849	0,318380652	0,318380652
$A_{cri,min}$ (m ²)	0,020416	0,01672	0,01672
$\rho_{s,m\acute{a}x}$	0,024043586	0,029358484	0,029358484

Anexo 6: Cálculo da abertura de fendas, Segundo a NBR, para as vigas 25-70-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @ 30
c (m)	0,082	0,07	0,07
E_s (GPa)	210	210	210
E_c (GPa)	28	28	28
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	213,1000083	213,1000083	213,1000083
d (m)	0,3555	0,3555	0,3555
z (m)	0,310166667	0,310166667	0,310166667
x (m)	0,136	0,136	0,136
F_t (kN)	687,05	687,05	687,05
F_c (kN)	687,05	687,05	687,05
σ_s (MPa)	350	350	350
σ_c (MPa)	28,86764706	28,86764706	28,86764706
$\varepsilon_s(\times 10^{-3})$	1,226	13,51862366	13,51862366
$b_{eff,int}$ (m)	0,053666667	0,0537	0,0537
$b_{eff,ext}$ (m)	0,121333333	0,10935	0,10935
1/R(m ⁻¹)	7,588337726	7,588337726	7,588337726
h_{eff} (m)	0,282	0,27	0,27
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,053666667	0,0537	0,0537
η_1	2,25	2,25	2,25
A_{cri} (m ²)	0,015134	0,014499	0,014499
ρ_s	0,032435169	0,033855704	0,033855704
f_{ctm} (MPa)	2,56	2,56	2,56
w_{k1} (mm)	0,607638889	0,607638889	0,607638889
$w_{k2,máx}$ (mm)	0,249367299	0,241701453	0,241701453
$w_{k,min}$ (mm)	0,249367299	0,241701453	0,241701453
$A_{s,\phi i}$ (m ²)	0,000490874	0,000490874	0,000490874
π	3,141592654	3,141592654	3,141592654
$w_{k2,min}$ (mm)	0,4797	0,4231	0,4231
$A_{cri,min}$ (m ²)	0,034216	0,0295245	0,0295245

NBR

Anexo 7: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o ACI, para as vigas 25-20-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @ 30
c (m)	0,032	0,02	0,02
E_s (GPa)	199,95	199,95	199,95
E_c (GPa)	29,9	29,9	29,9
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	292,0502325	292,0502325	292,0502325
d (m)	0,4055	0,4055	0,4055
z (m)	0,3585	0,3585	0,3585
x (m)	0,141	0,141	0,141
F_t (kN)	814,645	814,645	814,645
F_c (kN)	814,645	814,645	814,645
σ_s (MPa)	415	415	415
σ_c (MPa)	33,01499493	33,01499493	33,01499493
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	1,226	14,32236941	14,32236941
1 in (m)	0,03	0,03	0,03
1 psi (Pa)	6894,757	6894,757	6894,757
1/R	7,841428637	7,841428637	7,841428637
hcef (m)	0,089	0,089	0,089
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,087	0,087	0,087
nº barras	4	4	4
A_{cri} (m ²)	0,0077875	0,0077875	0,0077875
ρ_s	0,063049759	0,063049759	0,063049759
f_{ctm} (MPa)	2,56	2,56	2,56
t_b (in)	1,483333333	1,083333333	1,083333333
β	1,2	1,2	1,2
t_b (in)	1,483333333	1,083333333	1,083333333
h_1 (in)	8,816666667	8,816666667	8,816666667
w_b (in)	0,015768146	0,014200002	0,014200002
w_b (mm)	0,400510899	0,360680051	0,360680051
f_s (ksi)	60,19066372	60,19066372	60,19066372
A (in ²)	12,07364341	12,07364341	12,07364341
w_s (in)	0,011247774	0,010538441	0,010538441
w_s (mm)	0,285693454	0,267676413	0,267676413
1 in ² (m ²)	0,000645	0,000645	0,000645
1 in (mm)	25,4	25,4	25,4

Anexo 8: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o ACI, para as vigas 25-70-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @ 30
c (m)	0,082	0,07	0,07
E_s (GPa)	199,95	199,95	199,95
E_c (GPa)	29,9	29,9	29,9
A_s (m^2)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	214,4741083	214,4741083	214,4741083
d (m)	0,3555	0,3555	0,3555
z (m)	0,312166667	0,312166667	0,312166667
x (m)	0,13	0,13	0,13
F_t (kN)	687,05	687,05	687,05
F_c (kN)	687,05	687,05	687,05
σ_s (MPa)	350	350	350
σ_c (MPa)	30,2	30,2	30,2
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	1,226	13,88000565	13,88000565
1 in (m)	0,03	0,03	0,03
1 psi (Pa)	6894,757	6894,757	6894,757
1/R	7,765038127	7,765038127	7,765038127
hcef (m)	0,189	0,189	0,189
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,053666667	0,0537	0,0537
nº barras	4	4	4
A_{cri} (m^2)	0,0165375	0,0165375	0,0165375
ρ_s	0,029690098	0,029690098	0,029690098
f_{ctm} (MPa)	2,56	2,56	2,56
t_b (in)	3,15	2,75	2,75
β	1,2	1,2	1,2
t_b (in)	3,15	2,75	2,75
h_1 (in)	7,516666667	7,516666667	7,516666667
w_b (in)	0,021601273	0,020645246	0,020645246
w_b (mm)	0,548672345	0,524389254	0,524389254
f_s (ksi)	50,76321036	50,76321036	50,76321036
A (in^2)	25,63953488	25,63953488	25,63953488
w_s (in)	0,012685123	0,012596058	0,012596058
w_s (mm)	0,322202119	0,319939873	0,319939873
1 in^2 (m^2)	0,000645	0,000645	0,000645
1 in (mm)	25,4	25,4	25,4

ACI

Anexo 9: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o CEB-FIP, para as vigas 25-20-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @30
c (m)	0,032	0,02	0,02
E_s (GPa)	200	200	200
E_c (GPa)	29	29	29
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	291,5071358	291,5071358	291,5071358
d (m)	0,4055	0,4055	0,4055
z (m)	0,357833333	0,357833333	0,357833333
x (m)	0,143	0,143	0,143
F_t (kN)	814,645	814,645	814,645
F_c (kN)	814,645	814,645	814,645
σ_s (MPa)	415	415	415
σ_c (MPa)	32,55324675	32,55324675	32,55324675
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	2,069914943	2,164539626	2,164539626
$\varepsilon_1 (\times 10^{-3})$	14,64316971	14,64316971	14,64316971
$\varepsilon_2 (\times 10^{-3})$	1,543565143	1,543565143	1,543565143
1/R(m ⁻¹)	7,885390259	7,885390259	7,885390259
2,5*(h-d) (m)	0,11125	0,11125	0,11125
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,087	0,087	0,087
(h-x)/3 (m)	0,102333333	0,102333333	0,102333333
$A_{c,eff}$ (m ²)	0,035816667	0,035816667	0,035816667
ρ_s	0,054806887	0,054806887	0,054806887
f_{ctm} (MPa)	2,6	2,6	2,6
ε_{sr2}	0,000237196	0,000237196	0,000237196
$\rho_{s,ef} \cdot \sigma_{s2}$	22,74485807	22,74485807	22,74485807
$L_{s,máx}$ (m)	0,126707515	0,126707515	0,126707515
β	0,6	0,6	0,6
α_e	6,896551724	6,896551724	6,896551724
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})(\times 10^{-3})$	2,069772625	2,164397308	2,164397308
w_k (mm)	0,262255746	0,274245404	0,274245404
τ_{bk} (MPa)	4,68	4,68	4,68

Anexo 10: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o CEB-FIP, para as vigas 25-70-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @30
c (m)	0,082	0,07	0,07
E_s (GPa)	200	200	200
E_c (GPa)	29	29	29
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	214,016075	214,016075	214,016075
d (m)	0,3555	0,3555	0,3555
z (m)	0,3115	0,3115	0,3115
x (m)	0,132	0,132	0,132
F_t (kN)	687,05	687,05	687,05
F_c (kN)	687,05	687,05	687,05
σ_s (MPa)	350	350	350
σ_c (MPa)	29,74242424	29,74242424	29,74242424
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	1,744997994	1,838689161	1,838689161
$\varepsilon_1 (\times 10^{-3})$	14,58459173	14,58459173	14,58459173
$\varepsilon_2 (\times 10^{-3})$	0,638271078	0,638271078	0,638271078
1/R(m ⁻¹)	7,807597288	7,807597288	7,807597288
2,5*(h-d) (m)	0,23625	0,23625	0,23625
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,053666667	0,0537	0,0537
(h-x)/3 (m)	0,106	0,106	0,106
$A_{c,eff}$ (m ²)	0,0371	0,0371	0,0371
ρ_s	0,052911051	0,052911051	0,052911051
f_{ctm} (MPa)	2,6	2,6	2,6
ε_{sr2}	0,000245695	0,000245695	0,000245695
$\rho_{s,ef} \cdot \sigma_{s2}$	18,51886792	18,51886792	18,51886792
$L_{s,máx}$ (m)	0,131247524	0,131247524	0,131247524
β	0,6	0,6	0,6
α_e	6,896551724	6,896551724	6,896551724
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) (\times 10^{-3})$	1,744850577	1,838541744	1,838541744
w_k (mm)	0,229007317	0,241304051	0,241304051
τ_{bk} (MPa)	4,68	4,68	4,68

CEB-FIP 90

Anexo 11: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o MODEL CODE 2010, para as vigas 25-20-XX.

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @ 30
c (m)	0,032	0,02	0,02
E_s (GPa)	200	200	200
E_c (GPa)	29	29	29
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	291,51	291,51	291,51
d (m)	0,4055	0,4055	0,4055
z (m)	0,3578	0,3578	0,3578
x (m)	0,143	0,143	0,143
F_t (kN)	814,645	814,645	814,645
F_c (kN)	814,645	814,645	814,645
σ_s (MPa)	415	415	415
σ_c (MPa)	32,55	32,55	32,55
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	14,2923	14,3869	14,3869
$\varepsilon_1 (\times 10^{-3})$	14,6432	14,6432	14,6432
$\varepsilon_2 (\times 10^{-3})$	13,7659	13,7659	13,7659
1/R(m ⁻¹)	7,8854	7,8854	7,8854
$h_{c,eff}$ (m)	0,11125	0,11125	0,11125
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,087	0,087	0,087
(h-x)/3 (m)	0,1023	0,1023	0,1023
$A_{c,eff}$ (m ²)	0,035817	0,035817	0,035817
ρ_s	0,054807	0,054807	0,054807
f_{ctm} (MPa)	2,6	2,6	2,6
k	1	1	1
σ_{sr} (MPa)	65,370	65,370	65,370
$L_{s,máx}$ (m)	0,09535	0,08335	0,08335
β	0,6	0,6	0,6
α_e	6,90	6,90	6,90
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) (\times 10^{-6})$	1878,889	1878,889	1878,889
w_k (mm)	0,3583	0,3132	0,3132
τ_{bms}	4,68	4,68	4,68
$\sigma_{sr} \cdot (1-\beta)/E_s$	0,13074	0,13074	0,13074
N_r (kN)	128,322	128,322	128,322
(h-x)/(d-x)	1,16952	1,16952	1,16952
$w_{k,sup}$ (mm)	0,4191	0,3663	0,3663

MC 2010

Anexo 12: Cálculo da abertura de fendas, Segundo o MODEL CODE 2010, para as vigas 25-70-XX

	sem estribos	estribos @ 10	estribos @ 30
c (m)	0,082	0,07	0,07
E_s (GPa)	200	200	200
E_c (GPa)	29	29	29
A_s (m ²)	0,001963	0,001963	0,001963
M (kN.m)	211,50	211,50	211,50
d (m)	0,3555	0,3555	0,3555
z (m)	0,3078	0,3078	0,3078
x (m)	0,143	0,143	0,143
F_t (kN)	687,05	687,05	687,05
F_c (kN)	687,05	687,05	687,05
σ_s (MPa)	350	350	350
σ_c (MPa)	27,45	27,45	27,45
$\varepsilon_s (\times 10^{-3})$	13,3698	13,4608	13,4608
$\varepsilon_1 (\times 10^{-3})$	14,0866	14,0866	14,0866
$\varepsilon_2 (\times 10^{-3})$	12,2945	12,2945	12,2945
$1/R (m^{-1})$	7,5857	7,5857	7,5857
$h_{c,eff}$ (m)	0,23625	0,23625	0,23625
Φ (m)	0,025	0,025	0,025
s (m)	0,057	0,057	0,057
(h-x)/3 (m)	0,1023	0,1023	0,1023
$A_{c,eff}$ (m ²)	0,0358167	0,0358167	0,0358167
ρ_s	0,0548069	0,0548069	0,0548069
f_{ctm} (MPa)	2,6	2,6	2,6
k	1	1	1
σ_{sr} (MPa)	65,370	65,370	65,370
$L_{s,máx}$ (m)	0,145354	0,133354	0,133354
β	0,6	0,6	0,6
α_e	6,90	6,90	6,90
$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) (\times 10^{-6})$	1553,889	1553,889	1553,889
w_k (mm)	0,4517	0,4144	0,4144
τ_{bms}	4,68	4,68	4,68
$\sigma_{sr} \cdot (1-\beta) / E_s$	0,13074	0,13074	0,13074
N_r (kN)	128,322	128,322	128,322
(h-x)/(d-x)	1,44471	1,44471	1,44471
$w_{k,sup}$ (mm)	0,6526	0,5987	0,5987

MC 2010