

COMPORTAMENTO DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO SUBMETIDO A CORTE DIRETO

PEDRO MIGUEL BARBOSA VILA POUCA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Ana Maria Quintela da Silva Proença Corrêa de
Queirós

Coorientador: Professor Carlos Filipe Ferreira de Sousa

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

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

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

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por todo o apoio durante esta etapa e pela educação e valores que sempre recebi.

Aos meus orientadores, Professora Ana Maria Proença e Professor Carlos Sousa, por todo o tempo disponibilizado e por toda a experiência e conhecimento que me transmitiram.

À equipa do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC), pelo fabrico dos provetes para ensaio e pela realização dos ensaios laboratoriais.

Às empresas que disponibilizaram os materiais usados no fabrico dos provetes para ensaio: a N.V. BEKAERT S.A. (fibras metálicas); SECIL S.A. (cimento); SORGILA – Sociedade de argilas S.A. (areias); MC Bauchemie (adjuvante).

À N.V. BEKAERT S.A. pela realização dos ensaios de flexão em prismas.

RESUMO

Este trabalho de investigação pretende contribuir para o conhecimento sobre o BRFA (Betão Reforçado com Fibras de Aço). É um tipo de material com inúmeras potencialidades e ainda com uma utilização reduzida no ramo da Engenharia Civil.

O principal objetivo específico deste trabalho é a avaliação do comportamento de fissuras sujeitas a tensões de corte. Este aspeto é importante, por exemplo, para o estudo detalhado do funcionamento de estruturas de betão sujeitas a esforços transversos. No presente trabalho, o comportamento de elementos de betão sem fibras é comparado com o desempenho do BRFA, utilizando fibras de aço com gancho duplo, feitas com aço de elevada ductilidade e resistência. O estudo incide sobre fissuras que não são atravessadas por armadura.

A transferência de tensões de corte, no betão simples, é assegurada por um mecanismo vulgarmente designado por imbricamento dos agregados. Assim, inicialmente, são analisados modelos numéricos publicados por diversos autores, para descrever a relação entre as tensões (normal e de corte) aplicadas a uma fissura e os movimentos resultantes (deslizamento e abertura da fissura). Estes modelos são designados, de uma forma genérica, por modelos de imbricamento dos agregados (*aggregate interlock* na Língua Inglesa).

No caso do BRFA, o comportamento de fissuras sujeitas a tensões de corte depende fortemente do tipo de fibras usadas, e da composição do material. Não existem modelos gerais, para este tipo de material, para descrever a relação entre as tensões aplicadas a uma fissura e os correspondentes movimentos relativos entre as faces da fissura. Mas sabe-se que as fibras de aço têm um efeito favorável, permitindo uma maior transferência de tensões de corte do que aquela que pode ocorrer em elementos de betão simples.

Neste trabalho, são apresentados os resultados obtidos por diversos autores que estudaram o comportamento de elementos de BRFA em ensaios de corte direto. Estes ensaios são vulgarmente designados por ensaios do tipo *push-off*. Os resultados desses ensaios são comparados com os valores previstos por diversos modelos de imbricamento dos agregados, não deixando de notar que esses modelos não incluem o efeito das fibras.

Depois, são apresentados os resultados de uma campanha experimental em que foram realizados 8 ensaios do tipo *push-off* (4 ensaios em elementos de betão simples e 4 ensaios em elementos de BRFA). Nestes ensaios são medidas as tensões normais e de corte atuantes sobre a fissura, assim como os movimentos correspondentes ao deslizamento e à abertura da fissura. As tensões normais atuantes no plano da fissura resultam da ação de varões de confinamento aplicados exteriormente. Foi possível verificar que o BRFA, utilizando fibras Dramix® 5D da Bekaert, apresenta uma resistência ao corte direto substancialmente superior à que se verifica no betão simples.

PALAVRAS CHAVE: Betão reforçado com fibras de aço; Ensaios tipo *push-off*; Modelos de comportamento

ABSTRACT

This research aims to contribute to the knowledge about SFRC (Steel Fibre Reinforced Concrete). This is a material with great potential but its use is not yet widespread in the Civil Engineering domain.

The main specific objective of this study is the evaluation of the behaviour of cracks subjected to shear stresses. This aspect is important, for example, for the detailed study of concrete structures subject to shear forces. In this study, the behaviour of concrete elements without steel fibres is compared with the performance of SFRC using double-hook steel fibres, made with high ductility and high strength steel. The study focuses on cracks that are not crossed by reinforcing bars.

The transfer of shear stresses in plain concrete is ensured by a mechanism commonly referred to as aggregate interlock. Therefore, initially, numerical models published by various authors are analysed to describe the relationship between the stresses (normal and shear) applied to a crack and the resulting movements (sliding and crack opening). These models are designed in a generic way, by aggregate interlock laws.

In the case of SFRC, the behaviour of cracks subjected to shear stresses depends strongly on the type of fibres used and the composition of the material. There are no general model for this type of material, to describe the relationship between the stresses applied to a crack and the corresponding relative movements between the faces of the crack. But it is known that the steel fibres have a favourable effect, enabling a higher transfer of shear stresses than that which can occur in plain concrete elements.

This work presents the results obtained by various authors who have studied the behaviour of SFRC elements in direct shear tests. These tests are commonly called push-off experiments. The results of these tests are compared with the values predicted by several aggregate interlock models, leaving noted that these models do not include the effect of the fibres.

Then, the results of the experimental campaign carried out in this work are presented. In this campaign, 8 push-off tests were conducted (4 on plain concrete elements and 4 on SFRC elements). In these experiments, the following variables were measured: normal and shear stresses acting on the crack plane, movements corresponding to sliding and opening of the crack. The normal stresses acting on the crack plane result from the action of confinement applied externally. It was possible to verify that the SFRC using Dramix® 5D Bekaert fibres has a direct shear strength substantially greater than that found in plain concrete.

KEYWORDS: reinforced concrete with steel fibres; Push-off tests; Constitutive models

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. TEMA EM ESTUDO	1
1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA	3
1.3. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS	4
 2. MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE CORTE TRANSFERIDA ATRAVÉS DO IMBRICAMENTO DOS AGREGADOS	 5
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2. FIB MODEL CODE 2010	5
2.3. ROUGH CRACK MODEL	6
2.4. CONTACK DENSITY MODEL	6
2.5. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELOS MODELOS CONSIDERADOS	7
2.5.1. FIB MODEL CODE 2010	8
2.5.2. ROUGH CRACK MODEL	8
2.5.3. CONTACK DENSITY MODEL	8
2.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	10
 3. RESULTADO DE ENSAIOS DO TIPO <i>PUSH-OFF</i> EM BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS	 11
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
3.2. RESULTADOS PUBLICADOS POR AHMED ET AL.	11
3.3. RESULTADOS PUBLICADOS POR CUENCA ET AL.	15
3.4. RESULTADOS PUBLICADOS POR GREGORY ET AL.	17
3.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	18

3.5.1 AHMED ET AL.	18
3.5.2 CUENCA ET AL.	19
3.5.3 GREGORY ET AL.	20

4. DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL.....21

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
4.2. ESQUEMA DOS ENSAIOS DO TIPO <i>PUSH-OFF</i> REALIZADOS	21
4.2.1. GEOMETRIA	25
4.2.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO E DEFORMAÇÕES	27
4.2.3. CALIBRAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS INSTALADOS NOS VARÕES DE CONFINAMENTO	29
4.3. MATERIAIS UTILIZADOS	30
4.4. AMASSADURA, MOLDAGEM E CURA	32
4.5. ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO	32
4.6. RESULTADO DOS ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO	34

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS DO TIPO *PUSH-OFF*.....39

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	39
5.2. ENSAIOS DE PROVETES COM BETÃO SEM FIBRAS	40
5.3. ENSAIOS DE PROVETES COM BETÃO COM FIBRAS METÁLICAS	42
5.4. Comparação entre resultados experimentais e modelos de imbricamento dos agregados	44
5.5. Caracterização da fissura nos provetes de betão sem fibras	53

6. CONCLUSÕES.....57

ANEXO I.....61

ANEXO II.....65

ANEXO III.....69

ANEXO IV	75
-----------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Perfis típicos de fibras de aço usadas em betão [1].....	2
Fig. 2 - Características dos aços das fibras Dramix® 3D, 4D e 5D [2]	3
Fig. 3 - Ensaio de arrancamento das fibras Dramix® 3D, 4D e 5D [2].....	3
Fig. 4 - Representação gráfica das tensões tangenciais e normais calculadas pelo MC2010.....	8
Fig. 5 - Representação gráfica das tensões fornecidas pelo modelo do RCM.....	9
Fig. 6 – Representação gráfica das tensões tangenciais fornecidas pelo modelo do CDM.....	9
Fig. 7 – Dimensões dos provetes, em metros. Da esquerda para a direita: Gregory, Ahmed e Cuenca	13
Fig. 8 – Comparação de resultados experimentais [7] sem pré-fissuração com a previsão de modelos de cálculo para o cenário 1.....	13
Fig. 9 – Comparação de resultados experimentais [7] com pré-fissuração com a previsão de modelos de cálculo para o cenário 1.....	14
Fig. 10 - Comparação de resultados experimentais [7] sem pré-fissuração com a previsão de modelos de cálculo para o cenário 2.....	14
Fig. 11 - Comparação de resultados experimentais [7] com pré-fissuração com a previsão de modelos de cálculo para o cenário 2.....	15
Fig. 12 - Comparação de resultados experimentais com pré-fissura grossa [8] com a previsão de modelos de cálculo	16
Fig. 13 - Comparação de resultados experimentais com pré-fissura fina [8] com a previsão de modelos de cálculo	16
Fig. 14 – Comparação de resultados experimentais sem pré-fissura fina [8] com a previsão de modelos de cálculo	17
Fig. 15 – Comparação de resultados experimentais [9] com a previsão de modelos de cálculo.....	18
Fig. 16 – Esquema de ensaio.....	23
Fig. 17 – Posição da atuação da carga sobre a peça.....	24
Fig. 18 – Geometria dos provetes usados nos ensaios do tipo <i>push-off</i> (dimensões em metros)	25
Fig. 19 – Posição das armaduras embebidas	25
Fig. 20 – Cofragem Posição das armaduras embebidas	26
Fig. 21 – Pormenor do entalhe, com profundidade aproximadamente igual a 15 mm.....	26
Fig. 22 – Posição dos LVDT's vista nascente (E).....	27
Fig. 23 – Posição dos LVDT's vista poente (W)	27
Fig. 24 – Chapa metálica pertencente ao sistema de confinamento	28
Fig. 25 – Extensómetro aplicado num varão de 16 mm de diâmetro, para medir a sua deformação longitudinal.....	29

Fig. 26 – Procedimento de carga para calibração dos varões de confinamento	30
Fig. 27 – Fibras utilizadas no betão.....	31
Fig. 28 – Brita 4/8	32
Fig. 29 – Areia 0/2	32
Fig. 30 – Areia 0/4	32
Fig. 31 – Curva tensão/CMOD obtida no ensaio à flexão do betão simples (EN 14651).....	35
Fig. 32 – Curvas tensão/CMOD obtidas no ensaio à flexão do BRFA	38
Fig. 33– Resumo dos resultados dos ensaios do tipo push-off em provetes de betão sem fibras, da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2.....	40
Fig. 34 – Resumo dos resultados dos ensaios do tipo push-off em provetes de betão sem fibras, da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2.....	40
Fig. 35 – Resumo dos resultados dos ensaios do tipo push-off em provetes de BRFA, da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2	43
Fig. 36 – Resumo dos resultados dos ensaios do tipo push-off em provetes de BRFA, da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2	43
Fig. 37 – Relação entre a abertura de fenda, w e o deslizamento, s (valores em mm).....	45
Fig. 38 – Comparação entre os resultados experimentais sem fibras e modelos teóricos, da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2.....	46
Fig. 39 – Comparação entre os resultados experimentais sem fibras e modelos teóricos, da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2.....	46
Fig. 40 – Comparação entre os resultados experimentais com fibras e modelos teóricos, da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2.....	47
Fig. 41 – Comparação entre os resultados experimentais com fibras e modelos teóricos, da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2.....	47
Fig. 42 – Comparação entre os resultados experimentais (excluindo CDM) sem fibras e modelos teóricos, da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2.....	48
Fig. 43 – Comparação entre os resultados experimentais (excluindo CDM) sem fibras e modelos teóricos, da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2.....	48
Fig. 44 – Comparação entre os resultados experimentais (excluindo CDM) com fibras e modelos teóricos, da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2.....	49
Fig. 45 – Comparação entre os resultados experimentais (excluindo CDM) com fibras e modelos teóricos, da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2.....	49
Fig. 46 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento, da esquerda para a direita: Varão ESUP16mm e Varão EINF16mm.....	51
Fig. 47 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento, da esquerda para a direita: Varão WSUP16mm e Varão WINF16mm2	51
Fig. 48 – Comparação entre os resultados experimentais e o MC2010 com ajuste do parâmetro C_f Da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2	52

Fig. 49 – Comparação entre os resultados experimentais e o MC2010 com ajuste do parâmetro C_f : Da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2.....	52
Fig. 50 – Comparação entre os resultados experimentais e o MC2010 com ajuste do parâmetro C_f : Da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2.....	53
Fig. 51 – Comparação entre os resultados experimentais e o MC2010 com ajuste do parâmetro C_f : Da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2.....	54
Fig. 52 – Esquema de medição da rugosidade da superfície de corte	54
Fig. 53 – Caracterização do plano de corte do provete 00C08#1.....	55
Fig. 54 – Caracterização do plano de corte do provete 00C08#2.....	55
Fig. 55 – Caracterização do plano de corte do provete 00C16#1.....	64
Fig. 56 – Caracterização do plano de corte do provete 00C16#2.....	64
Fig. 57 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento. Da esquerda para a direita: Varão ESUP16mm e Varão EINF16mm.....	65
Fig. 58 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento. Da esquerda para a direita: Varão WSUP16mm e Varão WINF16mm	65
Fig. 59 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento. Da esquerda para a direita: Varão ESUP8mm e Varão EINF8mm.....	68
Fig. 60 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento. Da esquerda para a direita: Varão WSUP8mm e Varão WINF8mm	68
Fig. 61 – Evolução da força lida durante o processo de calibração. Da esquerda para a direita: Varão ESUP_16mm e Varão EINF_16mm.....	69
Fig. 62 – Evolução da força lida durante o processo de calibração. Da esquerda para a direita: Varão WSUP_16mm e Varão WINF_16mm	69
Fig. 63 – Evolução da força lida durante o processo de calibração. Da esquerda para a direita: Varão ESUP_8mm e Varão EINF_8mm.....	72
Fig. 64 – Evolução da força lida durante o processo de calibração. Da esquerda para a direita: Varão WSUP_8mm e Varão WINF_8mm	73
Fig. 65 – Evolução da força lida nos varões de confinamento. Da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2	73
Fig. 66 – Evolução da força lida nos varões de confinamento. Da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2	74
Fig. 67 – Evolução da força lida nos varões de confinamento. Da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2	78
Fig. 68 – Evolução da força lida nos varões de confinamento. Da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2	79
Fig. 69 – Leitura dos LVDT's, da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2	79
Fig. 70 – Leitura dos LVDT's, da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2	79
Fig. 71 – Leitura dos LVDT's, da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2	80

Fig. 72 – Leitura dos LVDT's, da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2	80
---	----

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Valores base considerados na aplicação dos modelos teóricos e informações sobre os tipos de fibras empregues por cada autor	12
Quadro 2 – Designação e características dos provetes ensaiados	22
Quadro 3 – Velocidade de ensaio	24
Quadro 4 – Características dos extensómetros aplicados a cada tipo de varão	28
Quadro 5 – Correspondência entre extensómetros e varões de confinamento	29
Quadro 6 – Fatores corretivos para cada varão	30
Quadro 7 – Características das fibras utilizadas	31
Quadro 8 – Ensaio realizados para determinar as características mecânicas do betão com fibras	33
Quadro 9 – Ensaio realizados para determinar as características mecânicas do betão sem fibras	33
Quadro 10 – Resultados dos ensaios para caracterização do betão simples (MPa)	34
Quadro 11 – Resultados do ensaio da absorção de água por imersão em betão simples	35
Quadro 12 – Ensaio de flexão em betão simples (NP EN 12350-5)	35
Quadro 13 – Resultados dos ensaios para a caracterização do BFRA (MPa)	36
Quadro 14 – Resultados dos ensaios para a caracterização do BFRA (MPa) (continuação)	37
Quadro 15 – Resultados do ensaio da absorção de água por imersão em betão com fibras	38
Quadro 16 – Força de compressão inicial aplicada a cada varão de confinamento e tensão atuante de compressão na fissura	41
Quadro 17 – Média das tensões de pico correspondentes à primeira quebra de força em cada grupo de provetes	42
Quadro 18 – Tensão tangencial máxima para cada grupo de provetes	44
Quadro 19 – Força de compressão inicial aplicada a cada varão de confinamento e tensão de compressão atuante na fissura	44
Quadro 20 – Parâmetros utilizados para cálculo de tensões nos modelos estudados	45
Quadro 21 – Valores de C_f corrigidos, para uso na expressão do MC2010	56

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

BRFA – betão reforçado com fibras de aço

RCM – Rough Crack Model

CDM – Contact Density Model

MC 2010 – Model Code 2010

C_F – coeficiente corretivo

s – deslizamento [mm]

s_{med} – deslizamento médio [mm]

w – abertura de fenda [mm]

D_g – dimensão máxima do agregado [mm]

FC – fator corretivo

V_f – volume de fibras [Kg/m³]

LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção

E – módulo de elasticidade [GPa]

f_{ck} – resistência à compressão característica do betão [MPa]

f_c – resistência à compressão média do betão [MPa]

τ – tensão de corte [MPa]

σ – tensão normal [MPa]

1

Introdução

1.1 TEMA EM ESTUDO

Na construção civil, um dos materiais mais utilizados é o betão. Ao longo dos anos, as características dos betões produzidos têm sofrido grandes mutações.

O betão resulta da mistura de agregados, água, cimento, adições e adjuvantes. O surgimento de projetos mais ambiciosos fez com que os produtores de cimentos e adjuvantes desenvolvessem novos produtos capazes de responder às novas necessidades.

O cimento utilizado atualmente pouco se assemelha aos primeiros cimentos produzidos. Hoje existem várias classes de resistência do cimento e diferentes composições.

Têm-se registado grandes evoluções também nos adjuvantes. Existem agora fortes redutores de água que permitem produzir, com relativa facilidade, betões com razão água/cimento muito baixa e tensões de rotura na ordem dos 100 MPa.

Com o incremento acentuado da resistência à compressão do betão, tornou-se ainda mais relevante o problema do controlo da fissuração deste material, pois betões mais resistentes têm em geral um maior módulo de elasticidade. Se analisarmos o efeito da retração (numa laje ou muro) restringida, por exemplo, por fundações rígidas, e compararmos betão de resistência normal com betão de elevada resistência com maior módulo de elasticidade, para o mesmo valor de retração surgirão tensões mais elevadas no betão de elevada resistência. Por outro lado, se a resistência à tração do betão, f_{ct} , for maior, é necessária uma maior quantidade de aço (armaduras ou fibras) para controlar convenientemente a fissuração. Uma das soluções para o controlo da fissuração é a utilização de fibras de aço.

A introdução de fibras, implica uma escolha correta da composição do betão, adaptada ao tipo de fibra selecionada.

Atualmente existem inúmeros tipos de fibras de aço, com comportamentos muito distintos. Na Figura 1 apresentam-se esquematicamente diversos tipos de fibras de aço usadas no fabrico de BRFA.

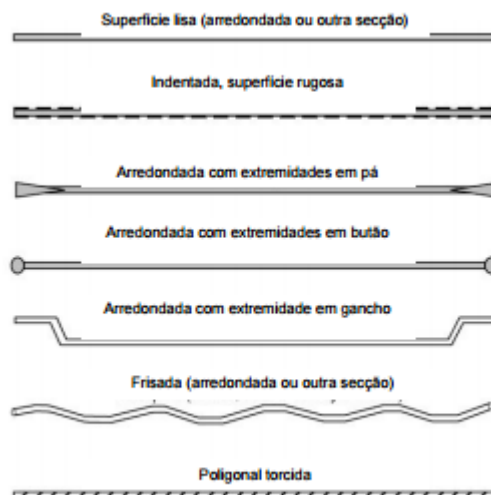


Fig.1 - Perfis típicos de fibras de aço usadas em betão [1]

Acompanhando a evolução das propriedades dos betões empregues na construção, tem-se verificado também uma evolução das fibras de aço para o fabrico de BRFA. Têm surgido novos tipos de fibras, com novas geometrias usando aços com desempenho melhorado. Isto porque a utilização de betões com elevada resistência mecânica requer também o emprego fibras de aço com: maior resistência à tração; maior ductilidade; melhor amarração ao betão. A Bekaert disponibiliza atualmente as fibras de aço tipo Dramix® 4D e Dramix®5D, adequadas para a utilização em betões de elevada resistência. A Figura 2 apresenta o resultado do ensaio de tração do aço usado nas fibras Dramix® 3D, 4D e 5D. Aí, pode ver-se que o aço usado nas novas fibras Dramix® 5D apresenta uma tensão resistente e uma extensão na força máxima muito superiores aos valores atingidos em fibras tradicionais. A Figura 3 apresenta resultados típicos para o ensaio de arrancamento de uma fibra [2].Nessa figura verifica-se que a tensão de arrancamento atingida com fibras do tipo Dramix® 5D é tipicamente cerca de 4 vezes superior à tensão máxima atingida em fibras mais tradicionais (fibras do tipo Dramix® 3D, por exemplo). Na mesma figura é visível a geometria do gancho em diferentes tipos de fibras, desde o gancho mais tradicional até ao gancho duplo das fibras Dramix® 5D, que confere a estas fibras uma melhor ancoragem ao betão. Este melhoramento do desempenho da ancoragem das fibras Dramix® 5D é importante para que possa ser atingida a cedência do aço, e possa ser aproveitada a grande ductilidade do material usado nestas fibras. Naturalmente, o desempenho da ancoragem depende não apenas das propriedades (geométricas e materiais) da fibra, mas também do desempenho do betão. Sendo as fibras Dramix® 5D destinadas a betões de elevada resistência, há então coerência entre o tipo de fibra e o tipo de betão.

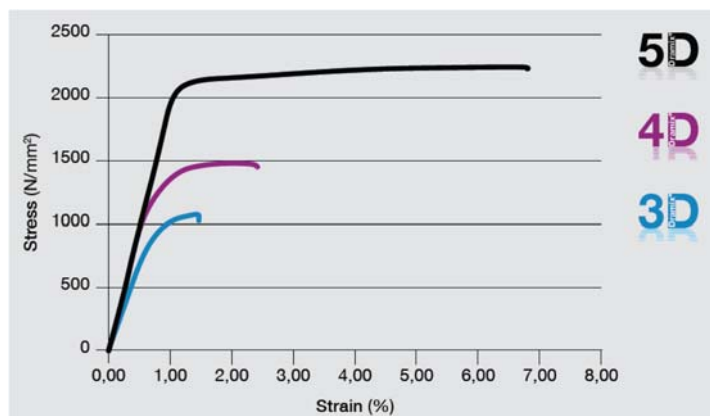


Fig.2 – Características dos aços das fibras Dramix® 3D, 4D e 5D [2]

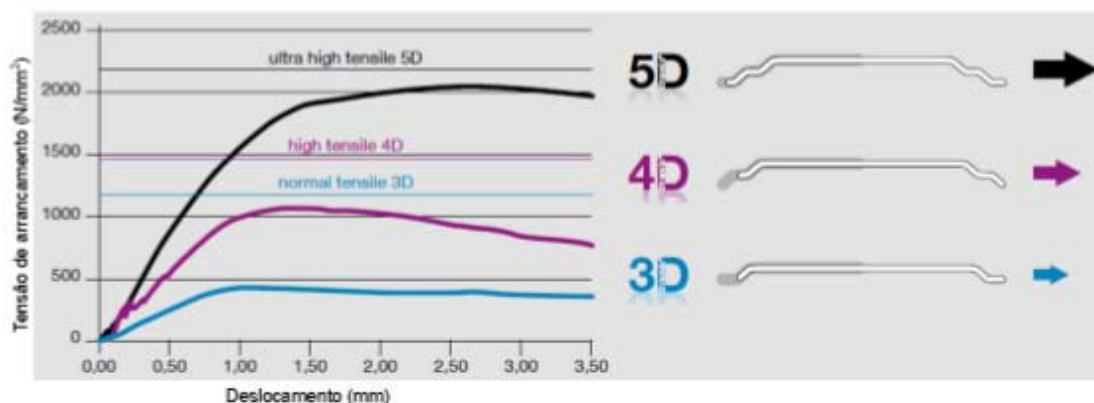


Fig. 3 - Ensaios de arrancamento das fibras Dramix® 3D, 4D e 5D [2]

1.2 OBJETIVOS E ESTRATÉGIA

Esta dissertação tem como objetivo avaliar o comportamento do BRFA submetido ao corte direto. Em particular, avalia-se o desempenho, em ensaios de corte direto, de elementos fissurados, em BRFA, fabricados com fibras do tipo Dramix® 5D.

O BRFA estudado nesta dissertação foi fabricado com uma dosagem de fibras de 50 kg/m^3 . Foram levados a cabo, no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), ensaios do tipo *push-off*, usando provetes com geometria do tipo *z-shapped*. Foram testados 4 provetes em BRFA e 4 provetes feitos com betão sem fibras. Foram considerados diferentes níveis de confinamento. O confinamento é materializado por varões de aço, exteriores à peça de betão, que induzem uma tensão de compressão na fissura em estudo nos ensaios do tipo *push-off*. Os ensaios realizados permitem obter a relação entre as tensões atuantes sobre uma fissura (tensão tangencial e tensão normal de compressão) e os movimentos relativos que ocorrem nessa fissura (deslizamento e abertura da fissura). Note-se que, nos ensaios do

tipo *push-off* realizados, não há qualquer armadura embebida a atravessar a fissura em estudo. Neste trabalho compara-se então o desempenho do betão sem fibras e do BRFA em estudo, no que diz respeito à relação entre tensões atuantes e movimentos relativos na fissura. O desempenho medido é comparado também com os valores previstos por modelos de imbricamento dos agregados. Para isso, consideram-se três modelos disponíveis na bibliografia:

- RCM – Rough Crack Model
- CDM – Contact Density Model
- MC2010 – fib Model Code 2010

O conhecimento da relação entre as tensões atuantes numa fissura e os movimentos relativos que aí ocorrem é uma ferramenta importante para uma análise detalhada do desempenho estrutural de elementos fissurados.

1.3 ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS

O trabalho está dividido em três partes. A primeira é referente ao capítulo 1, a segunda parte remete para os Capítulos 2 e 3 e a última parte é constituída pelos Capítulos 4, 5 e 6.

No capítulo 1 é feita uma breve introdução do trabalho, é explicado sumariamente o seu enquadramento e são apresentados os seus objetivos principais.

No segundo Capítulo são apresentados modelos de imbricamento dos agregados, para betão sem fibras. Estes modelos estimam o valor das tensões normais e tangenciais atuantes numa fissura em função das propriedades do betão e dos valores do deslizamento e da abertura da fissura. Não são apresentados modelos do mesmo tipo específico para elementos de BRFA porque se desconhece a existência de tais modelos que tenham sido desenvolvidos especificamente para este material.

De seguida, no Capítulo 3, apresentam-se trabalhos efetuados por diversos autores, presentes na bibliografia, que estudaram o comportamento do BRFA em ensaios do tipo *push-off*. São apresentados resultados de ensaios de peças com diferentes tipos de fibras de aço, e diferentes dosagens. É realizada uma análise exploratória, confrontando os resultados de tais ensaios com os valores previstos pelos modelos de imbricamento dos agregados.

No Capítulo 4 são descritos os ensaios realizados no âmbito do presente trabalho, para avaliação da transferência do esforço de corte em BRFA, com fibras Dramix® 5D, e confrontação com o desempenho do betão sem fibras. Neste capítulo apresentam-se também os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades dos betões utilizados.

No quinto Capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados dos 8 ensaios do tipo *push-off*. Os resultados medidos em cada provete podem resumir-se num único gráfico que apresenta, em função do deslizamento, a evolução das seguintes grandezas: tensão de corte atuante na fissura; tensão normal atuante na fissura e abertura da fissura. De seguida, realizam-se análises exploratórias comparando os resultados experimentais com os modelos de imbricamento dos agregados apresentados no Capítulo 2.

No sexto e último Capítulo são apresentadas as principais conclusões retiradas do estudo feito ao longo da presente dissertação.

2

Modelos para determinação da tensão de corte transferida através do imbricamento dos agregados

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo apresentam-se modelos de imbricamento dos agregados, para betão sem fibras, que fornecem uma estimativa para os valores da tensão tangencial, τ , e da tensão normal, σ , em função do deslizamento, s , e da abertura de fenda, w . Os valores fornecidos por cada um desses modelos são ilustrados graficamente.

2.2 FIB MODEL CODE 2010

O fib ModelCode 2010 (MC2010) [3] apresenta um modelo que é uma adaptação do *linear aggregate interlock model* de Walraven. Este modelo relaciona as variáveis σ , τ , s e w com base na interação entre os agregados e a matriz cimentícia. A quantidade e a distribuição das partículas com diâmetro aleatório, que atravessa uma fenda, são tratadas de forma estatística. A análise é feita por unidade de área do plano de corte e as relações de deslizamento e tensão são obtidas através do integral da contribuição de todas as partículas. O Model Code aplica um factor correctivo às expressões propostas por Walraven, C_f , que tem em conta a possibilidade de fratura dos agregados. Para betões com resistência à compressão, f_c , elevada, C_f toma o valor de 0,35. Para betões que não suportam tensões muito altas (betões em que as partículas de agregado não fraturam quando o betão fissura) usa-se 1. Este modelo é definido pelas Equações 1 e 2:

$$\sigma = C_f \left\{ -0,06 \times f_c + \left[1,35 \times w^{-0,63} + (0,242 \times w^{-0,55} - 0,19) f_c \right] s \right\} \quad (1)$$

$$\tau = C_f \left\{ -0,04 \times f_c + \left[1,8 \times w^{-0,8} + (0,292 \times w^{-0,7} - 0,25) f_c \right] s \right\} \quad (2)$$

onde:

- C_f é um coeficiente corretivo
- f_c é a resistência à compressão do betão

2.3 ROUGH CRACK MODEL

O Rough Crack Model (RCM) [4] relaciona as tensões na fenda com os correspondentes movimentos relativos s e w , tendo em conta a dimensão máxima do agregado, d_g , que influencia a transferência de tensões na fenda. As expressões que traduzem o modelo são as apresentadas nas Equações 3 a 8.

$$\sigma = -0,62 \times \sqrt{w} \times \frac{r}{(1+r^2)^{0,25}} \times \tau \quad (3)$$

$$\tau = \tau_0 \times \left(1 - \sqrt{\frac{2w}{d_g}}\right) \times r \times \frac{a_3 + a_4 \times |r|^3}{1 + a_4 \times r^4} \quad (4)$$

onde:

$$r = \frac{s}{w} \quad (5)$$

$$\tau_0 = 0,25 \times f_c \quad (6)$$

$$a_3 = \frac{2,45}{\tau_0} \quad (7)$$

$$a_4 = 2,44 \times \left(1 - \frac{4}{\tau_0}\right) \quad (8)$$

2.4 CONTACT DENSITY MODEL

O modelo Contact Density Model (CDM) [5] baseia-se em duas propostas e três premissas que são as seguintes:

- Na fissura existe um determinado número de áreas (unidades de contacto) com várias inclinações, que variam de $-\pi/2$ até $\pi/2$ e são descritas como uma função $\Omega(\theta)$;
- É proposto que a direção de cada tensão de contacto é fixa e normal à direção de contacto inicial θ ;
- A função de densidade $\Omega(\theta)$ é uma função trigonométrica, independente da dimensão e granulometria do agregado, da tensão atuante e do tipo de agregado grosso;
- As forças de contacto são calculadas com um simples modelo elasto-plástico para previsão da tensão de contacto σ_{con} ;
- O rácio efetivo da área de contacto $K(\Delta_{un})$ expressa a perda de contacto quando o deslizamento normal de uma fenda, Δ_{un} , é suficientemente grande quando comparado com a rugosidade da superfície da fenda.

Estas relações são traduzidas pelas equações 9 a 15. O termo d_g significa a dimensão máxima do agregado. Este último parâmetro influencia o desenvolvimento de tensões tangenciais. Quanto maior for d_g maior será também o valor das tensões tangenciais, na medida em que é criada uma rugosidade superior no plano da fissura.

$$\tau = g \times \left[\frac{s \sin \beta^3 + w \cos \beta^3}{3} - \frac{sw}{3\sqrt{s^2 + w^2}} + 0,5w_{lim} \times \cos \beta^2 \right] \quad (9)$$

$$\sigma = g \times \left[\frac{-s \cos \beta^3 + w \sin \beta^3}{3} - w \sin \beta + \frac{s^2 + 2w^2}{3\sqrt{s^2 + w^2}} + w_{lim} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} - \frac{\sin 2\beta}{4} \right) \right] \quad (10)$$

com:

$$K(w) = 1 - \exp \left(1 - \frac{0,5d_g}{w} \right) \geq 0 \quad (11)$$

$$g = 0,5 \times A \times R \times K(w) \quad (12)$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{w_{lim} \times \delta + w \sqrt{w^2 + \delta^2 - w_{lim}^2}}{w^2 + \delta^2} \right) \quad (13)$$

$$R_m = A \times R = 436 \times f_c^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

$$w_{lim} = 0,04 \quad (15)$$

2.5 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELOS MODELOS CONSIDERADOS

Para comparar os valores fornecidos pelos diversos modelos de imbricamento dos agregados, apresentam-se gráficos, onde se traça a evolução das tensões tangencial e normal, em função do deslizamento. É apresentada uma linha para cada valor de abertura de fendas. Essa linha representa portanto a evolução das tensões num cenário em que se considera que a abertura de fendas permanece constante. Este processo é repetido para diferentes valores da abertura de fendas, a variar entre 0,1mm e 1mm. Considera-se, nesta representação gráfica, uma resistência à compressão igual a 80MPa (valor com a mesma ordem de grandeza da resistência do betão a usar na campanha experimental realizada nesta dissertação). O eixo horizontal dos gráficos representa o valor do deslizamento em milímetros. Para o deslizamento máximo considera-se 3,5 mm de forma a, novamente, atribuir valores semelhantes aos da campanha experimental realizada nesta dissertação.

2.5.1 – fib Model Code 2010

A Figura 4 apresenta os resultados fornecidos pelo modelo do MC2010. Considera-se, para o parâmetro C_f , um valor de 0,35, por se tratar de um betão de elevada resistência.

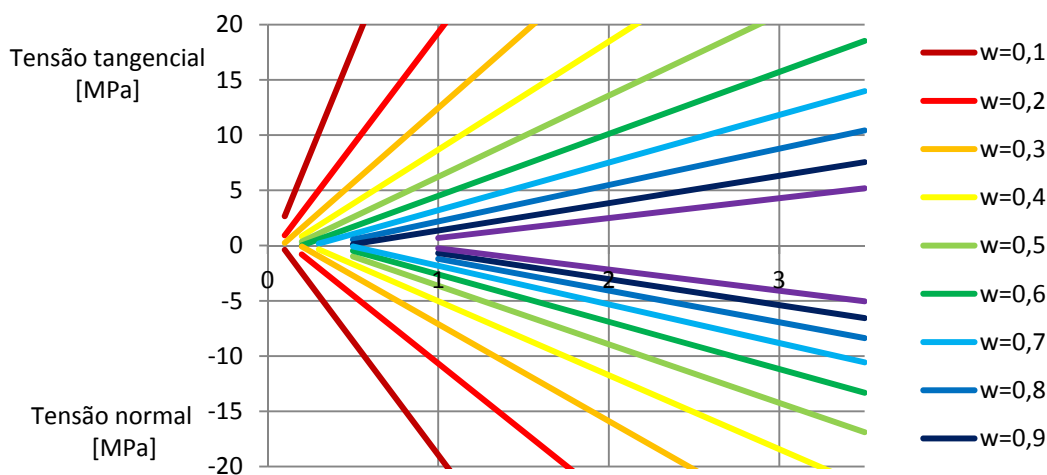


Fig. 4 – Representação gráfica das tensões tangenciais e normais calculadas pelo MC2010.

2.5.2 – Rough Crack Model

A Figura 5 apresenta os valores previstos pelo modelo RCM. Considera-se uma dimensão máxima do agregado, d_g , de 8mm visto que no presente trabalho serão usados agregados com uma dimensão máxima próxima desse valor.

2.5.3 – Contact Density Model

A Figura 6 apresenta os valores das tensões previstas pelo modelo CDM. Este modelo foi originalmente desenvolvido para ser aplicado em elementos de betão de resistência normal. Por isso, não tem em conta o efeito da fratura dos agregados, que faz com que a superfície de fratura se torne mais lisa nos elementos em betão de elevada resistência. Assim, limitou-se a resistência à compressão do betão a 40MPa, na determinação das tensões tangencial e de corte previstas pelo modelo CDM. Este procedimento simplista foi já adotado por outros autores [6].

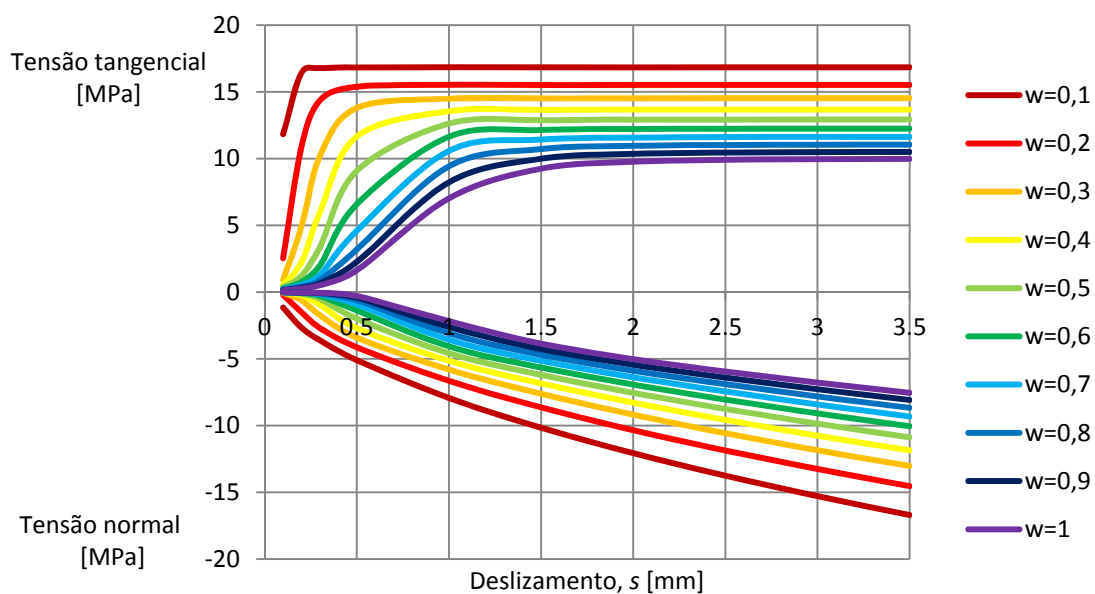


Fig. 5 – Representação gráfica das tensões fornecidas pelo modelo do RCM.

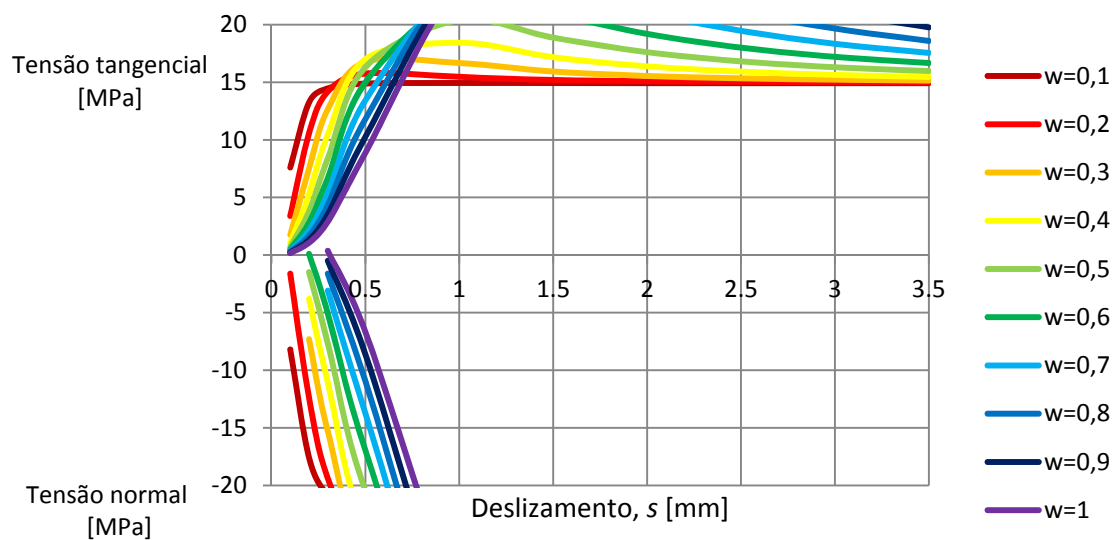


Fig. 6 – Representação gráfica das tensões tangenciais fornecidas pelo modelo do CDM.

2.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentaram-se gráficos que mostram os valores da tensão tangencial e da tensão normal previstas por três modelos, em função do deslizamento e da abertura da fenda. Verificam-se importantes diferenças entre os três modelos:

- O modelo do MC2010 prevê uma relação linear entre a tensão tangencial e o deslizamento. O mesmo acontece para a variação da tensão normal. Pelo contrário, nos outros dois modelos (RCM e CDM) essa relação é não-linear;
- Para valores de abertura de fenda na ordem dos 0,1 a 0,3 mm e para valores de deslizamento superiores o modelo MC2010 prevê valores de tensão tangencial significativamente maiores que os restantes métodos, no entanto, para aberturas de fenda maiores, este cenário inverte-se e verifica-se que os modelos RCM e CDM estimam valores de tensão tangencial superiores ao MC2010 para o mesmo valor de deslizamento;
- Em relação às tensões normais, o modelo CDM estima valores muito superiores em relação aos outros métodos. No entanto, os modelos RCM e MC2010 estimam valores parecidos para valores de abertura de fenda próximas de 1mm, mas para valores próximos de 0,1mm o modelo MC2010 estima tensões normais mais elevadas do que o RCM.

3

Resultado de ensaios do tipo *push-off* em betão reforçado com fibras

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo apresentam-se resultados disponíveis na bibliografia, relativos a ensaios do tipo *push-off* em elementos de BRFA. São escassos os trabalhos publicados sobre este assunto. Mostram-se aqui trabalhos onde são apresentados dados que permitam saber o valor das tensões exercidas sobre o plano da fissura (tangencial e normal) assim como os movimentos relativos que ocorrem nessa fissura (deslizamento e abertura). Foram considerados apenas os resultados de ensaios em que não há armaduras embebidas atravessando a fissura em estudo pois, nesses casos, para além do efeito de imbricamento dos agregados, as armaduras embebidas desempenham um papel importante na resistência aos esforços de corte (e esse papel não é abordado na presente dissertação).

Sabe-se que os modelos de imbricamento dos agregados não são aplicáveis para estimar a relação entre as tensões e os movimentos relativos na fissura em elementos de BRFA. No entanto, neste capítulo, apresentam-se análises exploratórias onde se comparam os resultados experimentais com as previsões fornecidas pelos três modelos descritos no capítulo 2. Com estas análises pretende-se avaliar, explorativamente, o desempenho do BRFA testado por esses autores comparativamente ao comportamento previsto por esses modelos para o betão sem fibras.

3.2 RESULTADOS PUBLICADOS POR AHMED ET AL.

Ahmed et al [7] estudaram a transferência do esforço de corte através de ensaios do tipo *push-off*. Para tal, os autores testaram vinte e sete provetes com betão de elevada resistência com e sem reforço de fibras de aço. Alguns provetes tinham também incorporados varões de aço embebidos, atravessando a fissura em estudo. Esses provetes não foram considerados neste trabalho, conforme foi referido na secção 3.1. Estudou-se unicamente as amostras fabricadas com BRFA, que são identificadas, no trabalho publicado por Ahmed et al., como uc4-1, uc3-1, uc2-1, cr3-1 e cr4-1. Foram realizados testes em que foi induzida previamente a fissuração no plano em estudo, e outros em que não existiu essa fase de pré-fissuração. De notar que não foi utilizado qualquer tipo de confinamento exterior. Os resultados experimentais apresentam-se nas Figuras 8 a 11. Nas legendas das figuras é indicado o

volume de fibras usado em cada provete. As fibras utilizadas são retas (sem gancho) com 25,4 mm de comprimento. A secção transversal é circular com diâmetro igual a 0,4mm.

Nas mesmas figuras apresentam-se também os valores fornecidos pelos três modelos considerados para a variação da tensão tangencial em função do deslizamento. Nos cálculos de acordo com esses modelos, considerou-se $f_c=62,62$ MPa, que é o valor médio da resistência à compressão nos provetes seleccionados. Considerou-se $d_g=9,5$ mm. O valor para C_f utilizado na análise segundo o MC2010 foi de 0,35. Como não existe nenhuma informação acerca da relação entre a abertura de fenda e do deslizamento, foram criados dois cenários: o primeiro em que se considera a relação máxima obtida no trabalho de Cuenca et al.; o segundo onde se considera o valor obtido por Gregory et al. As Figuras 8 e 9 mostram a comparação dos resultados experimentais com os cálculos relativos ao cenário 1 e as Figuras 10 e 11 são relativas ao cenário 2. O Quadro 1 apresenta um resumo das características principais necessárias para a utilização dos modelos teóricos. A Figura 7 mostra a geometria dos provetes utilizados por cada autor, à escala.

Quadro 1 – Valores base considerados na aplicação dos modelos teóricos e informações sobre os tipos de fibras empregues por cada autor.

	Ahmed		Cuenca			Gregory
	Com e sem pré-fissura		Pré-fissura fina	Pré-fissura grossa	Sem pré-fissura	Sem pré-fissura
f_{cm} (MPa)	62,6		65			31
d_g (mm)	9,5		12			12
Relação $s-w$	$s=7w$	$s=0,5w$	$s=7w$	$s=2,25w$	$s=4w$	$s=0,5w$
C_f (MC 2010)	0,35		0,35			1
Tipo de fibra	fibra reta; $l=25,5$ mm; diâmetro=0,4mm		fibra com gancho; $l=25,4$ mm; diâmetro=0,55mm			aço de baixo teor de carbono; $l=35$ mm; diâmetro=0,35mm

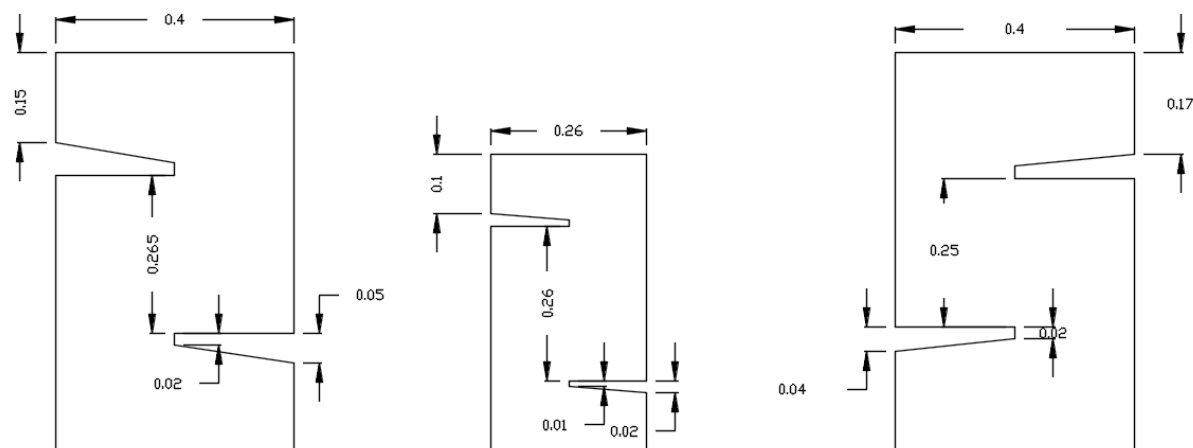


Fig. 7 – Dimensões dos provetes, em metros. Da esquerda para a direita: Gregory, Ahmed e Cuenca

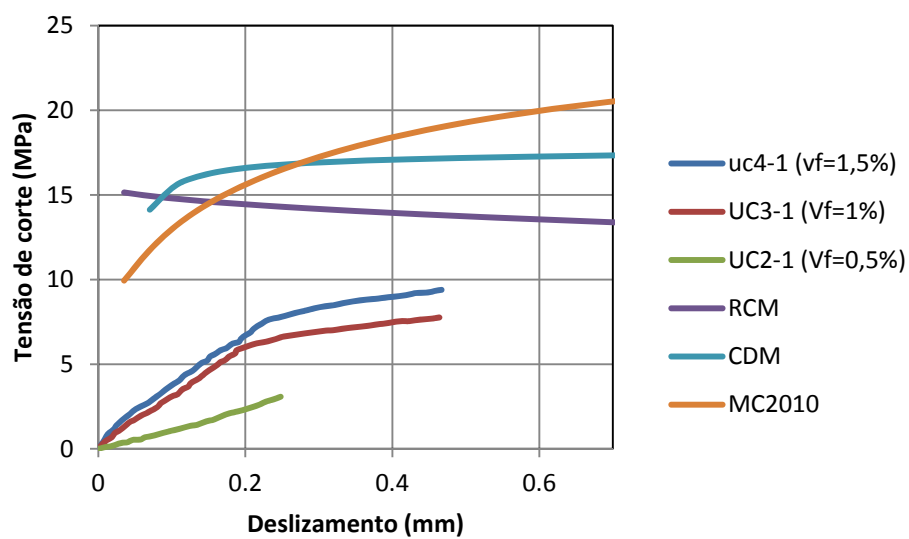


Fig. 8 – Comparação de resultados experimentais [7] sem pré-fissuração com a previsão de modelos teóricos para o cenário 1

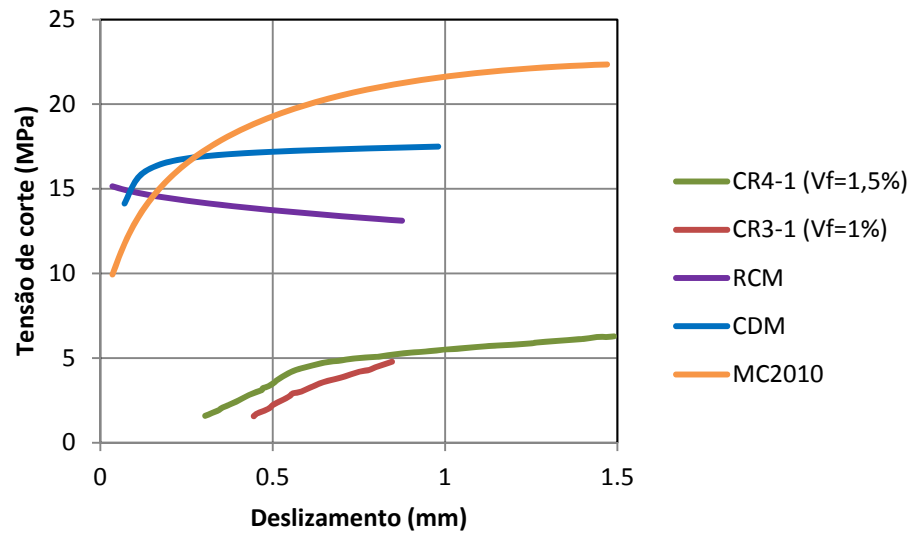


Fig.9 – Comparação de resultados experimentais [7] com pré-fissuração com a previsão de modelos teóricos para o cenário 1

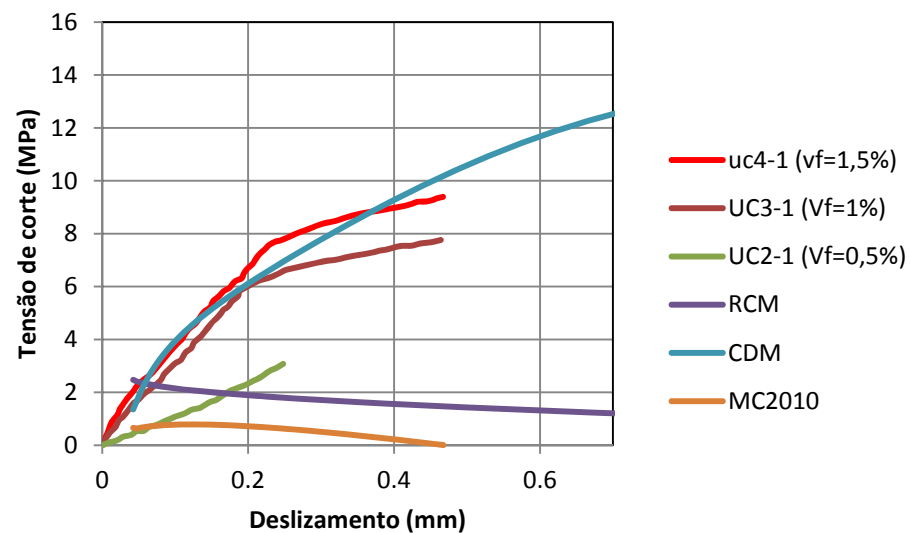


Fig.10 – Comparação de resultados experimentais [7] sem pré-fissuração com a previsão de modelos teóricos para o cenário 2

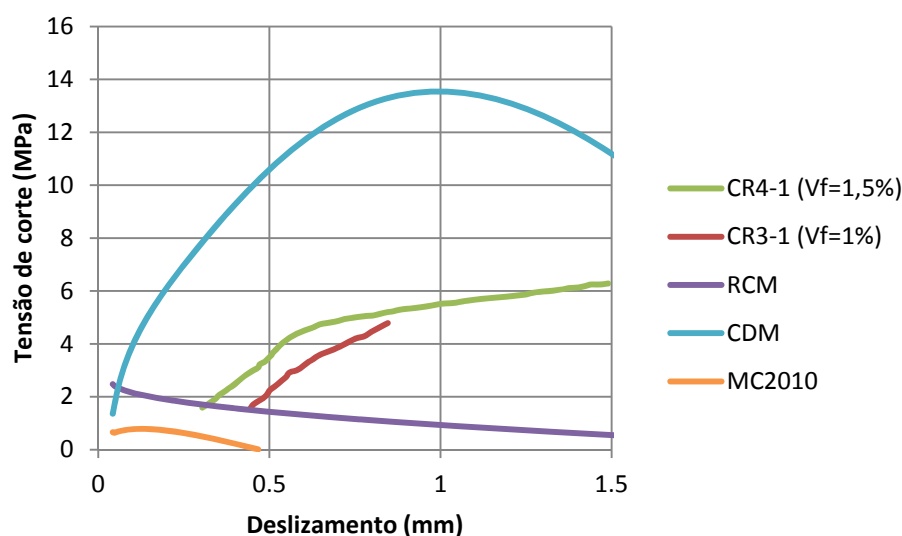


Fig.11 – Comparação de resultados experimentais [7] com pré-fissuração com a previsão de modelos de cálculo para o cenário 2

3.3 RESULTADOS PUBLICADOS POR CUENCA ET AL.

Considerou-se também o trabalho realizado por Cuenca et al. [8] Esta autora fez estudos do tipo *push-off* com provetes do tipo *z-shaped*. Utilizou betão auto-compactável e betão auto-compactável reforçado com fibras. As fibras utilizadas são da Bekaert, com gancho, com comprimento de 35mm e diâmetro de 0,55mm, a que corresponde uma esbelteza (L/D) de aproximadamente 65. A dosagem de fibras foi de 40 kg/m³ e de 60 kg/m³, no entanto apenas foram considerados aqui os provetes com dosagem de 60 kg/m³, pois não apresentavam armaduras a atravessar a fissura. Esta escolha é motivada pelo facto de na presente dissertação não serem utilizadas armaduras e atravessar a fissura já que estas são responsáveis pelo desenvolvimento de outros mecanismos de resistência ao corte (efeito de cavilha e efeito de grampo). Esses efeitos não estão a ser estudados neste trabalho. Cuenca et al. distinguiram três tipos de pré-fissura, isto é, sem pré-fissura, pré-fissura fina e pré-fissura grossa. O betão utilizado apresenta $f_{cm}=65$ MPa. Também neste trabalho não foram usadas barras para confinamento exterior dos provetes.

Os resultados experimentais e fornecidos pelos modelos de cálculo são apresentados nas Figuras 12 a 14. Os parâmetros considerados na quantificação dos valores previstos pelos modelos são indicados no Quadro 3. As relações registadas entre a abertura de fenda e o deslizamento são dadas no trabalho de Cuenca et al. em função do tipo de pré-fissura.

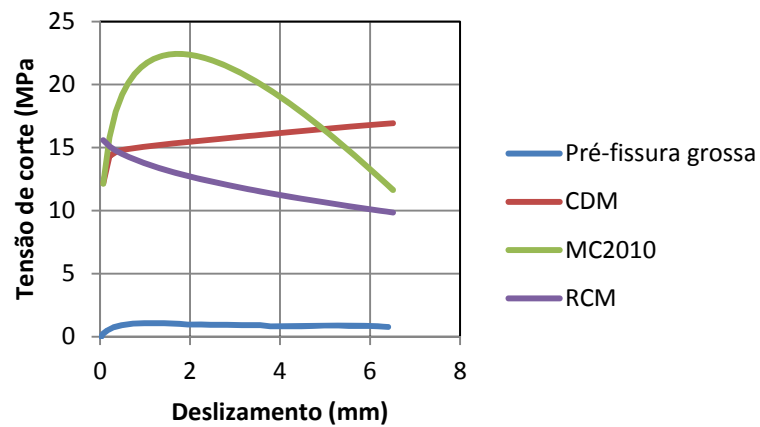


Fig.12 - Comparação de resultados experimentais com pré-fissura grossa [8] com a previsão de modelos teóricos.

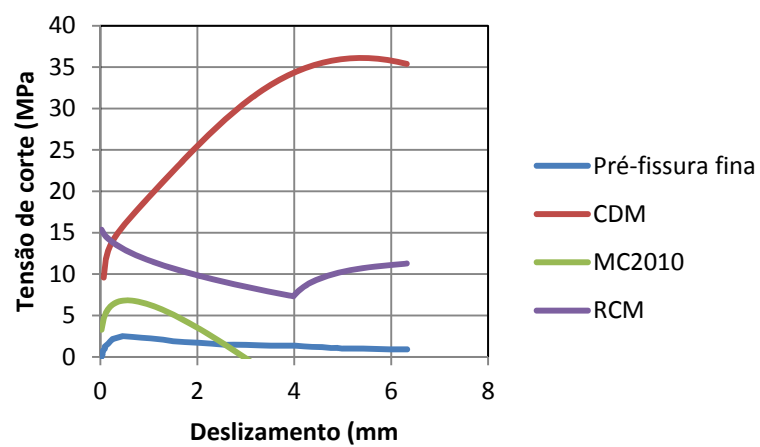


Fig.13 - Comparação de resultados experimentais com pré-fissura fina [8] com a previsão de modelos teóricos.

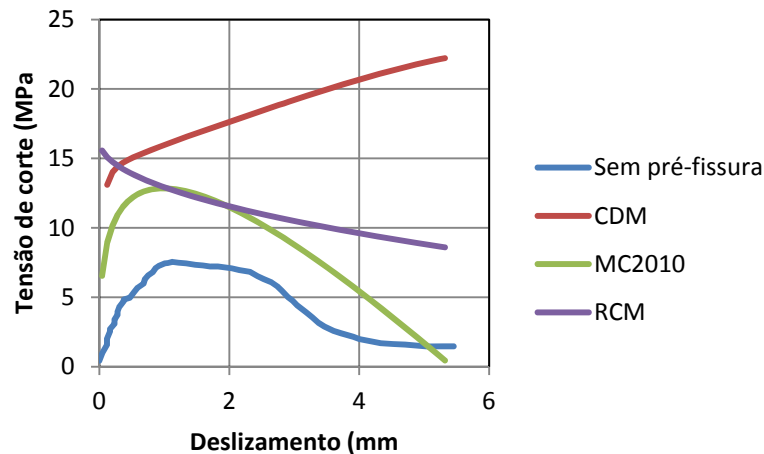


Fig.14 - Comparação de resultados experimentais sem pré-fissura fina [8] com a previsão de modelos teóricos.

3.4 RESULTADOS PUBLICADOS POR GREGORY ET AL.

Foi analisado também o trabalho publicado por Gregory et al. [9]. Estes autores estudaram o papel da introdução das fibras no betão no que toca à sua contribuição para a resistência ao esforço de corte, recorrendo a ensaios de *push-off* com provetes na forma de *z-shaped*. Seleccionaram-se alguns dos provetes usados no trabalho de Gregory et al., nomeadamente *amix 5* em que o provete não apresenta armadura a atravessar o plano da fissura nem pré-fissura e é apenas reforçado com fibras de aço com dosagem de 50 kg/m^3 . Esta seleção é motivada pelas razões descritas no Cap. 3.1. A medição das deformações foi feita com recurso à fotogrametria, com uma boa precisão, segundo o autor. A dimensão máxima do agregado neste caso é de 12mm, o valor de f_{cm} é 30,98 MPa, as fibras são em aço com baixo teor de carbono, com 35 mm de comprimento e 0,35 mm de diâmetro. O parâmetro C_f para o modelo MC2010 foi de 1, pois não se trata de um betão de elevada resistência. Não foi utilizado qualquer tipo de confinamento exterior e a abertura de fenda vale aproximadamente duas vezes o deslizamento segundo os resultados dos ensaios, tendo-se usado essa relação nas previsões de acordo com os modelos teóricos. Os resultados da análise são apresentados na Figura 15.

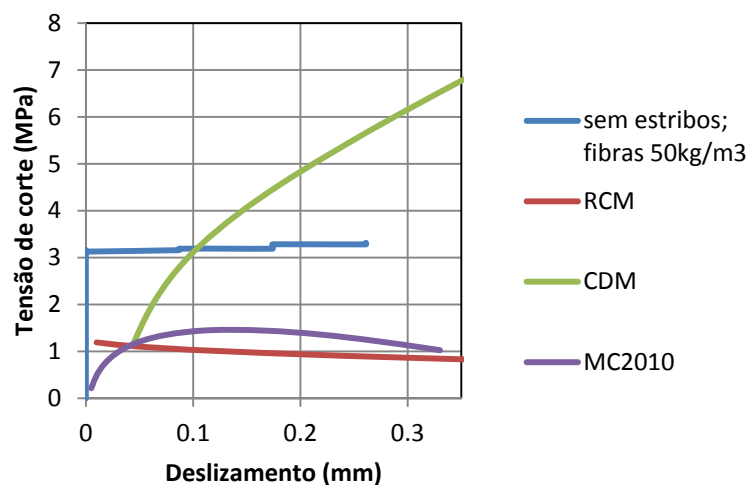


Fig. 15 - Comparação de resultados experimentais [9] com a previsão de modelos de cálculo

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados deve ter em conta as características que cada autor utilizou no desenvolvimento dos seus trabalhos, nomeadamente a influência da dosagem e do tipo de fibra, da existência de entalhe (pré-fissura) nos provetes e do tipo de betão.

É importante relacionar as relações que existem, em cada trabalho, entre o deslizamento e a abertura de fenda, pois esses dois parâmetros são muito influentes na previsão de tensões a partir dos modelos presentes nesta dissertação.

Assim, em cada um dos trabalhos avalia-se os resultados obtidos por cada autor para os provetes que cada um ensaiou, tendo em conta as variantes existentes como, por exemplo, a dosagem de fibras e a pré-fissura. Avaliam-se, por último, os modelos que melhor estimaram as tensões para cada trabalho.

3.5.1. Ahmed et al.

Ao analisar o trabalho de Ahmed et al. fica evidente que o aumento da dosagem de fibras no betão faz aumentar a capacidade deste em resistir a tensões de corte mais elevadas. Assim, naturalmente, os provetes UC4-1 e CR4-1 são aqueles que exibem resistência ao corte maior.

A presença de pré-fissura nos provetes é algo, também, bastante relevante, pois esta faz com que seja criada uma zona de fragilidade no betão e, conseqüentemente, as fendas surjam pelo plano de corte definido. Com a introdução desta pré-fissura é notório, por comparação dos provetes com a designação

UC e CR, que os provetes que não têm pré-fissura têm uma resistência a tensões tangenciais maior do que os que têm pré-fissura.

É também notório que, sobretudo nos provetes com pré-fissura, uma dose maior de fibras faz com que o betão consiga suportar um valor de tensão aproximadamente constante face a um valor de deslizamento crescente, o que não acontece para dosagens de fibras mais baixas, onde após se atingir o valor máximo da tensão de corte o ensaio termina (inexistência de confinamento).

Nos provetes sem pré-fissura, a rotura acontece com o aparecimento de algumas pequenas fendas diagonais, isto é, que fazem um ângulo com a horizontal entre 70 a 80 graus. A rotura dá-se quando algumas dessas fendas se juntam, formando uma banda de fissura que define o plano de rotura.

No que respeita aos modelos de previsão de tensões, verifica-se que estes estão adaptados de forma melhor para relações de abertura de fenda e deslizamento próximas. Isto é, no cenário 1 esta relação é muito superior à que se verifica no cenário 2 e analisando as figuras que ilustram a comparação dos métodos com os resultados experimentais nota-se que o cenário 2 é mais adequado do que o cenário 1 dada a proximidade dos valores teóricos aos experimentais. O método CDM é aquele que, no cenário 2, apresenta uma estimativa muito próxima do que aconteceu na experiência com provetes não fissurados.

3.5.2. Cuenca et al.

O trabalho de Cuenca et al. permite perceber qual a influência da largura da pré-fissura no estudo de tensões em ensaios do tipo *push-off*. Os resultados demonstram que quanto maior for a espessura da pré-fissura, menores são as tensões tangenciais às quais os provetes resistem. Logicamente, o provete sem pré-fissura foi aquele que desenvolveu maiores tensões tangenciais atingindo um valor máximo e depois suportando tensões decrescentes à medida que o deslizamento aumentava. Os ensaios realizados apresentavam uma dosagem de fibras de 60 Kg/m³ e reparou-se que as fibras podem não conseguir transferir esforços de uma parte da peça para outra, mesmo para tensões baixas, caso existam fendas muito desenvolvidas.

Em relação aos modelos de previsão de tensão é necessário ter em conta que estes foram calculados de forma diferente para cada tipo de pré-fissura, pois as relações entre abertura de fenda e deslizamento variaram em cada um dos tipos de pré-fissura. Analisando primeiro o resultado da experiência no provete com pré-fissura grossa, repara-se que todos os modelos prevêem tensões muito superiores às que na realidade se desenvolveram. No ensaio com a pré-fissura fina, o método MC2010 exibiu valores de tensão tangencial negativos, o que não faz sentido para o caso em estudo, devendo esses valores ser ignorados. Por último, o provete sem pré-fissura foi aquele em que o método MC2010 melhor se comportou. Existiu uma correspondência bastante boa no que toca à forma como as tensões se desenvolvem, isto é, o MC2010 previu que as tensões seriam crescentes até um valor de deslizamento igual a, aproximadamente, 1 mm, e que a partir daí as tensões decresciam suavemente à medida que o deslizamento aumentava.

3.5.3. Gregory et al.

Este trabalho difere dos anteriores na medida em que o valor da abertura de fenda é cerca de duas vezes maior do que o deslizamento, facto que nunca se verificou nos outros trabalhos (o valor do deslizamento era sempre maior do que a abertura de fenda). Com isto, os resultados de Gregory et al. apresentam valores de deslizamento pequenos e, consequentemente, os métodos não acompanharam o desenvolvimento das tensões da melhor forma. Existe, inicialmente um aumento de tensão forte, sem que haja praticamente deslizamento e estes métodos funcionam melhor para relações onde as tensões se desenvolvam com um aumento de deslizamento maior do que abertura de fenda.

O betão utilizado não era de elevada resistência, mas a inclusão das fibras permitiu que após ser atingido o valor máximo de tensão, continuassem a ser transferidas tensões para aberturas de fenda e deslizamento crescentes.

4

Descrição da campanha experimental

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com vista a estudar a transferência do esforço de corte em BRFA, utilizando fibras Dramix® 5D, foram realizados ensaios do tipo *push-off*. Foram testados 4 provetes em BRFA, com uma dosagem de fibras de 50Kg/m^3 , e 4 provetes feitos com betão sem fibras. Para cada tipo de betão, foram considerados dois tipos de confinamento: com varões de 8 mm de diâmetro ou com varões de 16 mm de diâmetro. Esta armadura de confinamento é responsável pelo desenvolvimento de tensões de compressão na fissura em estudo pois, quando se dá a abertura da fissura, esta armadura exterior fica tracionada. A soma da força de tração instalada em todos os varões de confinamento é igual à força de compressão aplicada na fissura em estudo. A força é medida através de extensómetros eléctricos de resistência, sendo instalados 2 extensómetros em cada um dos varões. A relação entre a força de confinamento e a abertura da fenda depende da rigidez do sistema de confinamento. É importante notar que esta rigidez não depende apenas da rigidez dos varões de aço. Depende também dos restantes componentes do sistema, nomeadamente as chapas onde os varões estão ligados, do sistema de aperto e da rigidez do contacto entre essas chapas e o betão. Por isso, a força de compressão instalada quando ocorre uma determinada abertura de fenda não será igual em todos os provetes confinados com varões de igual diâmetro.

Para cada diferente configuração, foram feitos dois ensaios. Os ensaios realizados são identificados no Quadro 2, onde é apresentada a designação atribuída a cada um dos ensaios.

Quadro 2 – Designação e características dos provetes ensaiados

Designação do provete	Dose de fibras [Kg/m ³]	Diâmetro do confinamento [mm]
00C08#1	0	8
00C08#2		
00C16#1		16
00C16#2		
50C08#1	50	8
50C08#2		
50C16#1		16
50C16#2		

4.2 ESQUEMA DOS ENSAIOS DO TIPO PUSH-OFF REALIZADOS

O esquema de ensaio, representado na Figura 16, garante que a fissura em estudo esteja sujeita a uma força de corte resultante igual à força de compressão aplicada pelo atuador sobre o provete (despreza-se o peso próprio do provete). De maneira a evitar o desenvolvimento de reações horizontais, o apoio inferior é um apoio de roletes. Este apoio permite movimentos horizontais segundo a direção paralela aos varões de confinamento. Assim, sabe-se que a força de compressão na fissura em estudo é apenas a que é instalada pelos varões de confinamento.

Entre os apoios metálicos e o provete de betão, foi instalada uma placa de cartão prensado com espessura igual a 3 mm e densidade igual a 750 kg/m³, que permite que a distribuição de tensões de compressão ao longo da área do apoio seja mais uniforme do que a que aconteceria se essa placa não existisse, uma vez que a placa de cartão prensado absorve pequenas irregularidades existentes na superfície de betão.

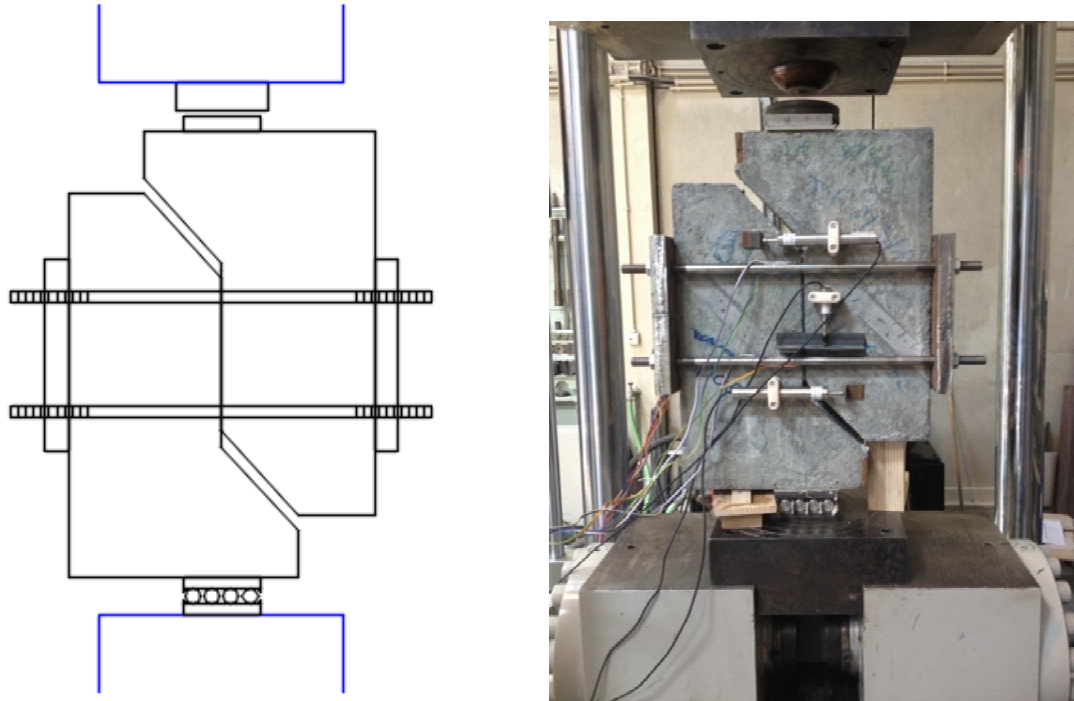


Fig.16 – Esquema de ensaio

A prensa hidráulica utilizada, ilustrada na Figura 17, tem uma capacidade de 1000 kN. Os ensaios foram realizados com uma velocidade constante de aproximação entre os pratos da prensa. Nos primeiros ensaios realizados com cada tipo de varões de confinamento, essa velocidade foi de 0,2 mm/min. Tendo-se verificado que essa velocidade podia ser aumentada sem prejudicar a compreensão do desempenho das peças nas várias fases do ensaio, a velocidade foi aumentada para 0,5 mm/min nos restantes testes (ver Quadro 3).

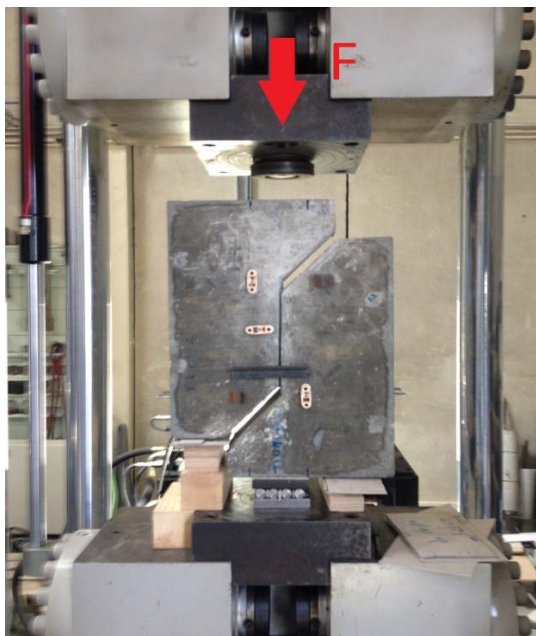


Fig. 17 – Posição da atuação da carga sobre a peça

Quadro 3 – Velocidade de ensaio

Designação do provete	Velocidade de ensaio (mm/min)
00C08#1	0,2
00C08#2	0,5
00C16#1	0,2
00C16#2	0,5
50C08#1	
50C08#2	
50C16#1	
50C16#2	

4.2.1 GEOMETRIA

Foi utilizado um modelo de elementos finitos para estudar a geometria das peças. A geometria adotada é apresentada na Figura 18. Através desse modelo, foi também possível dimensionar as armaduras embebidas necessárias para evitar que ocorra a rotura do provete de ensaio fora da fissura em estudo. Essas armaduras estão representadas na Figura 19 e são também visíveis na Figura 20. Note-se que apenas existem armaduras embebidas em zonas afastadas da fissura em estudo. Por isso, pode afirmar-se que essas armaduras embebidas não influenciam o comportamento nessa fissura.

De forma a materializar a geometria pretendida, foi utilizada a cofragem, em contraplacado marítimo, ilustrada na Figura 18. Essa cofragem consiste numa caixa com peças interiores (em madeira e em poliestireno expandido extrudido) que definem a geometria final do provete. Para colmatar algumas fissuras nas juntas das caixas, impedindo escorrências durante a moldagem, foram feitas pequenas selagens com silicone.

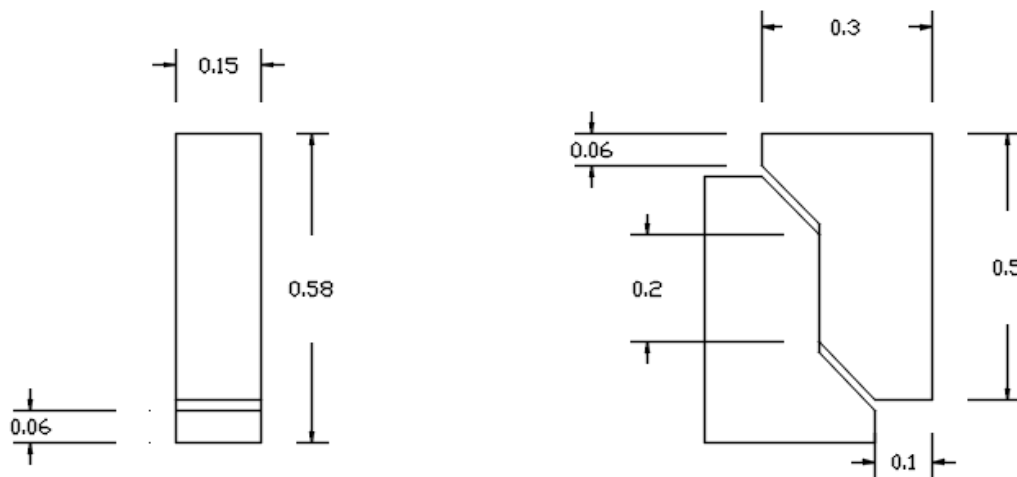


Fig. 18 – Geometria dos provetes usados nos ensaios do tipo *push-off* (dimensões em metros)

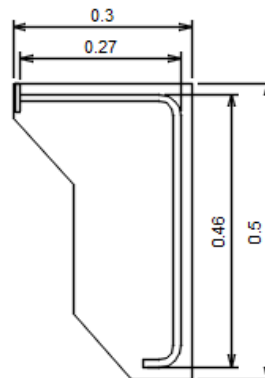


Fig.19 – Posição das armaduras embebidas



Fig.20 – Cofragem.

Os ensaios foram conduzidos sem imposição prévia de fissuração. Para garantir que a fissura se desenvolve no plano pretendido (alinhada com os eixos de atuação da força transmitida pela prensa hidráulica), foram feitos entalhes, definindo assim esse plano. Os entalhes foram realizados após o endurecimento do betão, recorrendo a um aparelho de corte. A profundidade do entalhe é aproximadamente igual a 15 mm. O valor real da profundidade do entalhe materializado em cada provete foi medido com um paquímetro, tendo sido usado o valor real da área da fissura para converter as forças aplicadas (de compressão e corte) em tensões atuantes na fissura. A Figura 21 ilustra um pormenor do entalhe.



Fig. 21 – Vista do entalhe, com profundidade aproximadamente igual a 15 mm.

4.2.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇAS E DEFORMAÇÕES

Os movimentos relativos na fissura (deslizamento e abertura) foram medidos com transdutores de deslocamento do tipo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT). O esquema de montagem dos LVDTs é apresentado nas Figuras 22 e 23. Aí, verifica-se que foram usados dois LVDTs para medir o deslizamento (um de cada lado da peça) e quatro para medir a abertura da fissura (dois de cada lado da peça). A designação atribuída a cada LVDT (designação que o vai identificar na apresentação dos resultados) está identificada nas mesmas figuras. Foram utilizados LVDTs com gama de medição de 5 mm para medir o deslizamento e transdutores com uma gama de medição de 10 mm nas medições da abertura da fissura. A escolha destes transdutores foi condicionada pelos equipamentos disponíveis e pelo espaço livre, entre varões de confinamento, para os instalar.

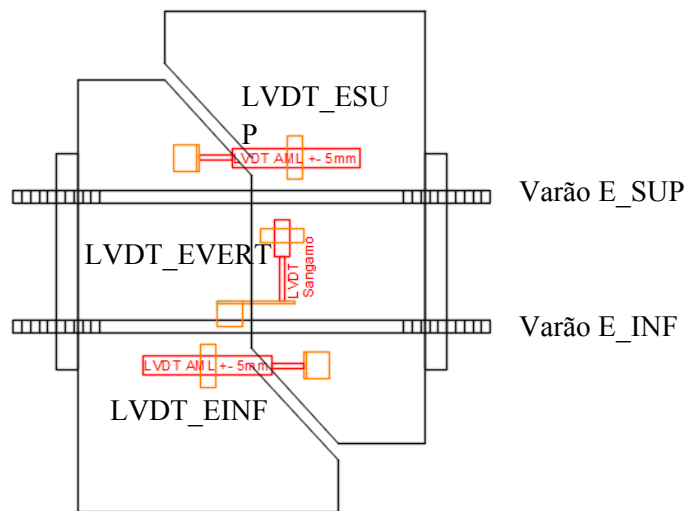


Fig.22 – Posição dos LVDT's – vista nascente (E)

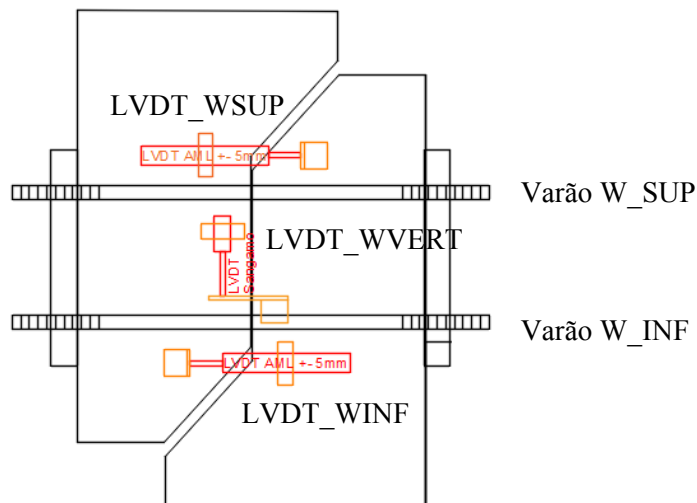


Fig.23 – Posição dos LVDT's – vista poente (W)

Conforme foi descrito atrás, neste trabalho usaram-se dois tipos de varões para confinar a peça: varões com diâmetro de 8 mm e de 16mm. Estes varões são posicionados recorrendo a chapas de aço com 25 mm de espessura. Os varões de confinamento e as chapas metálicas são feitos com aço da classe S275. A geometria das chapas é ilustrada na Figura 24.

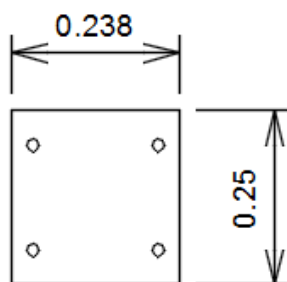


Fig.24 – Chapa metálica pertencente ao sistema de confinamento

Conforme foi também explicado no início deste capítulo, foram instalados dois extensómetros em cada varão de aço. Foram usados extensómetros elétricos de resistência com características apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Características dos extensómetros aplicados a cada tipo de varão

	Varões de 16 mm	Varões de 8 mm
Base de medida (mm)	6	3,18
Resistência elétrica (Ω)	$120 \pm 0,3\%$	$350 \pm 0,6\%$
Gauge Factor	$2,1 \pm 1\%$	$2,16 \pm 0,5\%$

Os extensómetros foram instalados na direção longitudinal dos varões, em posições diametralmente opostas. A Figura 25 ilustra um dos extensómetros instalado num varão de 16 mm de diâmetro, onde é visível que foi usada uma ligação com 3 fios, para compensar os efeitos da variação de resistência elétrica nos fios de ligação. A força instalada em cada varão é calculada com base no valor médio da extensão medida nos dois extensómetros instalados em cada varão. Deste modo, compensam-se os efeitos de um momento fletor que possa estar instalado no varão de confinamento. No Quadro 5 faz-se a correspondência entre o número associado a cada extensómetro e respetiva aplicação do extensómetro no varão de confinamento. Nesse quadro, a designação *ext1_2*, por exemplo, significa que no varão em questão foram instalados os extensómetros nº 1 e 2.

As extensões foram registadas com um equipamento de aquisição da marca DataTaker (modelo DT80G). A frequência de aquisição dos valores das extensões foi de 1Hz. Os restantes valores foram adquiridos com uma frequência de 5 Hz.

A força aplicada pela prensa hidráulica, que é convertida em tensão de corte atuante no plano da fissura, é medida com uma célula de carga resistiva (que é parte integrante da prensa hidráulica).

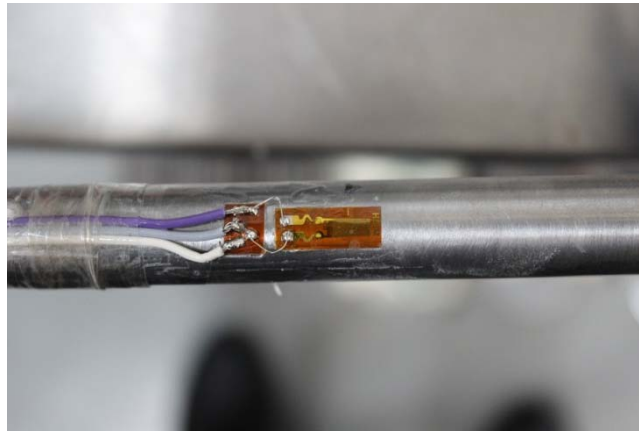


Fig.25 – Extensómetro aplicado num varão de 16 mm de diâmetro, para medir a sua deformação longitudinal

Quadro 5 – Correspondência entre extensómetros e varões de confinamento

Posição	Varão	
	φ8mm	φ16mm
Varão E _{sup}	Ext9_10	Ext1_2
Varão E _{inf}	Ext11_12	Ext3_4
Varão W _{sup}	Ext13_14	Ext5_6
Varão W _{inf}	Ext15_16	Ext7_8

4.2.3 CALIBRAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS INSTALADOS NOS VARÕES DE CONFINAMENTO

O processo de calibração é essencial para que sejam conseguidas leituras corretas nos extensómetros. Para tal, definiu-se um modelo de carregamento dos varões, que consistiu em aplicar uma força crescente de tração, até ser atingido um determinado patamar de força. De seguida, aplicou-se outra força crescente até atingir outro patamar de força superior. O procedimento está ilustrado na Figura 26. Neste processo de calibração, o varão foi ligado a uma prensa hidráulica usando rótulas nas suas duas extremidades. Deste modo, minimizam-se os efeitos de flexão no varão.

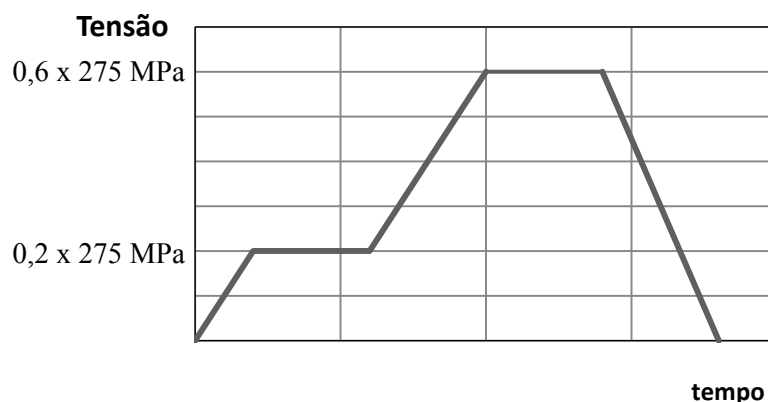


Fig. 26 – Procedimento de carga para calibração dos varões de confinamento

A diferença de força entre os patamares resulta num incremento de força e, pela Lei de Hook, é possível determinar a extensão teórica do varão. Por outro lado, é registada a extensão em cada extensómetro. A calibração é feita determinando o valor de um fator corretivo (FC) que resulta da divisão da extensão teórica pela extensão lida no equipamento de aquisição de dados. Nos Anexos I e II mostram-se os gráficos usados para calcular o valor de FC para cada um dos varões. No Quadro 6 apresenta-se os valores de FC para cada varão.

Quadro 6 – Fatores corretivos para cada varão

Extensómetro	FC
ext1_2	1,00
ext3_4	0,93
ext5_6	0,94
ext7_8	0,93
ext9_10	1,01
ext11_12	1,03
ext13_14	1,03
ext15_16	0,98

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Na presente dissertação, utilizaram-se duas composições que variam apenas na quantidade de fibras, como já referido. A composição A possui 0 Kg/m³ e a composição B possui 50 Kg/m³.

Relativamente aos materiais utilizados na composição do betão, as fibras foram as Dramix® 5D 65/60 BG [14], ilustradas na Figura 27. Estas foram fornecidas pela Bekaert, S.A e no Quadro 7 é possível observar as suas principais características.



Fig.27 – Fibras utilizadas no betão

Quadro 7 – Características das fibras utilizadas

Tipo de gancho	5D
Comprimento (lf)	60 mm
Diâmetro (df)	0,9 mm
Esbelteza (lf/df)	65
Tensão de rotura	2300 MPa
Módulo de elasticidade	210 GPa
Extensão na rotura	6 %

Foi utilizado um cimento do tipo CEM I 42,5R, facultado pela SECIL de Maceira-Liz. O adjuvante utilizado foi o MC-PowerFlow 2695 da empresa MC Bauchemie.

As areias, ilustradas nas Figuras 29 e 30, foram disponibilizadas pela SORGILA, enquanto a brita, na Figura 28, pela Secil-Britas, S.A.



Fig.28 – Brita 4/8



Fig.29 – Areia 0/2



Fig.30 – Areia 0/4

4.4 AMASSADURA, MOLDAGEM E CURA

Após pesagem de todos os materiais necessários à produção do betão, iniciou-se as betonagens das peças *z-shapped* e dos restantes provetes. A amassadura foi realizada numa betoneira de eixo vertical, com capacidade de 180 litros.

A colocação do betão nos moldes foi feita manualmente. Como se trata de um betão auto-compactável a vibração foi dispensada.

Após a moldagem, colocou-se um filme de polietileno sobre os provetes até à data da desmoldagem. A cura dos provetes foi realizada numa câmara climática, com uma temperatura de $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa superior a 95%. Neste procedimento foi seguida a norma NP EN 206-1 [10].

4.5 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

Para determinar as características mecânicas dos betões, realizaram-se os ensaios complementares de caracterização do betão endurecido que se apresentam nos Quadros 8 e 9.

Quadro 8 – Ensaio realizados para determinar as características mecânicas do betão com fibras

Ensaio	Tipo provete	Idade em dias	Nº provetes
Compressão	Cubos 15x15x15cm	11	3
		28	3+3 ⁽¹⁾
Compressão	Cilindros ϕ 15 h30cm	11	3
		28	3
Compressão diametral	Cilindros ϕ 15 h30cm	28	3
Absorção de água por imersão	Cubos 15x15x15cm	28	3
Flexão	Prismas 15x15x60cm	28	7

Nota: ⁽¹⁾ 3 cubos foram realizados no LEMC e os restantes 3 no laboratório da Bekaert.

Quadro 9 – Ensaio realizados para determinar as características mecânicas do betão sem fibras

Ensaio	Tipo provete	Idade em dias	Nº provetes
Compressão	Cubos 15x15x15cm	7	3
		28	6
Compressão	Cilindros ϕ 15 h30cm	7	3
		28	3
Compressão diametral	Cilindros ϕ 15 h30cm	28	3
Absorção de água por imersão	Cubos 15x15x15cm	28	3
Flexão	Prismas 15x15x60cm	28	3+3 ⁽¹⁾

Nota: ⁽¹⁾ 3 ensaios foram realizados de acordo com a norma EN 14651 e os restantes 3 de acordo com a norma NP EN 12390-5

Na realização dos ensaios referidos nos Quadros 8 e 9, foram seguidas as normas:

- Compressão - NP EN 12390-3 [11]
- Compressão Diametral – NP EN 12390-6 [12]
- Absorção de água por imersão – LNEC E 394 [13]
- Flexão (ensaio segundo a norma para betão com fibras) – EN 14651 [14]
- Flexão (ensaio segundo a norma para betão endurecido) – NP EN 12390-5 [15]

Os ensaios foram, de um modo geral, feitos no LEMC da FEUP, exceto os ensaios de flexão de acordo com a norma EN 14651 e 3 ensaios de compressão (que foram realizados no Concrete Laboratory da Bekaert, na Bélgica).

4.6. RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

Os resultados dos ensaios para a caracterização do betão simples apresentam-se no Quadro 10 a 12 e na Figura 31.

Quadro 10 – Resultados dos ensaios para caracterização do betão simples (MPa)

Propriedade	Tipo de provete	Idade	Resultado individual	Valor médio
Resistência à compressão	Cubos	7	74,2	74,10
			78,2	
			69,9	
		28	87,6	86,55
			87,7	
			88,3	
			88,4	
			82,0	
			85,3	
	Cilindro	7	73,8	73,10
			73,2	
			72,3	
		28	86,1	85,73
			85,1	
			86,0	
Resistência à tração por compressão diametral	Cilindro	28	5,55	6,05
			6,35	
			6,25	

Quadro 11 – Resultados do ensaio da absorção de água por imersão em betão simples

M1 - Massa do provete saturado no ar (g)	M2 - Massa hidrostática do provete saturado (g)	M3 - Massa do provete seco (g)	Absorção de água por imersão $= (M1 - M3) / (M1 - M2)$ (%)
8067,3	4710,5	7837,9	6,8
8048,6	4708,6	7820,9	6,8
8064,7	4716,3	7834,5	6,9

Quadro 12 – Ensaio de flexão em betão simples (NP EN 12350-5)

Idade	Resistência à flexão (MPa)	Média
28	9,9	9,2
	8,2	
	9,4	

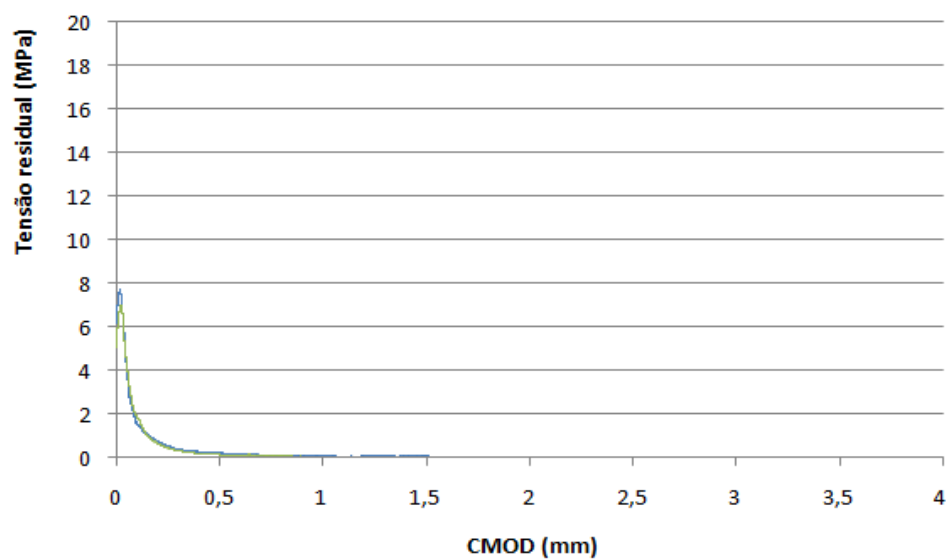


Fig.31 – Curva tensão/CMOD obtida no ensaio à flexão do betão simples (EN 14651)

Os resultados dos ensaios para a caracterização do BRFA, apresentam-se nos Quadros 13 a 15 e na Figura 32.

Quadro 13 – Resultados dos ensaios para a caracterização do BFRA (MPa)

Propriedade	Tipo de provete	Idade	Resultado individual	Valor médio
Resistência à compressão	Cubos	11	77,6	78,07
			78,5	
			78,1	
		28	85,2 ⁽¹⁾	86,68
			86,4 ⁽¹⁾	
			88,4 ⁽¹⁾	
			86,9 ⁽²⁾	
			85,8 ⁽²⁾	
			87,4 ⁽²⁾	
	Cilindro	11	73,6	71,90
			67	
			75,1	
		28	80,6	79,47
			79,1	
			78,7	
Resistência à tração por compressão diametral	Cilindro	28	6,25	7,38
			8,35	
			7,55	

Notas: ⁽¹⁾ Ensaio realizado no LEMC; ⁽²⁾ Ensaio realizado no laboratório da Bekaert

Quadro 14 – Resultados dos ensaios para a caracterização do BFRA (MPa) (continuação)

Propriedade	Tipo de provete	Idade	Resultado individual		Valor médio
Resistência à tração por flexão [14]	Prismas	28	fL	7,73	7,77
				7,87	
				7,52	
				7,64	
				7,50	
				8,02	
				8,12	
			fR,1	10,18	10,44
				13,89	
				7,25	
				9,65	
				9,76	
				13,45	
				8,87	
			fR,2	13,74	12,81
				15,63	
				9,78	
				14	
				11,43	
				13,07	
				12,05	
			fR,3	14,46	12,33
				13,42	
				9,57	
				11,24	
				11,86	
				12,95	
				12,80	
			fR,4	13,25	11,35
				13,31	
				8,68	
				11,42	
				10,44	
				12,73	
				9,59	

Quadro 15 – Resultados do ensaio da absorção de água por imersão em betão com fibras

M1 - Massa do provete saturado no ar (g)	M2 - Massa hidrostática do provete saturado (g)	M3 - Massa do provete seco (g)	Absorção de água por imersão $= (M1 - M3) / (M1 - M2)$ (%)
8267,6	4914,1	8045,7	6,6
8267,8	4904,6	8045,3	6,6
8343,8	4961,8	8115,3	6,8

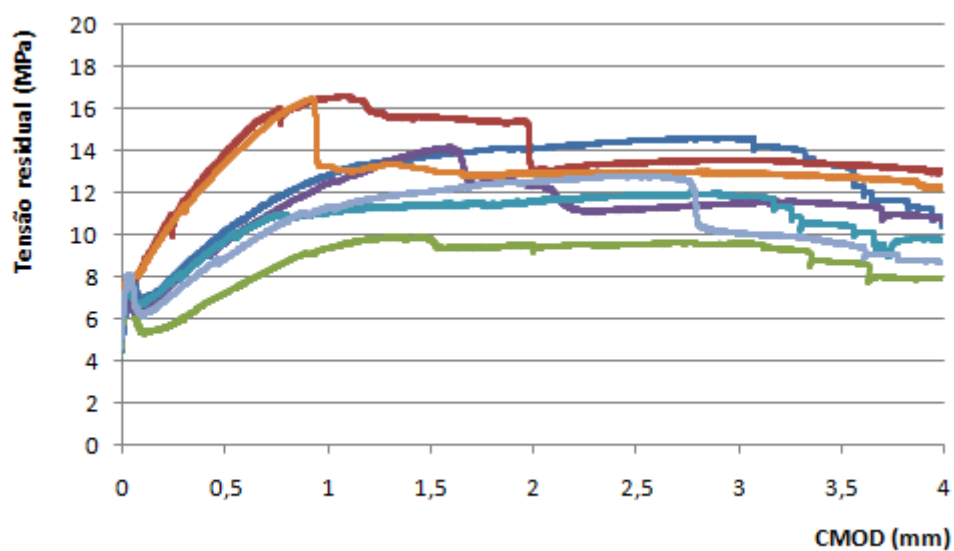


Fig.32 – Curvas tensão/CMOD obtidas no ensaio à flexão do BRFA

5

Resultados dos ensaios do tipo *push-off*

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados dos 8 ensaios do tipo *push-off* que foram realizados em provetes de betão sem fibras (4 ensaios) e em provetes de BRFA (4 ensaios).

Os resultados medidos em cada um dos provetes podem ser resumidos num único gráfico, onde se apresenta a variação das seguintes grandezas, em função do deslizamento:

- tensão de corte atuante na fissura;
- tensão normal atuante na fissura (resultante da força tração instalada nos varões de confinamento);
- abertura da fissura;

Neste capítulo, os valores apresentados para o deslizamento e para a abertura da fissura correspondem à média dos valores registados nos vários LVDTs (4 no caso da medição da abertura da fissura; 2 no caso da medição do deslizamento). O registo individual de cada LVDT é apresentado no Anexo IV.

Os valores apresentados para as tensões normal e de corte são os valores médios atuantes do plano da fissura, que se obtêm dividindo a força resultante pela área da fissura. Presume-se que, para a análise do comportamento do provete após o surgimento da fissura, este valor médio é representativo do comportamento do provete.

Em alguns dos ensaios (provetes 00C16#1 e 50C08#1), não foi possível registar os valores das deformações num dos varões de aço usados no confinamento, por causa de interferências no sistema de medição. Nesses casos, a tensão normal atuante na fissura foi determinada de um modo aproximado, assumindo que a força instalada no varão sem resultados é igual ao valor médio da força atuante nos restantes três varões do sistema de confinamento. A força medida em cada varão é apresentada no Anexo III.

Neste capítulo é também feita a comparação entre os valores experimentais e os valores previstos pelos modelos descritos no capítulo 2. Além disso, é avaliado o valor do parâmetro C_f (empregue no modelo MC2010) que conduziria a um melhor ajuste entre resultados experimentais e resultados fornecidos por este modelo.

5.2 Ensaio de provetes com betão sem fibras

Os resultados dos ensaios dos provetes em betão sem fibras são apresentados nas Figuras 33 e 34.

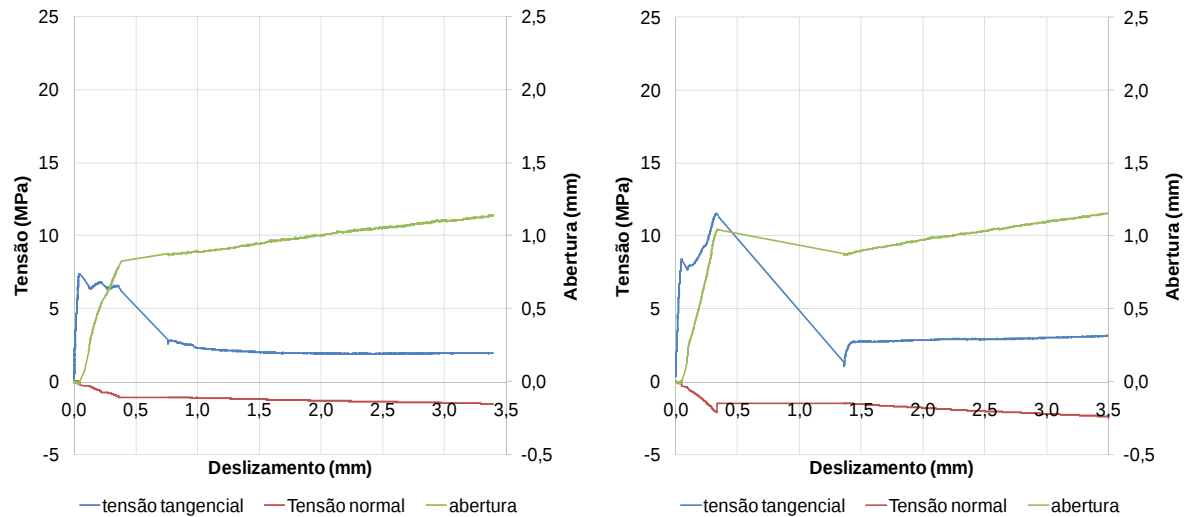


Fig. 33 – Resumo dos resultados dos ensaios do tipo *push-off* em provetes de betão sem fibras.
Da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2

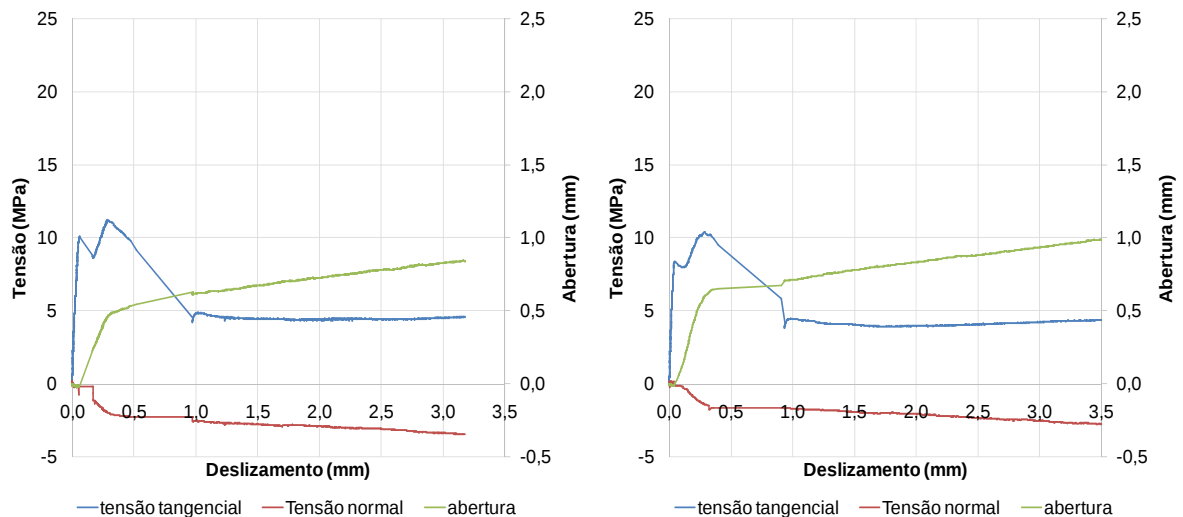


Fig. 34 – Resumo dos resultados dos ensaios do tipo *push-off* em provetes de betão sem fibras.
Da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2

Verifica-se que, quando se forma a fissura no plano do entalhe, há uma ligeira diminuição da tensão de corte instalada. No entanto, à medida que o deslocamento imposto aumenta, a tensão tangencial instalada aumenta novamente sendo que, em três dos quatro provetes ensaiados, a tensão máxima ultrapassa o valor correspondente ao instante de surgimento da fissura. No outro provete, o segundo pico de tensão tangencial tem um valor (de tensão) próximo do primeiro pico.

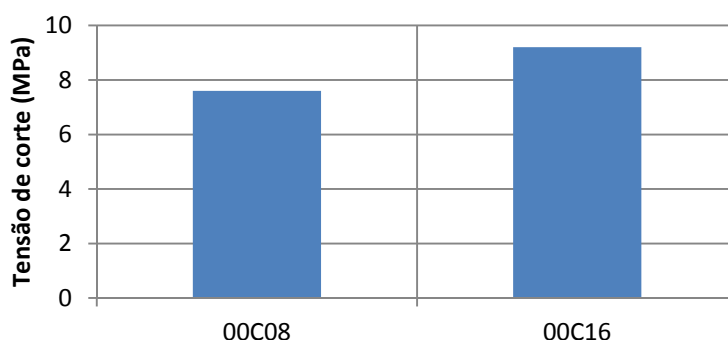
O segundo pico de tensão tangencial ocorre quando a abertura da fissura tem já valores muito expressivos: cerca de 0,9 mm nos provetes com confinamento com varões de 8 mm e 0,6 mm nos provetes com varões de confinamento de 16 mm.

Após se atingir o segundo pico de tensão tangencial, há um aumento súbito de deslizamento (para valores da ordem do 1 mm), e a tensão tangencial sofre um decréscimo muito acentuado. Para valores superiores da deformação imposta, a tensão tangencial permanece sensivelmente constante, isto é, em patamar. Este nível de tensão é menor nos provetes confinados com varões de 8 mm de diâmetro. Nesta última fase de comportamento (correspondendo ao patamar da tensão tangencial), há um aumento progressivo da abertura da fissura, sendo aproximadamente linear a relação entre a abertura da fissura e o deslizamento. O aumento da abertura da fissura é acompanhado de um aumento da tensão normal de compressão instalada no plano da fissura.

O ensaio foi terminado quando o deslizamento apresentava valores próximos de 3,5mm. Nesse instante, a abertura da fissura era ligeiramente superior a 1 mm nos provetes confinados com varões de 8 mm, e ligeiramente inferior a 1 mm nos provetes com varões de 16 mm.

A média das tensões de pico correspondentes à primeira quebra de força visível nos gráficos que relacionam a evolução das tensões com a evolução do deslizamento, para cada grupo de provetes, é resumida no Quadro 16.

Quadro 16 – Média das tensões de pico correspondentes à primeira quebra de força em cada grupo de provetes



Nos gráficos apresentados nas Figuras 33 e 34, a tensão normal tem um valor igual a zero no início do ensaio. No entanto, o valor da força instalada nos varões de confinamento não é, nesse instante, rigorosamente igual a zero, em virtude do aperto feito na fixação dos varões de confinamento. A força instalada no início do ensaio foi avaliada registando o valor medido em cada extensómetro quando, no final do ensaio, os varões de confinamento foram desapertados e ficaram sujeitos a uma força rigorosamente igual a zero. Esse registo não foi feito no início do ensaio por dificuldades relacionadas com o procedimento de montagem do ensaio. Os valores medidos correspondem então à força de compressão aplicada no início do ensaio e são apresentados no Quadro 17.

Em todos os ensaios, a fissuração ocorreu no plano definido pelos entalhes, não havendo registo de qualquer outra fissura visível noutras partes do provete. Conforme seria de esperar, atendendo ao valor elevado da resistência à compressão do betão utilizado, a fratura atravessa os agregados. A fratura não segue um plano perfeito, apresentando ondulações expressivas. Essas ondulações são caracterizadas adiante, no subcapítulo 5.5.

Quadro 17 – Força de compressão inicial aplicada a cada varão de confinamento e tensão atuante de compressão na fissura

	00C08#1	00C08#2	00C16#1	00C16#2
ESUP (kN)	-1,4	-3,4	-4,4	-10,9
EINF (kN)	-5,4	-4,4	-3,4	-6,8
WSUP (kN)	-3,6	-3,1	-	-1,4
WINF (kN)	-2,5	-1,2	-3,8	-5,8
Tensão de compressão atuante na fissura (MPa)	0,344	0,322	0,412	0,664

5.3 Ensaios de provetes com BRFA

Os resultados obtidos no ensaio dos provetes em BRFA são apresentados na Figuras 35 e 36.

Nestes ensaios, o surgimento da fissura acontece sem diminuição repentina da tensão tangencial suportada. O valor máximo da tensão tangencial instalada é atingido para valores do deslizamento sensivelmente iguais a 0,4 mm. Após ser atingida a tensão tangencial máxima, há um decréscimo gradual dessa tensão. À medida que o deslizamento imposto aumenta, diminui progressivamente a velocidade da evolução das tensões instaladas no plano da fissura (quer a tensão tangencial, quer a tensão normal).

A fissura ocorreu no plano definido pelos entalhes. O valor da resistência ao corte nos provetes em BRFA é consideravelmente superior aos valores atingidos no betão sem fibras, conforme se vê no Quadro 18 (e comparando este quadro com o Quadro 16).

As tensões normais de compressão no plano da fissura, nos provetes em BRFA, são superiores às atingidas nos provetes em betão sem fibras.

À semelhança dos ensaios em provetes sem fibras, também foram registados os valores da força inicial aplicada a cada varão de confinamento. O Quadro 19 mostra esses resultados.

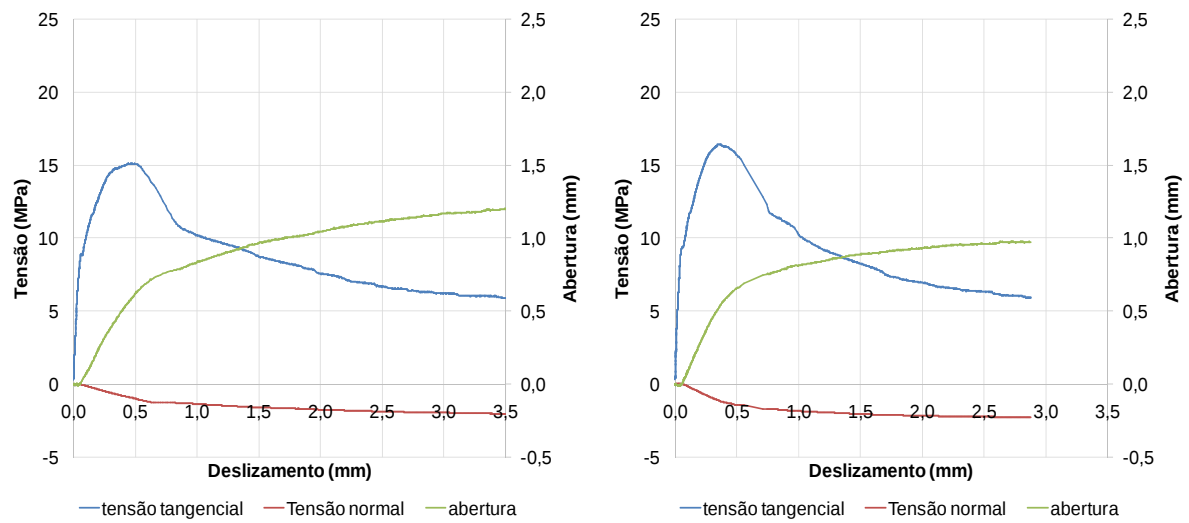


Fig.35 – Resumo dos resultados dos ensaios do tipo *push-off* em provetes de BRFA.
Da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2

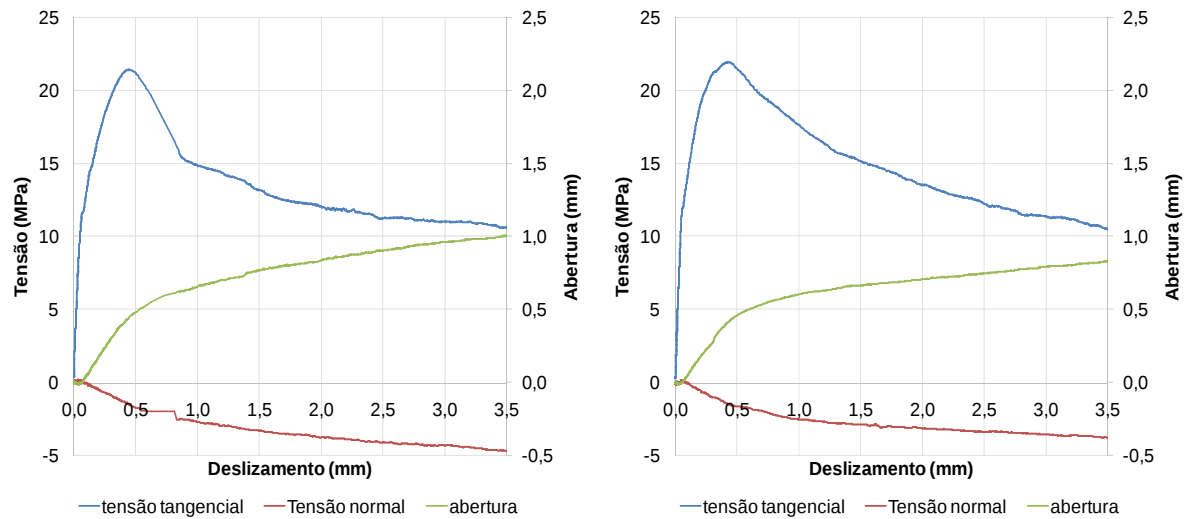
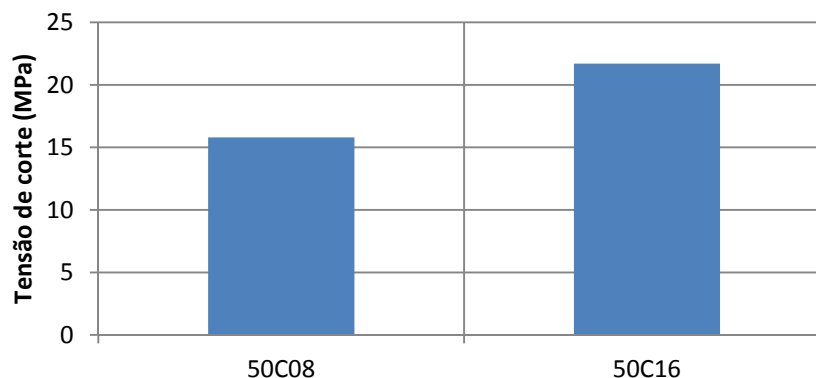


Fig.36 – Resumo dos resultados dos ensaios do tipo *push-off* em provetes de BRFA.
Da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2

Quadro 18 – Tensão tangencial máxima para cada grupo de provetes



Quadro 19 – Força de compressão inicial aplicada a cada varão de confinamento e tensão de compressão atuante na fissura.

	50C08#1	50C08#2	50C16#1	50C16#2
ESUP (kN)	-8,6	-2,7	-5,5	-4,5
EINF (kN)	-	-3,2	-1,9	-3,9
WSUP (kN)	-4,1	-0,1	-15,2	-3,3
WINF (kN)	-5,9	-1,6	-4,8	-3,1
Tensão de compressão atuante na fissura (MPa)	0,661	0,203	0,731	0,395

5.4 Comparação entre resultados experimentais e modelos de imbricamento dos agregados

Para comparar os resultados obtidos experimentalmente com os modelos de previsão apresentados no capítulo 2, elaboraram-se gráficos que mostram a variação da tensão normal e tangencial em função do deslizamento. Esta comparação foi feita apenas para valores de deslizamento iguais e superiores a 1mm. Deste modo, analisa-se apenas o comportamento na fase em que a fissura já se encontra bem aberta. Atendendo à variação suave dos 4 parâmetros medidos, nesta fase de comportamento, foram realizados cálculos para valores de deslizamento discretos, com incrementos de 0,5mm. Na determinação das tensões previstas pelos modelos, considerou-se, para cada valor do deslizamento, o

valor da abertura de fendas medida experimentalmente. A evolução da abertura de fendas em função do deslizamento, em cada ensaio, é apresentada na Figura 37.

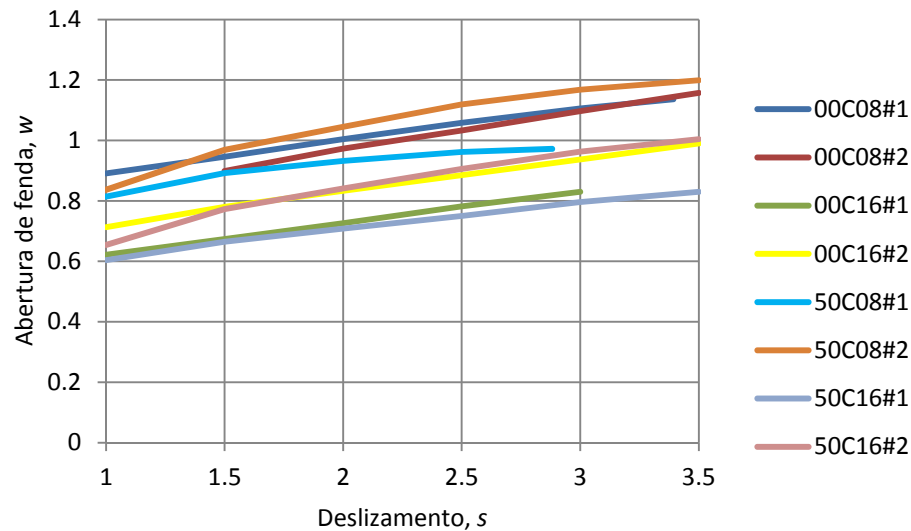


Fig.37 – Relação entre a abertura de fenda, w e o deslizamento, s (valores em mm).

Analisando a Figura 37, verifica-se que existe uma menor abertura da fissura nos ensaios em que o confinamento é realizado com varões de 16 mm de diâmetro, comparativamente aos ensaios com varões de confinamento com diâmetro de 8 mm. Por outro lado, nesta relação entre deslizamento e abertura da fissura, não é visível uma influência da existência ou não de fibras de aço.

Os valores dos parâmetros que foram usados na determinação de tensões recorrendo aos modelos MC2010, RCM e CDM são indicados no Quadro 20.

Quadro 20 – Parâmetros utilizados para cálculo de tensões nos modelos estudados

	s/fibras	c/fibras
f_m (MPa)	85,7	79,5
d_g (mm)	8	8
C_f (MC2010)	0,35	0,35

Nas Figuras 38 a 41 apresentam-se os gráficos comparativos entre os modelos de previsão e os resultados dos ensaios. Cada gráfico é relativo a um dos provetes apenas, pois a relação entre a abertura da fissura e o deslizamento varia ligeiramente de ensaio para ensaio. As linhas a cheio representam as tensões tangenciais e as linhas tracejadas as tensões normais.

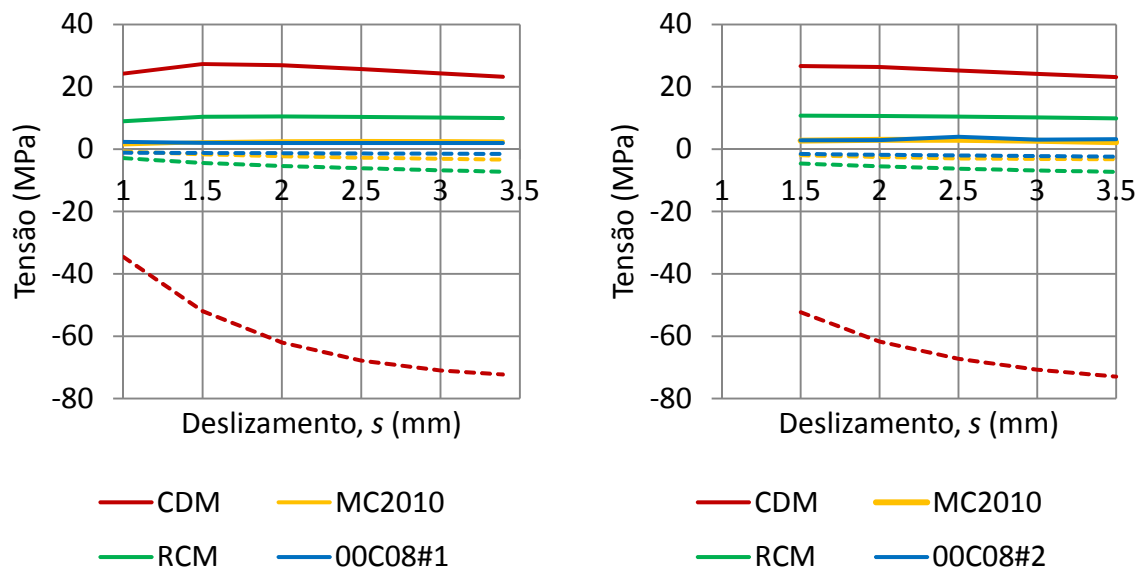


Fig.38 – Comparação entre os resultados experimentais sem fibras e modelos teóricos.
Da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2

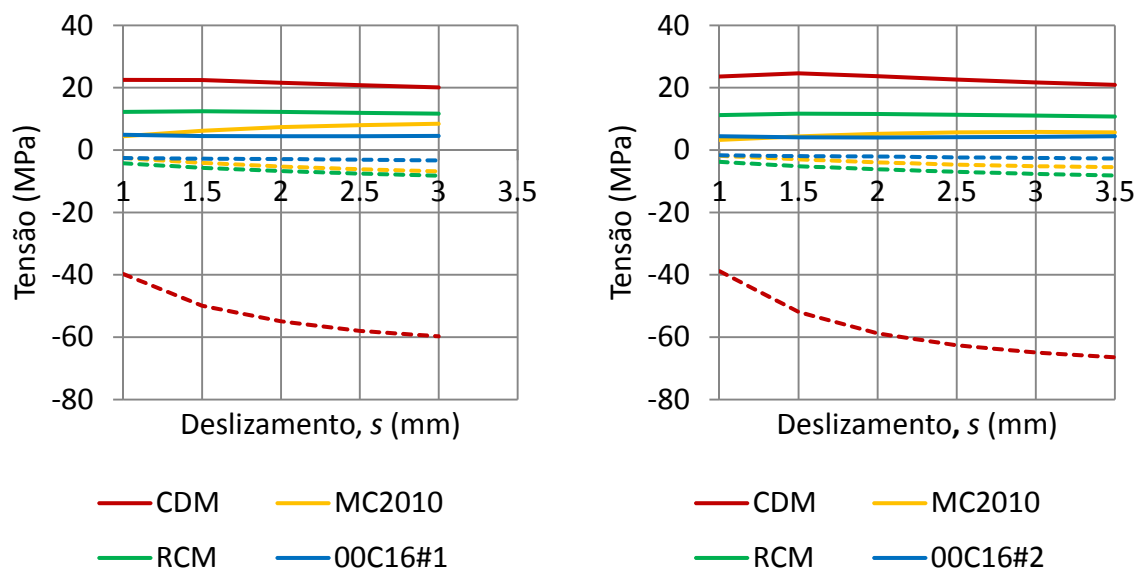


Fig.39 – Comparação entre os resultados experimentais sem fibras e modelos teóricos.
Da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2

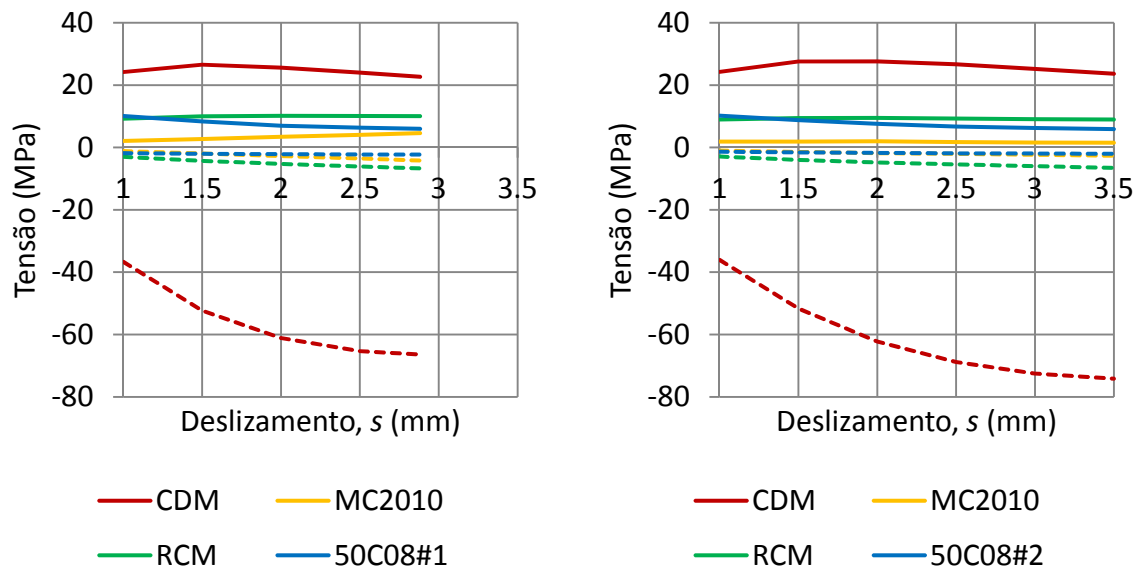


Fig.40 – Comparação entre os resultados experimentais com fibras e modelos teóricos.
Da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2

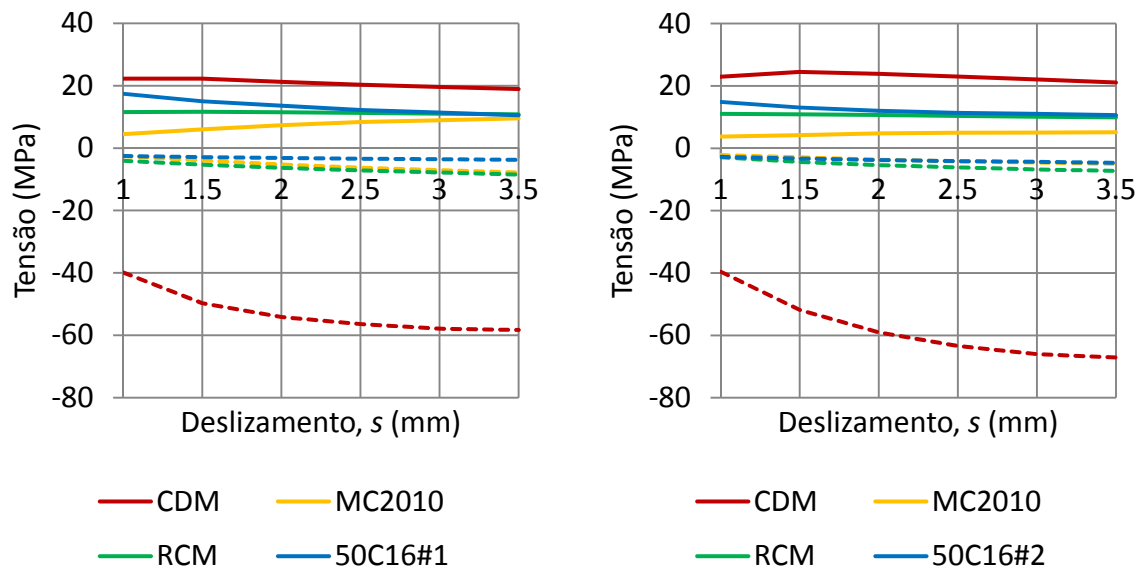


Fig.41 – Comparação entre os resultados experimentais com fibras e modelos teóricos.
Da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2

Como é possível observar, o método CDM apresenta previsões de tensão, tangencial e normal, muito elevadas desenquadrando-se dos valores obtidos neste trabalho e, também, das previsões dos restantes modelos de imbricamento dos agregados. Assim, nas Figuras 42 a 45 apresentam-se os mesmos gráficos de comparação, com a exclusão do método CDM. Com isto, pretende-se visualizar de uma forma mais elucidativa os resultados dos métodos MC2010 e RCM (com uma escala que possibilite ver, de forma mais clara, as variações de tensão que ocorreram).

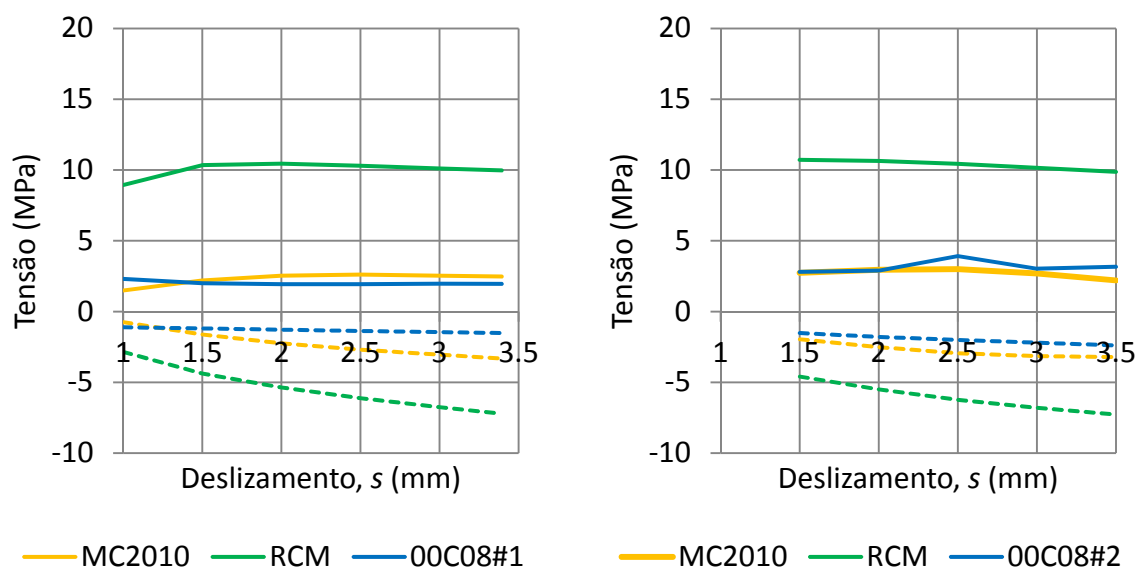


Fig.42 – Comparação entre os resultados experimentais (excluindo CDM) sem fibras e modelos teóricos.
Da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2

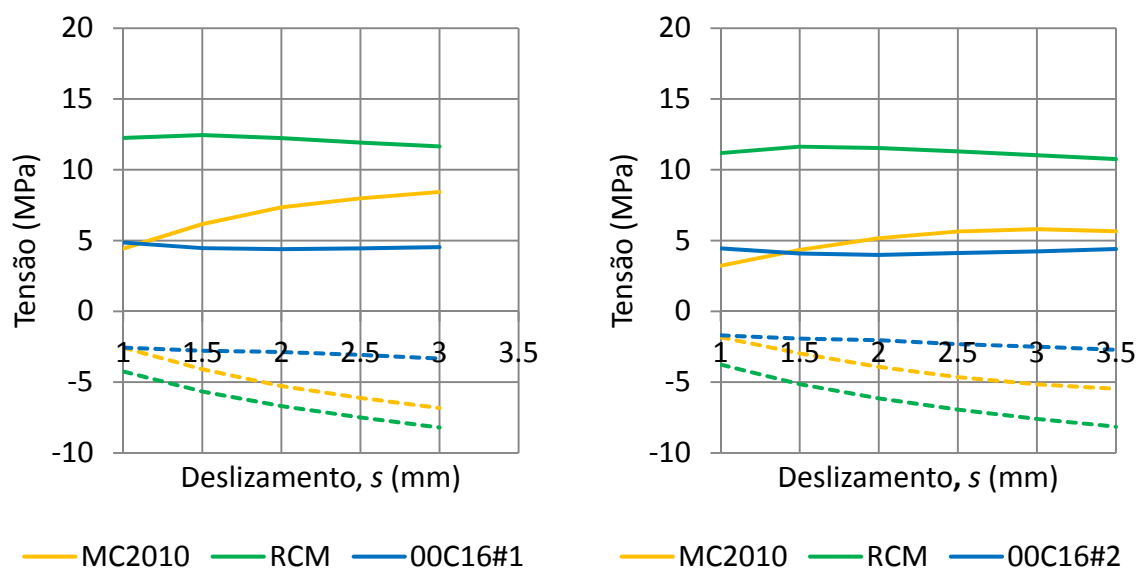
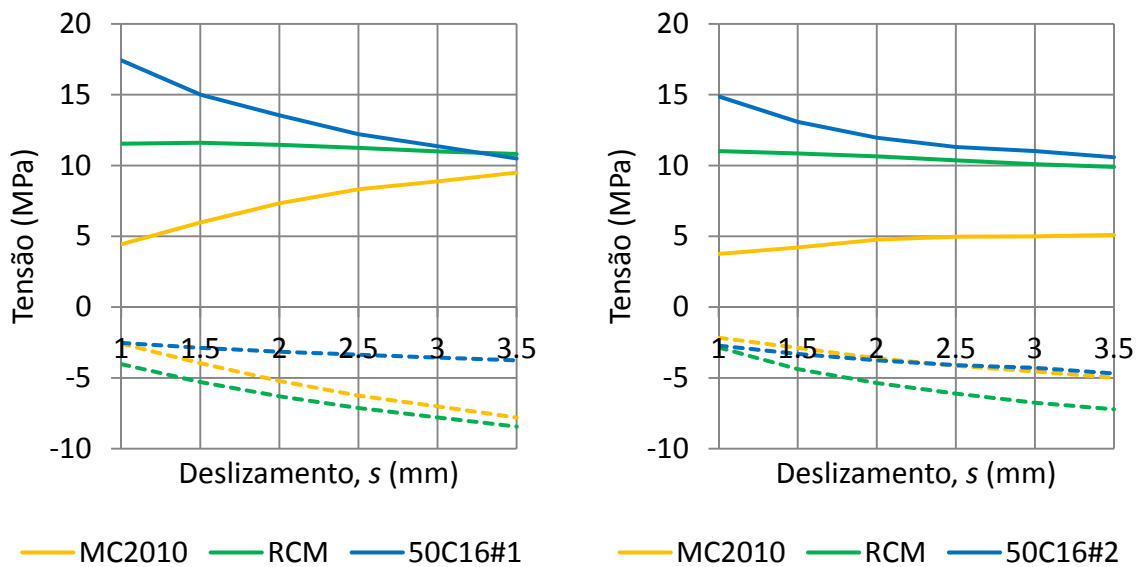
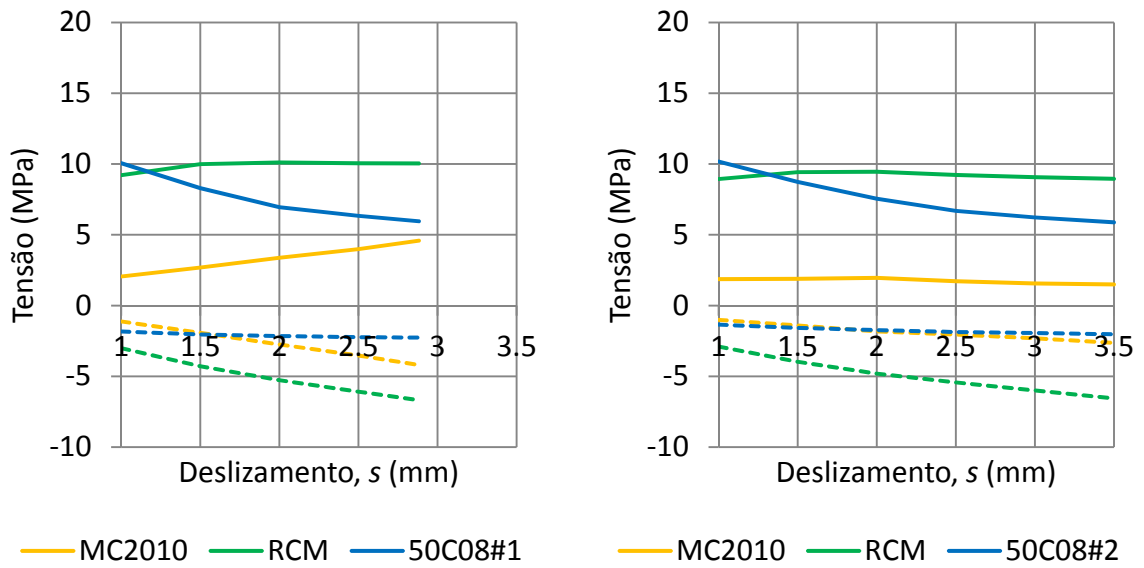


Fig.43 – Comparação entre os resultados experimentais (excluindo CDM) sem fibras e modelos teóricos.
Da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2



Quanto à previsão de tensões dos métodos verifica-se que o MC2010 é aquele que, de uma maneira geral, melhor prevê tensões tangenciais e normais para os provetes sem fibras. Por outro lado, a proximidade entre a curva experimental e a curva do RCM no caso de provetes com fibras mostra que este é o método que melhor prevê as tensões tangenciais. No entanto, para as tensões normais nos provetes com fibras, é novamente o MC2010 que melhor estima as tensões desenvolvidas no trabalho experimental. O CDM não estimou de forma tão eficaz as tensões face aos métodos anteriormente citados, sobrevalorizando, sempre, quer as tensões tangenciais quer as tensões normais. De notar que no cálculo das tensões de acordo com este método a resistência à compressão foi limitada a 40MPa, pelo motivo apresentado no capítulo 2.

Concluiu-se então que nenhum dos modelos teóricos considerados é adequado para prever o desenvolvimento de tensões tangenciais e normais observadas nos ensaios realizados. Assim, foi realizado um estudo para avaliar a possibilidade de ajustar o parâmetro C_f do modelo MC2010, de forma a que esse modelo permita prever as tensões medidas nas fissuras em estudo (tendo em conta os valores do deslizamento e da abertura de fenda).

Considerou-se diferentes valores de C_f para a previsão da tensão tangencial e para a previsão da tensão normal. Obviamente, consideraram-se valores distintos para o betão sem fibras e para o BRFA.

Os valores obtidos, e que conduzem a uma melhor aproximação entre resultados numéricos e experimentais, são apresentados no Quadro 21.

Quadro 21 – Valores de C_f corrigidos, para uso na expressão do MC2010

Betão sem fibras		BRFA	
Tensão tangencial	Tensão normal	Tensão tangencial	Tensão normal
0,27	0,20	1,0	0,25

Nas Figuras 46 a 49 apresentam-se os gráficos que comparam os valores experimentais com os valores previstos pelas expressões do MC2010, utilizando os valores corrigidos do parâmetro C_f . As linhas a cheio representam as tensões tangenciais e as linhas a tracejado as tensões normais.

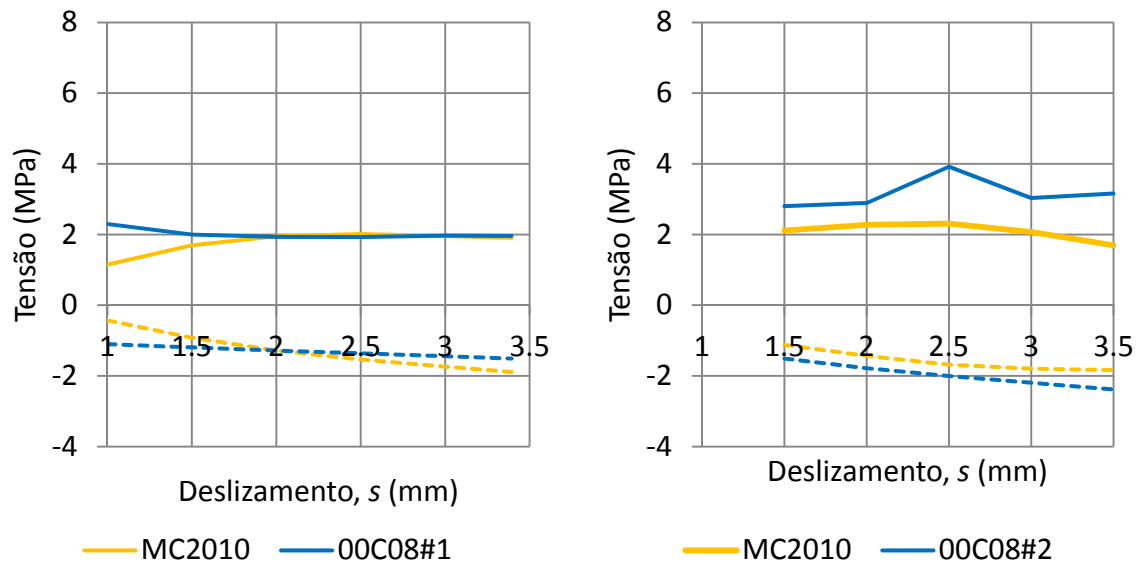


Fig.46 – Comparação entre os resultados experimentais e o MC2010 com ajuste do parâmetro C_f
Da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2

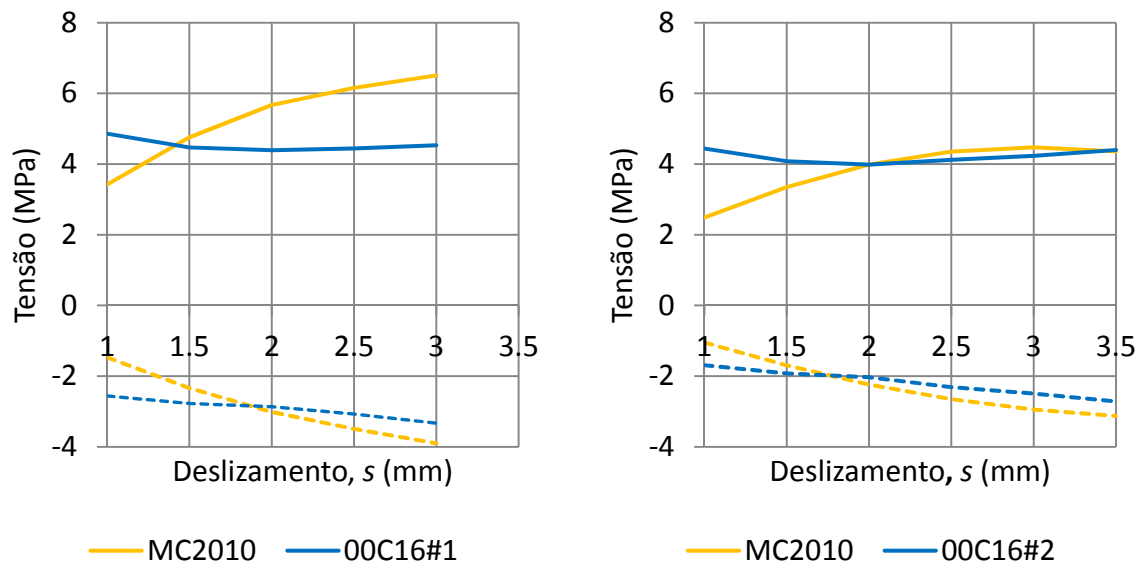


Fig.47 – Comparação entre os resultados experimentais e o MC2010 com ajuste do parâmetro C_f
Da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2

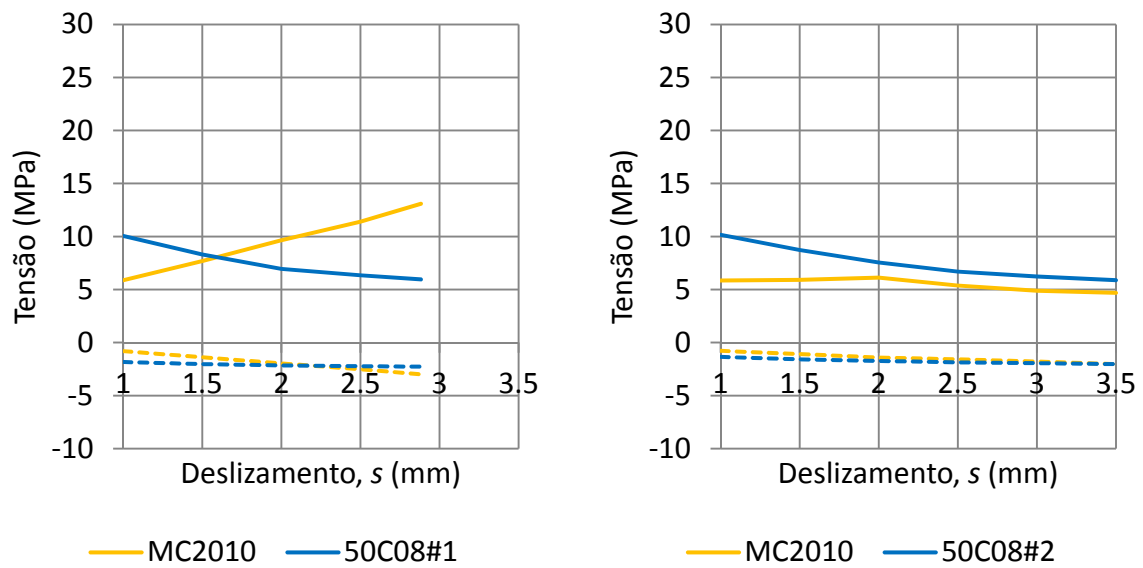


Fig.48 – Comparação entre os resultados experimentais e o MC2010 com ajuste do parâmetro C_f ,
Da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2

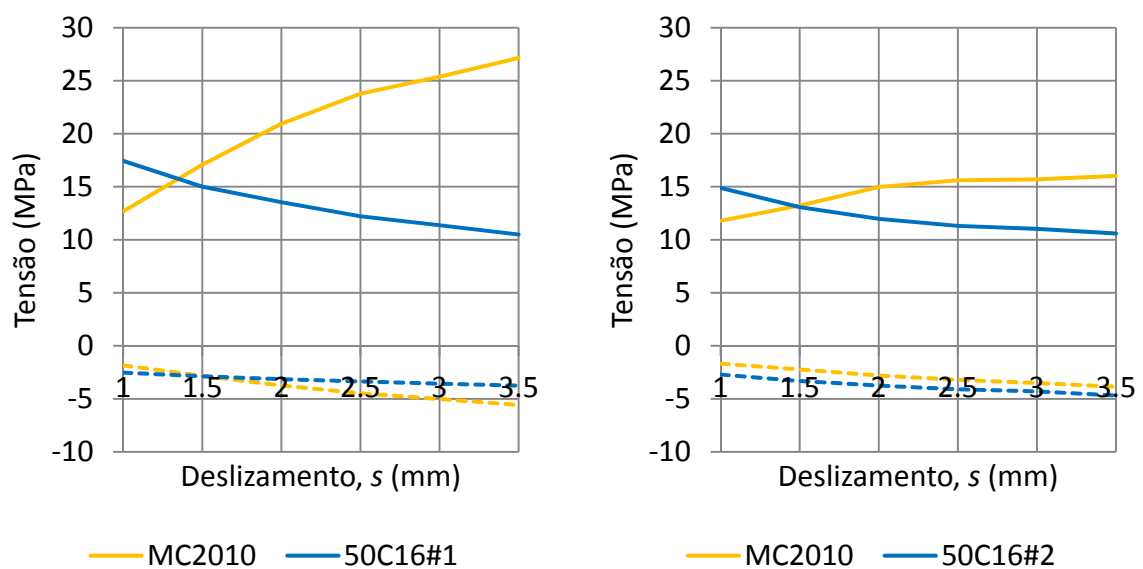


Fig.49 – Comparação entre os resultados experimentais e o MC2010 com ajuste do parâmetro C_f ,
Da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2

Analisando os gráficos do betão com e sem fibras verifica-se que com a correção do parâmetro C_f os valores teóricos e experimentais se aproximam. No entanto, a evolução das curvas das tensões tangenciais previstas pelo MC2010 tomam um desenvolvimento diferente das experimentais, isto é, os resultados teóricos, em geral, apresentam valores iniciais mais baixos que os experimentais, mas à medida que o ensaio se desenvolve estes apresentam um crescimento que os leva a valores superiores aos que se verificaram experimentalmente. Por esse motivo não se verifica um acompanhamento entre as curvas teóricas e experimentais, mas sim uma aproximação geral das tensões. Por outro lado, nas tensões normais, como a previsão do MC2010 acompanha uma tendência crescente de tensão e com a introdução de um novo parâmetro C_f corrigido, a caracterização e previsão do modelo fica muito próxima dos valores experimentais.

5.5 Caracterização da fissura nos provetes de betão sem fibras

A superfície de corte, nos provetes de betão sem fibras, foi caracterizada de uma forma simplificada. Caracterizou-se o perfil de rugosidade em três linhas (A, B, e C identificadas na Figura 50). Foi empregue um transdutor de deslocamento, recorrendo ao procedimento ilustrado na Figura 50 (à direita). Ao longo de cada linha, foram feitas 20 medições, espaçadas de 1 cm. As figuras 51 a 54 mostram, para cada linha (A, B e C), a rugosidade medida em relação à linha reta que une o primeiro e o último ponto de medição.

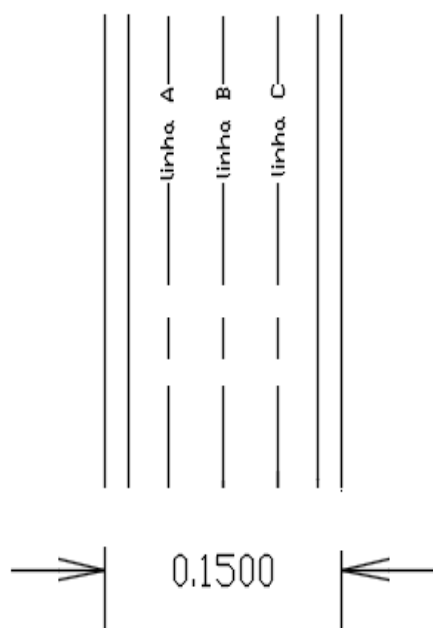


Fig.50 – Esquema de medição da rugosidade da superfície de corte

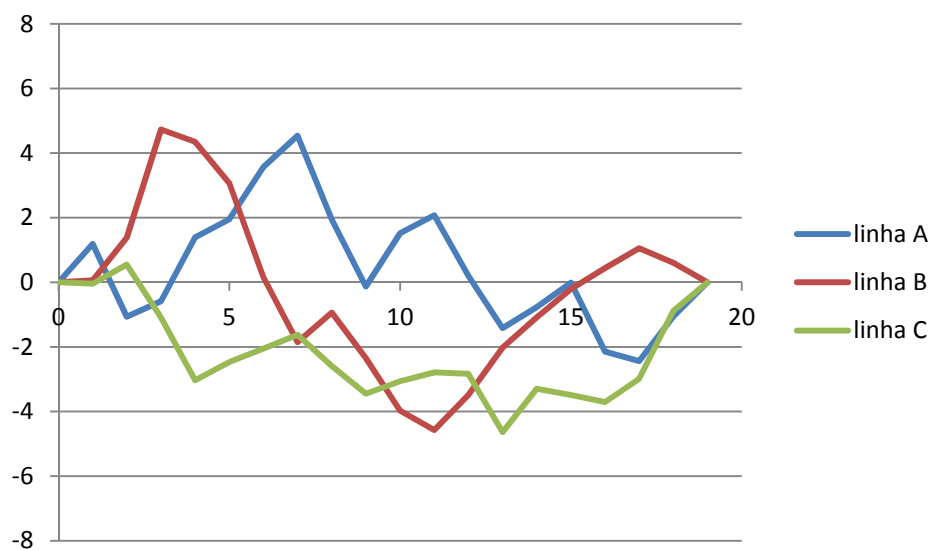


Fig.51 – Caracterização do plano de corte do provete 00C08#1

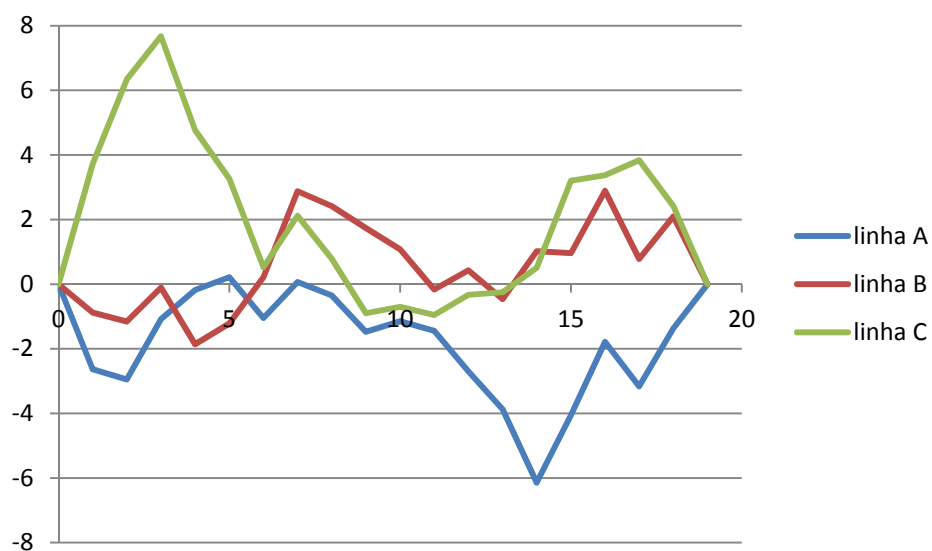


Fig.52 – Caracterização do plano de corte do provete 00C08#2

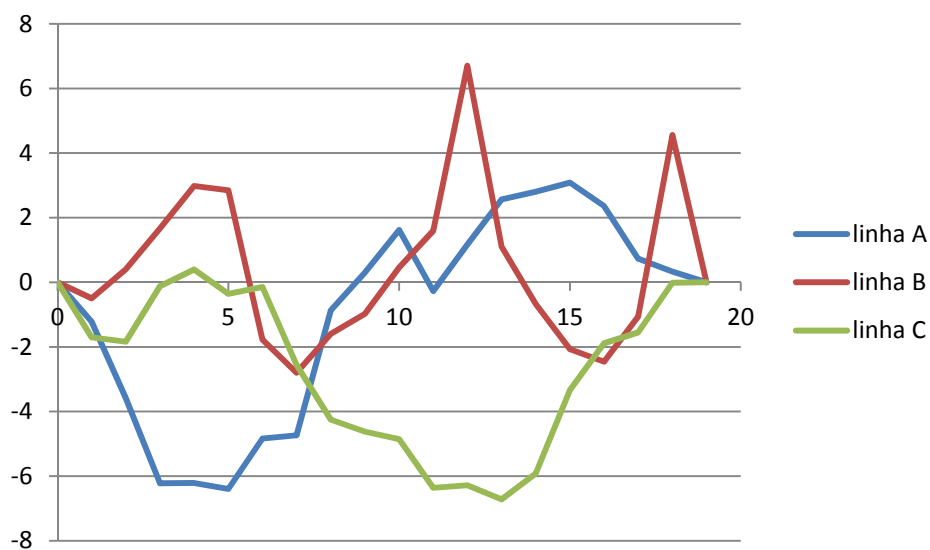


Fig.53 – Caracterização do plano de corte do provete 00C16#1

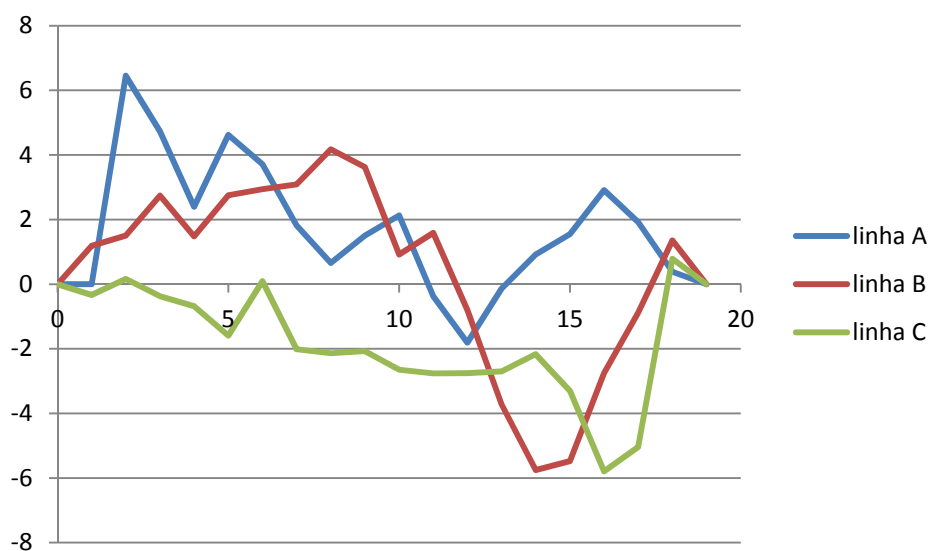


Fig.54 – Caracterização do plano de corte do provete 00C16#2

6

Conclusões

Nesta dissertação foi realizado um estudo sobre o comportamento de fissuras, sujeitas a tensões de corte, em elementos de betão reforçados com fibras de aço do tipo Dramix® 5D. Para isso, recorreu-se a ensaios de corte direto, do tipo push-off. Nestes ensaios, desenvolvem-se tensões de compressão na fissura em estudo, uma vez que existe um sistema de confinamento com varões de aço exteriores. O comportamento dos elementos em BRFA foi confrontado com o desempenho de elementos em betão simples. As fissuras em estudo não são atravessadas por qualquer armadura embebida (quer nos provetes de betão simples, quer nos provetes em BRFA). Os provetes testados em ensaios de corte direto possuem entalhes com profundidade de 15mm nos planos de corte. Não foi induzida fissuração prévia desse plano. Os betões empregues apresentam uma resistência média à compressão em provetes cilíndricos, aos 28 dias, próxima de 80MPa. O estudo realizado permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- O sistema de ensaio empregue revelou-se adequado para estudar o comportamento de fissuras sujeitas a corte direto, permitindo caracterizar a relação entre os movimentos relativos (deslizamento e abertura de fenda) e as tensões instaladas na fissura. O valor máximo do deslizamento, considerado no presente trabalho, foi de 3,5mm. A relação entre a abertura de fenda e o deslizamento depende da rigidez do sistema de confinamento empregue. No presente trabalho foram usados dois tipos de confinamento: um deles é constituído por 4 varões com diâmetro de 16mm; o outro é análogo, mas com varões de 8mm de diâmetro. Com este sistema, a abertura máxima de fenda registada foi de aproximadamente 1,2mm (para um deslizamento de 3,5mm).
- Os ensaios foram conduzidos com imposição de deformação, sendo constante a velocidade de aproximação dos pratos da prensa que comprime os provetes. Foi possível registar, em função do deslizamento na fenda em estudo, a evolução da abertura de fenda, da tensão normal que comprime a fenda e da tensão tangencial transferida nessa fenda.
- Os provetes de BRFA apresentaram um comportamento consideravelmente mais dúctil do que os provetes de betão sem fibras. Esse aumento de ductilidade traduz-se pela ausência de quebras bruscas de tensão tangencial, e por uma maior tensão tangencial transferida para valores elevados do deslizamento imposto na fissura.

- A tensão tangencial máxima suportada dos elementos de BRFA é mais do que o dobro da tensão suportada pelos elementos de betão simples antes da primeira quebra significativa de tensão tangencial.

Nos ensaios com varões de confinamento de 16mm, essas tensões têm os valores de 21,7MPa para o BRFA e 9,2MPa para o betão sem fibras.

Nos ensaios com varões de confinamento de 8mm, essas tensões têm os valores de 15,8MPa para o BRFA e 7,6MPa para o betão sem fibras.

Note-se que foram realizados dois ensaios de cada tipo e os valores apresentados nas duas frases anteriores correspondem à média de dois ensaios semelhantes. Observou-se uma boa repetibilidade entre ensaios do mesmo tipo (mesmo betão e confinamento com varões do mesmo diâmetro).

- Para os betões e para os tipos de confinamento considerados, foi possível obter um modelo simples que permite prever, de um modo aproximado, as tensões normais e tangenciais e normais instaladas na fissura, em função do deslizamento e da abertura da fissura. Esse modelo é, basicamente, uma versão modificada do modelo previsto Model Code 2010 do *fib*, para a transferência de tensões de corte em fendas rugosas. Nesse modelo, as tensões são diretamente proporcionais a um parâmetro C_f . O Model Code 2010 sugere os seguintes valores para esse parâmetro C_f :
 - ♦ 1,0 para os casos em que não se verifica fratura dos agregados;
 - ♦ 0,35 quando ocorre fratura dos agregados e consequentemente a fissura é mais lisa (nomeadamente quando é usado betão de elevada resistência).

A versão modificada do Model Code 2010 que, conforme se referiu, conduz a uma estimativa aproximada das tensões instaladas nos provetes ensaiados, consiste em usar valores diferentes para esse parâmetro C_f :

- ♦ 0,27 para a determinação da tensão tangencial em elementos de betão simples;
- ♦ 0,20 para a determinação da tensão normal em elementos de betão simples;
- ♦ 1,0 para a determinação da tensão tangencial em elementos de BRFA;
- ♦ 0,25 para a determinação da tensão normal em elementos de BRFA;

Referências bibliográficas

- [1] Naaman, A. (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, 241-252, Japan Concrete Institute.
- [2] Dramix®- Reinforcing the Future.
http://www.bekaert.com/en/Product%20Catalog/Content/Building%20Products%20Pages/steel_fibers_new_Dramix.aspx. (acedido em 11 de Julho de 2016))
- [3] fib (2013). Fib Model Code for Concrete Structures 2010. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn.
- [4] Gambarova PG, Karakoç C. (1983). A new approach to the analysis of the confinement role in regularly cracking concrete elements. In: Trans. 7th struct mech in reactor tech, vol. H; p. 251–61.
- [5] Li B, Maekawa K, Okamura H. (1989). Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete. *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo*.
- [6] Pimentel M, Brüwhiler E, Figueiras J. (2010) Extended cracked membran model for the analysis of RC panels. *Engineering Structures*, 32:1964-75.”
- [7] Ahmed, L., Ansell, A. Direct Shear Strength of High-Strength Fiber Concrete. *Magazine of Concrete Research*, 05/2010, 379-390, ICE Publishing
- [8] Cuenca, E., Serna, P. (2010). Shear Behavior of Self-Compacting Concrete and Fiber-Reinforced Concrete Push-off Specimen. *RILEM Bookseries*
- [9] Navarro-Gregory, J., Mezquida-Alcaraz, E., Serna, P., Oviedo, J. (2016). Experimental Study on the Steel-Fibre Contribution to Concrete Shear Behavior. *Construction and Building Materials*, 100-111, Elsevier
- [10] IPQ (2007). Especificação, desempenho, produção, e conformidade. NP EN206-1 Betão. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- [11] IPQ (2009d). Resistência à compressão. NP EN 12390-3: 2009 Ensaios do betão endurecido. Caparica: Instituto Português da Qualidade
- [12] IPQ (2009c) Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica. NP EN 12390-6: 2009 Ensaios do betão endurecido. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- [13] LNEC E 394 – Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica. Portugal: MOPTC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993.
- [14] CEN (2007) EN 14651:2005+A1 - Test method for methallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)
- [15] IPQ (2009) NP EN 12390-5 - Ensaios do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes

Anexo I – Calibração dos varões – leituras dos extensómetros

Neste anexo apresentam-se os gráficos relativos às extensões medidas para obtenção dos fatores de calibração apresentados no subcapítulo 4.2.3.

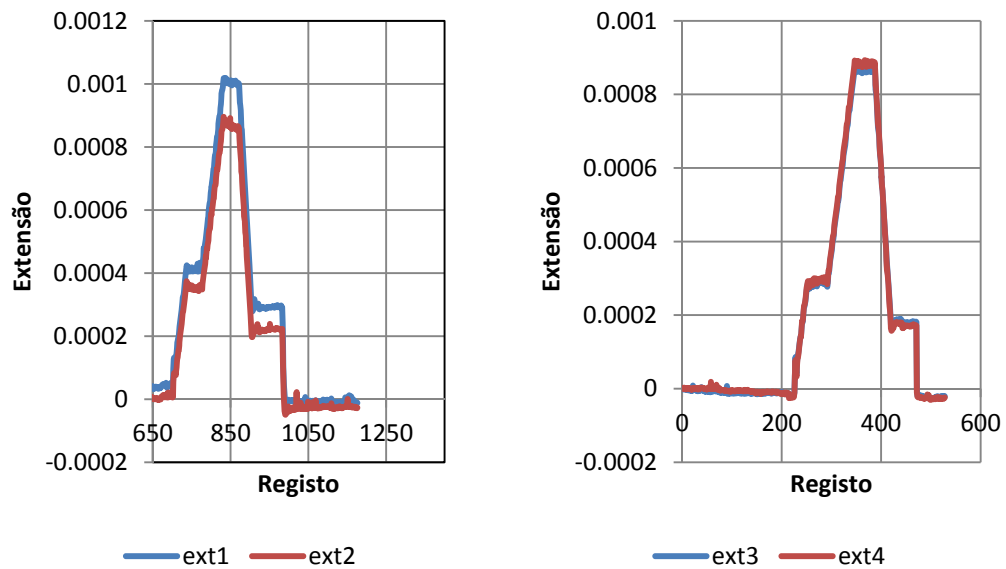


Fig.55 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento.
Da esquerda para a direita: Varão ESUP16mm e Varão EINF16mm

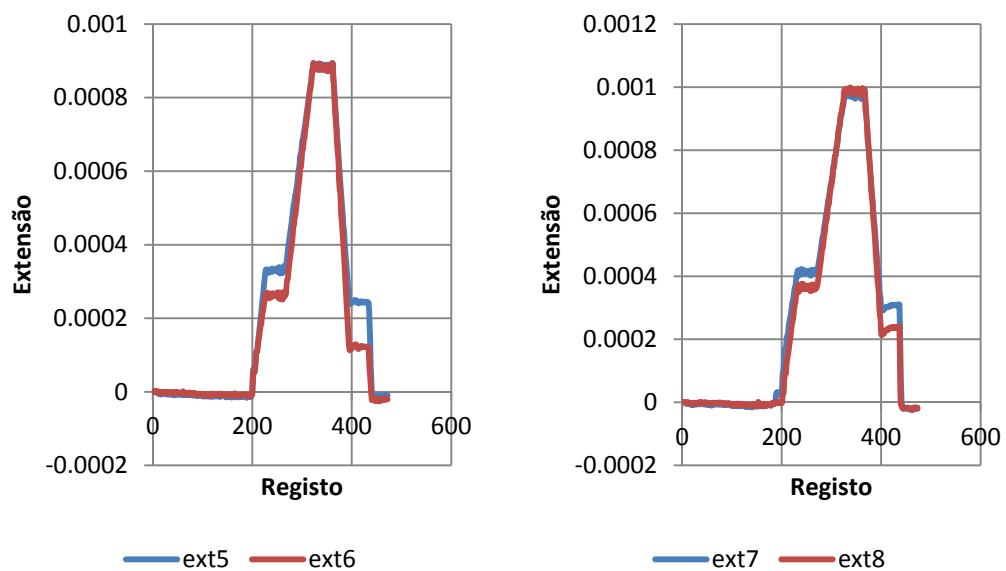


Fig.56 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento.
Da esquerda para a direita: Varão WSUP16mm e Varão WINF16mm

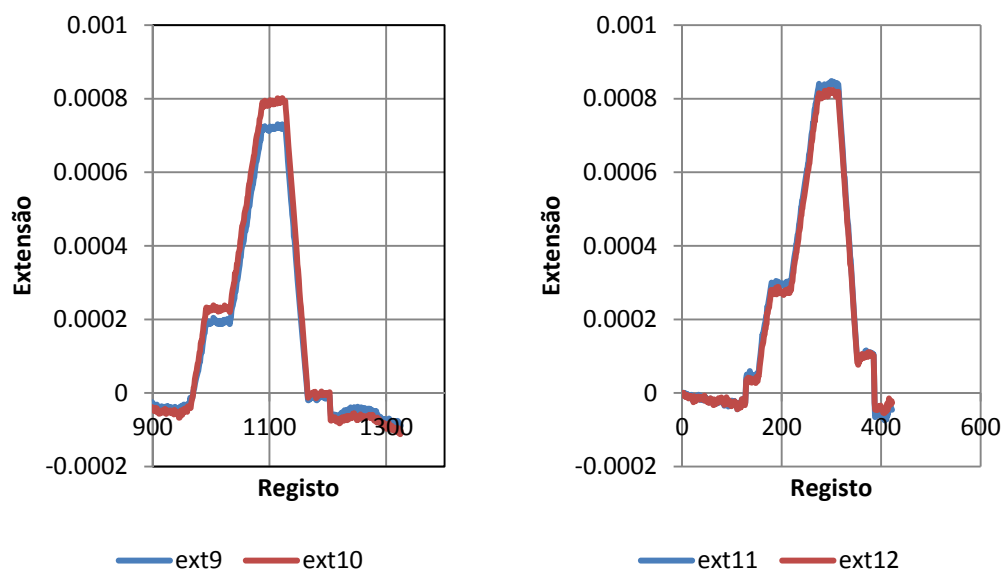


Fig.57 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento.
Da esquerda para a direita: Varão ESUP8mm e Varão EINF8mm

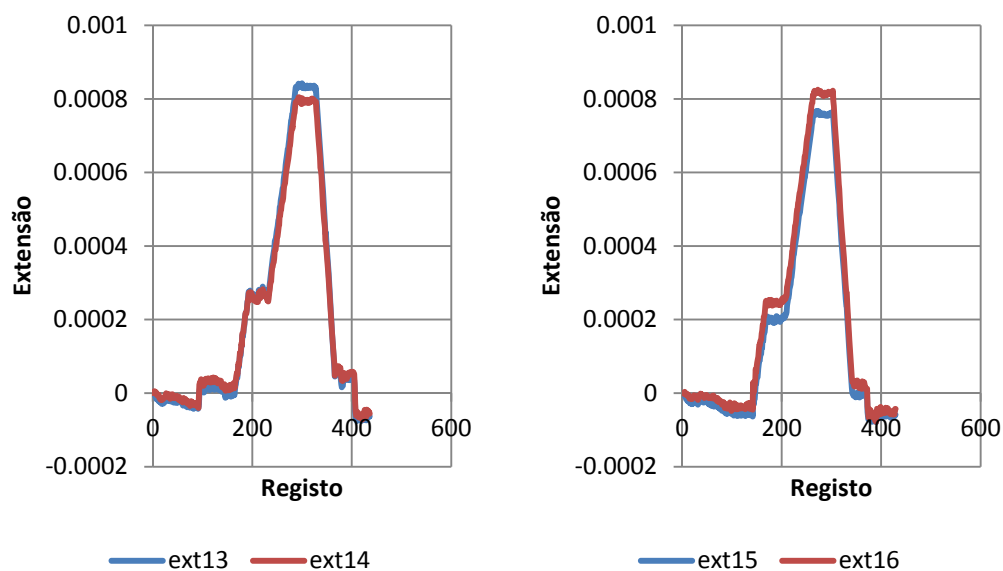


Fig.58 – Evolução da extensão lida nos varões de confinamento.
Da esquerda para a direita: Varão WSUP8mm e Varão WINF8mm

Anexo II – Calibração dos varões – leituras da célula resistiva

Neste anexo apresentam-se os gráficos relativos às forças medidas para obtenção dos fatores de calibração apresentados no subcapítulo 4.2.3.

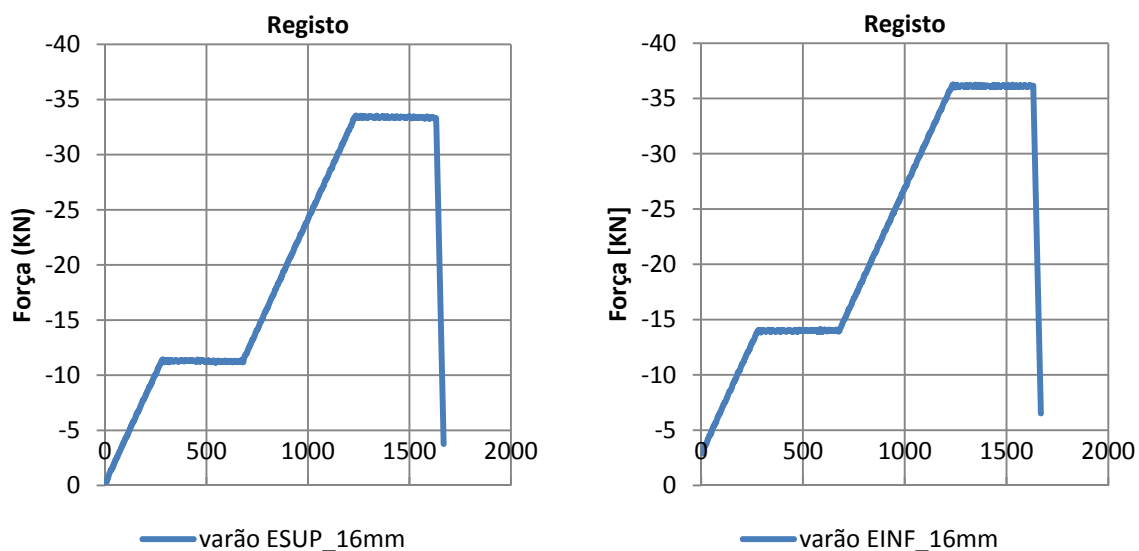


Fig.59 – Evolução da força lida durante o processo de calibração.
Da esquerda para a direita: Varão ESUP_16mm e Varão EINF_16mm

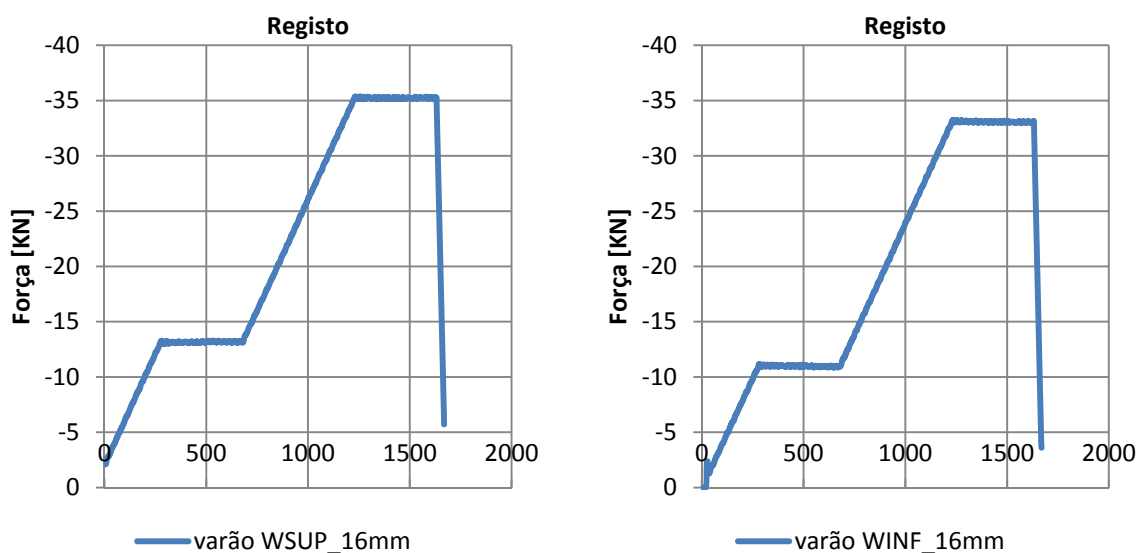


Fig.60 – Evolução da força lida durante o processo de calibração.
Da esquerda para a direita: Varão WSUP_16mm e Varão WINF_16mm

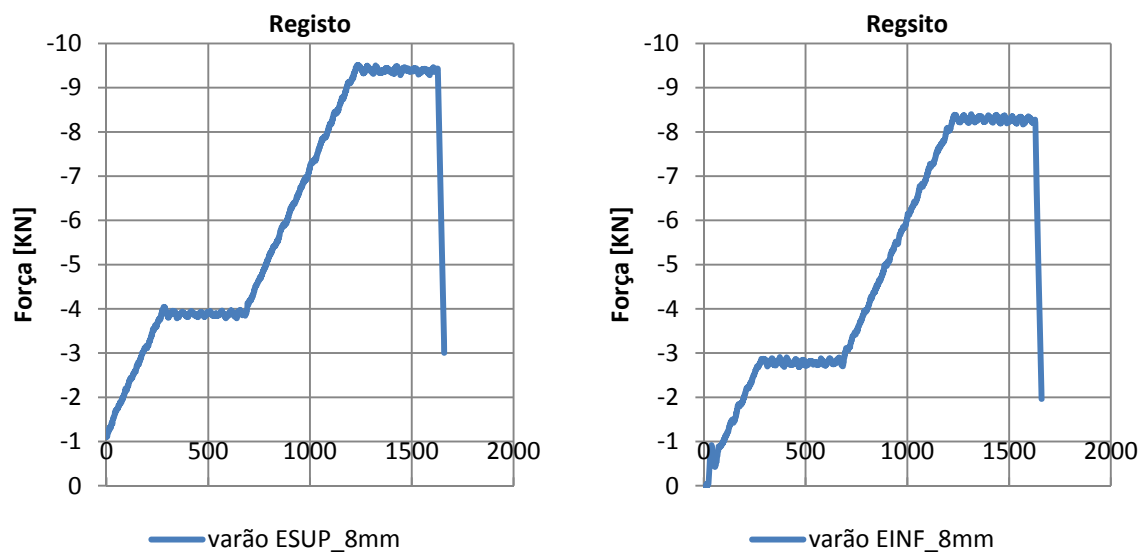


Fig.61 – Evolução da força lida durante o processo de calibração.
Da esquerda para a direita: Varão ESUP_8mm e Varão EINF_8mm

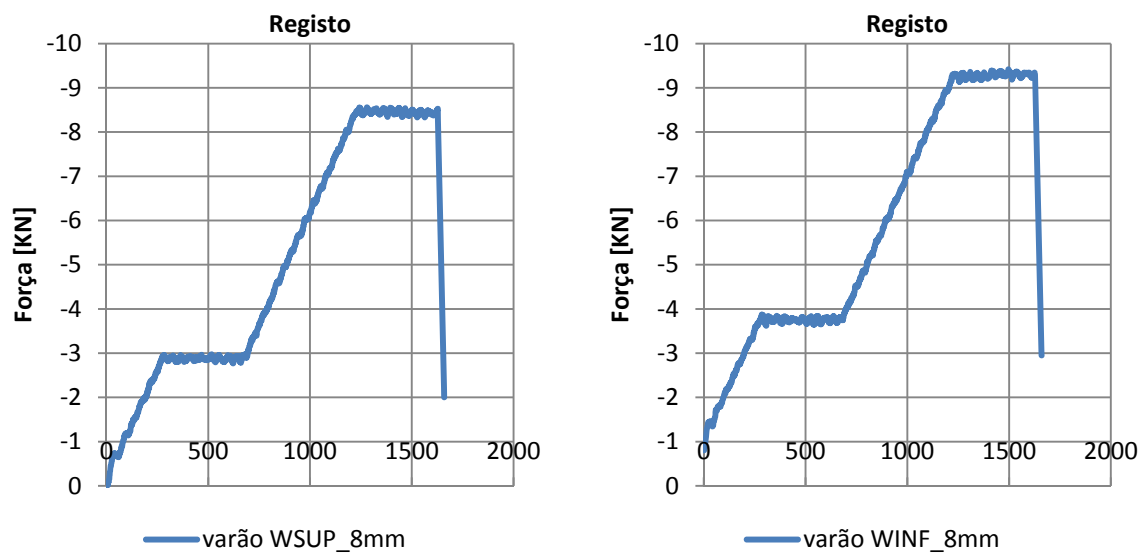


Fig.62 – Evolução da força lida durante o processo de calibração.
Da esquerda para a direita: Varão WSUP_8mm e Varão WINF_8mm

ANEXO III – Forças nos varões de confinamento

O cálculo da tensão normal durante os ensaios do tipo *push-off* é conseguido através da leitura da força nos varões de confinamento, apresentada nas Figuras 63 a 66. Somando as forças dos 4 varões e dividindo pela área do plano de corte obtém-se a referida tensão.

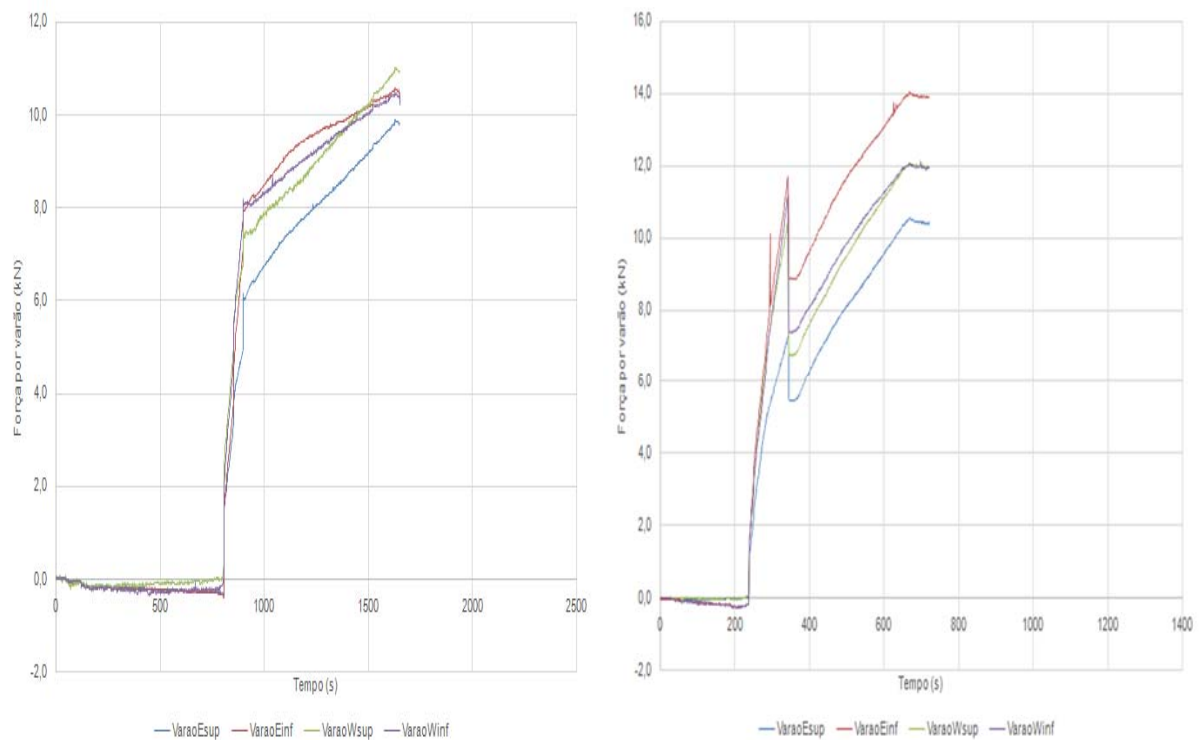


Fig.63 – Evolução da força lida nos varões de confinamento.
Da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2

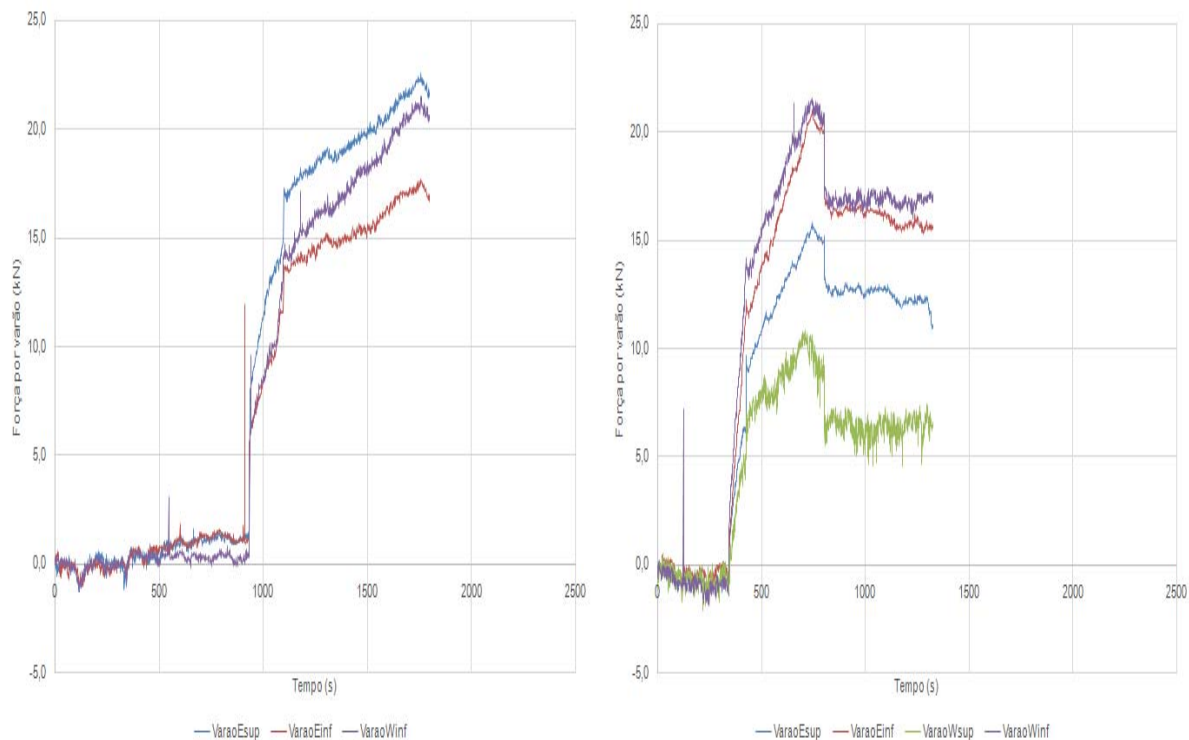


Fig.64 – Evolução da força lida nos varões de confinamento.

Da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2

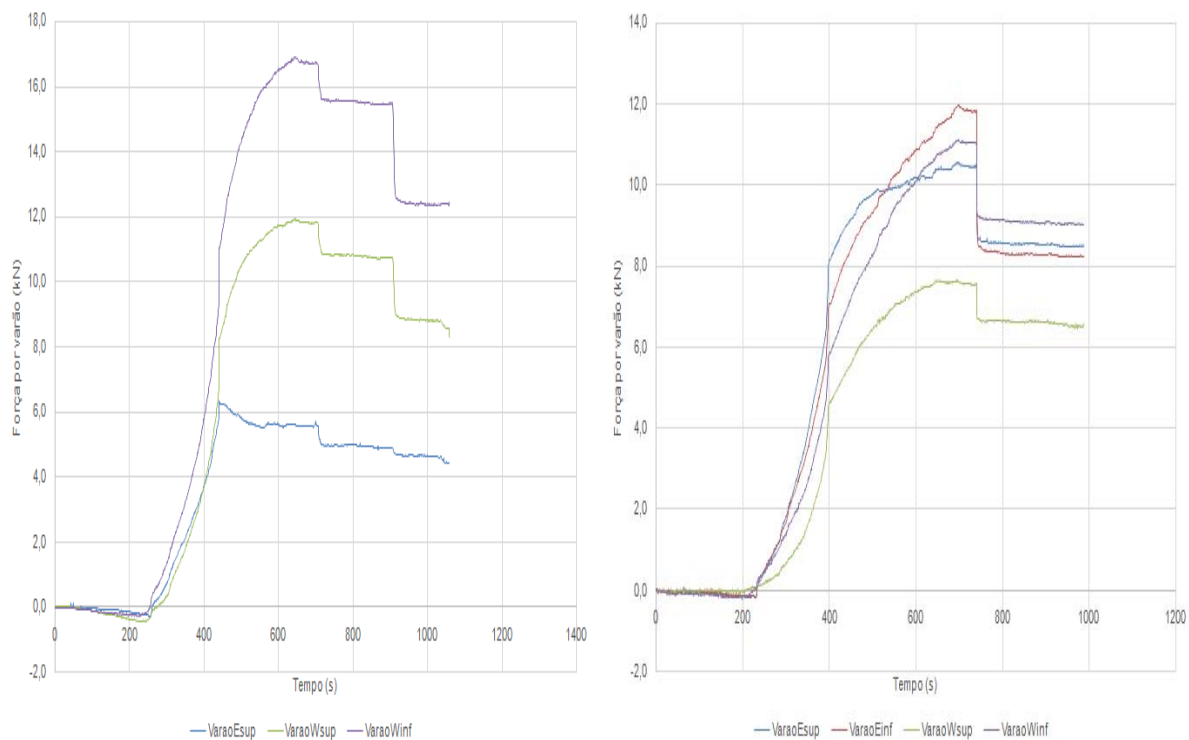


Fig.65 – Evolução da força lida nos varões de confinamento.

Da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2

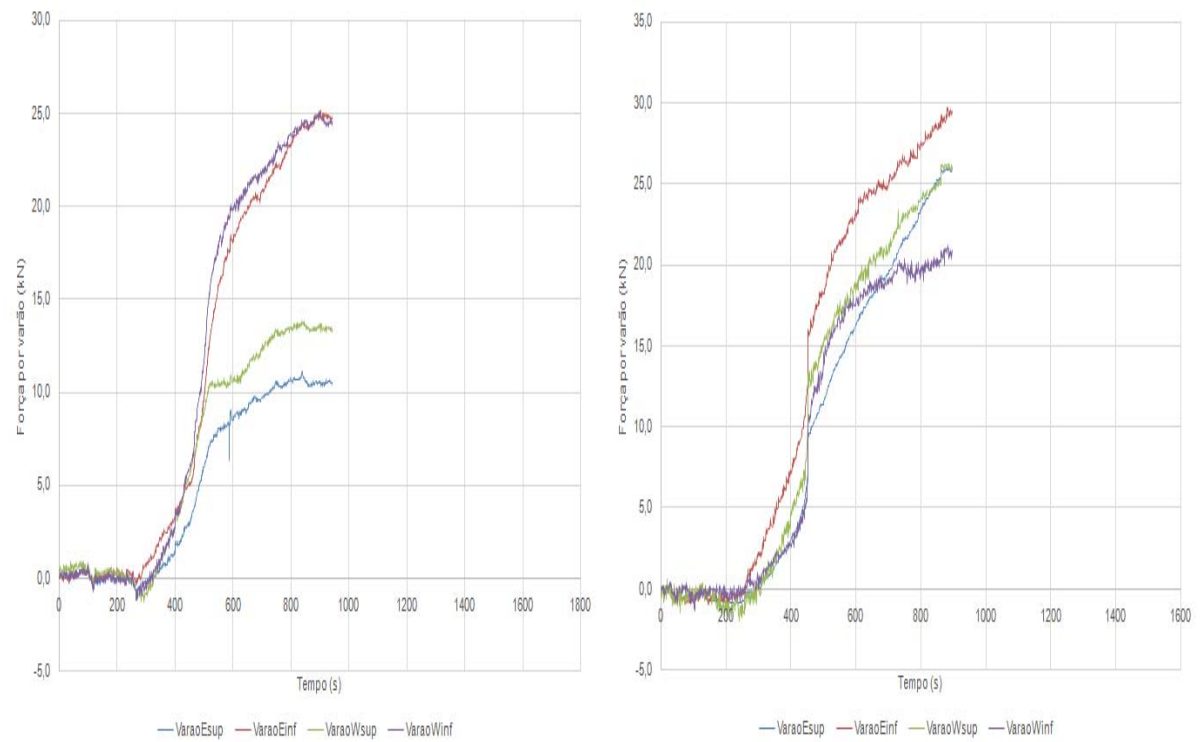


Fig.66 – Evolução da força lida nos varões de confinamento.
Da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2

ANEXO IV – Deslizamentos e aberturas medidas com os LVDT's

As Figuras 67 a 70 apresentam as aberturas de fenda medidas com os LVDT's ESUP, EINF, WSUP E WINF, assim como os deslizamentos medidos com os LVDT's Evert e Wvert.

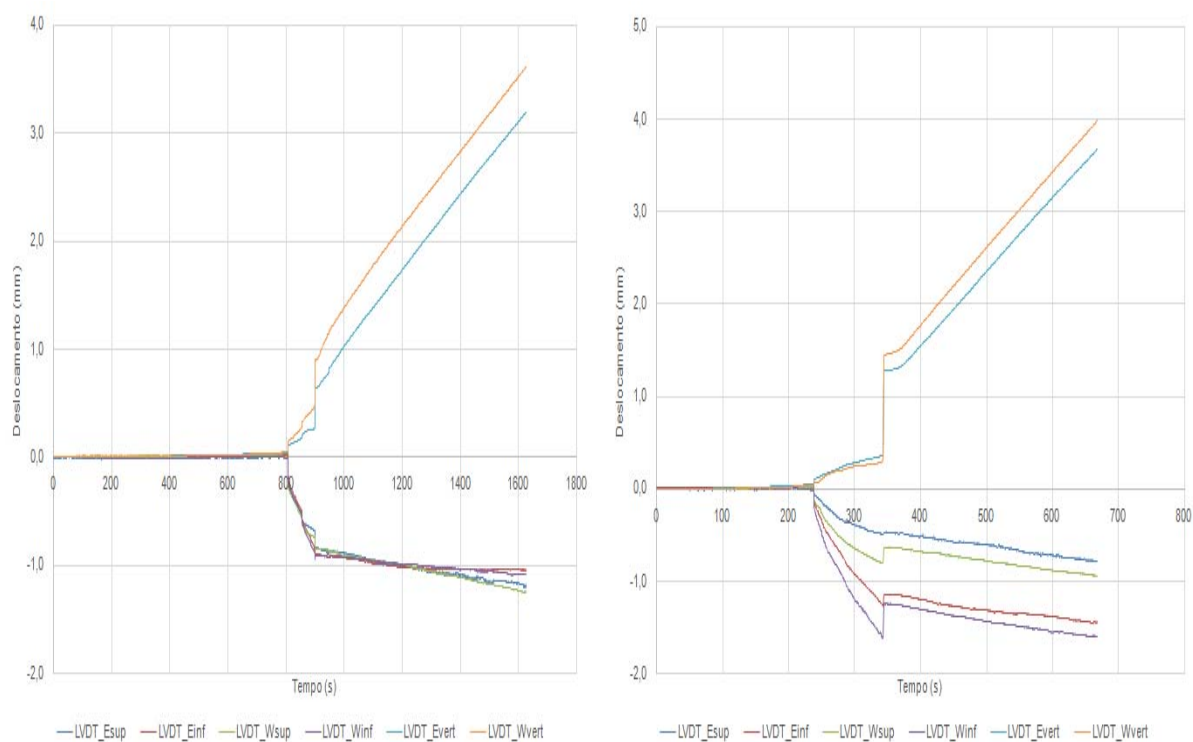


Fig.67 – Leitura dos LVDT's.
Da esquerda para a direita: 00C08#1 e 00C08#2

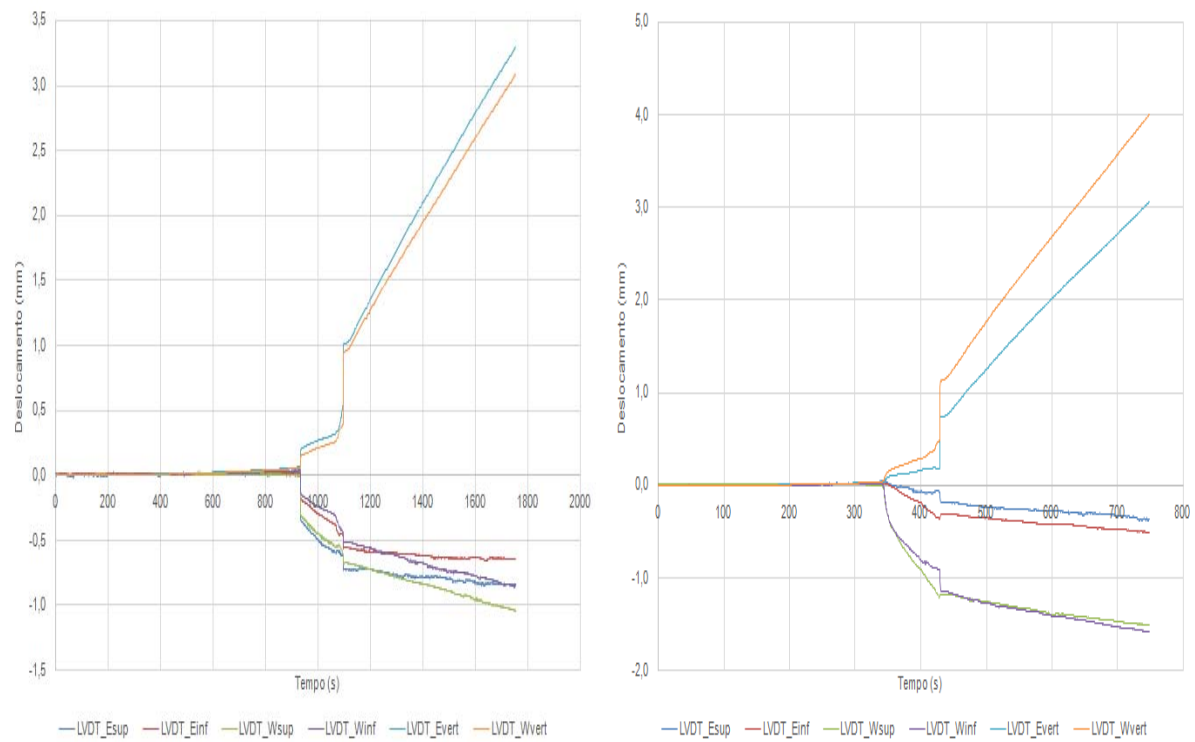


Fig.68 – Leitura dos LVDT's.
Da esquerda para a direita: 00C16#1 e 00C16#2

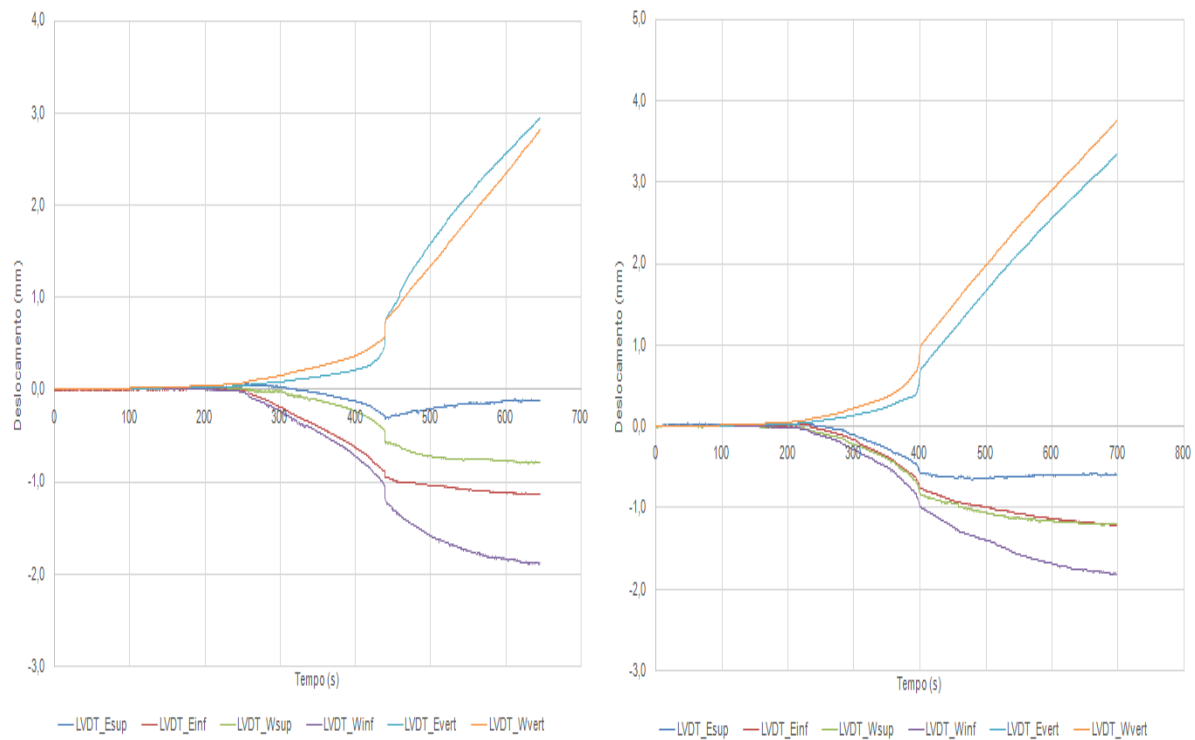


Fig.69 – Leitura dos LVDT's.
Da esquerda para a direita: 50C08#1 e 50C08#2

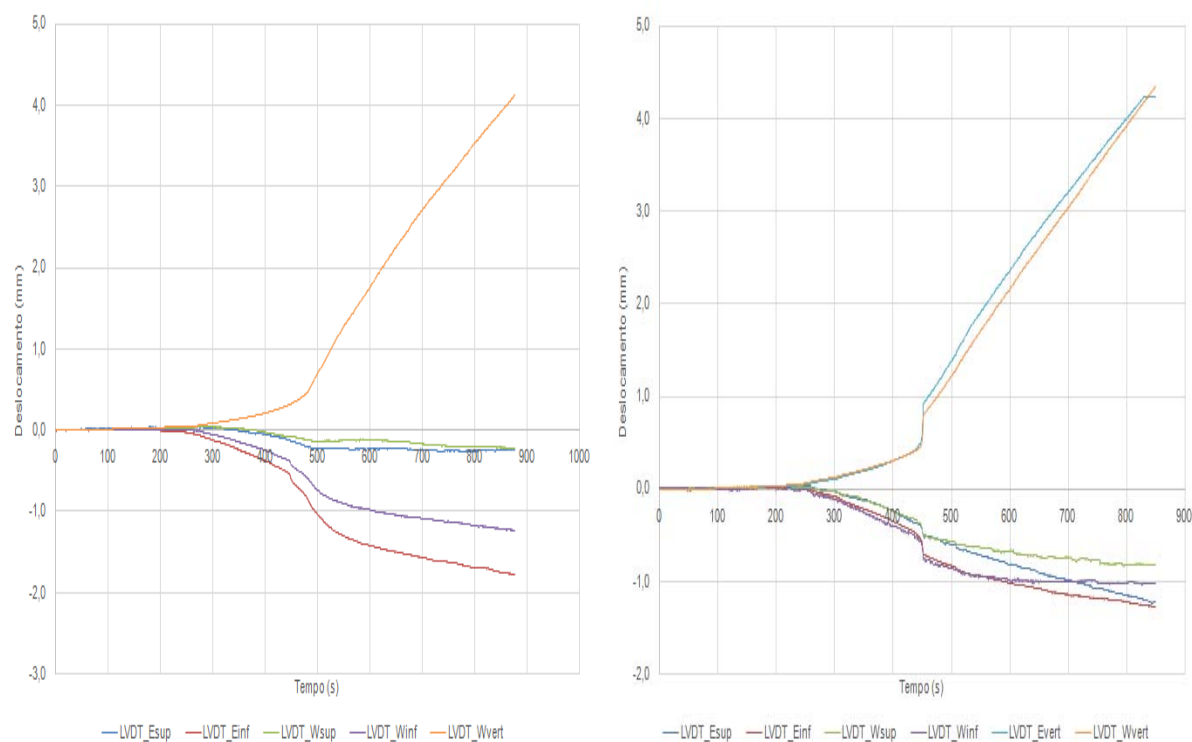


Fig.70 – Leitura dos LVDT's.
Da esquerda para a direita: 50C16#1 e 50C16#2