

# Comportamento à flexão de vigas de betão reforçado com fibras de aço

**MARIANA LIMA DA QUINTA PEREIRA DE SOUSA**

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

---

Orientador: Professor Doutor Afonso António de Serra Neves

---

Co-orientador: Professora Ana Maria Quintela da Silva Proença  
Corrêa de Queirós

OUTUBRO DE 2014

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto: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 +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto: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 - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

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.

À minha família

*He who knows all the answers has not been asked all the questions*

*Confucius*



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais pela educação, confiança e apoio ao longo da minha vida e sem os quais não teria chegado até aqui.

Ao meu orientador, Professor Afonso António de Serra Neves pela orientação neste trabalho e todo o tempo disponibilizado. De igual forma agradeço também à Professora Ana Maria Quintela da Silva Proença Corrêa de Queirós por ter aceitado o meu pedido de realizar uma tese sobre este assunto e ter acompanhado todo o processo de perto, pelos ensinamentos e partilha de experiências.

Ao apoio incansável do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC), nomeadamente às Engenheiras Patrícia e Dora, à Irene, ao Fernando, ao Paulo, ao Manuel, ao Gil, à Cecília, à Júlia e à Paula que sem a vossa ajuda não seria possível realizar tantas betonagens, provetes e ensaios. Ao José Gomes pelo apoio na correlação digital de imagens.

De forma sentida, aos meus colegas de curso pelos momentos vividos e ultrapassados nesta faculdade, na vida académica e pessoal. E em especial aos da opção de Materiais de Construção que partilharam comigo os momentos nesta última etapa no meu curso.

Aproveito ainda para referir o Eng. Erik Ulrix da BIU Internacional e a N.V. BEKAERT, S.A. pelo fornecimento das fibras, ao Eng. Steven Pouillon pela disponibilidade em fazer os ensaios no Concrete Laboratory da Bekaert e ao Sr. Pedro Valter da SECIL S.A. pelo fornecimento do cimento, à SORGILA-Sociedade de Argilas S.A. pela disponibilização das areias e à MC Bauchemie pelo adjuvante.



## RESUMO

O betão é um material com bastante aplicação na construção que apresenta grande deficiência a resistir aos esforços de tração. Para superar esse problema desenvolveram-se técnicas de reforço com colocação de armadura nas zonas de tracionadas e, mais recentemente, tem-se aplicado betão reforçado com fibras de aço (BRFA).

Neste trabalho o tema principal é o BRFA e a sua influência no comportamento de vigas. Este material é apontado como proporcionador de maior resistência e de controlo de fissuração nas estruturas.

A partir de provetes moldados para caracterizar o betão com fibras obtiveram-se os valores necessários à caracterização do betão.

São analisados três documentos existentes para o cálculo do BRFA (fib Model Code 2010, Rilem TC-162 e EHE 08) e calculados os resultados previsíveis de modo a serem comparados com os resultados obtidos de ensaios de vigas à flexão. Foram ensaiadas vigas com diferentes quantidades de fibras e diferentes soluções de armadura. Esses ensaios permitem também uma comparação da influência das quantidades de cada um dos componentes.

Os resultados obtidos permitiram avaliar qual das três vias em análise melhor se ajusta ao comportamento à flexão das vigas de betão reforçado com fibras.

**PALAVRAS-CHAVE** – Betão reforçado com fibras, fibras de aço, ensaios de caracterização de betão reforçado com fibras de aço (BRFA), resistência à flexão de vigas, regulamentos de BRFA



## **ABSTRACT**

Concrete is a much applied construction material that has serious deficiency in resisting to tensile stresses. To overcome this problem, some reinforcing techniques have been developed including reinforcement with steel rebars and, most recently, applications with steel fiber reinforced concrete (SFRC).

In this dissertation the main subject is the SFRC and its influence in beams behavior to flexure. This material is considered as a good reinforcement in terms of resistance and crack control in structures.

The results to characterize concrete were obtained through molded specimen tested in laboratory.

Three guidelines/regulations for BRFA design (fib Model Code 2010, Rilem TC-162 and EHE 08) are compared and calculations were obtained for each one, with intentions to be compared to experimental results. Beams with different composition of fibers and different reinforcement solution were tested. The results allow to compare the influence of different compositions.

The results allowed to ascertain which guideline(s)/regulation(s) best characterizes the flexural behavior of fiber reinforced concrete beams.

**KEYWORDS** – Fiber reinforced concrete, steel fibers, steel fiber reinforced concrete (SFRC) characterization tests, flexural resistance in beams, SFRC guidelines



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. TEMÁTICA .....	1
1.2. OBJETIVOS, ESTRATÉGIA E ORGANIZAÇÃO .....	2
<b>2 BETÃO, FIBRAS E BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS .....</b>	<b>3</b>
2.1. BETÃO .....	3
2.2. FIBRAS .....	3
2.2.1. TIPOS DE FIBRAS.....	4
2.2.1.1. Fibras de aço.....	4
2.2.2. MECANISMOS ENTRE BETÃO E FIBRAS .....	8
<b>2.3. AS VANTAGENS DAS FIBRAS NA DURABILIDADE DO BETÃO .....</b>	<b>9</b>
2.3.1. PROCESSOS FÍSICOS DE DEGRADAÇÃO DO BETÃO.....	9
2.3.2. PROCESSOS QUÍMICOS DE DEGRADAÇÃO DO BETÃO .....	9
2.3.3. ENSAIOS NO BETÃO COM FIBRAS .....	10
2.3.3.1. No betão fresco .....	10
2.3.3.2. No betão endurecido .....	10
2.4. APLICAÇÃO DAS FIBRAS.....	11
<b>3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS: CARACTERIZAÇÃO .....</b>	<b>13</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	13
3.2. COMPOSIÇÃO DO BETÃO .....	14
3.2.1. MATERIAIS UTILIZADOS NAS COMPOSIÇÕES .....	14
3.3. AMASSADURA, MOLDAGEM E CURA .....	17
3.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO .....	18
3.4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	18
3.4.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	19
3.4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO .....	20
3.4.4. RESISTÊNCIAS RESIDUAIS À TRAÇÃO POR FLEXÃO E LIMITE DE PROPORCIONALIDADE .....	20
3.5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARMADURAS.....	24
<b>4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS: ROTURA DE VIGAS POR FLEXÃO... 27</b>	

<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2. VIGAS E ESQUEMA DE ENSAIO.....</b>	<b>28</b>
<b>4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS.....</b>	<b>30</b>
4.3.1. VIGAS 1A (3 $\phi$ 6; 0 KG/M <sup>3</sup> ) .....	32
4.3.2. VIGAS 1B (3 $\phi$ 6; 20 KG/M <sup>3</sup> ) .....	33
4.3.3. VIGAS 1C (3 $\phi$ 6; 40 KG/M <sup>3</sup> ) .....	34
4.3.4. VIGAS 1D (3 $\phi$ 6; 60 KG/M <sup>3</sup> ) .....	35
4.3.5. VIGAS 2D (2 $\phi$ 8; 60 KG/M <sup>3</sup> ) .....	36
4.3.6. VIGAS 3D (2 $\phi$ 10; 60 KG/M <sup>3</sup> ) .....	37
4.3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS .....	37
<b>5 REGULAMENTOS/RECOMENDAÇÕES FIB MODEL CODE 2010, RILEM TC-162 E EHE 08 E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2. RILEM TC 162-TDF .....</b>	<b>51</b>
5.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	51
5.2.2. DIMENSIONAMENTO EM ELU.....	52
<b>5.3. FIB MODEL CODE 2010 .....</b>	<b>54</b>
5.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	54
<b>5.4. EHE 08.....</b>	<b>55</b>
5.4.1. DIMENSIONAMENTO EM ESTADO LIMITE ÚLTIMO.....	55
5.4.1.1. Diagrama retangular.....	55
5.4.1.2. Diagrama multilinear.....	56
5.4.2. MÉTODO DE CÁLCULO .....	58
<b>5.5. REVISÃO DOS VALORES DOS MOMENTOS RESISTENTES.....</b>	<b>58</b>
<b>6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Distribuição de tensões de tração no betão simples. Adaptado de Vitt (2011) .....	3
Fig. 2.2 – Tipos de fibras de aço existentes (forma e secção) .....	4
Fig. 2.3 – Diferentes tipos de fibras metálicas existentes .....	6
Fig. 2.4 – Influência das extremidades das fibras conforme a resistência do betão. Adaptado de Vitt (2011).....	7
Fig. 2.5 – Efeito da resistência do betão e da resistência das fibras na largura de fendas. Adaptado de Vitt (2011) .....	8
Fig. 2.6 – Pontes de tensões nas fibras de aço no betão. Adaptado de Vitt (2011).....	9
Fig. 2.7 – Ensaio de <i>slump</i> (abaixamento).....	10
Fig. 3.1 – Amostras de materiais utilizados nas amassaduras do betão.....	16
Fig. 3.2 – Amassadura e moldagem .....	17
Fig. 3.3 - Vibração realizada em prismas (a) e em vigas (b) .....	17
Fig. 3.4 - Provetes cobertos com filme e a identificação.....	18
Fig. 3.5 - Diagrama genérico força-CMOD (EN14651:2007).....	22
Fig. 3.6 - Diagrama para a composição B (20 kg/m <sup>3</sup> ) .....	22
Fig. 3.7 - Diagrama para a composição C (40 kg/m <sup>3</sup> ) .....	23
Fig. 3.8 - Diagrama para a composição D (60 kg/m <sup>3</sup> ) .....	23
Fig. 3.9 - Diagrama das resistências residuais à tração por flexão ( $f_{Ri,m}$ ) e limite de proporcionalidade ( $f_{L,m}$ )(B:20kg/m <sup>3</sup> , C:40kg/m <sup>3</sup> e D:60kg/m <sup>3</sup> ) .....	24
Fig. 4.1 – Esquema de montagem das vigas com 3 $\phi$ 6 .....	28
Fig. 4.2 – Esquema de montagem das vigas com 2 $\phi$ 8 .....	28
Fig. 4.3 – Esquema de montagem das vigas com 2 $\phi$ 10 .....	28
Fig. 4.4 - Espaçadores .....	29
Fig. 4.5 – Esquema de aplicação das forças e dimensões (mm) .....	29
Fig. 4.6 - Esquema de montagem da viga e posição do atuador .....	30
Fig. 4.7 - Diagrama momento-deslocamento das vigas sem fibras e 3 $\phi$ 6.....	32
Fig. 4.8 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 20 kg/m <sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6 .....	33
Fig. 4.9 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 40 kg/m <sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6 .....	34
Fig. 4.10 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 60 kg/m <sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6 .....	35
Fig. 4.11 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 60 kg/m <sup>3</sup> e 2 $\phi$ 8 .....	36
Fig. 4.12 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 60 kg/m <sup>3</sup> e 2 $\phi$ 10 .....	37
Fig. 4.13 - Comparação de resultados com a mesma quantidade de fibras e diferente armadura (1D-3 $\phi$ 6, 2D-2 $\phi$ 8, 3D-2 $\phi$ 10) .....	39
Fig. 4.14 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 1A .....	40
Fig. 4.15 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 1B .....	41
Fig. 4.16 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 1C.....	42
Fig. 4.17 – Fotos do modo de rotura das vigas 1D .....	43
Fig. 4.18 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 2D.....	44
Fig. 4.19 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 3D.....	45
Fig. 4.20 – Diagrama momento-rotação relativa numa viga (3 $\phi$ 6; 20 kg/m <sup>3</sup> ) .....	47
Fig. 4.21 - Diagrama momento-rotação relativa em vigas (3 $\phi$ 6; 40 kg/m <sup>3</sup> ).....	47
Fig. 4.22 - Diagrama momento-rotação relativa em vigas (3 $\phi$ 6; 60 kg/m <sup>3</sup> ).....	48
Fig. 4.23 - Diagrama momento-rotação relativa em vigas (2 $\phi$ 8; 60 kg/m <sup>3</sup> ).....	48
Fig. 4.24 - Diagrama momento-rotação relativa em vigas (2 $\phi$ 10; 60 kg/m <sup>3</sup> ).....	49
Fig. 5.1 – Diagrama de cálculo de tensões. Fonte: Rilem TC 162-TDF .....	52
Fig. 5.2 - Diagrama de extensões ( $\epsilon$ ) e de tensões ( $\sigma$ ). Fonte: Rilem TC 162-TDF .....	54

Fig. 5.3 - Diagramas de cálculo para o estado limite último segundo o Model Code a) diagrama de extensões; b) diagrama de tensões; c) diagrama de tensões simplificado .....	54
Fig. 5.4 – Diagrama de tensões simplificado. Adaptado de Model Code (2010) .....	55
Fig. 5.5 – Diagrama retangular para cálculo de tensões de tração. Fonte: EHE 08.....	56
Fig. 5.6 – Diagrama de cálculo. Fonte: EHE 08 .....	57
Fig. 5.7 – Diagrama de tensões de compressão. Adaptado de Model Code (x=profundidade do eixo neutro) .....	58

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ensaios de caracterização das resistências do betão endurecido .....	10
Tabela 2.2 – Razões para aplicação de BRFA em diversos tipos de estruturas. Adaptado de Ferreira (2008).....	11
Tabela 3.1 – Quantificação das vigas moldadas por quantidade de fibras/tipo de armadura .....	13
Tabela 3.2 - Ensaios efetuados para caracterização do betão endurecido.....	13
Tabela 3.3 – Identificação das composições por quantidade de fibras .....	14
Tabela 3.4 - Características das fibras usadas.....	14
Tabela 3.5 - Materiais usados na composição do betão .....	15
Tabela 3.6 - Dimensões dos provetes: cubos e prismas .....	18
Tabela 3.7 - Dimensões dos provetes: cilindros .....	18
Tabela 3.8 - Resistência à compressão aos 7 dias .....	19
Tabela 3.9 - Resistência à compressão aos 35 dias .....	19
Tabela 3.10 - Valores do módulo de elasticidade obtidos no ensaio, segundo a norma DIN 1048-5: 2011 .....	20
Tabela 3.11 - Resistência à tração por flexão.....	20
Tabela 3.12 - Valores do limite de proporcionalidade e das resistências residuais à tração por flexão .....	21
Tabela 3.13 – Valores das resistências residuais à tração por flexão.....	24
Tabela 3.14 – Valores das tensões de cedência e rotura dos varões de aço .....	25
Tabela 4.1 - Identificação das vigas conforme a quantidade de fibras e o tipo de armadura .....	27
Tabela 4.2 - Valores calculados dos momentos das vigas sem fibras .....	32
Tabela 4.3 - Valores calculados dos momentos das vigas com 20 kg/m <sup>3</sup> e 3φ6.....	33
Tabela 4.4 - Valores calculados dos momentos das vigas com 40 kg/m <sup>3</sup> e 3φ6.....	34
Tabela 4.5 - Valores calculados dos momentos das vigas com 60 kg/m <sup>3</sup> e 3φ6.....	35
Tabela 4.6 - Valores calculados dos momentos das vigas com 60 kg/m <sup>3</sup> e 2φ8.....	36
Tabela 4.7 – Valores calculados dos momentos das vigas com 60 kg/m <sup>3</sup> e 2φ10.....	37
Tabela 4.8 - Momentos fletores de fendilhação (valores médios) .....	38
Tabela 4.9 - Momentos fletores máximos (valores médios) .....	38
Tabela 4.10 – Valores calculados dos momentos de fendilhação (1ª fenda) para vigas com fibras (para diferentes composições) e sem armadura .....	46
Tabela 5.1 – Relação entre momentos obtidos por ensaio e por cálculo .....	59
Tabela 5.2 - Benefício da adição e aumento da quantidade de fibras.....	60



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$b$  – largura da viga

BRFA – Betão reforçado com fibras de aço

CMOD – Crack mouth opening displacement

$d$  – Altura útil

$E$  – Módulo de elasticidade

$E_c$  – Módulo de elasticidade do betão

EC0 – Eurocódigo 0

$F$  – Força aplicada

$f_{c,cilindro}$  – Resistência à compressão do betão nos ensaios com cilindros

$f_{c,cubo}$  - Resistência à compressão do betão nos ensaios com cubos

$f_{ctm,fl}$  – Resistência média do betão à tração por flexão (EN 14651:2007)

$f_L$  – Limite de proporcionalidade

$f_{Lm}$  – Limite de proporcionalidade médio

$f_{R1}$  – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 0,47 mm

$f_{R2}$  – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 1,32 mm

$f_{R3}$  – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 2,17 mm

$f_{R4}$  – Resistência residual à tração correspondente a uma flecha central de 3,02 mm

$k_h$  – Fator de forma

$M$  – Momento fletor atuante

$M_{cr}$  – Momento fletor crítico

$M_{max}$  – Momento fletor máximo

$R_{m,nom}$  – Resistência à tração das fibras

C.V. – Coeficiente de variação

D.P. – Desvio padrão







# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. TEMÁTICA

O betão, como um dos materiais mais utilizados no mundo e com as características pouco *eco-friendly* que estão associadas ao fabrico e obtenção dos seus componentes, deve ser utilizado com cada vez mais consciência e preocupação ambiental e económica. Para tal se conseguir é necessário ter uma elevada consideração pela duração das estruturas, tanto mantendo as existentes em condições de utilização como projetar as novas para um longo período de vida útil.

Apesar das investigações e estudos no assunto, ainda não se consegue manter estruturas por uma vida muito longa - hoje em dia são projetadas para uma vida útil de 50 ou 100 anos, dependendo da função (EC0).

Além da importância da resistência estrutural na manutenção da integridade de um elemento de betão armado, há também a necessidade de este manter um aspeto agradável e adequado ao meio em que se insere. Com vista a regularizar estes parâmetros essenciais à durabilidade de uma estrutura edificada, existem regulamentos com regras e métodos de cálculo a respeitar em projeto.

Um dos grandes problemas das estruturas de vãos de comprimento elevado é a flexão. As ações aplicadas desencadeiam tensões para as quais o betão tem mau comportamento, e só com a associação de armadura longitudinal é possível obter resistência estrutural. Outra das consequências é a fendilhação que deve ser limitada a um valor máximo de abertura de fendas. As armaduras, longitudinal e transversal, permitem controlar tal fendilhação.

A introdução de fibras na matriz cimentícia do betão altera o comportamento dos mecanismos resistentes, tornando-os mais complexos, no caso de uma viga de betão. Intervêm vários parâmetros como a dosagem de fibras, as suas características físicas como comprimento, diâmetro ou tipo de ancoragem e características mecânicas como tensão de rotura ou ductilidade. A influência que estas características têm na atuação conjunta com o betão à flexão, pode ser quantificada por meio de ensaios que determinem a resistência residual à tração de um elemento de betão reforçado com fibras (BRFA) sujeito a flexão.

Através de regulamentos, códigos ou recomendações é possível fazer o dimensionamento de BRFA, através de formulações associadas aos valores das resistências residuais à tração.

A contribuição das fibras no comportamento à flexão ainda é um tema muito recente pelo que a regulamentação existente ainda é alvo de várias atualizações e ajustes. Porém, o grande número de soluções existentes no mercado e a evolução do seu desempenho tem motivado os fabricantes a inovar e otimizar as fibras para diferentes situações de projeto.

Para se utilizar com maior confiança e explorar o potencial do BRFA em vários tipos de aplicações, é essencial ter regulamentos com modelos de cálculo fiáveis e adequados aos tipos de fibras existentes.

## 1.2. OBJETIVOS, ESTRATÉGIA E ORGANIZAÇÃO

O objetivo deste trabalho de investigação é a comparação dos resultados obtidos a partir das expressões de cálculo constantes de regulamentos ou recomendações existentes para dimensionamento com BRFA, nomeadamente *Rilem TC 162-TDF*, *FIB Model Code 2010* e *EHE 08*, com os resultados obtidos em laboratório por ensaio à flexão, nas mesmas condições, de 18 vigas de betão, com o mesmo comprimento e a mesma secção, com diferentes tipos de armadura convencional associada a dosagens diferentes de fibras de aço.

A armadura convencional considerada foi de  $3\phi 6$  ou  $2\phi 8$  ou  $2\phi 10$  e a dosagem de fibras Dramix 5D utilizada foi de 0 ou 20 ou 40 ou  $60 \text{ kg/m}^3$  de betão.

Identificam-se essencialmente três partes neste documento:

Uma primeira parte introdutória (presente capítulo) na qual se apresenta o interesse e âmbito do trabalho e os objetivos e organização do mesmo.

A segunda parte, capítulo 2, tem o intuito de apresentar os elementos estudados (betão e fibras, fundamentalmente), sendo um resumo do estado-da-arte. Exemplificam-se tipos de fibras, funcionamento de BRFA, vantagens da aplicação de fibras e aplicações de BRFA.

A terceira parte engloba os capítulos 3, 4, 5 e 6. Aqui é abordado todo o processo desde a obtenção do betão, dos provetes e das vigas para ensaio até ao objetivo principal de comparação dos resultados reais com os regulamentos existentes propostos. No capítulo 3 são descritos os materiais constituintes do betão dos provetes e das vigas moldados bem como dos ensaios realizados ao betão endurecido. Apresentam-se, ainda neste capítulo, os resultados desses ensaios.

No capítulo 4 apresentam-se os ensaios que serviram de base a este trabalho, os resultados dos ensaios de flexão dos provetes prismáticos e os relativos a cada viga.

Os regulamentos e recomendações são abordados e expostos no capítulo 5, onde é apresentado o método de cálculo seguido. Ainda neste capítulo apresentam-se os valores obtidos através de cada regulamento e a sua comparação com os resultados experimentais.

O capítulo 6 e último, apresenta as principais conclusões dos trabalhos desenvolvidos. Acrescentam-se ainda sugestões para futuros desenvolvimentos do tema aqui abordado, mas melhorando e/ou tratando outros aspetos.

# 2

## BETÃO, FIBRAS E BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS

### 2.1. BETÃO

O betão é um material composto resultante da mistura de cimento, água, agregado fino e grosso e eventualmente adjuvantes e adições, sendo posteriormente submetido à amassadura. Pretende-se que tenha boa trabalhabilidade, isto é, apresente facilidade de colocação e compactação.

O betão apresenta resistência à tração muito baixa em relação à resistência à compressão, e pequena capacidade de deformação (Fernandes, N.A.G., 2012).

Por ter fraca resistência à tração, o betão quando exposto a este tipo de solicitação tem tendência para fissurar. No betão simples uma fissura irá proporcionar uma barreira à propagação de tensões de tração, representadas simplificadaamente pelas linhas de tensão (fig. 2.1). Esse desvio das linhas de tensão irá provocar uma concentração de tensões nas extremidades da fissura. Por cada ciclo há uma pequena propagação das microfissuras e, conseqüentemente um aumento progressivo na concentração de tensões na sua extremidade até que ocorra a rotura completa do material. A partir do momento em que a fissura atinge um comprimento crítico ocorre a rotura abrupta do material, caracterizando um comportamento tipicamente frágil, ou seja, uma rotura sem aviso. Não se pode assim contar com nenhuma capacidade residual à tração do betão fissurado (Figueiredo, A.D.d., 2011).

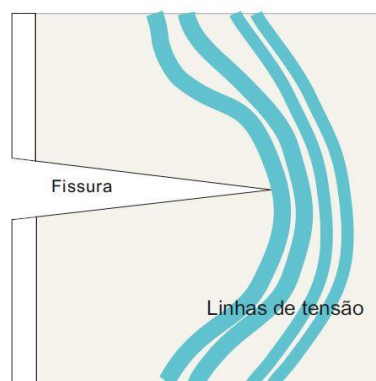


Fig. 2.1 - Distribuição de tensões de tração no betão simples. Adaptado de Vitt (2011)

### 2.2. FIBRAS

O uso das fibras como reforço de materiais frágeis já tem sido feito desde o tempo dos egípcios, que adicionavam palha e crina de cavalo ao barro para fazer tijolos. Encontra-se também descrito que chineses e japoneses usavam esteiras de palha para reforçar a sua construção habitacional. (Li, V.C., 2002)

O desenvolvimento do betão reforçado com fibras de aço começou por volta do início dos anos 60 e as fibras poliméricas começaram a ter um uso comercial em finais dos anos 70. O uso de fibras de vidro teve um grande crescimento nos anos 80 e as fibras de carbono atraíram grande interesse de aplicação no início da década de 90 (Li, V.C., 2002).

### 2.2.1. TIPOS DE FIBRAS

Existem atualmente diferentes tipos de fibras conforme o material, formato, comprimento e a resistência.

As fibras podem ser classificadas quanto à sua origem como sendo naturais (orgânicas e inorgânicas) e artificiais. São exemplos de fibras as naturais orgânicas: a celulose, o sisal, o bambu e a juta. O asbesto (ou amianto), a wollastonite (silicato de cálcio) e a lã de rocha são exemplos de fibras inorgânicas. Como exemplos de fibras artificiais pode indicar-se: o aço, o vidro e as sintéticas (acrílicas, nylon, poliéster) (Naaman, A.E., 2003).

As fibras são elementos descontínuos cujo comprimento é bem maior que a dimensão da sua secção transversal (Figueiredo, A.D.d., 2011).

No âmbito deste trabalho serão analisadas as fibras de aço Dramix® 5D da Bekaert, S.A..

#### 2.2.1.1. Fibras de aço

A introdução das fibras de aço no betão conduz à alteração das propriedades no regime pós-elástico da deformação dos materiais. Estas alterações podem ser mais ou menos consideráveis, dependendo dos vários fatores intervenientes, como é o caso da resistência da matriz, o tipo de fibra, a ductilidade do aço da fibra, a forma da fibra, resistência à tração da fibra, a quantidade e orientação das fibras, bem como com a dimensão máxima do agregado (Ulrix, E. and Ferreira, N., 2011). Outro fator importante é a composição e resistência do betão.

No que diz respeito à forma, as fibras podem apresentar superfície lisa, rugosa, indentada, ondulada ou torcida e as extremidades serem em forma de gancho, pá, botão ou outro tipo de ancoragem (fig. 2.2). Este parâmetro tem forte influência na ligação fibra-matriz. As formas descritas têm como objetivo aumentar a aderência (Naaman, A.E., 2003).

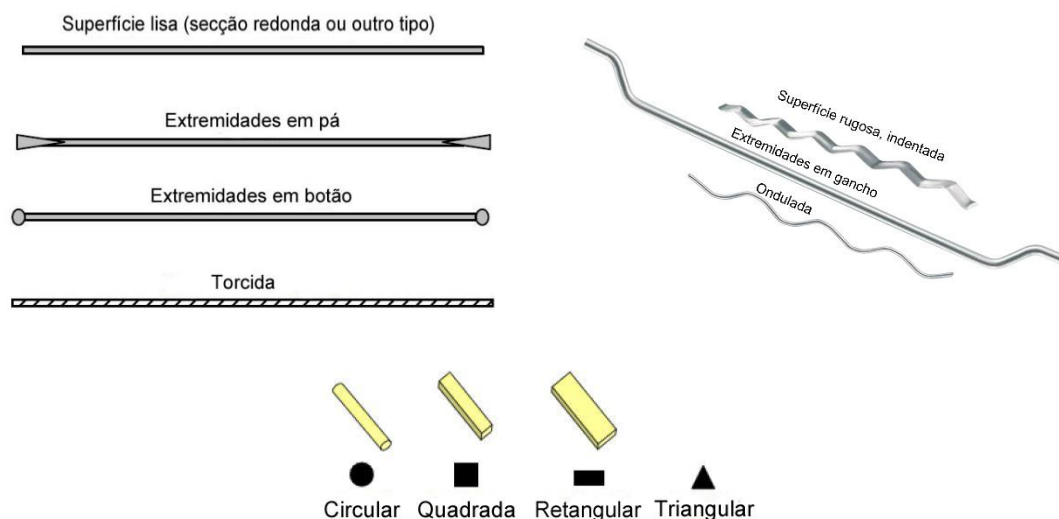


Fig. 2.2 – Tipos de fibras de aço existentes (forma e secção)

Nas fibras com extremidades em gancho a resistência à flexão dos ganchos induz uma pressão local na matriz cimentícia que faz aumentar as forças de fricção e consequentemente a resistência ao arrancamento da fibra até o gancho se endireitar. Nas fibras torcidas a resistência à torção induz uma pressão na matriz ao longo da fibra que aumenta a resistência desta ao deslizamento relativo no betão (Wille, K., 2012).

No que diz respeito à secção das fibras, pode encontrar-se a forma circular, triangular, retangular, poligonal, quadrada ou adiamantada. Este parâmetro tem grande influência no mecanismo solicitado entre a fibra e o betão (Naaman, A.E., 2003).

Quanto ao comprimento, existem vários comprimentos conforme o tipo de aplicação pretendida, geralmente variando entre 25 e 60 mm.

As fibras são ainda caracterizadas pelas dimensões da secção transversal. Por exemplo, para as fibras de secção circular existem vários diâmetros disponíveis, variando entre 0,3 e 0,9 mm, dependendo da forma.

Para além destas características geométricas, uma outra que se considera (estando incluída nas fichas técnicas das fibras) é a esbelteza. Esta é a relação entre comprimento e diâmetro ( $l/d$ ) e quanto maior este valor, mais favorável será a geometria da fibra. Quanto maior o comprimento melhor será a ancoragem e quanto menor o diâmetro, maior volume de fibras se pode incluir, aumentando a quantidade por volume de betão.

As principais propriedades mecânicas das fibras são:

- Resistência
- Ductilidade
- Rigidez

As propriedades mecânicas das fibras determinam a sua aplicabilidade conforme o tipo de betão, solicitações a que a estrutura vai estar sujeita ou a função que irão desempenhar.

No desenvolvimento deste trabalho foram usadas fibras de aço.

Existe uma grande variedade das características do aço das fibras; por exemplo, nas fibras Dramix® existem 3 variedades: as 3D, 4D e 5D. Todas têm diferentes aplicações sendo as duas primeiras as mais adequadas a betões de resistência normal enquanto as fibras 5D são as mais recomendadas para betões de mais alta resistência (pelo menos 60 MPa de  $f_{ck}$ ).

As fibras de aço podem ser divididas em 5 grupos correspondentes ao processo de fabrico, de acordo com a NP EN 14889-1:2006:

- Fio de aço estirado a frio,
- Chapa cortada,
- Fusão
- Fio de aço estirado a frio por aplainamento;
- Fresagem a partir de blocos.

As fibras de fio de aço estirado a frio são atualmente as mais utilizadas por promoverem um melhor desempenho do BRFA em comparação com as fibras dos restantes grupos (Vitt, G., 2011).

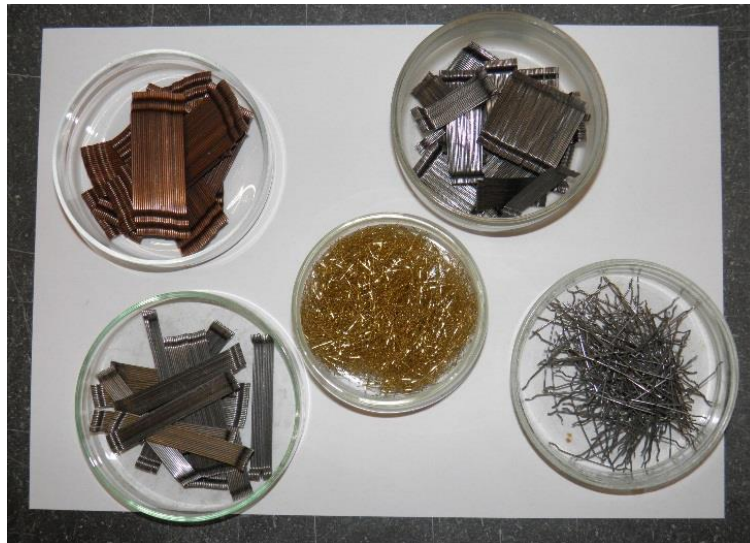


Fig. 2.3 – Diferentes tipos de fibras metálicas existentes

O aço é um material de grande ductilidade pelo que a introdução de fibras de aço permite modificar o comportamento do betão, tornando-o assim um material menos frágil.

A resistência à tração do aço é um dos parâmetros a ter em conta na escolha das fibras devido ao mecanismo de funcionamento que se pretende das fibras no betão. Estas poderão ser lentamente arrancadas da matriz de betão pela deformação da sua extremidade ou terem ductilidade e resistência que permita resistir às solicitações.

As fibras quando misturadas no betão não devem ser levadas à tensão de rotura pois possuem uma extensão na rotura bastante reduzida com conseqüente diminuição rápida da resistência à tração pós fendilhação e conseqüentemente, da resistência e da ductilidade (Vitt, G., 2011).

O betão reforçado com fibras não deve ser o resultado da adição de fibras a um betão sem composição adequada e não se pode considerar que o material resultante é uma simples adição das características de ambos os componentes. Pelo contrário, deve ser visto como um novo material composto por uma composição de betão e quantidade de fibras adequados às características requeridas (Vitt, G., 2011).

Podem ter que ser feitos ajustes à composição do betão, consoante o tipo e quantidade de fibras utilizados na mistura. Tais ajustes podem envolver o aumento da quantidade de cimento e/ou de finos, o ajuste da curva granulométrica e o uso de um plastificante ou superplastificante na altura de acertar a composição do betão (Vitt, G., 2011).

Como se pode verificar na fig. 2.4, as fibras de aço de resistência normal (1000-1400 MPa) têm um bom comportamento em betão de resistência normal (inferior a 60 MPa), em que as características do betão permitem a deformação das extremidades das fibras. Ao ocorrer uma fissura no betão e sua abertura, a extremidade da fibra desloca-se face ao betão, havendo assim controlo da abertura por parte da fibra pois esta mantém a sua resistência.

Para betões de alta resistência (resistência à compressão igual ou superior a 60 MPa) prevê-se a ocorrência de uma rotura frágil do aço, o que não permite tirar partido da função das fibras (controlar a fissuração), pois os ganchos das extremidades ficam quase “bloqueados” devido à alta resistência do betão, conseguindo controlar pouco a abertura da fissura. Tal fenómeno é também verificado nas fibras de extremidades fixas, em que não ocorrendo deslizamento algum, o aço atinge a rotura cedo.

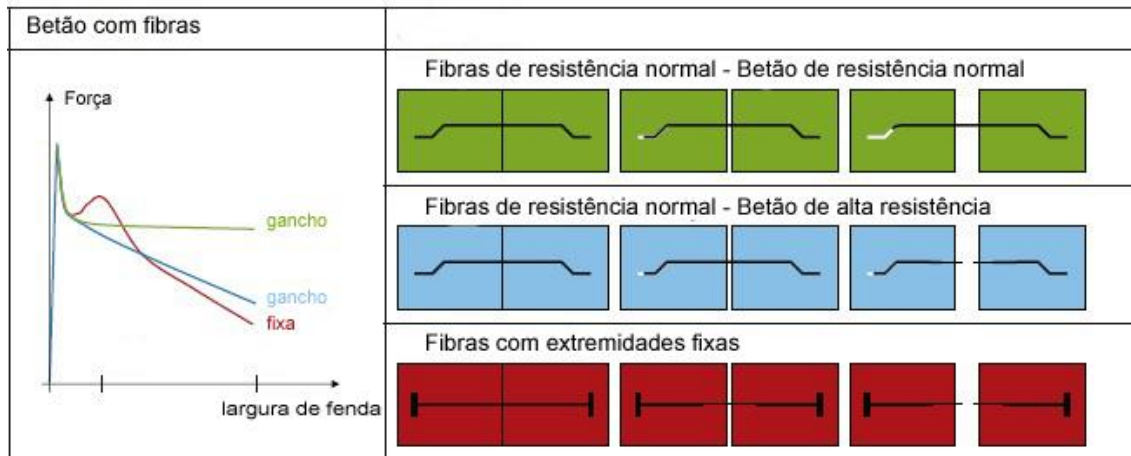


Fig. 2.4 – Influência das extremidades das fibras conforme a resistência do betão. Adaptado de Vitt (2011)

Para superar o mau comportamento das fibras de baixa resistência nos betões de alta resistência, criaram-se fibras de aço de alta resistência (acima de 2500 MPa) e alta ductilidade.

A fig. 2.5 permite verificar a relação entre betões de resistência normal e alta com fibras de resistência normal e alta. É perceptível que usar fibras de uma ou outra resistência leva a um comportamento similar no caso do betão de resistência normal. Por outro lado, as fibras de resistência normal têm um acentuado decréscimo da resistência à medida que aumenta a abertura da fissura, em betão de alta resistência. Deve-se por isso associar fibras de alta resistência com betões de alta resistência.

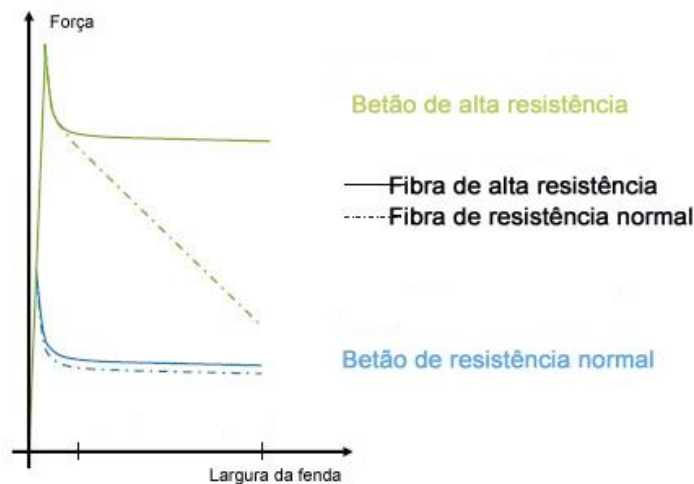


Fig. 2.5 – Efeito da resistência do betão e da resistência das fibras na largura de fendas. Adaptado de Vitt (2011)

### 2.2.2. MECANISMOS ENTRE BETÃO E FIBRAS

O controlo da fendilhação do betão é suportado pelos mecanismos resistentes entre fibra e betão, com base no atrito e na aderência e também suportado pelas fibras com a deformação das extremidades (dependendo do tipo de ancoragem) e pela deformação elástica (Gomes, J., 2013).

Quando se adicionam fibras com resistência e ductilidade adequados ao betão em causa e num teor apropriado, o betão deixa de ter o carácter marcadamente frágil. Isso ocorre pelo facto de a fibra servir como ponte de transferência de tensões nas fissuras, cuja concentração de tensões nas extremidades será então minimizada. Tem-se assim uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no compósito que passa assim a ter um comportamento pseudo-dúctil (ou não frágil) (Figueiredo, A.D.d., 2011).

Assim, com a utilização de fibras poderá ser obtida uma menor abertura de fendas no betão.

De facto as fibras distribuídas aleatoriamente na matriz cimentícia são muito eficientes a controlar a deformação pois encontram-se próximas umas das outras (Ferreira, N.F.M., 2008).

Atendendo a este facto, as fibras são usadas isoladas ou associadas à armadura ordinária contribuindo para a resistência aos esforços de tração na peça compósita e para o controlo da fissuração.

As fibras funcionam como um controlador de fissuras e assim, indiretamente, promovem a durabilidade do betão (Li, V.C., 2002).

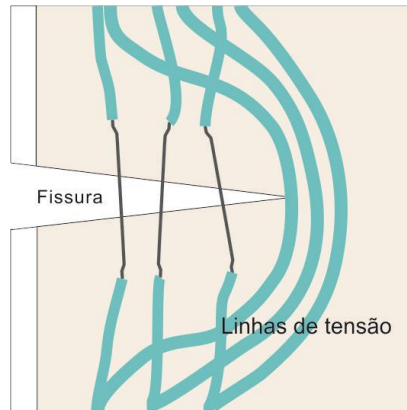


Fig. 2.6 – Pontes de tensões nas fibras de aço no betão.  
Adaptado de Vitt (2011)

### 2.3. AS VANTAGENS DAS FIBRAS NA DURABILIDADE DO BETÃO

O betão com fibras de aço é mais durável do que o betão simples quando feito com o mesmo tipo de mistura. As fibras, dentro do ambiente alcalino do betão, ficam protegidas da corrosão. Com uma mistura correta e ao utilizar processos de acabamento normais, serão pouquíssimas as fibras expostas na superfície. As fibras que ainda assim ficam expostas sujeitas à corrosão acabam por desaparecer, não constituindo um problema de fissuração ao betão. (Bekaert, N.V., 1999)

As fibras, como contribuem para o controlo da abertura das fissuras no betão, têm uma forte influência no que concerne a durabilidade do betão.

Quando exposto a ambientes desfavoráveis (cloretos, carbonatação, agentes químicos, entre outros), o betão sofre problemas de perda de integridade física e possível consequente perda de resistência. O grande problema reside na abertura de fendas provocada pela fraca resistência do betão à tração. Desta forma, quando sujeito a esta solicitação geram-se aberturas propícias à invasão de intrusos ao ambiente estável no interior do betão.

#### 2.3.1. PROCESSOS FÍSICOS DE DEGRADAÇÃO DO BETÃO

Apesar de poder não haver uma melhoria direta na redução da retração, as fibras conseguem distribuir a fissuração, aumentando o número das fissuras, diminuindo assim a abertura de cada uma delas (Proença, A.M., 2004).

No caso da abrasão, as fibras não conferem melhoria no caso de a abrasão ser provocada por detritos transportados por água que circule a baixa velocidade. No caso de ser a alta velocidade ou fenómenos de cavitação, as fibras impedem que o betão se desintegre (Proença, A.M., 2004).

#### 2.3.2. PROCESSOS QUÍMICOS DE DEGRADAÇÃO DO BETÃO

A invasão por parte dos cloretos tem como principal consequência a destruição das armaduras que indiretamente destroem o betão devido à formação de ferrugem. Esta provoca um aumento no volume do ferro que ao expandir provoca fraturas no betão.

Outro dos problemas é a carbonatação do betão que, embora não seja por si só prejudicial, origina reações que acompanhadas pela descida brusca do pH, originam a despassivação da película que protege a armadura, verificando-se a mesma consequência atrás referida (Ferreira, N.F.M., 2008).

Uma boa forma de controlar estes problemas associados à degradação do betão é a associação de fibras na mistura. Ao conseguir que estas controlem a abertura de fendas dificulta-se assim o ataque dos agentes exteriores.

### 2.3.3. ENSAIOS NO BETÃO COM FIBRAS

Neste trabalho apenas são enunciados e descritos os ensaios que foram realizados, e não todos os existentes para caracterizar o betão com fibras.

#### 2.3.3.1. No betão fresco

##### Trabalhabilidade

A avaliação da trabalhabilidade do betão com fibras não pode, na generalidade, ser feita com recurso ao ensaio de abaixamento (*slump*); no caso presente, a composição permitiu a realização do referido ensaio (fig. 2.7).

Este ensaio permite ainda avaliar qualitativamente, por observação, a presença de segregação e de exsudação.



Fig. 2.7 – Ensaio de *slump* (abaixamento)

#### 2.3.3.2. No betão endurecido

As características mecânicas e elásticas do betão são determinadas segundo os ensaios indicados na tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Ensaios de caracterização do betão endurecido

Ensaio	Norma
Compressão	NP EN 12390-3: 2009
Módulo de elasticidade	DIN 1048-5: 1991
Tração residual por flexão	EN 14651: 2007

## 2.4. APLICAÇÃO DAS FIBRAS

É em aplicações não estruturais que mais se utilizam as fibras, sendo maioritariamente usadas para controlo de fissuras por retração (plástica ou por secagem), em alternativa ao uso de varões de aço ou malha electrosoldada. Refere-se como exemplos pavimentos, lajes, grandes depósitos, todos em betão e com grandes áreas superficiais com restrições de movimento, resultando assim numa forte probabilidade de sofrerem fissuração (Li, V.C., 2002).

Na tabela 2.2 apresentam-se exemplos de estruturas e razões para a utilização de BRFA.

Tabela 2.2 – Razões para aplicação de BRFA em diversos tipos de estruturas. Adaptado de Ferreira (2008)

Tipo de estrutura	Razões para uso de BRFA
Estruturas hidráulicas (barragens, descarregadores, etc.)	Resistência à cavitação
Pavimentos (aeroportos, autoestradas, reforço de pavimentos, grandes espaços comerciais)	Resistência ao impacto e resistência ao choque térmico
Tabuleiros de pontes	Como reforço de pavimento
Cobertura a betão projetado	Estabilização de taludes e banquetas; revestimentos em obras subterrâneas
Estruturas resistentes a choque	Em combinação com armadura convencional, oferece resistência à penetração
Possível uso em estruturas sísmicas resistentes	Aumento da ductilidade atrasando a propagação de fraturas por corte



# 3

## ENSAIOS EXPERIMENTAIS: CARACTERIZAÇÃO

### 3.1. INTRODUÇÃO

Para realizar o estudo do comportamento de peças fletidas de betão com fibras, foram fabricadas no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC) 18 vigas de iguais dimensões e com diferente quantidade de fibras Dramix® 5D (0, 20, 40 e 60 kg/m<sup>3</sup>) e solução de armadura de flexão (3φ6, 2φ8 e 2φ10).

Tabela 3.1 – Quantificação das vigas moldadas por quantidade de fibras/tipo de armadura

		Dosagem de fibras (Kg/m <sup>3</sup> )			
		0	20	40	60
Armadura de flexão	3φ6	3	3	3	3
	2φ8	-	-	-	3
	2φ10	-	-	-	3

Para determinar as características mecânicas do betão endurecido (com e sem fibras) foram moldados prismas, cubos e cilindros e realizados os ensaios dispostos na seguinte tabela:

Tabela 3.2 - Ensaios efetuados para caracterização do betão endurecido

Ensaio e norma	Provete	Idade à data de ensaio (dias)
Compressão (NP EN 12390-3: 2011)	Cilindros	7 e 35
	Cubos	7 e 35
Módulo de Elasticidade (DIN 1048-5: 2011)	Cilindros	7 e 35
Tração Residual por Flexão (EN 14651: 2007)	Prismas	35

O ensaio de determinação dos valores residuais da resistência à tração por flexão (prismas) exige ser feito por equipamento tecnicamente muito exigente, não disponível em Portugal. Por isso recorreu-se ao Laboratório da N.V. Bekaert S.A., na Bélgica, para a realização de tais ensaios.

A data de realização dos ensaios aos 35 dias, desfasada dos normais 28 dias, deve-se a ajustes que tiveram de ser feitos no calendário dos ensaios dos prismas e cilindros. Devido a este facto, as vigas foram também ensaiadas aos 35 dias, para haver concordância de idades.

### 3.2. COMPOSIÇÃO DO BETÃO

As composições foram acertadas de modo a adequar a mistura cimentícia com as fibras e o único parâmetro que se fez variar foi a quantidade de fibras. Os constituintes do betão são CEM IV 32,5 N, areias, godos, água e um adjuvante superplastificante (reductor de água).

Como foram usadas fibras Dramix® 5D, para se tirar partido das características resistentes destas, o betão é de elevada resistência.

Tabela 3.3 – Identificação das composições por quantidade de fibras

Composição	Quantidade de fibras (kg/m <sup>3</sup> )
A	0
B	20
C	40
D	60

#### 3.2.1. MATERIAIS UTILIZADOS NAS COMPOSIÇÕES

O cimento utilizado foi um cimento pozolânico CEM IV/A (V) 32,5 R – SR produzido em Dezembro de 2013 pela SECIL de Macieira-Liz. Tal como a designação indica, o cimento incorpora cinzas vulcânicas (11-35%), evitando a necessidade de incluir cinzas na amassadura.

As areias foram disponibilizadas pela SORGILA e os godos vieram da zona de Entre-os-Rios.

O adjuvante utilizado foi o Powerflow 3140 disponibilizado pela MC Bauchemie e as fibras misturadas no betão foram as Dramix® 5D 65/60 BG disponibilizadas pela Bekaert, S.A.. Na tabela 3.5 estão indicadas as principais características das fibras.

Tabela 3.4 - Características das fibras usadas

Tensão de rotura	R <sub>m,nom</sub> (MPa)	2,3
Módulo de elasticidade	E (MPa)	210
Ductilidade	Ag+e (%)	6
Família de ancoragem		5D
Comprimento	l (mm)	60
Diâmetro	d (mm)	0,90
Esbelteza	l/d	65

Na tabela 3.5 apresenta-se uma síntese das características dos materiais usados na composição do betão.

Tabela 3.5 - Materiais usados na composição do betão

Material	Características
Cimento	CEM IV/A 32,5R - SR
Areias	0/2
	0/4
Godos	4/12
	10/20
Água	
Superplastificante	Powerflow 3140
Fibras	5D 65/60 BG

Na figura 3.1 apresentam-se imagens dos materiais usados:

Finos



cimento



Areia 0/2



Areia 0/4

Agregados

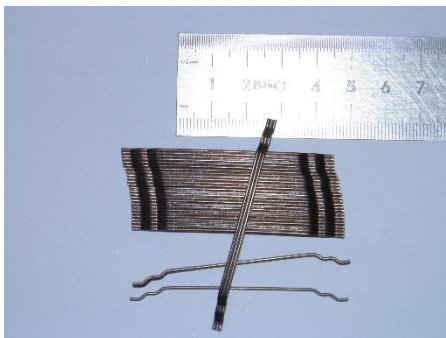


Godo 4/12



Godo 10/20

Fibras



5D 65/60 BG

Adjuvante



Powerflow 3140

Fig. 3.1 – Amostras de materiais utilizados nas amassaduras do betão

### 3.3. AMASSADURA, MOLDAGEM E CURA

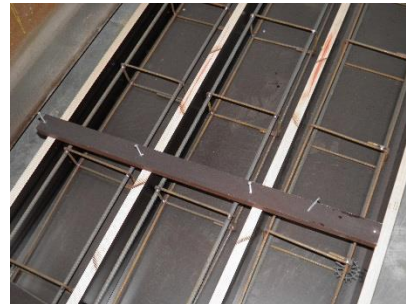
A amassadura do betão foi feita numa betoneira de eixo vertical (fig. 3.2 a)) de 270 litros de capacidade e a colocação nos moldes (fig. 3.2 c)) foi feita manualmente, através de pás e copos.



a) Betoneira



b) Moldes (cubos, cilindros)



c) Moldes (prismas e cofragens das vigas)

Fig. 3.2 – Amassadura e moldagem

Para se obter uma boa compactação e devido à altura dos moldes, a colocação foi feita em várias camadas. A vibração foi realizada recorrendo a uma agulha vibradora. Esta foi inserida em vários pontos do molde para não se gerar uma concentração de fibras à volta desta nem provocar uma alteração na posição destas.



(a)



(b)

Fig. 3.3 - Vibração realizada em prismas (a) e em vigas (b)

Após a total compactação do betão nos moldes colocou-se um filme de polietileno para evitar a perda de humidade e a consequente retração por secagem (fig. 3.4) até ao momento da desmoldagem.

Após a desmoldagem as peças foram mantidas numa câmara de cura à temperatura de  $20^{\circ}\pm 2^{\circ}$  C e a uma humidade relativa superior a 95% até à data dos ensaios, segundo a norma NP EN 206-1.



Fig. 3.4 - Provetes cobertos com filme e a identificação

### 3.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO

Antes dos ensaios, os provetes foram medidos, tendo-se obtido os valores indicados nas tabelas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.6 - Dimensões dos provetes: cubos e prismas

	Comprimento [cm]	Largura [cm]	Altura [cm]
Cubos	15	15	15
Prismas	60	15	15

Tabela 3.7 - Dimensões dos provetes: cilindros

	Altura [cm]	Diâmetro [cm]
Cilindro	30	15

#### 3.4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão foi determinada segundo a norma NP EN 12390-3: 2009, ensaiando-se 3 cilindros e 3 cubos de cada composição aos 7 e aos 35 dias.

Os resultados dos ensaios realizados são apresentados nas tabelas 3.8 (7 dias) e 3.9 (35 dias).

Tabela 3.8 - Resistência à compressão aos 7 dias

Composição	Ref.	$f_c$ , cilindro (MPa)	$f_{cm}$ , cilindro (MPa)	Ref.	$f_c$ , cubo (MPa)	$f_{cm}$ , cubo (MPa)
A 0 Kg/m <sup>3</sup>	A30	58,8	59,5	A21	68,6	67,7
	A31	60,5		A22	67,7	
	A32	59,2		A23	66,9	
B 20 Kg/m <sup>3</sup>	B37	59,8	60,0	B28	70,6	70,9
	B38	59,4		B29	71,4	
	B39	60,7		B30	70,6	
C 40 Kg/m <sup>3</sup>	C37	59,3	59,2	C28	68,6	69,4
	C38	60,4		C29	69,5	
	C39	58,0		C30	70,2	
D 60 Kg/m <sup>3</sup>	D37	59,6	59,3	D28	76,0	75,5
	D38	58,2		D29	74,8	
	D39	60,2		D30	75,7	

Tabela 3.9 - Resistência à compressão aos 35 dias

Composição	Ref.	$f_c$ , cilindro (MPa)	$f_{cm}$ , cilindro (MPa)	Ref.	$f_c$ , cubo (MPa)	$f_{cm}$ , cubo (MPa)
A 0 kg/m <sup>3</sup>	A33	70,8	68,7	A24	86,3	83,6
	A34	66,4		A25	81,4	
	A35	69,0		A26	83,1	
B 20 kg/m <sup>3</sup>	B40	77,2	73,4	B31	82,1	83,4
	B41	71,0		B32	83,2	
	B42	71,9		B33	85,0	
C 40 kg/m <sup>3</sup>	C40	65,3	67,9	C31	83,6	83,1
	C41	67,7		C32	82,5	
	C42	70,6		C33	83,3	
D 60 kg/m <sup>3</sup>	D40	76,6	75,1	D31	88,9	88,9
	D41	74,7		D32	87,2	
	D42	74,0		D33	90,5	

#### 3.4.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

A obtenção do módulo de elasticidade do betão ( $E_c$ ) foi realizada segundo a norma DIN 1048-5: 1991 e obteve-se através de ensaios de provetes cilíndricos. Os resultados dos ensaios aos 7 e aos 35 dias são apresentados na tabela 3.10:

Tabela 3.10 - Valores do módulo de elasticidade obtidos no ensaio, segundo a norma DIN 1048-5: 2011

Composição	7 dias			35 dias		
	Ref.	$E_c$ (MPa)	$E_{c,m}$ (MPa)	Ref.	$E_c$ (MPa)	$E_{c,m}$ (MPa)
<b>A</b> <b>0 kg/m<sup>3</sup></b>	A9	42000	<b>40667</b>	A12	48300	<b>48167</b>
	A10	39400		A13	48200	
	A11	40600		A14	48000	
<b>B</b> <b>20 kg/m<sup>3</sup></b>	B49	42800	<b>43567</b>	B52	46200	<b>47000</b>
	B50	45500		B53	47500	
	B51	42400		B54	47300	
<b>C</b> <b>40 kg/m<sup>3</sup></b>	C49	41100	<b>40367</b>	C52	46200	<b>46100</b>
	C50	39900		C53	47600	
	C51	40100		C54	44500	
<b>D</b> <b>60 kg/m<sup>3</sup></b>	D49	44800	<b>44433</b>	D52	46000	<b>45300</b>
	D50	42600		D53	42100	
	D51	45900		D54	47800	

### 3.4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

A resistência à tração por flexão do betão sem fibras (composição A) foi determinada pela norma NP EN 12390-5: 2009 tendo sido ensaiados 2 prismas, cujos resultados estão apresentados na tabela 3.11:

Tabela 3.11 - Resistência à tração por flexão

Composição	Ref.	Tensão de rotura (MPa)	Tensão de rotura média (MPa)
<b>A</b> <b>0 kg/m<sup>3</sup></b>	A1	9,4	<b>9,1</b>
	A2	8,7	

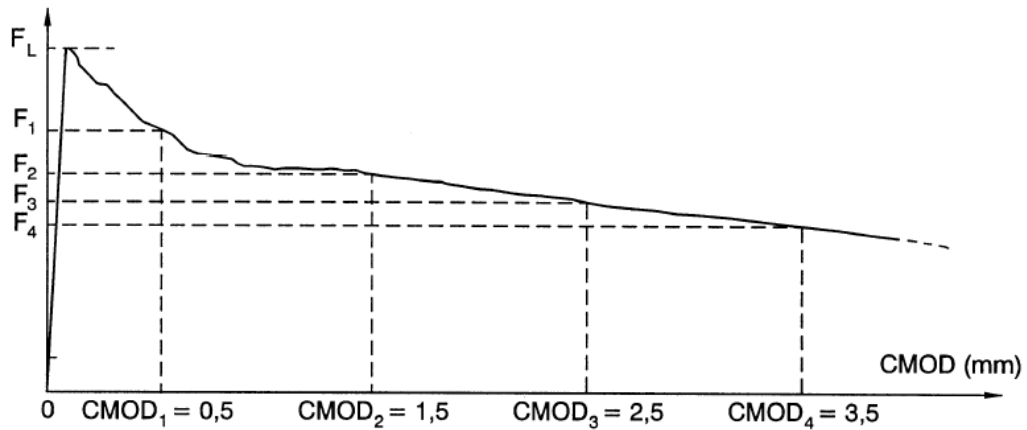
### 3.4.4. RESISTÊNCIAS RESIDUAIS À TRAÇÃO POR FLEXÃO E LIMITE DE PROPORCIONALIDADE

As resistências residuais à tração por flexão e o limite de proporcionalidade do betão com fibras (composições B, C e D) foram obtidas através do ensaio de flexão de acordo com a norma EN 14651:2005+A1 a 9 prismas, sendo determinados os seguintes parâmetros constantes da tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Valores do limite de proporcionalidade e das resistências residuais à tração por flexão

Composição	Ref.	$f_L$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{R1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{R2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{R3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{R4}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B 20 kg/m <sup>3</sup>	B1	7,71	3,34	3,24	3,35	2,83
	B2	7,66	3,64	4,5	4,91	4,67
	B3	7,93	5,46	7,81	7,35	7,8
	B4	7,89	3,63	4,04	4,37	4,51
	B5	8,33	4,29	5,78	6,27	3,92
	B6	7,62	2,27	2,49	2,52	1,47
	B7	7,36	4,89	6,24	6,25	4,9
	B8	8,19	4,34	5,93	6,59	5,56
	B9	8,62	4,18	5,84	5,88	3,85
	média	<b>7,92</b>	<b>4,00</b>	<b>5,10</b>	<b>5,28</b>	<b>4,39</b>
C 40 kg/m <sup>3</sup>	C1	6,59	5,92	6,72	7,17	6,27
	C2	6,8	5,04	6,35	6,41	5,54
	C3	6,77	6,86	8,76	8,42	8,01
	C4	7,65	9,6	8,59	7,53	6,65
	C5	7,05	8,38	10,82	8,1	7,37
	C6	7,06	8,03	10,9	9,37	8,36
	C7	6,99	6,6	8,89	9,27	8,22
	C8	7,44	8,64	11,89	7,7	7,71
	C9	7,21	7,42	9,14	8,78	6,84
	média	<b>7,06</b>	<b>7,39</b>	<b>9,12</b>	<b>8,08</b>	<b>7,22</b>
D 60 kg/m <sup>3</sup>	D1	8,57	9,49	12,17	9,94	10,01
	D2	8,39	11,02	10,75	10,72	9,91
	D3	9,14	12,88	14,25	13,37	12,71
	D4	10,53	11,35	13,65	11,86	10,36
	D5	9,11	12,02	14,74	12,1	11,09
	D6	8,97	9,78	10,25	9,92	8,62
	D7	9,75	10,27	12,34	12,35	11,12
	D8	9,69	10,26	11,67	10,28	8,78
	D9	8,61	10,75	12,62	13,45	13,09
	média	<b>9,20</b>	<b>10,87</b>	<b>12,49</b>	<b>11,55</b>	<b>10,63</b>

Na figura 3.5 apresenta-se o diagrama de tensões genérico constante da norma, para permitir idealizar o tipo de diagrama de tensões que se pode obter deste ensaio. Indica também a flecha e  $CMOD$  (abertura da fenda em entalhe a meio vão do prisma) relativos a cada tensão.



$F_L$ : Força máxima (valor máximo de tensão no intervalo [0; 0,05] mm)

$F_i$ : Força correspondente a uma certa flecha central.

Para:

$i=1$ : flecha=0,47mm (CMOD=0,5mm)

$i=2$ : flecha=1,32mm (CMOD=1,5mm)

$i=3$  flecha=2,17mm (CMOD=2,5mm)

$i=4$ : flecha=3,02mm (CMOD=3,5mm)

CMOD: Crack mouth opening displacement (abertura da fenda em entalhe a meio vão)

Fig. 3.5 - Diagrama genérico força-CMOD (EN14651:2007)

Nas figuras 3.6, 3.7 e 3.8 está ilustrado o comportamento dos prismas ensaiados através de diagramas carga-flecha.

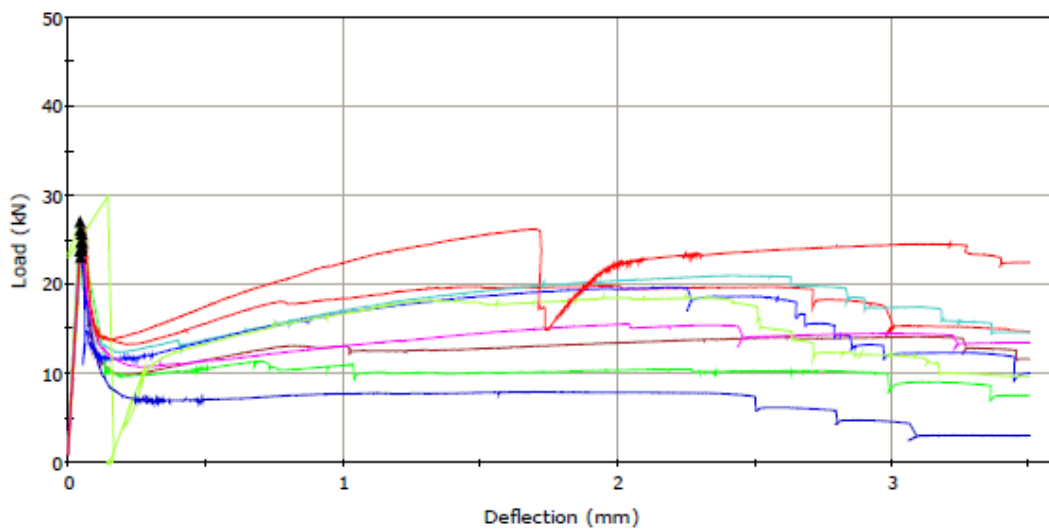


Fig. 3.6 - Diagrama para a composição B (20 kg/m<sup>3</sup>)

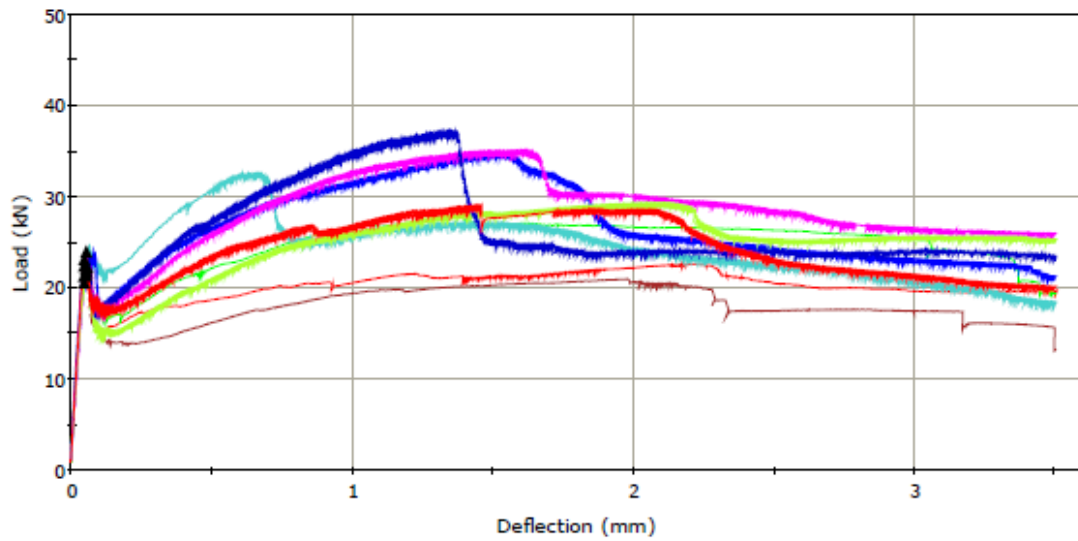


Fig. 3.7 - Diagrama para a composição C (40 kg/m<sup>3</sup>)

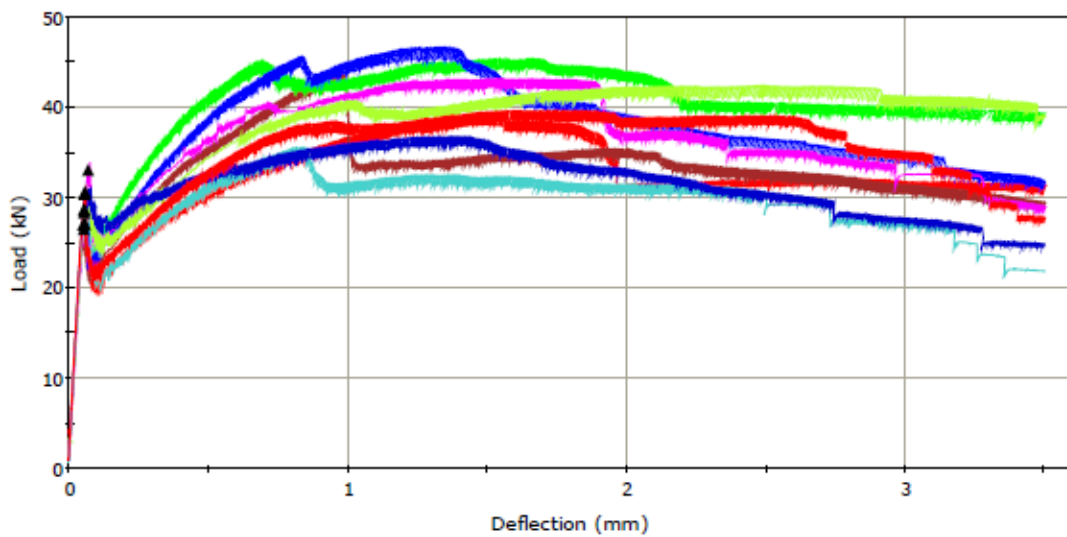


Fig. 3.8 - Diagrama para a composição D (60 kg/m<sup>3</sup>)

Na figura 3.9 estão representados os valores das resistências residuais e do limite de proporcionalidade médios, onde se podem comparar os valores correspondentes a cada uma das 3 diferentes dosagens de fibras (B:20kg/m<sup>3</sup>, C:40kg/m<sup>3</sup> e D:60kg/m<sup>3</sup>).

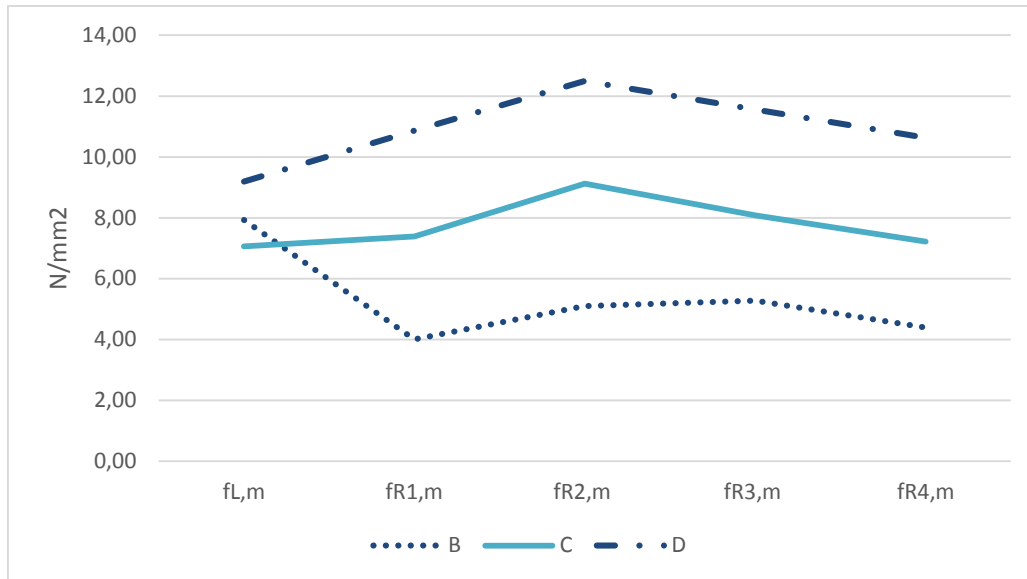


Fig. 3.9 - Diagrama das resistências residuais à tração por flexão ( $f_{Ri,m}$ ) e limite de proporcionalidade ( $f_{L,m}$ ) (B:20kg/m<sup>3</sup>, C:40kg/m<sup>3</sup> e D:60kg/m<sup>3</sup>)

Na tabela 3.13 apresentam-se os valores numéricos.

Tabela 3.13 – Valores médios das resistências residuais à tração por flexão

Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{L,m}$	$f_{R1}$	$f_{R2}$	$f_{R3}$	$F_{R4}$
20	7,92	4,00	5,10	5,28	4,39
40	7,06	7,39	9,12	8,08	7,22
60	9,20	10,87	12,49	11,55	10,63

A resistência máxima obtida até ao momento da abertura da primeira fenda designa-se por limite de proporcionalidade,  $f_L$ . Este valor indica a resistência máxima à tração do betão, pelo que se compreende que até ser atingida, apenas o betão está a ser solicitado. Esperava-se assim uma grande proximidade entre esses valores pois as composições apenas variam na quantidade de fibras, tendo estas nenhuma influência até ao momento de início de fendilhação.

Depreende-se destes resultados haver uma ligeira diferença de resistência nas diferentes amassaduras, devido à qualidade do betão.

Os diagramas têm um comportamento semelhante quanto ao funcionamento das fibras, representado pelos valores de  $f_{R1,m}$ ,  $f_{R2,m}$ ,  $f_{R3,m}$  e  $f_{4,m}$ . Evoluem de forma semelhante constatando-se um aumento das resistências com o aumento da dosagem e de forma aproximadamente proporcional.

### 3.5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARMADURAS

O ensaio de tração nos aços da armadura de reforço foi realizado de acordo com a norma NP EN ISO 6892-1: 2012. Foram ensaiados 3 varões de cada tipo de diâmetro ( $\phi 6$ ,  $\phi 8$ ,  $\phi 10$ ), estando os valores calculados da tensão apresentados na tabela 3.14:

Tabela 3.14 – Valores das tensões de cedência e rotura dos varões de aço

Diâmetro	Provete	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão de Cedência média (MPa)	Tensão de Rotura (MPa)	Tensão de Rotura média (MPa)
φ6	1	475	482	628	629
	2	490		636	
	3	480		623	
φ8	1	450	457	657	654
	2	444		643	
	3	477		663	
φ10	1	422	422	550	559
	2	412		555	
	3	431		572	

Na avaliação do comportamento das vigas em termos de força de rotura, foram usados os valores de cedência pois é neste patamar que o aço tem um comportamento previsível.



# 4

## ENSAIOS EXPERIMENTAIS: ROTURA DE VIGAS POR FLEXÃO

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos os ensaios de flexão realizados nas 18 vigas de betão com diferentes composições (3 sem fibras e 15 com fibras) e com diferente armadura (3 $\phi$ 6, 2 $\phi$ 8 e 2 $\phi$ 10). Os ensaios foram realizados com o objetivo de estudar o comportamento do betão com fibras à flexão. As vigas de dimensões 25x15x207 cm foram ensaiadas até à rotura e são apresentados e interpretados os respetivos resultados.

As vigas foram ensaiadas à idade de 35 dias. As dimensões reais das vigas e as datas dos seus ensaios são apresentadas no Anexo 1.

Na tabela 4.1 é feita uma identificação das vigas conforme a quantidade de fibras e a armadura existente.

Tabela 4.1 - Identificação das vigas conforme a quantidade de fibras e o tipo de armadura

Compos. Armadura	A 0 kg/m <sup>3</sup>	B 20 kg/m <sup>3</sup>	C 40 kg/m <sup>3</sup>	D 60 kg/m <sup>3</sup>
1 - 3 $\phi$ 6	1A-V1	1B-V1	1C-V1	1D-V1
	1A-V2	1B-V2	1C-V2	1D-V2
	1A-V3	1B-V3	1C-V3	1D-V3
2 - 2 $\phi$ 8				2D-V1
				2D-V2
				2D-V3
3 - 2 $\phi$ 10				3D-V1
				3D-V2
				3D-V3

## 4.2. VIGAS E ESQUEMA DE ENSAIO

Foram ensaiadas vigas com diferentes composições e diferente quantidade de armadura, em que 3 dessas vigas não têm fibras, apenas armadura (composição 1A: vigas V1, V2 e V3).

A armadura transversal utilizada em todas essas vigas foi  $\phi 6//0,30$  (2 ramos) e foram colocados 2 varões  $\phi 6\text{mm}$  como armadura de montagem. As diferentes montagens de armadura podem ser vistas nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

O aço utilizado é da classe A400 e os diagramas de tensões estão incluídos nos Anexos.

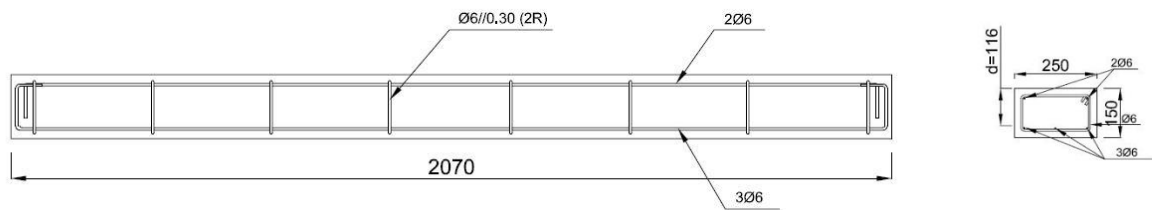


Fig. 4.1 – Esquema de montagem das vigas com 3 $\phi$ 6

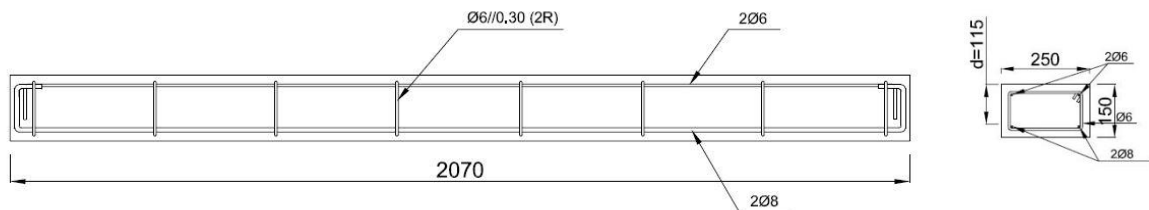


Fig. 4.2 – Esquema de montagem das vigas com 2 $\phi$ 8

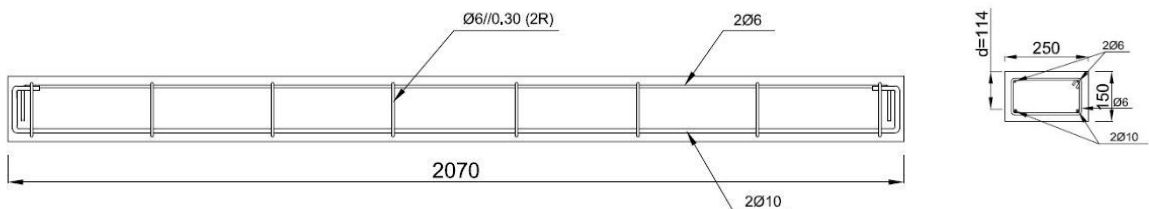


Fig. 4.3 – Esquema de montagem das vigas com 2 $\phi$ 10

De modo a garantir a posição desejada das armaduras, e conseqüente altura útil, colocaram-se espaçadores que garantem 2,5 cm de recobrimento dos estribos, como se pode ver na fig. 4.4.



Fig. 4.4 - Espaçadores

O esquema de carregamento das vigas consistiu na aplicação de uma força concentrada, por via de um atuador de 50kN, a meio da viga. Como se pode ver na figura 4.5, a força concentrada é dividida em duas forças de igual valor, carregando a viga em dois pontos simétricos (a 300mm do centro da viga, cada). Optou-se por este esquema de modo a existir um “terço central” de momento constante, com o intuito de poder-se identificar o padrão de fendilhação e a evolução das fendas. Como consequência, a rotura deu-se pela “escolha” da secção mais fraca da viga.

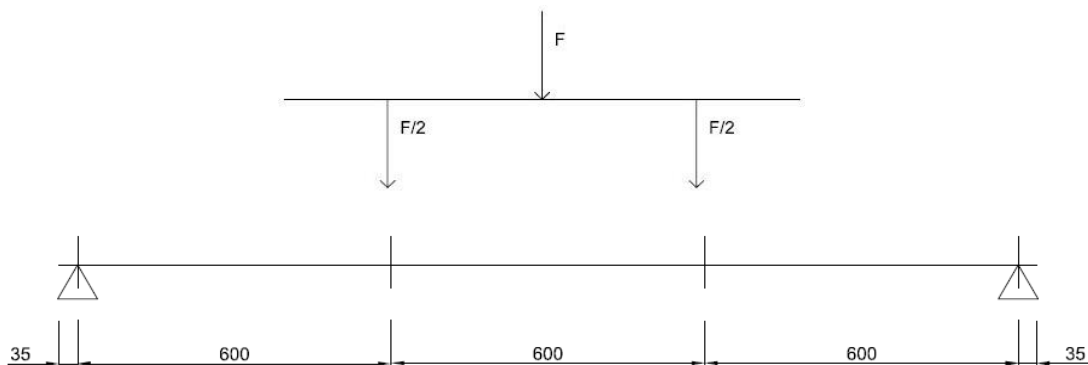


Fig. 4.5 – Esquema de aplicação das forças e dimensões (mm)

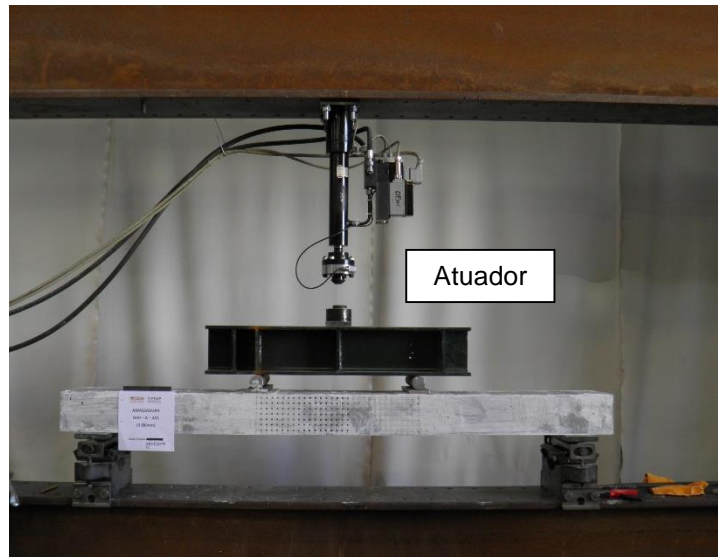


Fig. 4.6 - Esquema de montagem da viga e posição do atuador

Todos os ensaios foram realizados com o mesmo método: controlo do deslocamento e a uma velocidade de 2mm/min.

Foram colocadas duas chapas a materializar os apoios de dimensões 12x2 mm de largura e espessura, respetivamente. Não foi colocado qualquer tipo de material entre o betão (viga) e as chapas.

No início do ensaio os apoios foram libertados de modo a não existir qualquer tipo de restrição ao movimento.

Os valores obtidos do ensaio (par força – deslocamento) permitem calcular o valor do momento fletor máximo a partir da seguinte equação:

$$M = \frac{F}{2} * x \quad (4.1)$$

Em que:

F: força aplicada (kN)

x: distância entre o apoio e o local de aplicação da força F/2 (m)

### 4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Como referido anteriormente, foram ensaiadas vigas, com e sem fibras, tendo todas elas sido dotadas de armaduras ordinárias.

Para todos os ensaios efetuados foram assinalados os valores do momento fletor associado ao instante de aparecimento da primeira fenda ( $M_{cr}$  – momento crítico) e o momento fletor associado à força máxima verificada ( $M_{max}$ ). São apresentados, relativos a cada tipo de vigas, o gráfico

obtido dos ensaios de flexão e a tabela com  $M_{cr}$  e  $M_{max}$ , a par com o cálculo do valor médio e respetivos desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

Os gráficos são relativos ao par momento-deslocamento, em que o deslocamento corresponde à deslocação vertical do ponto central da viga em relação à sua posição inicial.

4.3.1. VIGAS 1A (3 $\phi$ 6; 0 kg/m<sup>3</sup>)

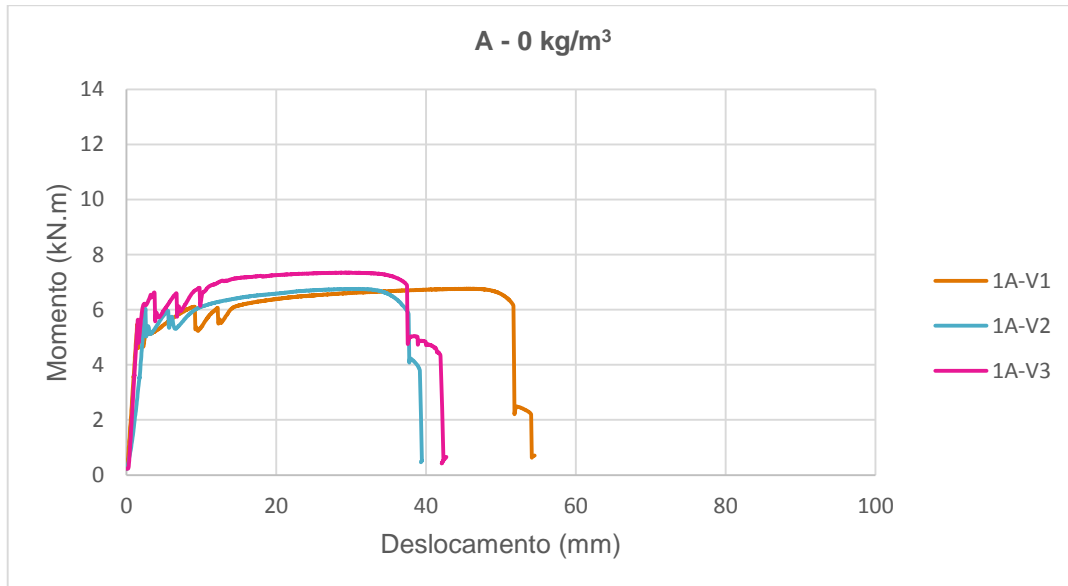
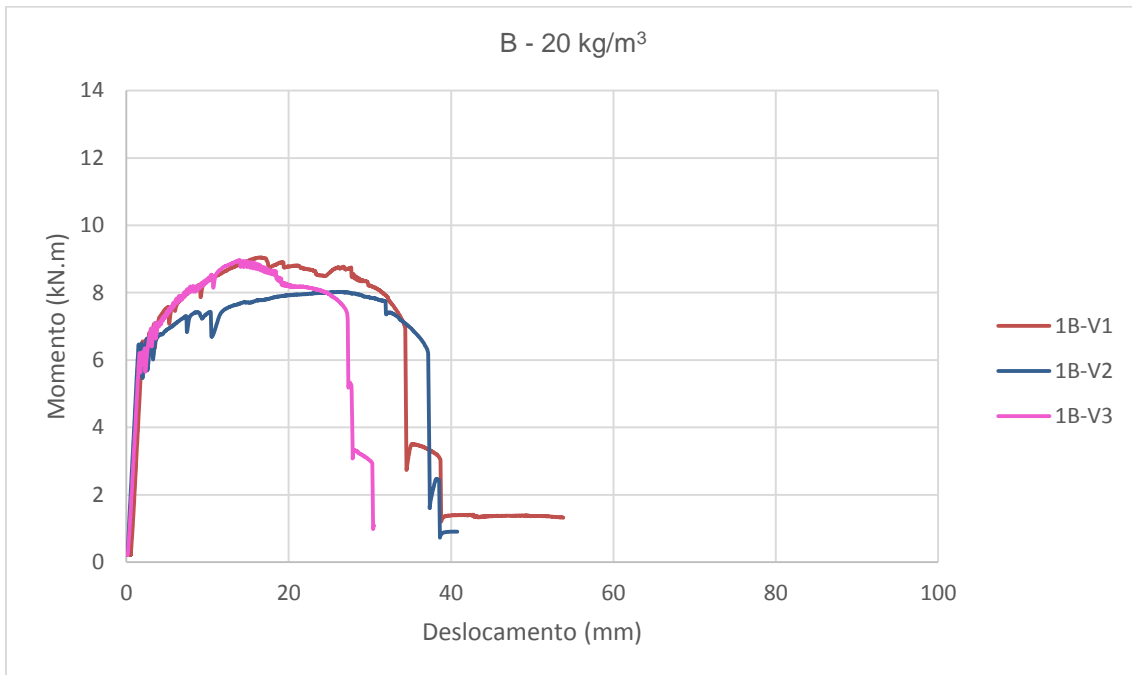


Fig. 4.7 - Diagrama momento-deslocamento das vigas sem fibras e 3 $\phi$ 6

Na tabela 4.2 indicam-se os valores do momento de fendilhação e o momento fletor máximo.

Tabela 4.2 - Valores calculados dos momentos das vigas sem fibras

1A	V1	V2	V3	média	D.P.	C.V. (%)
$M_{cr}$ (kN.m)	5,34	6,04	5,64	<b>5,67</b>	0,35	6,13
$M_{max}$ (kN.m)	6,77	6,76	7,35	<b>6,96</b>	0,34	4,85

4.3.2. VIGAS 1B (3 $\phi$ 6; 20 KG/M<sup>3</sup>)Fig. 4.8 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 20 kg/m<sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6

Por cálculo do momento fletor através da identificação no gráfico das forças associadas ao aparecimento da primeira fenda e das forças de rotura, obtiveram-se os resultados indicados na tabela 4.3 para as vigas com 20kg/m<sup>3</sup> de fibras.

Tabela 4.3 - Valores calculados dos momentos das vigas com 20 kg/m<sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6

1B	V1	V2	V3	média	D.P.	C.V. (%)
M <sub>cr</sub> (kN.m)	6,66	6,50	6,23	<b>6,46</b>	0,22	3,35
M <sub>max</sub> (kN.m)	9,10	8,00	9,00	<b>8,70</b>	0,61	6,99

4.3.3. VIGAS 1C (3 $\phi$ 6; 40 kg/m<sup>3</sup>)

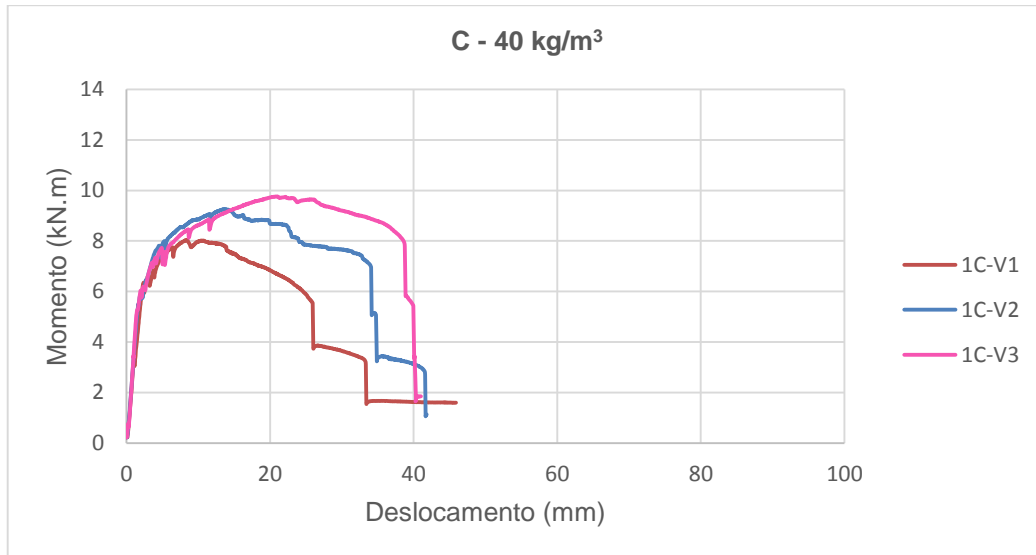
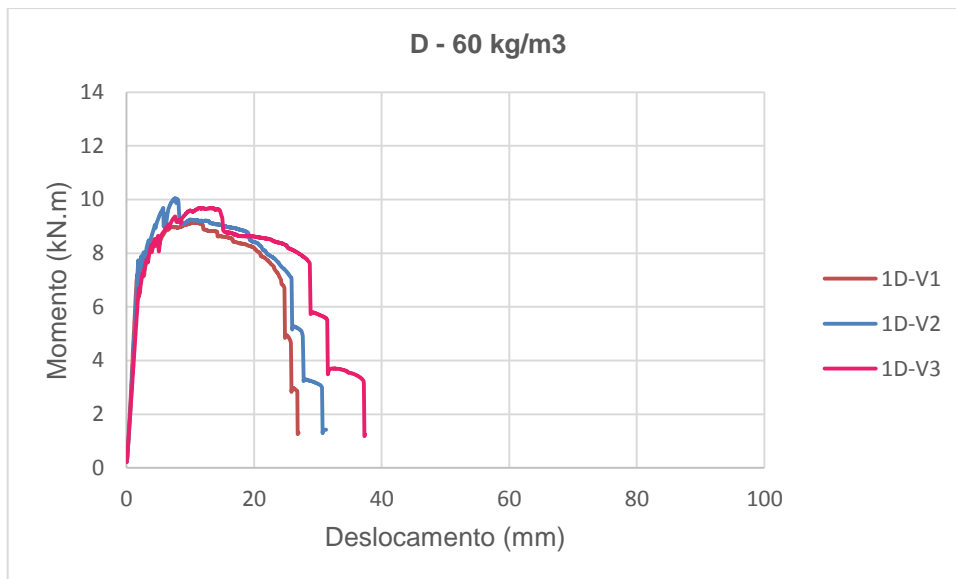


Fig. 4.9 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 40 kg/m<sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6

Por cálculo do momento através da identificação no gráfico das forças associadas ao aparecimento da primeira fenda e das forças de rotura, obtiveram-se os resultados para as vigas com 40kg/m<sup>3</sup> de fibras (tabela 4.4)

Tabela 4.4 - Valores calculados dos momentos das vigas com 40 kg/m<sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6

1C	V1	V2	V3	média	D.P.	C.V. (%)
M <sub>cr</sub> (kN.m)	3,44	5,71	5,27	<b>4,81</b>	1,20	24,97
M <sub>max</sub> (kN.m)	8,00	9,30	9,80	<b>9,03</b>	0,93	10,29

4.3.4. VIGAS 1D (3 $\phi$ 6; 60 kg/m<sup>3</sup>)Fig. 4.10 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 60 kg/m<sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6

Na tabela 4.5 estão indicados os valores do momento fletor de fendilhação e do momento fletor máximo.

Tabela 4.5 - Valores calculados dos momentos das vigas com 60 kg/m<sup>3</sup> e 3 $\phi$ 6

1D	V1	V2	V3	média	D.P.	C.V. (%)
M <sub>cr</sub> (kN.m)	7,22	6,88	6,70	<b>6,94</b>	0,26	3,80
M <sub>max</sub> (kN.m)	9,20	10,10	9,70	<b>9,67</b>	0,45	4,66

4.3.5. VIGAS 2D (2 $\phi$ 8; 60 kg/m<sup>3</sup>)

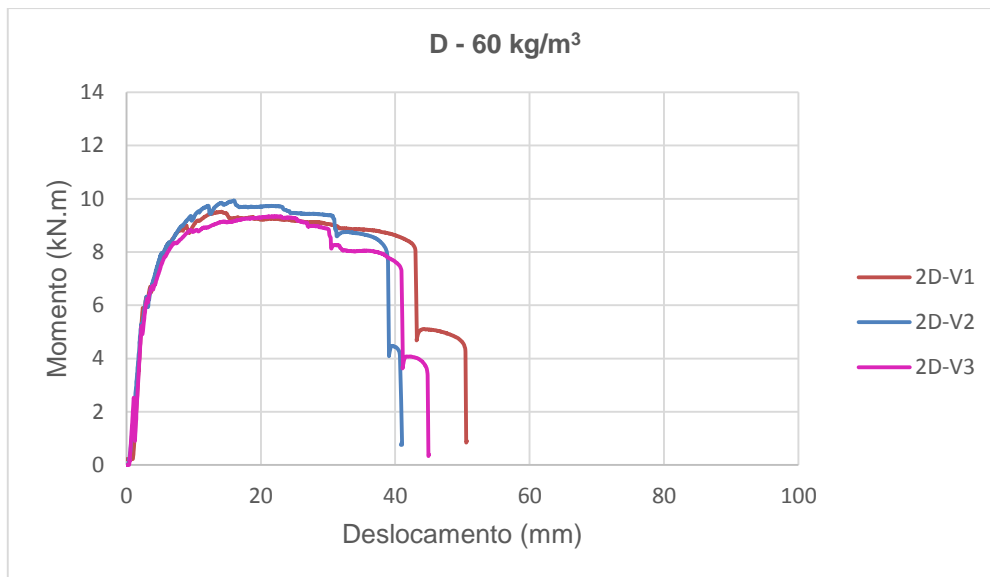
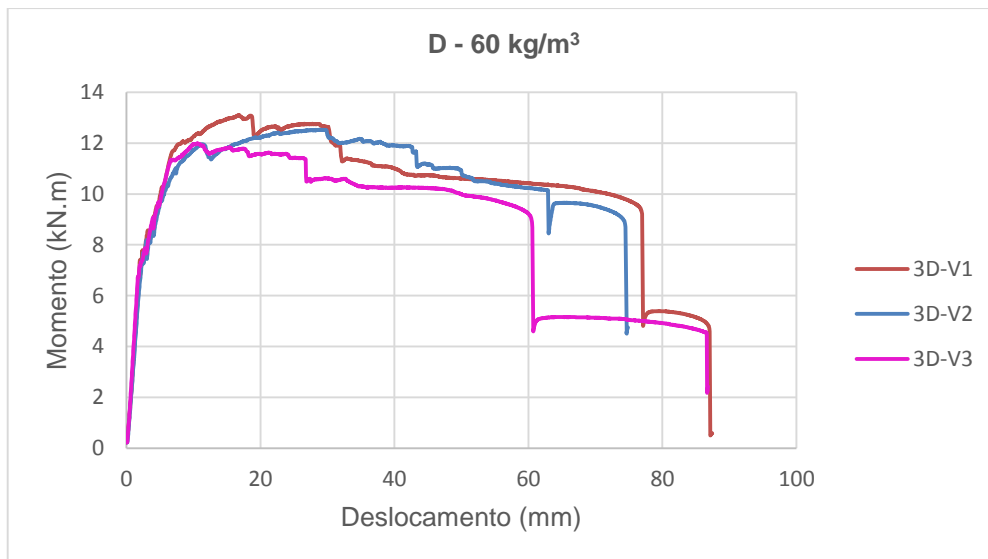


Fig. 4.11 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 60 kg/m<sup>3</sup> e 2 $\phi$ 8

Por cálculo do momento através da identificação no gráfico das forças associadas à primeira fenda e das forças de rotura, obtiveram-se os resultados constantes da tabela 4.6:

Tabela 4.6 - Valores calculados dos momentos das vigas com 60 kg/m<sup>3</sup> e 2 $\phi$ 8

2D	V1	V2	V3	média	D.P.	C.V. (%)
M <sub>cr</sub> (kN.m)	5,90	5,31	2,45	<b>4,55</b>	1,85	40,63
M <sub>max</sub> (kN.m)	9,50	9,90	9,30	<b>9,57</b>	0,31	3,19

4.3.6. VIGAS 3D (2 $\Phi$ 10; 60 kg/m<sup>3</sup>)Fig. 4.12 - Diagrama momento-deslocamento das vigas com 60 kg/m<sup>3</sup> e 2 $\Phi$ 10

Também aqui foram identificados os valores das forças de ensaio associadas ao aparecimento da primeira fenda e o valor máximo da força. Na tabela 4.7 apresentam-se os valores dos correspondentes momentos fletores.

Tabela 4.7 – Valores calculados dos momentos das vigas com 60 kg/m<sup>3</sup> e 2 $\Phi$ 10

3D	V1	V2	V3	média	D.P.	C.V. (%)
M <sub>cr</sub> (kN.m)	7,40	3,59	7,21	<b>6,07</b>	2,14	35,36
M <sub>max</sub> (kN.m)	13,10	12,50	12,00	<b>12,53</b>	0,55	4,39

## 4.3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Uma primeira análise dos resultados incide sobre os valores dos momentos fletores de fendilhação. Na tabela 4.8 apresentam-se os valores médios daqueles momentos.

Tabela 4.8 - Momentos fletores de fendilhação (valores médios)

Compos. Armadura	A 0 kg/m <sup>3</sup>	B 20 kg/m <sup>3</sup>	C 40 kg/m <sup>3</sup>	D 60 kg/m <sup>3</sup>
3φ6 (0,848 cm <sup>2</sup> )	5,67	6,46	4,81	6,94
2φ8 (1,005 cm <sup>2</sup> )	-	-	-	4,55
2φ10 (1,571 cm <sup>2</sup> )	-	-	-	6,07

A análise dos valores obtidos permite concluir que não há grande variação, quer com a dosagem de fibras, quer com a secção das armaduras (com um valor médio global de 5,75 MPa).

Esta constatação compreende-se porque o valor do momento fletor de fendilhação depende essencialmente da resistência à tração do betão.

Com base nos valores obtidos nos ensaios para o momento fletor máximo, organiza-se igualmente uma tabela resumo (tabela 4.9).

Tabela 4.9 - Momentos fletores máximos (valores médios)

Compos. Armadura	A 0 kg/m <sup>3</sup>	B 20 kg/m <sup>3</sup>	C 40 kg/m <sup>3</sup>	D 60 kg/m <sup>3</sup>
3φ6 (0,848 cm <sup>2</sup> )	6,96	8,70	9,03	9,67
2φ8 (1,005 cm <sup>2</sup> )	-	-	-	9,57
2φ10 (1,571 cm <sup>2</sup> )	-	-	-	12,53

A tabela permite concluir de uma forma consistente, que para uma mesma armadura (3φ6) o momento fletor máximo cresce com a dosagem das fibras (6,96<8,70<9,03<9,67).

A mesma tabela permite também constatar que o momento fletor máximo aumenta com a secção da armadura ordinária (9,67(<)9,57<12,53).

Na figura 4.13 estão representados os diagramas correspondentes a 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras e armaduras de flexão diferentes, o que permite constatar a conclusão referida.

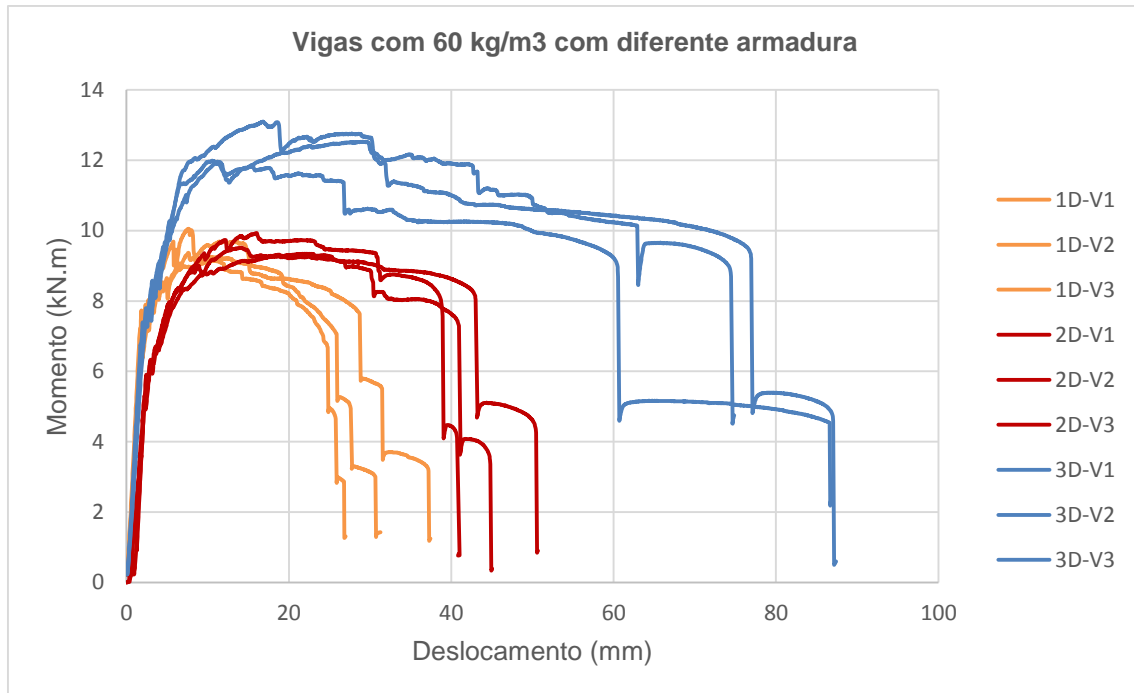


Fig. 4.13 - Comparação de resultados com a mesma quantidade de fibras e diferente armadura (1D-3 $\phi$ 6, 2D-2 $\phi$ 8, 3D-2 $\phi$ 10)

Durante a realização dos ensaios fez-se um registo fotográfico acompanhando a evolução das fissuras. Foi também feito um registo em vídeo que serviu para posteriormente ter sido feita uma análise a nível de abertura de fissuras. Este último aspeto, apesar de não constituir um dos objetivos desta dissertação, foi julgado interessante incluir-se os resultados nesta dissertação. Nas figuras seguintes apresentam-se duas fotografias por cada ensaio, num total de 18 ensaios. As imagens representam a viga após a rotura, e um pormenor do terço central para melhor se perceber o padrão de fendilhação e a posição das fendas na viga.

As diversas vigas ensaiadas são aqui representadas (fig. 4.14 a 4.19) por GVi, onde i representa a dosagem de fibras.

GV0

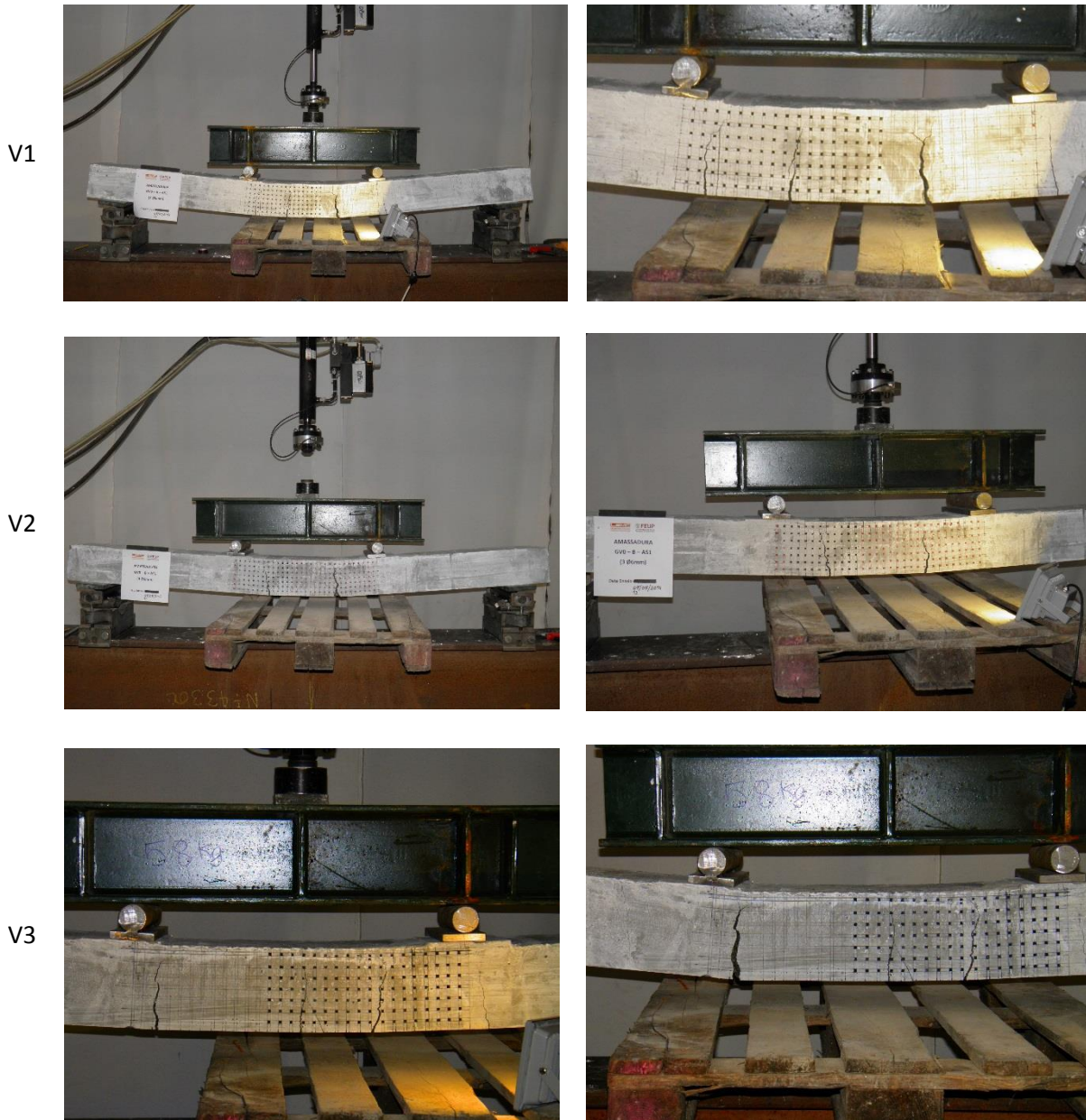


Fig. 4.14 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 1A

GV20

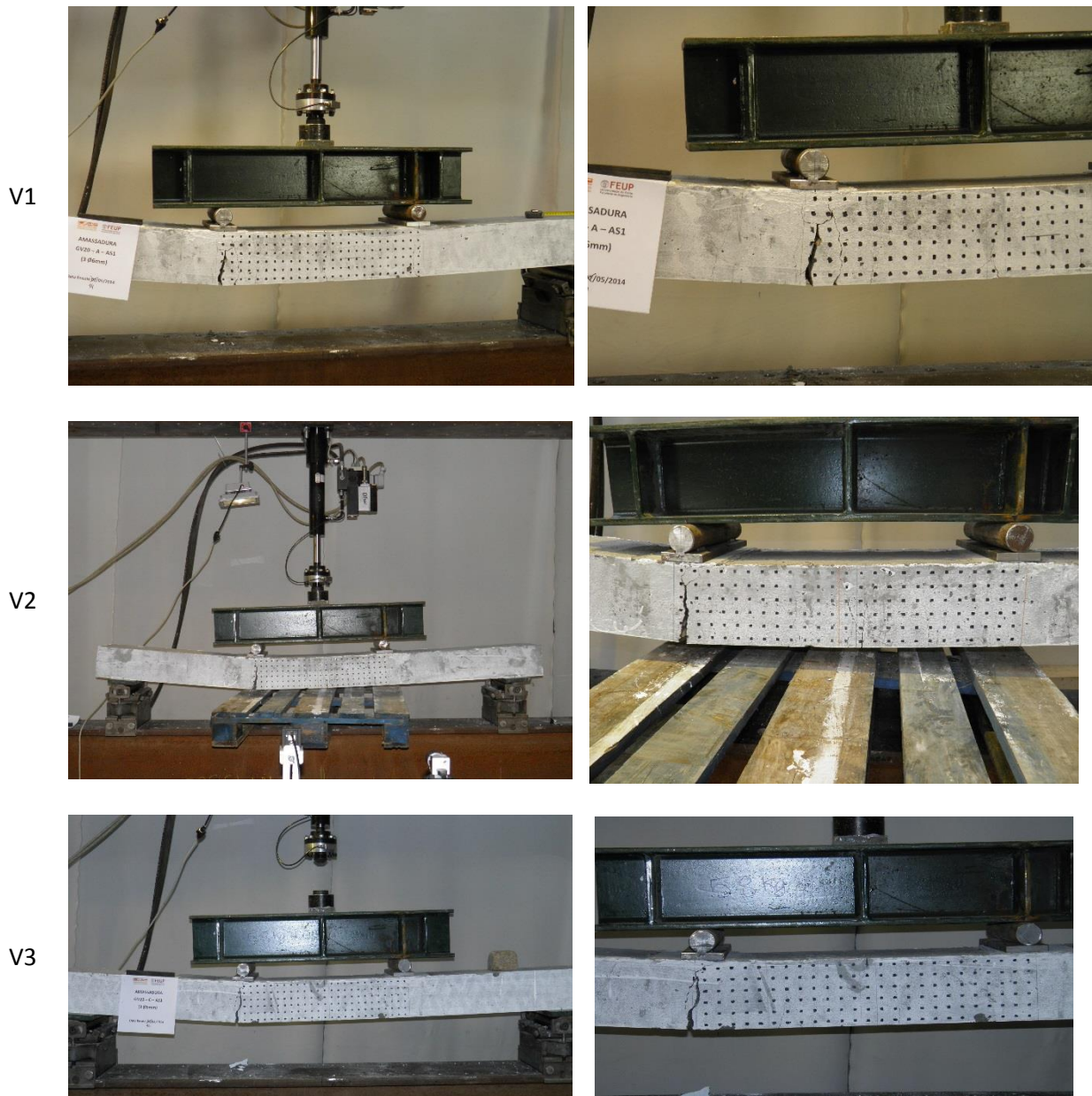
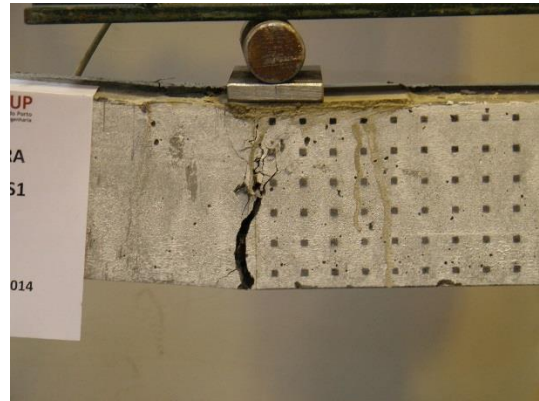


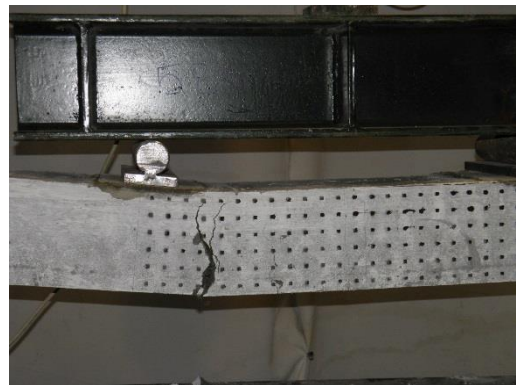
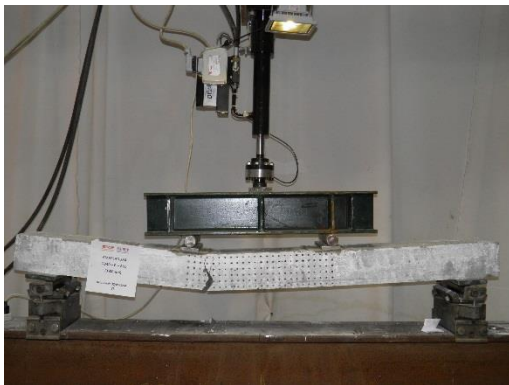
Fig. 4.15 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 1B

GV40

V1



V2



V3

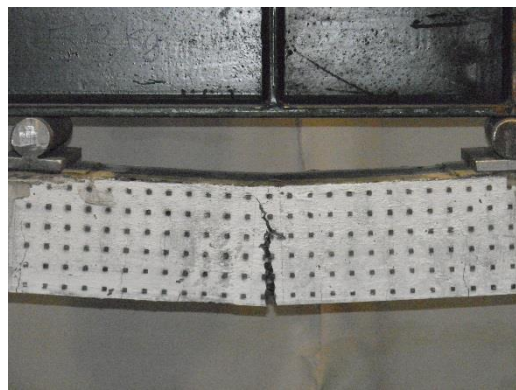
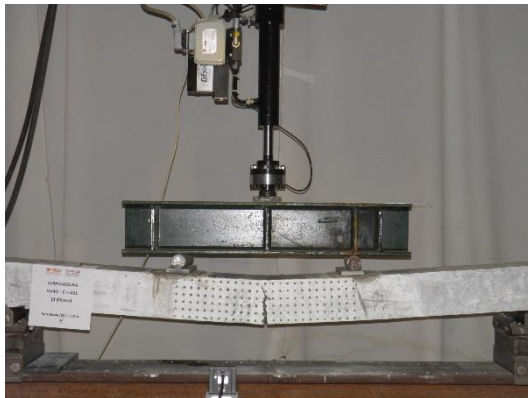
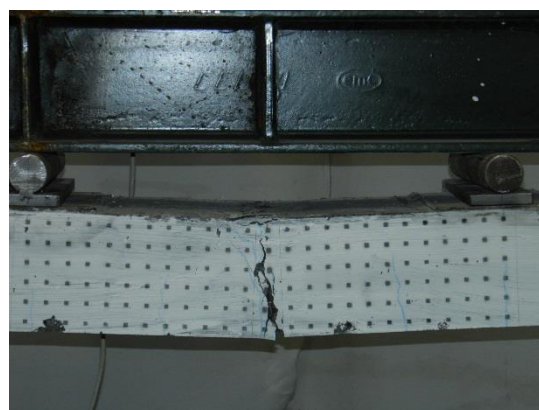
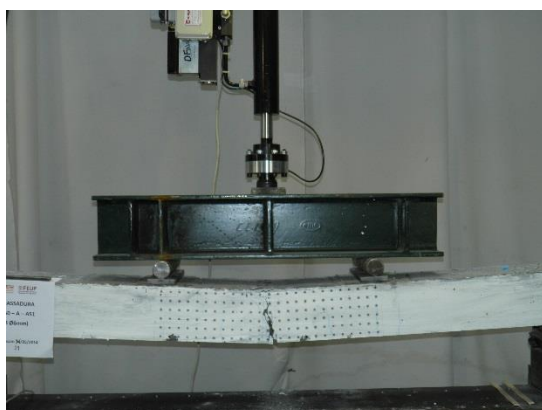


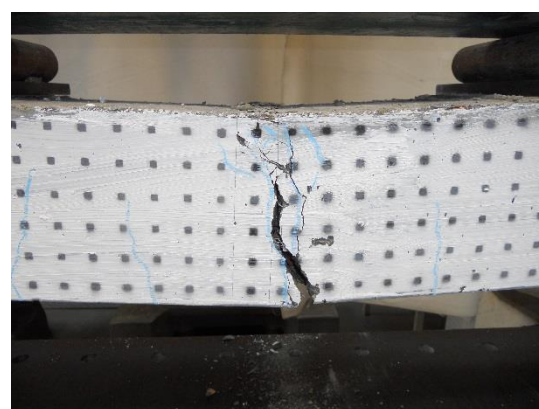
Fig. 4.16 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 1C

GV60

V1



V2



V3

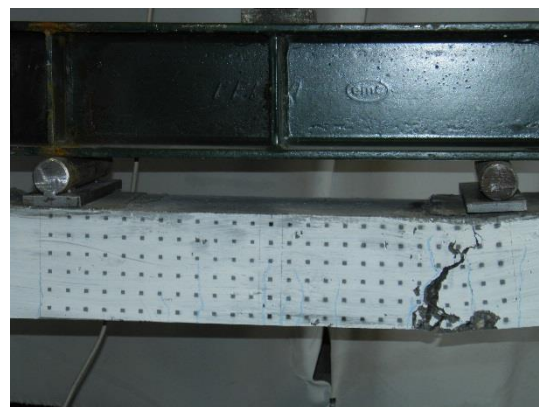
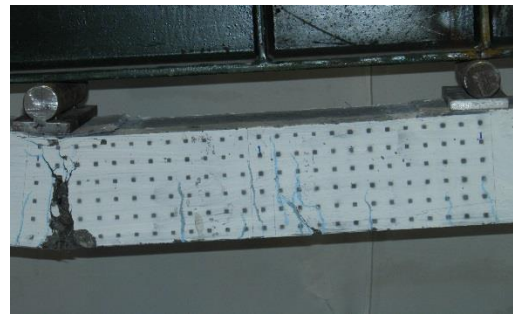
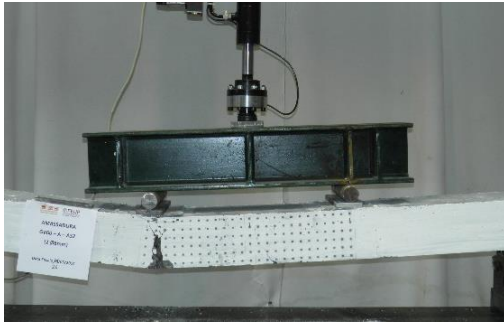


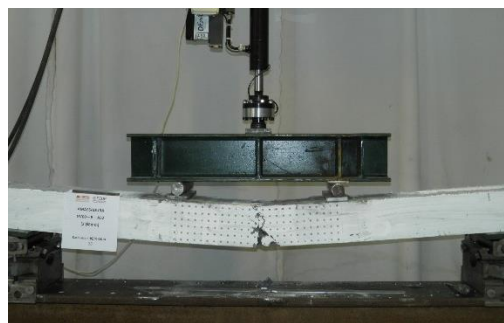
Fig. 4.17 – Fotos do modo de rotura das vigas 1D

GV60

V1



V2



V3

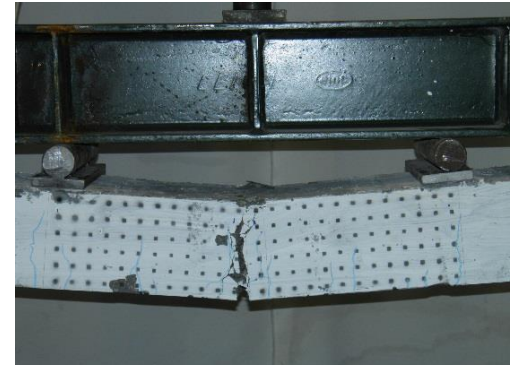
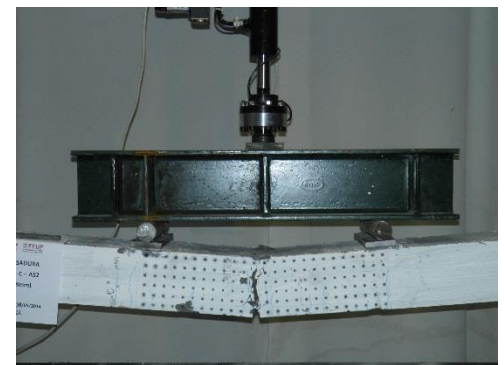


Fig. 4.18 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 2D

GV60

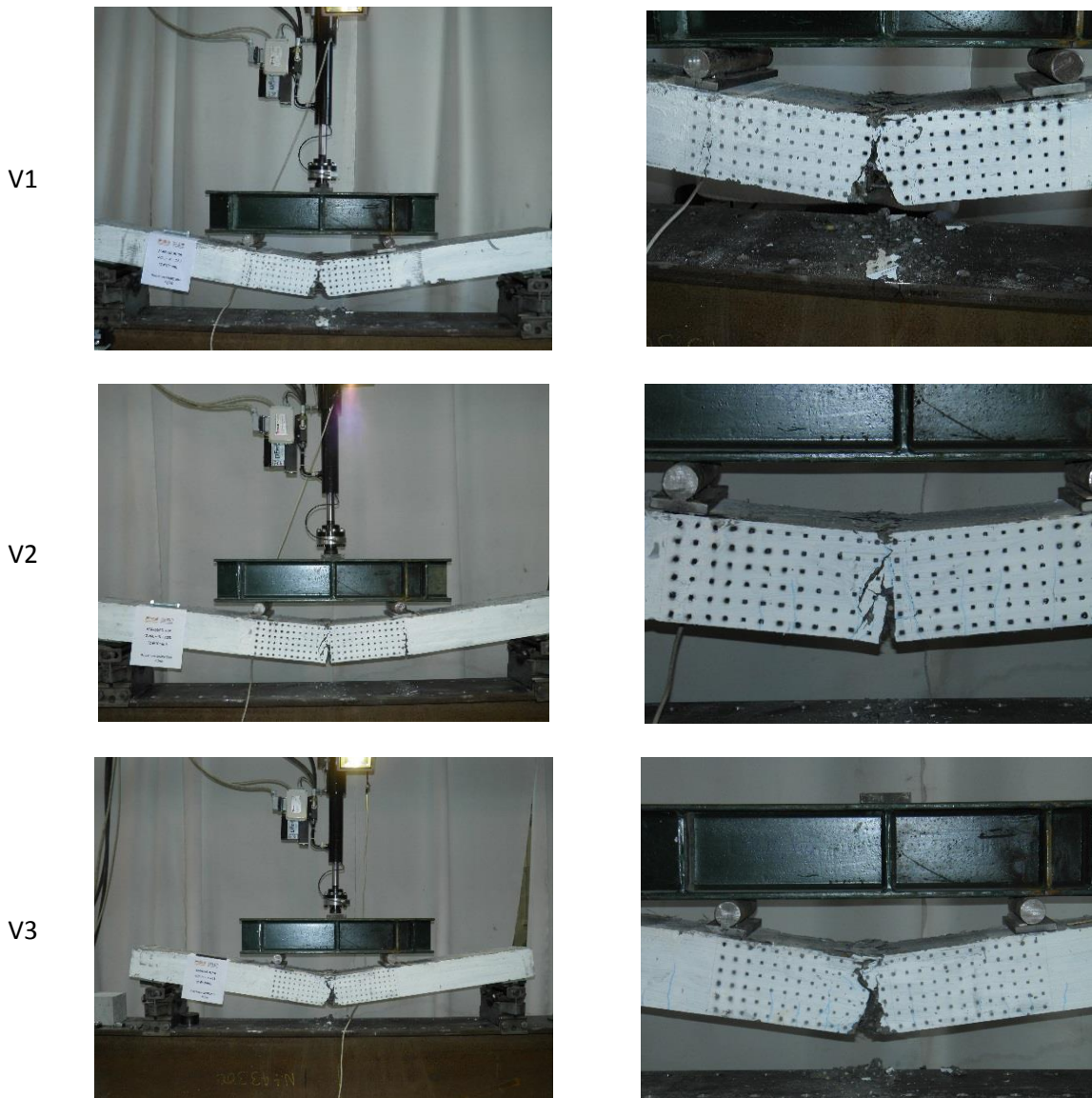


Fig. 4.19 – Fotos do modo de rotura das vigas de referência 3D

Não foram moldadas vigas com fibras e sem armadura mas é possível determinar, indiretamente através de cálculos, o momento de fendilhação. Este corresponde à formação da primeira fenda. Considerando o valor do limite de proporcionalidade,  $f_L$  (equivalente ao momento de fendilhação no betão simples) obtido nos ensaios da Bekaert e a secção das vigas, o momento foi calculado através da expressão:

$$\sigma = \frac{M}{bh^3/12} * \frac{h}{2} \rightarrow M = f_L * \frac{bh^2}{6} \quad (4.2)$$

Em que:

M=momento fletor (kN.m);

h=altura da viga (m);

b=largura da viga (m).

Sendo  $\sigma=f_t$ , calcularam-se os momentos e apresentam-se na seguinte tabela:

Tabela 4.10 – Valores calculados dos momentos de fendilhação (1ª fenda) para vigas com fibras (para diferentes composições) e sem armadura

Viga \ $M_{cr}$	20kg/m <sup>3</sup>	40kg/m <sup>3</sup>	60kg/m <sup>3</sup>
$M_{cr,m}$	7,48	6,57	8,72

Seria de esperar que os valores fossem bastantes parecidos visto as amassaduras terem todas a mesma composição, exceto a quantidade de fibras, pelo que os betões deviam ter igual resistência à tração. Esta conclusão baseia-se no facto de até à formação da primeira fenda é sobretudo a resistência à tração do betão que é mobilizada.

As diferenças entre vigas da mesma amassadura verificam-se devido às ligeiras variações das secções das vigas e, naturalmente, devido também à natural dispersão de valores de resistência à tração do betão.

Como já foi referido apresentam-se, a título ilustrativo, os resultados de uma análise de tratamento por vídeo, da rotação da abertura das fendas das vigas ensaiadas no âmbito deste trabalho.

Em cada um desses ensaios foi escolhida a fenda que mais progrediu durante o carregamento.

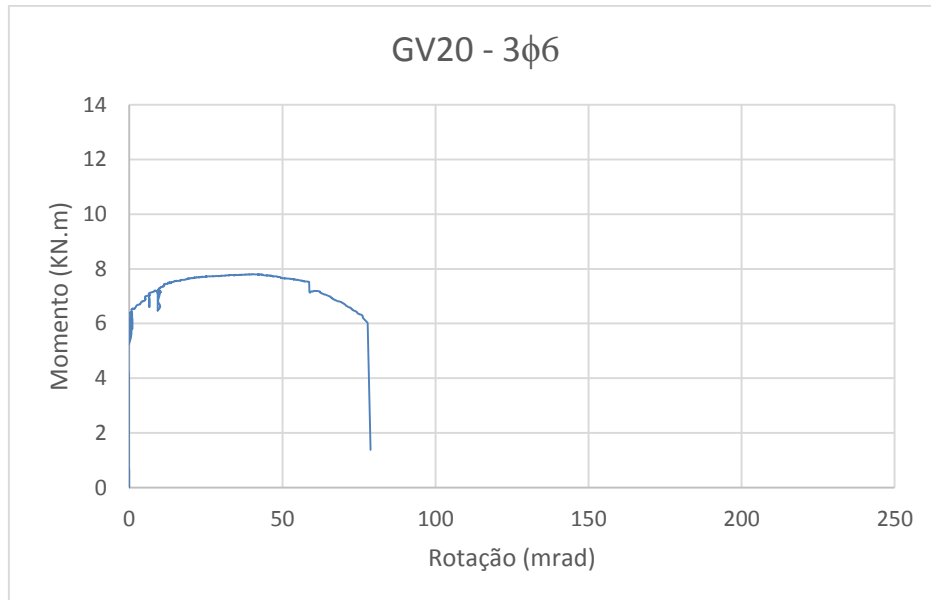


Fig. 4.20 – Diagrama momento-rotação relativa numa viga (V2) ( $3\phi 6$ ;  $20 \text{ kg/m}^3$ )

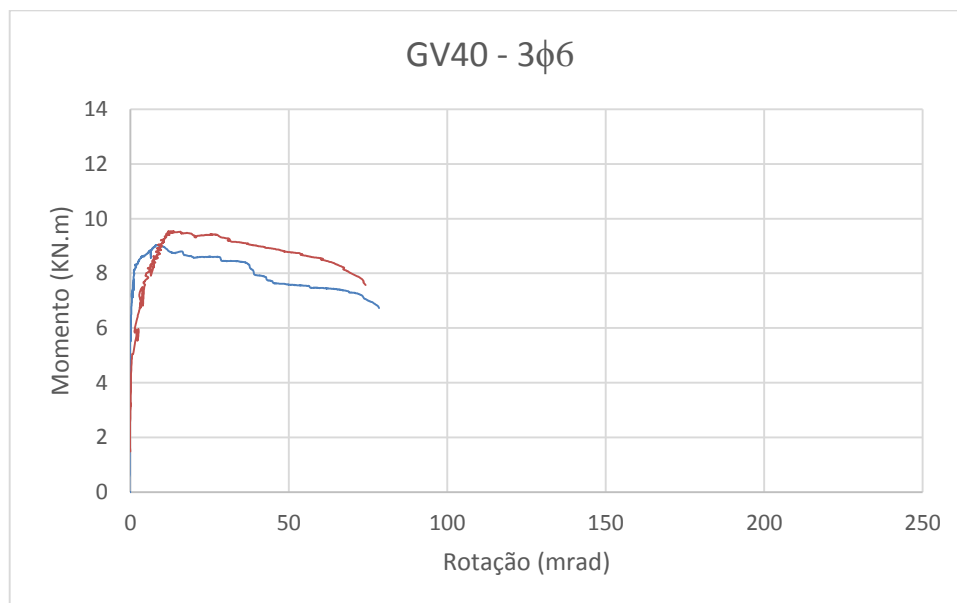


Fig. 4.21 - Diagrama momento-rotação relativa em vigas (V2 e V3) ( $3\phi 6$ ;  $40 \text{ kg/m}^3$ )

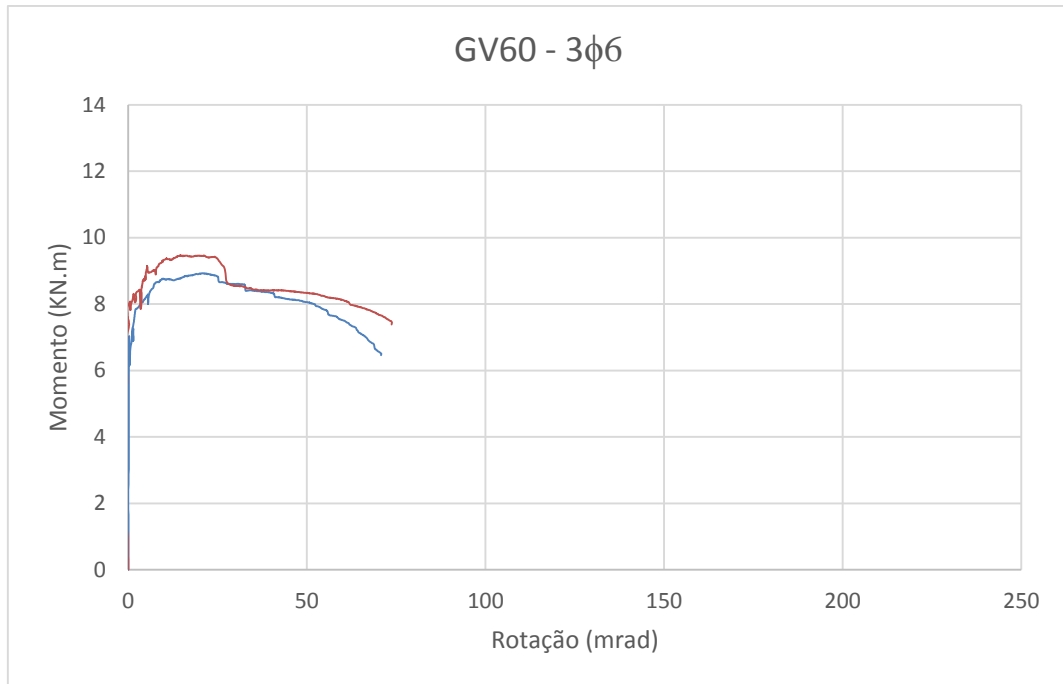


Fig. 4.22 - Diagrama momento-rotação relativa em vigas (V1 e V3) (3φ6; 60 kg/m<sup>3</sup>)

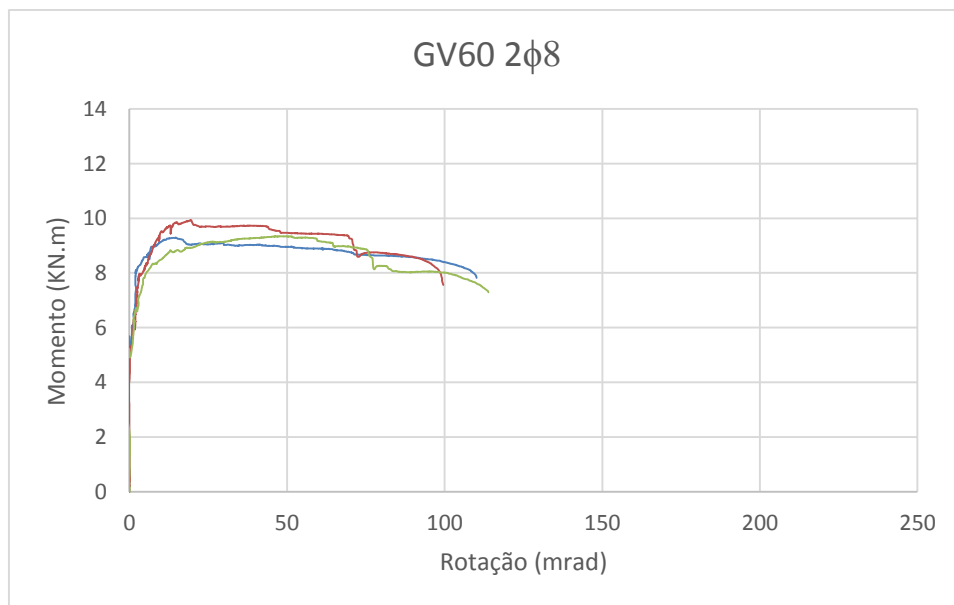


Fig. 4.23 - Diagrama momento-rotação relativa em vigas (V1, V2 e V3) (2φ8; 60 kg/m<sup>3</sup>)

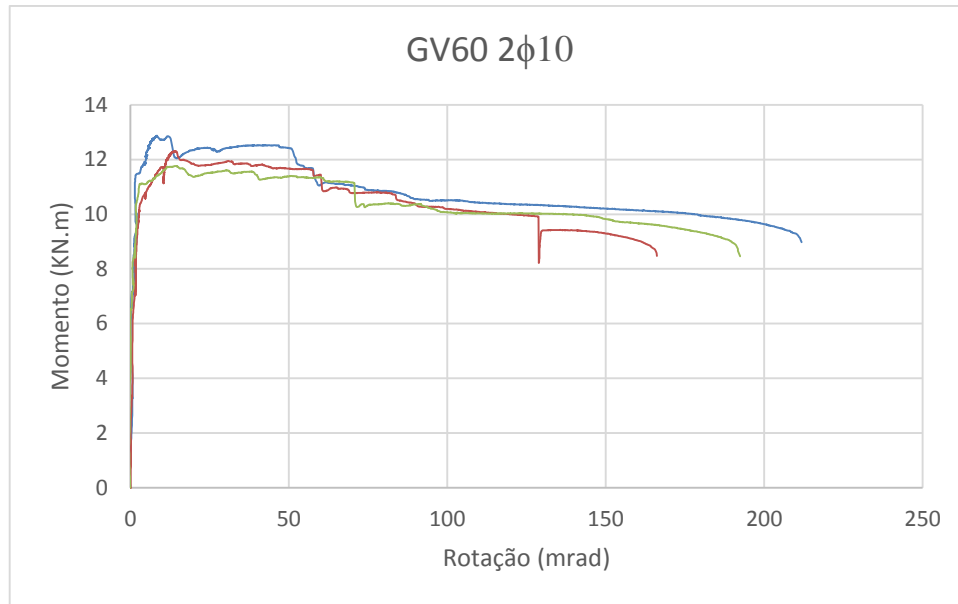


Fig. 4.24 - Diagrama momento-rotação relativa em vigas (V1, V2 e V3) (2φ10; 60 kg/m<sup>3</sup>)

Uma breve análise dos diagramas momento-rotação encontrados permite constatar um comportamento dúctil para a secção de fendas avaliada, naturalmente condicionado pela presença da armadura ordinária mas também pela presença das fibras.



# 5

## REGULAMENTOS/RECOMENDAÇÕES FIB MODEL CODE 2010, RILEM TC-162 E EHE 08 E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

### 5.1. INTRODUÇÃO

As estruturas de BRFA apresentam especificidades que obrigam a um tratamento diferente das estruturas de betão armado convencional. Para tal têm aparecido normas e recomendações que orientam o dimensionamento de tais estruturas. Como este é um assunto ainda relativamente recente os regulamentos ainda estão em ajustamento, sendo do maior interesse avaliar quais os que melhor se ajustam aos ensaios efetuados.

O principal objetivo desta dissertação foi a comparação dos resultados dos ensaios com os cálculos obtidos por meio dos regulamentos existentes. Estes apresentam soluções de cálculo que permitem fazer o dimensionamento de estruturas de BRFA. A situação em estudo é a flexão, pelo que o cálculo realizado é relativo aos momentos fletores.

Foram feitos os cálculos segundo 3 regulamentos: fib Model Code 2010, Rilem TC-162 e EHE 08 que têm em comum a utilização dos valores das resistências residuais à tração por flexão segundo a norma EN 14651:2007 como variáveis no cálculo.

É de salientar ainda que, para comparação direta dos valores calculados com os dos ensaios, não se consideraram quaisquer coeficientes de segurança nos cálculos envolvidos neste trabalho.

### 5.2. RILEM TC 162-TDF

A RILEM (União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais de Construção) tem como função promover a cooperação científica na área dos materiais de construção e das estruturas.

Em 2003 elaborou uma recomendação para o dimensionamento de estruturas de BRFA “*Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*” (Rilem TC 162-TDF) tendo como base o Eurocódigo 2.

#### 5.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O método proposto é válido para betão reforçado com fibras de resistência até C50/60. As fibras também podem ser usadas em betões de alta resistência ( $f_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2$ ). É suposto que as fibras não tenham uma rotura frágil antes de serem arrancadas (em relação ao betão).

## 5.2.2. DIMENSIONAMENTO EM ELU

Assumem-se as seguintes condições:

- Secções planas permanecem planas (hipótese de Bernoulli);
- As tensões no betão reforçado com fibras, de compressão e de tração, são determinadas a partir do diagrama da fig. 5.1.

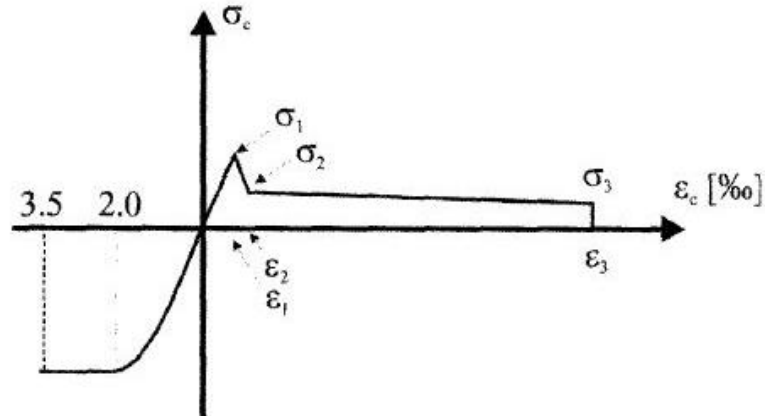


Fig. 5.1 – Diagrama de cálculo de tensões. Fonte: Rilem TC 162-TDF

As equações para o cálculo das tensões do diagrama da fig. 5.1 são as seguintes:

$$\sigma_1 = 0,7 * f_{fctm,fl} * (1,6 - d) \quad (5.1)$$

$f_{fctm,fl}$  – Valor da resistência média do betão à tração por flexão (EN 14651: 2007), (N/mm<sup>2</sup>);

$d$  – Altura útil (m)

$$\sigma_2 = 0,45 * f_{R,1} * k_h \quad (5.2)$$

$f_{R,1}$  – Valor da resistência residual à tração por flexão (EN 14651: 2007) correspondente a uma flecha central de 0,47 mm (N/mm<sup>2</sup>)

$k_h$  – Fator de forma, adiante descrito.

$$\sigma_3 = 0,37 * f_{R,4} * k_h \quad (5.3)$$

Fator de forma,  $k_h$

A comparação entre as previsões do método de dimensionamento e os resultados obtidos experimentalmente em elementos estruturais de várias dimensões revelam estimativas exageradas da capacidade de carga. Para compensar este aspeto é introduzido um fator de segurança dependente da altura da secção,  $k_h$ .

$$k_h = 1.0 - 0.6 * \frac{h[cm] - 12.5}{47.5} \quad (5.4)$$

$$12.5 \leq h \leq 60 [cm]$$

As equações para o cálculo das extensões do diagrama da fig. 5.1 são as seguintes:

$$\varepsilon_1 = \sigma_1 / E_c \quad (5.5)$$

Onde,

$\sigma_1$  – Calculado pela equação 5.5

$E_c$  – Valor do módulo de elasticidade do betão, obtido através de ensaios (DIN 1048-5: 1991)

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0,1\% \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_3 \leq 25\% \quad (5.7)$$

O regulamento apresenta as seguintes condições,

- Para secções sujeitas a esforço de compressão puro, a extensão por compressão é limitada a -2‰. Para secções que não estejam totalmente sujeitas a compressão, a deformação limite máxima é -3,5‰. Em situações intermédias, a extensão limite assume-se ser -2‰ ao nível de 3/7 da altura da zona comprimida, medida a partir da parte mais comprimida;

- Para o BRFA com armadura ordinária, a deformação limite é 25‰, ao nível da armadura de tração;

- Para assegurar ancoragem suficiente às fibras, a máxima abertura de fendas em estado limite último está limitada a 3,5 mm. Se a abertura de fendas é superior a 3,5 mm, a tensão residual de flexão relativa a essa fenda medida durante o ensaio tem de ser usada para calcular o  $\sigma_3$ .

Na figura 5.2 apresentam-se os diagramas de extensões e tensões numa secção retangular.

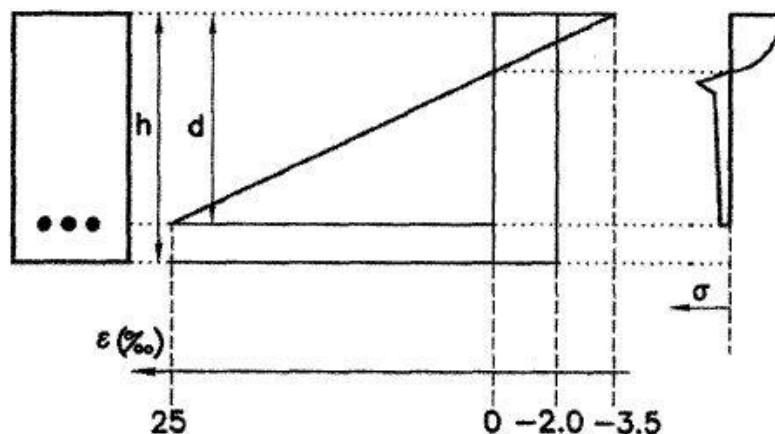


Fig. 5.2 - Diagrama de extensões ( $\epsilon$ ) e de tensões ( $\sigma$ ). Fonte: Rilem TC 162-TDF

### 5.3. FIB MODEL CODE 2010

A *fib* (*Fédération Internationale du Béton*) é uma organização sem fins lucrativos que visa regulamentar a performance – técnica, económica, estética e ambiental - de estruturas de betão.

Até à data existem publicadas duas versões, sendo a mais recente composta pelos volumes *fib bulletins* 65 e 66, os quais foram consultados para esta dissertação.

#### 5.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

São apresentados 2 modelos de cálculo possíveis para o tratamento da flexão (figura 5.3).

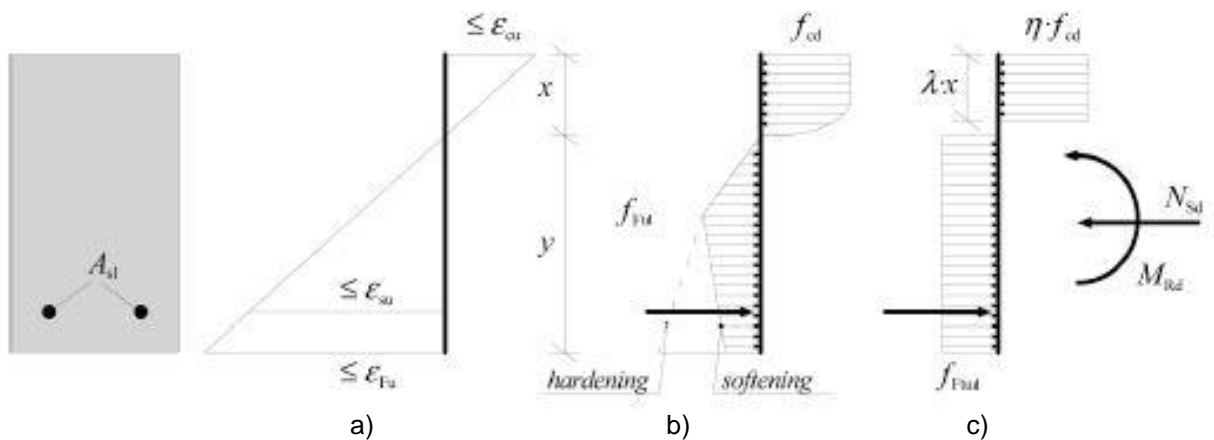


Fig. 5.3 - Diagramas de cálculo para o estado limite último segundo o Model Code  
a) diagrama de extensões; b) diagrama de tensões; c) diagrama de tensões simplificado

Devido à falta de elementos que permitissem fazer o cálculo por meio do diagrama de tensões b) da figura 5.3 que obriga à obtenção dos valores da abertura de fendas, optou-se pelo uso do diagrama simplificado, c) da mesma figura 5.3.

O modelo c) da figura 5.3 designa-se rígido-plástico e referencia um único valor no gráfico tensão-deformação,  $f_{Ftu}$ , baseado no comportamento em estado limite último. A expressão para calcular  $f_{Ftu}$  é:

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3} \quad (5.8)$$

Onde:

$f_{R3}$  - Valor de cálculo da resistência residual à tração por flexão para uma flecha central de 2,17 mm ( $N/mm^2$ ), determinado de acordo com a norma EN 14651: 2007

$f_{Ftu}$  – tensão máxima em estado limite último.

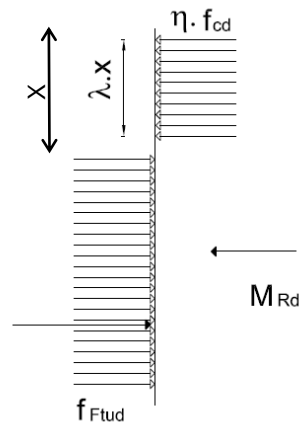


Fig. 5.4 – Diagrama de tensões simplificado. Adaptado de Model Code (2010)

O diagrama de tensões a utilizar no tratamento da flexão é então representado na figura 5.4, onde para  $50 \leq f_{ck} \leq 100 \text{ MPa}$ ,

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \quad (5.9)$$

$$\eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200 \quad (5.10)$$

A condição de extensão máxima é limitada por  $\varepsilon_{\text{lim}}=20 \text{ ‰}$ .

## 5.4. EHE 08

EHE 08 é o regulamento adotado em Espanha para o tratamento de estruturas de betão. Este regulamento, no seu Anexo 14, regulamenta a utilização de betão com fibras na construção. Nesse anexo são indicados os métodos de cálculo adequados.

Segundo este documento, a incorporação de fibras altera o comportamento não linear do betão estrutural, particularmente sob tensões de tração, prevenindo a abertura e propagação de fendas. Refere ainda o EHE 08 que se recomenda o uso de uma análise não linear nos casos em que as fibras constituam uma importante contribuição para o reforço do betão.

Refere ainda o regulamento espanhol que para as fibras poderem ser aceites como tendo função estrutural, a tensão residual  $f_{R,1,k}$  não deve ser inferior a 40% do limite de proporcionalidade e a tensão  $f_{R,3,k}$  não deve ser inferior a 20% do limite de proporcionalidade.

### 5.4.1. DIMENSIONAMENTO EM ESTADO LIMITE ÚLTIMO

O regulamento apresenta duas soluções de cálculo, um diagrama retangular e um diagrama multilinear.

#### 5.4.1.1. Diagrama retangular

O diagrama retangular é, segundo o regulamento, o indicado para casos gerais de cálculo de BRF e tem como variável de cálculo a tensão residual à tração,  $f_{ctR,d}$ .

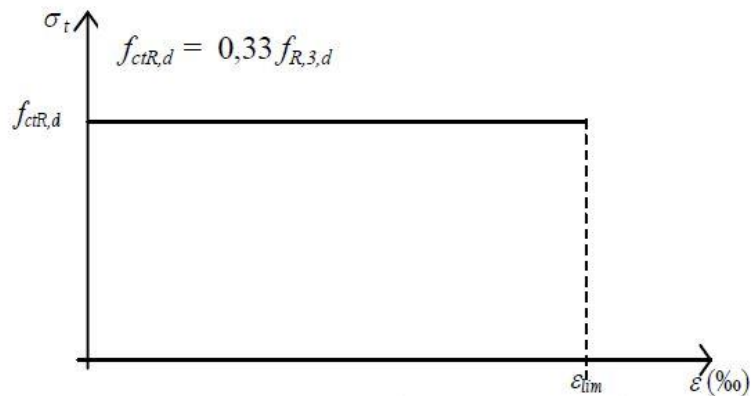


Fig. 5.5 – Diagrama retangular para cálculo de tensões de tração. Fonte: EHE 08

O valor da tensão residual máxima é calculado pela seguinte equação,

$$f_{ctR,d} = 0,33 f_{R,3,d} \quad (5.11)$$

Onde,

$f_{ctR,d}$  – Valor (de cálculo) da tensão residual à tração

$f_{R,3,d}$  – Valor (de cálculo) da resistência residual à tração por flexão para uma flecha central de 2,17 mm ( $N/mm^2$ ), determinado de acordo com a norma EN 14651: 2007

A condição de extensão máxima é definida como:

-Em flexão,  $\varepsilon_{lim} \leq 20\text{‰}$

-Em tração,  $\varepsilon_{lim} \leq 10\text{‰}$

#### 5.4.1.2. Diagrama multilinear

Este diagrama é, segundo o regulamento, o mais indicado para aplicações de BRF que requeiram um cálculo mais rigoroso.



A condição de extensão máxima é aqui expressa por:

-Em flexão,  $\varepsilon_{lim} \leq 20\text{‰}$

-Em tração,  $\varepsilon_{lim} \leq 10\text{‰}$

Neste trabalho optou-se pelo cálculo com base no diagrama retangular, pois o multilinear obrigava a que se determinasse a abertura de fendas, tarefa difícil de realizar nas condições existentes.

#### 5.4.2. MÉTODO DE CÁLCULO

Por não haver indicação do diagrama de compressão a considerar no cálculo, adotou-se o diagrama retangular existente no *Model Code*. Esta decisão baseou-se no facto de haver similaridade entre os diagramas de tração do EHE 08 e do *Model Code*. Considera-se no cálculo que para  $50 \leq f_{ck} \leq 100 \text{ MPa}$

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \quad (5.16)$$

$$\eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200 \quad (5.17)$$

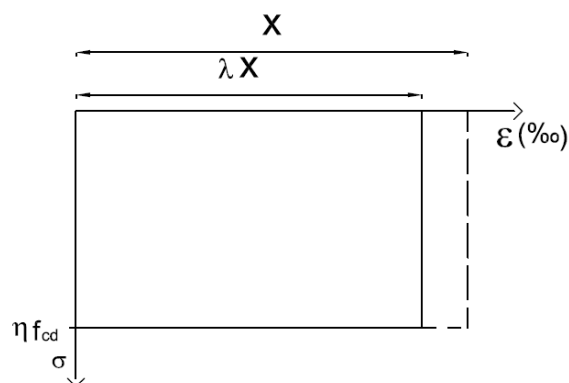


Fig. 5.7 – Diagrama de tensões de compressão. Adaptado de Model Code ( $x$ =profundidade do eixo neutro)

### 5.5. REVISÃO DOS VALORES DOS MOMENTOS RESISTENTES

Tendo em vista comparar de forma direta os resultados dos ensaios com os resultados previstos nos regulamentos, não foram considerados quaisquer coeficientes de segurança, quer no betão quer no aço. Foram utilizados os valores médios de resistência relativos a ambos os materiais.

Foram realizados provetes para cada uma das amassaduras usadas para cada grupo de vigas, de modo que todos os valores necessários de caracterização do betão fossem obtidos experimentalmente.

No caso dos provetes sem fibras, a resistência à tração média do betão  $f_{ctm}$  considerada foi obtida no ensaio de tração por flexão (NP EN 12390-5: 2009).

Os valores das resistências residuais à tração por flexão considerados foram os cedidos pela Bekaert, obtidos por ensaio em prismas (EN 14651: 2007).

A tabela 5.1 apresenta uma síntese dos valores encontrados para o momento resistente pelos diversos documentos referidos.

Tabela 5.1 – Relação entre momentos obtidos por ensaio e por cálculo

Ref.	Mrd <sub>,exp</sub>	Mrd <sub>,Rilem</sub>		Mrd <sub>,MC</sub>		Mrd <sub>,EHE</sub>	
	kN.m	kN.m	%	kN.m	%	kN.m	%
1B-V1	9,1	7,87	-13,5	7,93	-12,9	8,56	-5,9
1B-V2	8,0	7,58	-5,2	7,67	-4,1	8,23	2,9
1B-V3	9,0	7,84	-12,9	7,90	-12,2	8,48	-5,8
1C-V1	8,0	9,64	20,5	10,37	29,6	10,32	29,0
1C-V2	9,3	9,47	1,8	10,13	8,9	10,17	9,4
1C-V3	9,8	9,74	-0,7	10,65	8,7	10,43	6,5
1D-V1	9,2	11,82	28,5	12,74	38,5	12,67	37,7
1D-V2	10,1	12,05	19,3	13,26	31,3	12,94	28,1
1D-V3	9,7	11,48	18,3	12,39	27,8	12,35	27,3
2D-V1	9,5	12,25	28,9	13,31	40,1	13,09	37,8
2D-V2	9,9	12,39	25,2	13,66	38,0	13,39	35,2
2D-V3	9,3	12,25	31,7	13,48	45,0	13,25	42,5
3D-V1	13,1	13,70	4,6	14,99	14,4	15,00	14,5
3D-V2	12,5	13,65	9,2	14,99	19,9	15,00	20,0
3D-V3	12,0	13,94	16,1	15,47	28,9	15,27	27,3

Uma análise dos valores da tabela 5.1 permite constatar que os valores calculados divergem dos valores obtidos experimentalmente. Nas vigas 1B (20 kg/m<sup>3</sup>) os resultados experimentais são ligeiramente superiores aos calculados, o que já era de esperar. Já nas vigas 1C e 1D o mesmo não acontece. De facto, ao contrário do que era de esperar, os valores experimentais são inferiores aos previstos. A explicação que se encontra para este facto é a seguinte.

Nos prismas ensaiados de acordo com a norma EN 14651:2007 nos laboratórios da Bekaert, que servem para avaliar o valor das forças residuais à tração por flexão ( $f_{R,i}$ ), a fenda é induzida.

Nos ensaios das vigas, em consequência do esquema de ensaio utilizado com um troço de viga com momento máximo e constante, a fenda “opta” pela secção mais frágil no terço central do vão da viga, onde os  $f_{R,i}$  são assim de menor valor. Ao “escolher” a secção com menor volume de fibras condiciona assim o resultado do ensaio.

Isto acontece porque o processo de moldagem das vigas ensaiadas não garante uma uniformidade de distribuição de fibras ao longo das referidas vigas.

Calculando o benefício que se obtém, em termos de momento resistente, com a adição de fibras ao betão (tabela 5.2), constata-se uma melhoria sistemática, quer pela via experimental quer pelos valores calculados com base nos 3 documentos em análise.

Tabela 5.2 - Benefício da adição e aumento da quantidade de fibras

	1A	1B	Melhoria	1C	Melhoria	1D	Melhoria
	kN.m	kN.m	%	kN.m	%	kN.m	%
Experimental	6,96	8,70	20,0	9,03	23,0	9,67	28,0
Teórico							
RILEM	4,85	8,42	42,4	10,31	52,9	12,65	61,7
MC	4,83	7,76	37,8	9,62	49,8	11,78	59,0
EHE	4,83	7,83	38,4	10,38	53,5	12,80	62,3

## 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho abordou o comportamento à flexão de vigas de betão reforçado com fibras de aço.

Foram preparadas diversas vigas com diferentes níveis de armadura ordinária e dosagem de fibras. Paralelamente foram preparados provetes para caracterização dos materiais envolvidos.

Tendo em vista a comparação dos resultados experimentais com os esforços resistentes previstos em alguns regulamentos ou recomendações, foram quantificados os momentos fletores resistentes previstos por aqueles documentos.

Como principais conclusões do presente trabalho podem identificar-se as seguintes:

C1- Os momentos de fendilhação das vigas realizadas com BRFA não dependem significativamente da dosagem de fibras, sendo sobretudo condicionados pela resistência à tração do betão;

C2- Para vigas com a mesma armadura ordinária, o momento fletor resistente aumenta com o aumento das dosagens de fibras;

C3- Para vigas com igual valor de armadura ordinária e idêntico valor de momento fletor atuante, a presença de fibras de aço conduz a uma maior distribuição de fendas e por consequência um menor valor da abertura máxima das fendas, podendo assim afirmar-se que a presença das fibras proporciona um melhor controlo da fendilhação;

C4- A análise dos diagramas que relacionam o momento fletor com a rotação relativa das fendas observadas nos ensaios, permitiu constatar um comportamento dúctil não só condicionado pela presença das armaduras ordinárias mas também pela presença das fibras de aço;

C5- Uma análise dos valores dos momentos resistentes através do Fib Model Code, Rilem TC-162 e EHE 08, em vigas dotadas de armadura ordinária e fibras de aço, permitiu constatar que os valores daqueles esforços resistentes são semelhantes, assinalando-se uma ligeira maior proximidade do Rilem com os valores experimentais;

C6- Os ensaios experimentais conduziram, no caso das dosagens de 40 e 60 kg/m<sup>3</sup>, a momentos resistentes inferiores aos previstos pela documentação avaliada. Isto ocorreu em consequência do esquema de ensaio utilizado proporcionar um troço de viga (L/3) com momento fletor constante, permitindo assim a “escolha” da secção mais fragilizada em termos de distribuição de fibras.

C7- Outra razão para aquela diferença pode residir no facto de os provetes que permitiram a caracterização dos materiais (valores de  $f_c$ ,  $f_{tE}$  e  $f_{Rt}$ ) não terem sido moldados no mesmo dia e com a mesma amassadura (apesar de as composições serem as mesmas).

Os trabalhos realizados no âmbito desta dissertação permitiram à autora tirar conclusões importantes relacionadas com o uso das fibras metálicas e sobretudo permitiram a aquisição de maior sensibilidade nesta área do BRFA.

Durante o desenvolvimento dos trabalhos realizados foi também possível identificar áreas de trabalho para as quais se sugerem futuros desenvolvimentos, sendo propostos principalmente os seguintes:

D1- Realização de investigação experimental tendo em vista garantir a uniformidade das fibras de aço por métodos alternativos de fabrico de BRFA;

D2- Campanha de ensaios tendo em vista correlacionar de forma clara a dosagem das fibras de aço e características das fibras com a abertura e espaçamento de fendas;

D3- Avaliação experimental do comportamento de peças fletidas realizadas com BRFA e sem quaisquer armaduras ordinárias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bekaert, N. V. - Dramix - Fibras de aço trefilado para reforço de betão. (1999).
- DIN - Ensaio para betão DIN 1048-5 Ensaio para betão endurecido (provetes preparados em moldes). 1991.
- EHE - Code on structural concrete - articles and annexes.
- Fernandes, Nelson Agostinho Gonçalves - Caracterização do Betão Reforçado com Fibras de Aço. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- Ferreira, Nuno Filipe Mesquita - Influência das características das fibras no desempenho do betão. Porto: [s. n.], 2008. Disponível em WWW: [http://eos.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom\\_att\\_2=simple\\_viewer&metadata\\_request=false&pid=52100](http://eos.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=52100).
- fib - Bulletin 65: Model Code 2010, Final draft. Vol. 1. (2012a).
- fib - Bulletin 66: Model Code 2010, Final draft. Vol. 2. (2012b).
- Figueiredo, António Domingues de - Concreto Reforçado com Fibras. (2011). p. 248.
- Gomes, José - Influência das Fibras Metálicas no Comportamento ao Esforço Transverso de Vigas SFRC. FEUP, 2013.
- ICS - 14651:2005+A1 Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). 2007.
- IPQ - Ensaio do betão endurecido. NP EN 12390-3 Resistência à compressão de provetes. 2009.
- Li, Victor C. - Large Volume, High-Performance Applications of Fibres in Civil Engineering. *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. Vol. 83. (2002). p. 660-686.
- Naaman, Antoine E. - Engineered Steel Fibres with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol. 1. n.º 3 (2003). p. 241-252.
- Proença, Ana Maria - Betões Especiais. 2004. Disponível em WWW: [civil.fe.up.pt/pub/apoio/Mestr\\_Estr/.../Betao%20com%20fibras.pdf](http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/Mestr_Estr/.../Betao%20com%20fibras.pdf).
- RILEM - TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete -  $\tau$ - $\epsilon$  design method - Final recommendation. . 2003.
- Ulrix, Erik; Ferreira, Nuno - State of the Art - Betões com Fibras em Aplicações Subterrâneas. *Jornadas Materiais de Construção 2011*. (2011).

Vitt, Gerhard - Understanding Steel Fibre Reinforced Concrete: Dramix - Guidance to comprehending an extraordinary material. (2011). p. 95.

Wille, K. - Concrete strength dependent pull-out behaviour of deformed steel fibers. 2012.





**A1**

DIMENSÕES DAS VIGAS ENSAIADAS



Vigas	h (cm)	d (cm) *	b (cm)	$\phi$ (mm)
1A-V1	15,0	14,97	25,0	6
1A-V2	15,1	15,07	24,9	6
1A-V3	15,1	15,07	24,9	6
1B-V1	15,2	15,17	25,0	6
1B-V2	15,0	14,97	24,9	6
1B-V3	15,0	14,97	25,0	6
1C-V1	15,0	14,97	25,0	6
1C-V2	15,0	14,97	24,9	6
1C-V3	14,9	14,88	24,9	6
1D-V1	15,2	15,17	25,0	6
1D-V2	15,2	15,17	25,0	6
1D-V3	15,0	14,97	25,0	6
2D-V1	15,0	15,02	25,0	6
2D-V2	15,2	15,16	25,0	6
2D-V3	15,1	15,07	25,0	6
3D-V1	15,0	15,01	25,0	6
3D-V2	15,0	15,00	25,0	6
3D-V3	15,0	14,98	24,9	6

\* o valor do recobrimento adotado no cálculo foi medido nas vigas, na zona da fissura



**A2**

CALENDARIZAÇÃO DE MOLDAGENS E ENSAIOS



Datas de moldagem e idade de ensaio

	<b>Amassadura</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Tipo de provete</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Moldagem</b>	<b>Ensaio</b>
GV0	As1-A	Flexão	viga	1	07-04-2014	12-05-2014
	As1-B			1		
	As1-C			1		
GV20	As1-A	Flexão	viga	1	09-04-2014	14-05-2014
	As1-B			1		
	As1-C			1		
GV40	As1-A	Flexão	viga	1	14-04-2014	19-05-2014
	As1-B			1		
	As1-C			1		
GV60	As1-A	Flexão	viga	1	16-04-2014	21-05-2014
	As1-B			1		
	As1-C			1		
GV60	As2-A	Flexão	viga	1	21-04-2014	26-05-2014
	As2-B			1		
	As2-C			1		
GV60	As3-A	Flexão	viga	1	29-04-2014	03-06-2014
	As3-B			1		
	As3-C			1		
GVExtra	As1	Flexão	viga	1	03-04-2014	05-05-2014



**A3**

BOLETIM DO CIMENTO USADO





**RESULTADOS DO AUTOCONTROLO**  
 AUTOCONTROL RESULTS | RÉSULTATS DE L'AUTOCONTROLÉ  
 VALORES MÉDIOS  
 AVERAGE RESULTS | RÉSULTATS MOYENNE

REFERÊNCIA **Cimento Pozolânico - EN 197-1 CEM I/A (V) 32,5 R - SR**  
 REFERENCE **Pozzolanic cement | Ciment pouzzolanique**

BOLETIM Nº **ACM-012/2014**  
 REPORT N.º **RAPPORT N.**

FÁBRICA **Maceira-Liz**  
 PLANT | USINE

DATA **14-02-2014**  
 DATE

MÊS **Dezembro 2013**  
 MONTH | MOIS **December | Décembre**

**ENSAIOS MECÂNICOS**  
 MECHANICAL TESTS | ESSAIS MECANIQUE (NF EN 1261)

IDADE AGE	Resistência à Flexão (MPa) Flexural Strength Résistance à la Flexion		Resistência à Compressão (MPa) Compressive Strength Résistance à la Compression	
	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN
2 dias 2p   2jrs	3,5	4,1	18,4	20,5
7 dias 7p   7jrs	5,4	6,9	30,7	32,6
28 dias 28p   28jrs	7,5	7,9	43,5	44,9

**ENSAIOS FÍSICOS**  
 PHYSICAL TESTS | ESSAIS PHYSIQUES

	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN
Peso Específico (g/cm³) Specific Weight   Valeur volumique	2,88	2,88
Resíduo de Penetração (%) Blaine Fin (m)   Résidu de Traversage (NF EN 1261-2)	45 µm	1,77
	32 µm	8,96
Superfície Específica de Blaine (m²/g) Blaine Spec. Surface   Surface spécif. Blaine p. 3 Fin (m²/g)	4302	4212
Água na Pasta Normal (%) Water content (Cem. en Cimentage) (NF EN 1261-1)	29,1	28,2
Tempo de Freggo (min) Setting Time   Tempo de Freg (NF EN 1261-2)	Início In. de   Devor.	161
	Fim Fim   Fin	243
Exponibilidade (mm) Saturação   Capéon (NF EN 1261-2)	0,39	0,40
Índice de Referência (0 a 100) Reference (White test)   indice de référence		

**INFORMAÇÃO ADICIONAL**  
 ADDITIONAL INFORMATION | INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

--

NOTA (ENR) | NB. (ENR) | Remarque (ENR) | Note (ENR)  
 NOTA | NOTE: Os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que estão a ser avaliados. The parameters are determined by internal methods, except those that are being evaluated. Les paramètres sont déterminés par méthodes internes, except ceux qui sont à l'évaluation.

**ANÁLISE QUÍMICA**  
 CHEMICAL ANALYSIS | ANALYSES CHIMIQUES

	MÊS MONTH   MOIS	ANO YEAR   AN
Perda ao Fogo (%) Loss on Ignition   Perte au Feu	-	2,61
Resíduo Insolúvel (%) Insoluble Residue   Résidu Insoluble	-	23,03
Oxido de Silício (%) Silica Oxide   Oxyde de Silicium	SiO <sub>2</sub>	
Oxido de Alumínio (%) Aluminium Oxide   Oxyde d'Aluminium	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Oxido de Ferro (%) Iron Oxide   Oxyde de Fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Oxido de Cálcio (%) Calcium Oxide   Oxyde de Calcium	CaO	
Oxido de Magnésio (%) Magnesium Oxide   Oxyde de Magnésium	MgO	
Sulfatos (%) Sulfates   Sulfates	SO <sub>3</sub>	2,78
Oxido de Potássio (%) Potassium Oxide   Oxyde de Potassium	K <sub>2</sub> O	1,08
Oxido de Sódio (%) Sodium Oxide   Oxyde de Sodium	Na <sub>2</sub> O	0,35
Clorure (%) Chloride   Chlorure (NF EN 1261-2)	Cl	0,04
Óxido Livre (%) Free Lime   Chaux Libre		
Índice de Saturação em Cal Lime Saturation Factor   Coef. de Sat. Chaux		
Índice Silíceo Silica Ratio   indice Siliceux		
Índice Alumínico Alumina Ratio   indice Alumineux		

**COMPOSIÇÃO POTENCIAL DE BOGUE**  
 Bogue's Composition | COMPOSITION POTENTIAL DE BOGUE

Silicato Tricálcico (%) Tricalcium Silicate   Silicate Tricalcique	C <sub>3</sub> S	
Silicato Bicálcico (%) Dicalcium Silicate   Silicate Bicalcique	C <sub>2</sub> S	
Alumínio Tricálcico (%) Tricalcium Aluminate   Aluminate Tricalcique	C <sub>3</sub> A	
Ferro-alumínio Tetracálcico (%) Tetracalcium Ferrite   Ferrite Tetracalcique	C <sub>4</sub> AF	

APROVADO  
 APPROVED | APPROUVÉ

BPB

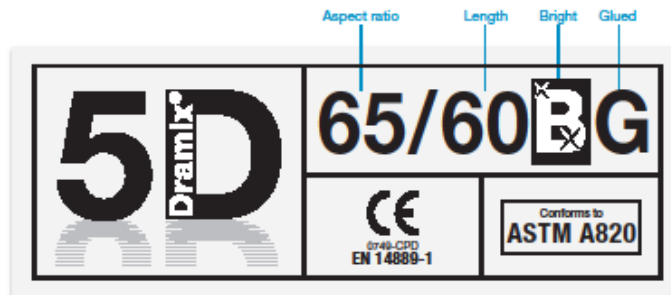


**A4**

BOLETIM DAS FIBRAS USADAS (EM INGLÊS)



## Data Sheet



### DRAMIX® 5D



The Dramix® 5D series provides you with the ultimate in performance, thanks to a unique combination of a perfectly shaped hook, a high ductility wire, and extreme tensile strength.

- > ultimate anchorage
- > high L/D ratio, glued fibre
- > ultra high tensile strength
- > high ductility wire

Dramix® 5D is a cost efficient solution for high end ULS structural applications

- > foundation slabs structural rafts
- > rafts
- > suspended structures
- > structural precast elements
- > structural floors (e.g. floors on piles)

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support. Go to [www.bekaert.com/dosingdramix](http://www.bekaert.com/dosingdramix) for our recommendations on handling, dosing and mixing.



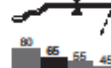

Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For detailed information, product specifications available on request.

### PERFORMANCE

#### Material properties

Tensile strength:  $R_{m,mean} = 2.300 \text{ N/mm}^2$   
Tolerances:  $\pm 7,5\% \text{ Avg}$   
Young's Modulus:  $\pm 210.000 \text{ N/mm}^2$   
Wire ductility: Ag+e = 6%

#### Geometry

Fibre family  5D  
Length (l) 60 mm   
Diameter (d) 0,90 mm   
Aspect ratio (l/d) 65 

#### Fibre network

9,0 km per m<sup>3</sup> (for 15 kg/m<sup>3</sup>)  
3.183 fibres/kg  
Minimum dosage:  
15 kg per m<sup>3</sup> (according to CE)

#### Dramix® range

	5D	4R	3R
Tensile strength	█	█	█
Wire ductility	█	█	█
Anchorage strength	█	█	█

### PRODUCT CERTIFICATES



Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

### SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

### PACKAGING



BAGS 20 kg

BIG BAG 1100 kg

### STORAGE





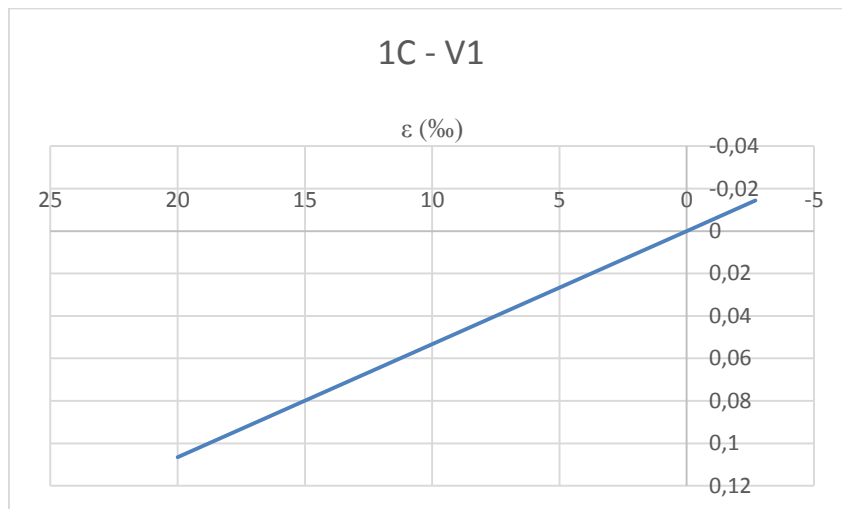
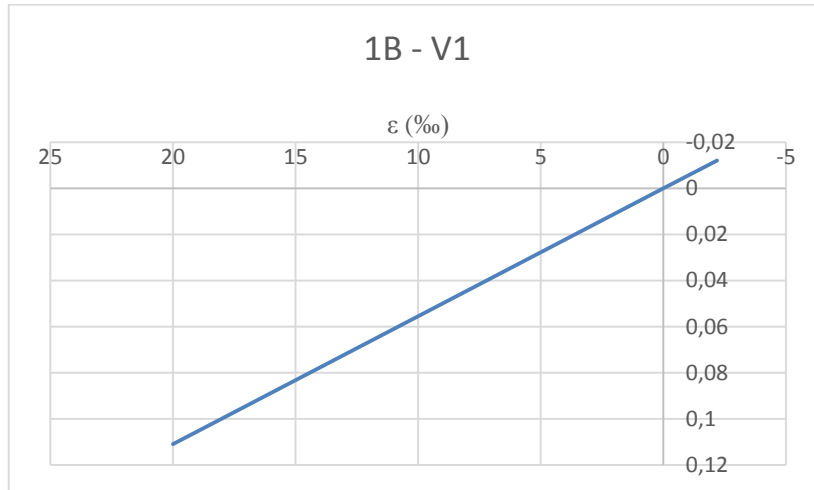
# A5

DIAGRAMAS DE EXTENSÕES CALCULADOS PELOS REGULAMENTOS  
(ALGUNS EXEMPLOS)

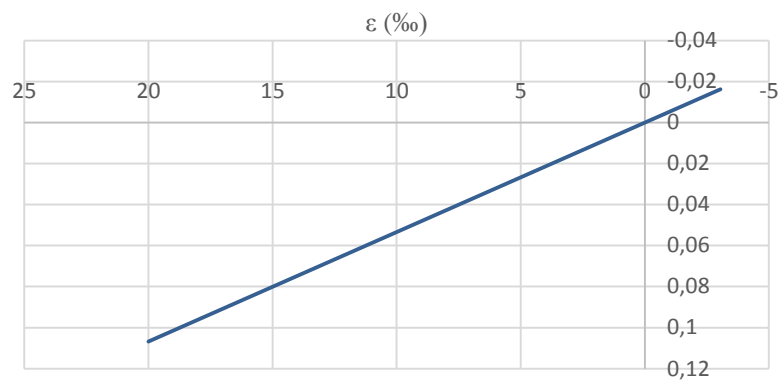


Diagramas de extensões calculados para controlo da extensão máxima na secção, seguindo os regulamentos:

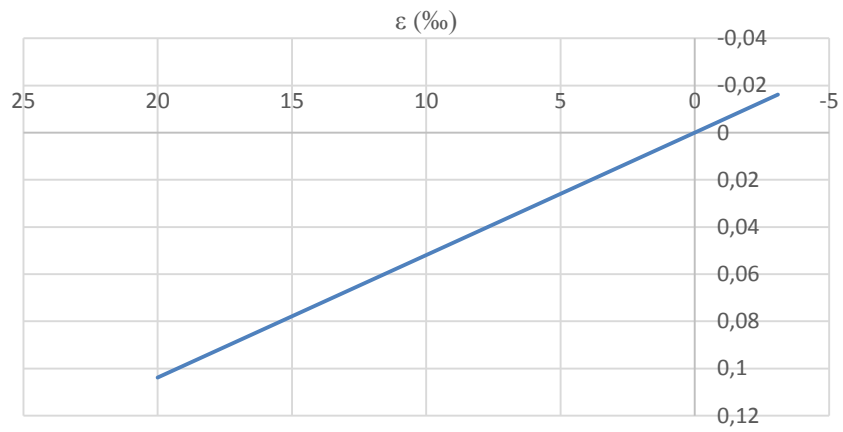
Model Code:



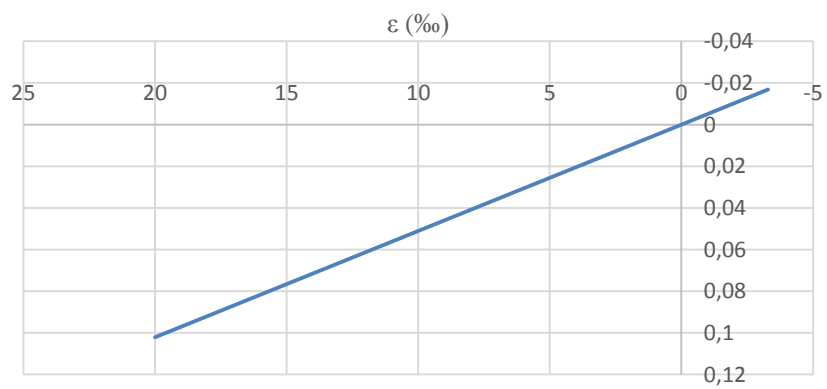
### 1D - V1



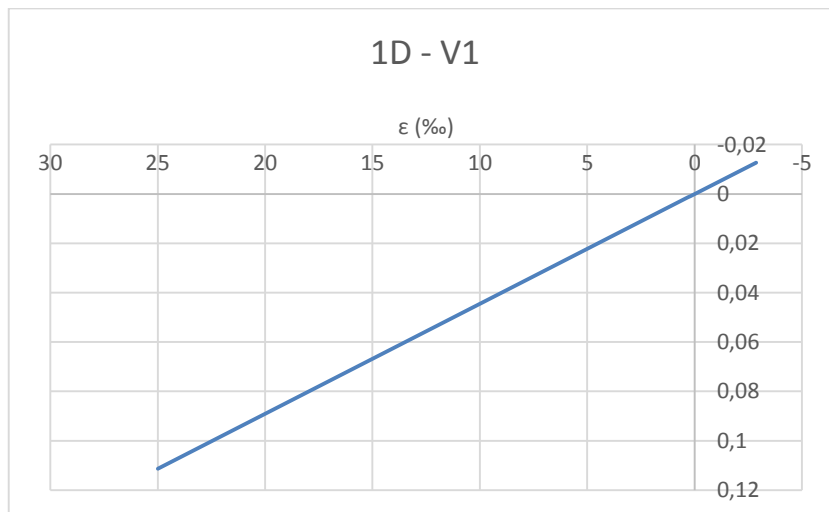
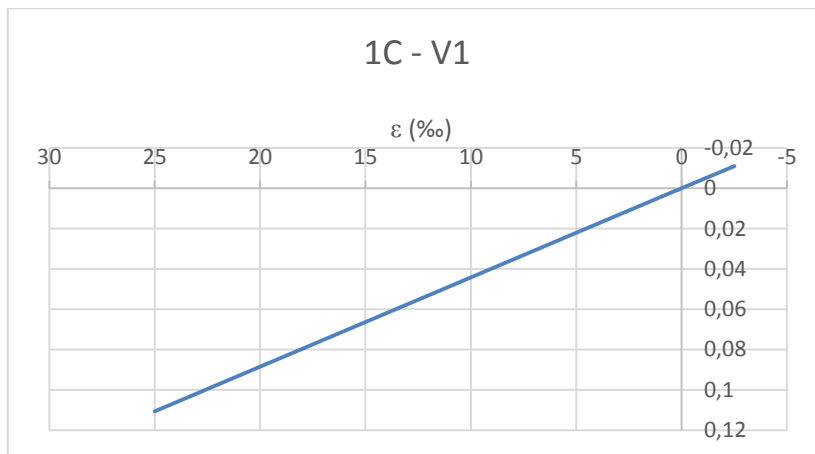
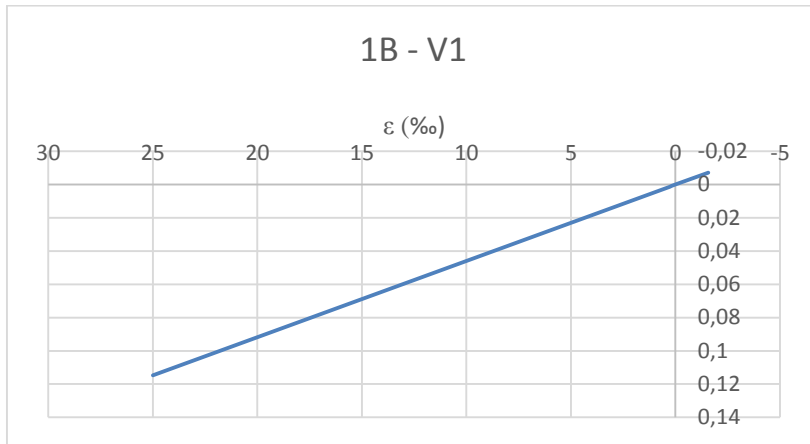
### 2D - V1

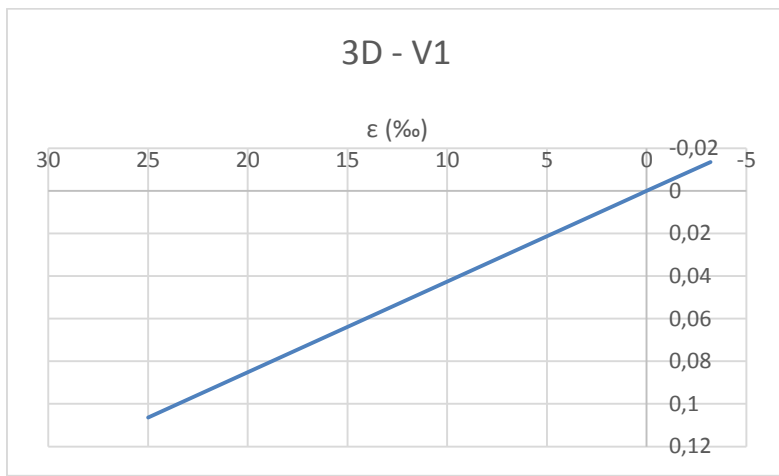
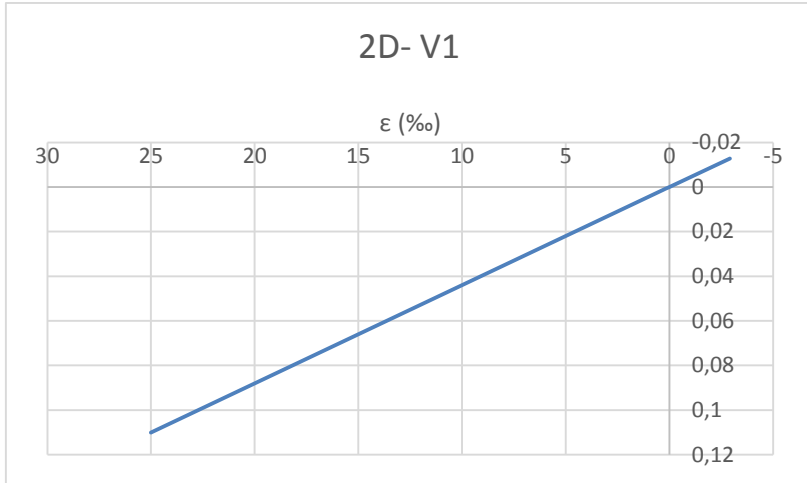


### 3D - V1

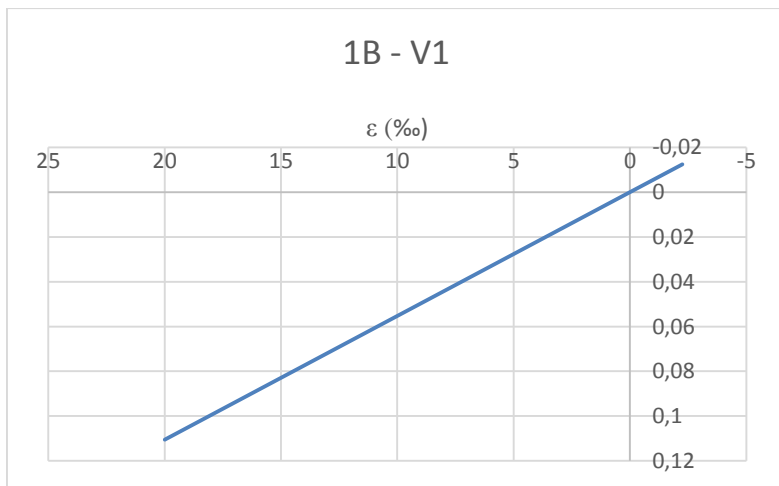


Rilem

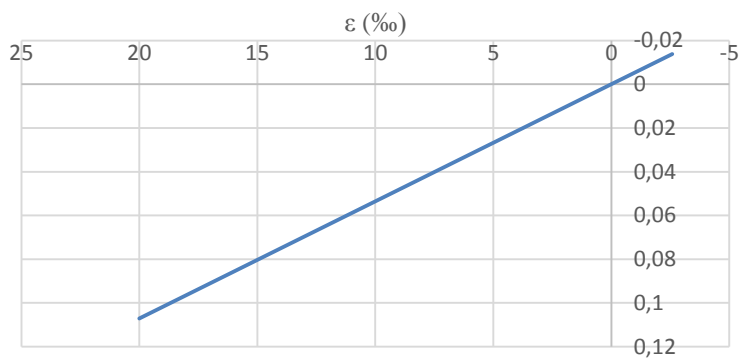




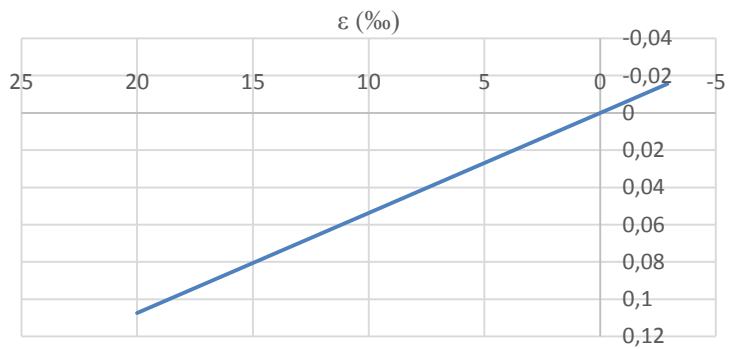
EHE 08



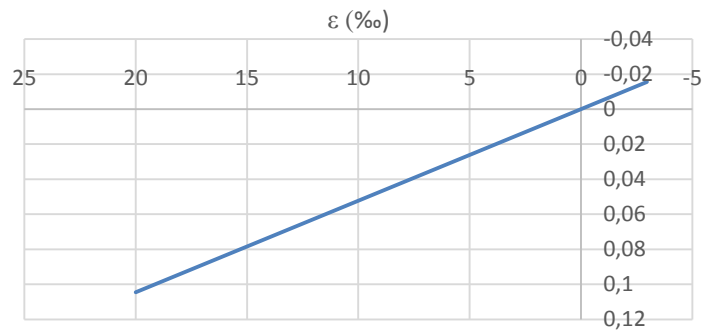
### 1C - V1



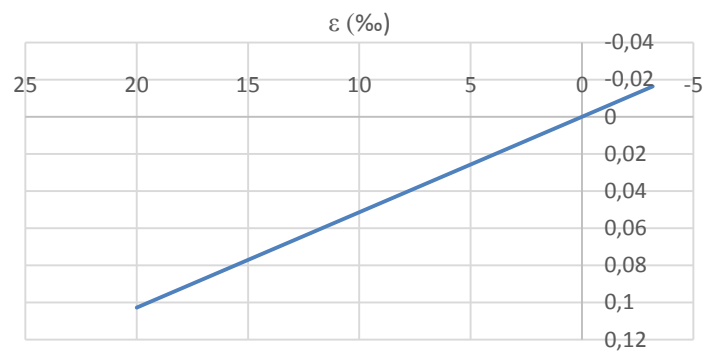
### 1D - V1



### 2D - V1



### 3D - V1



**A6**

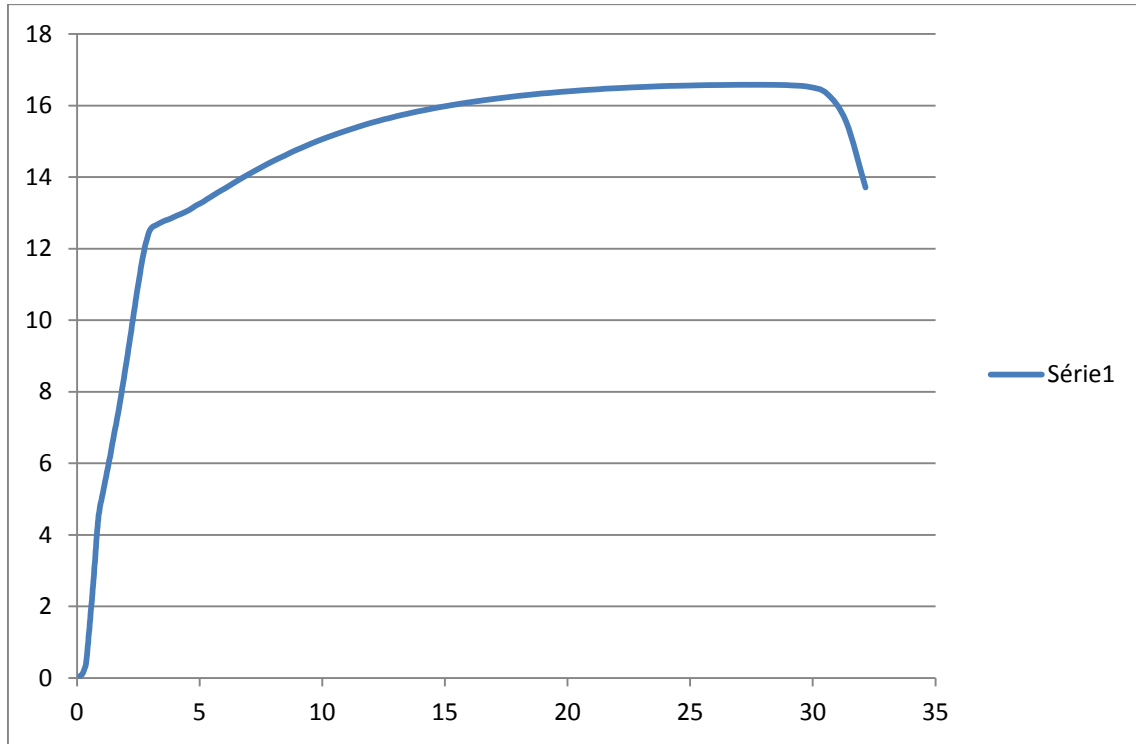
DIAGRAMAS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO REALIZADOS A VARÕES DE AÇO



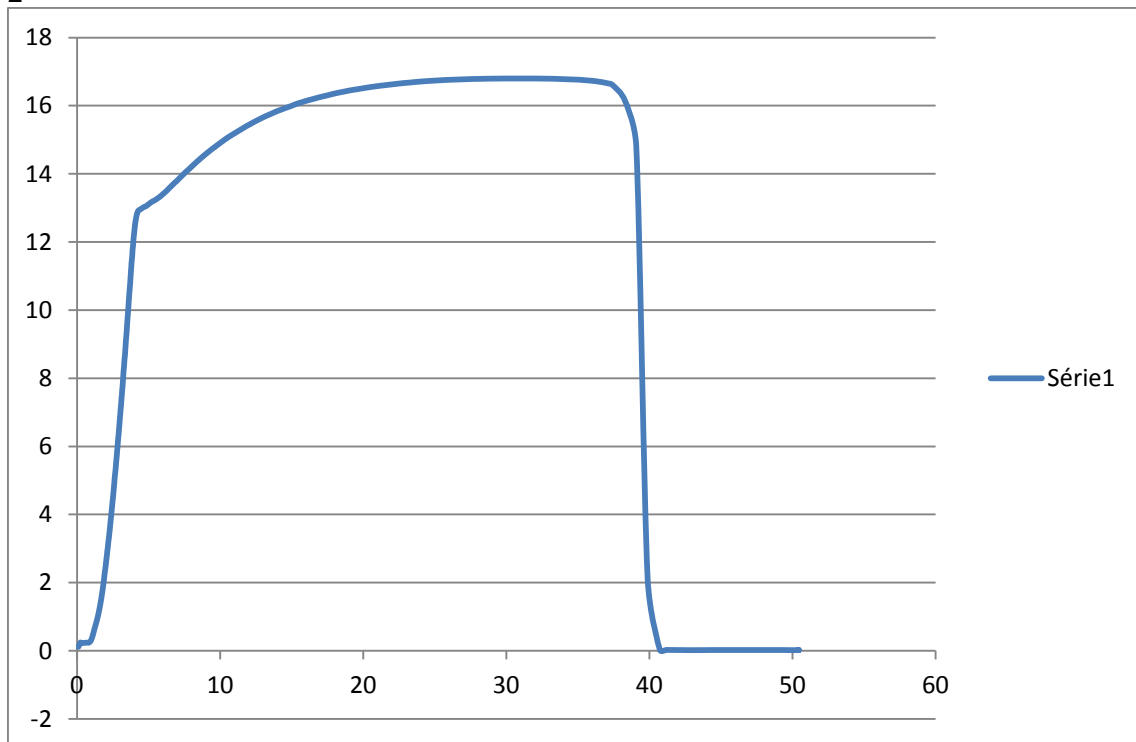
Diagramas dos ensaios de resistência à tração dos varões de aço.

**Varões de  $\phi 6$**

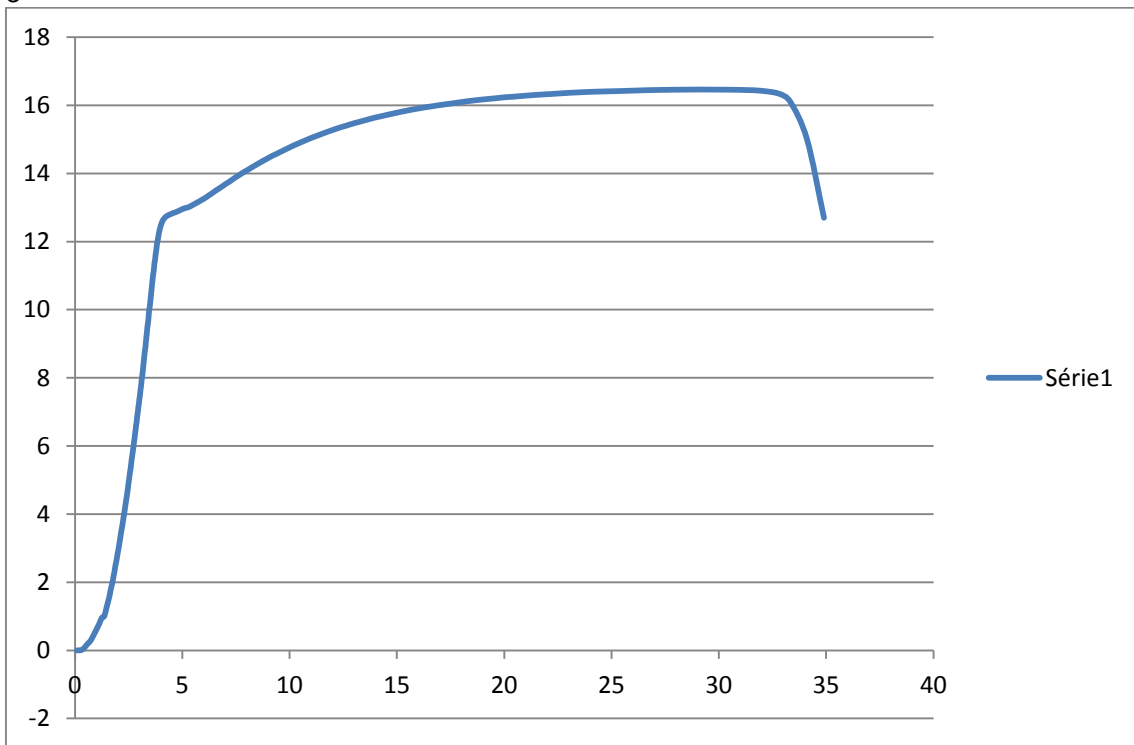
1



2

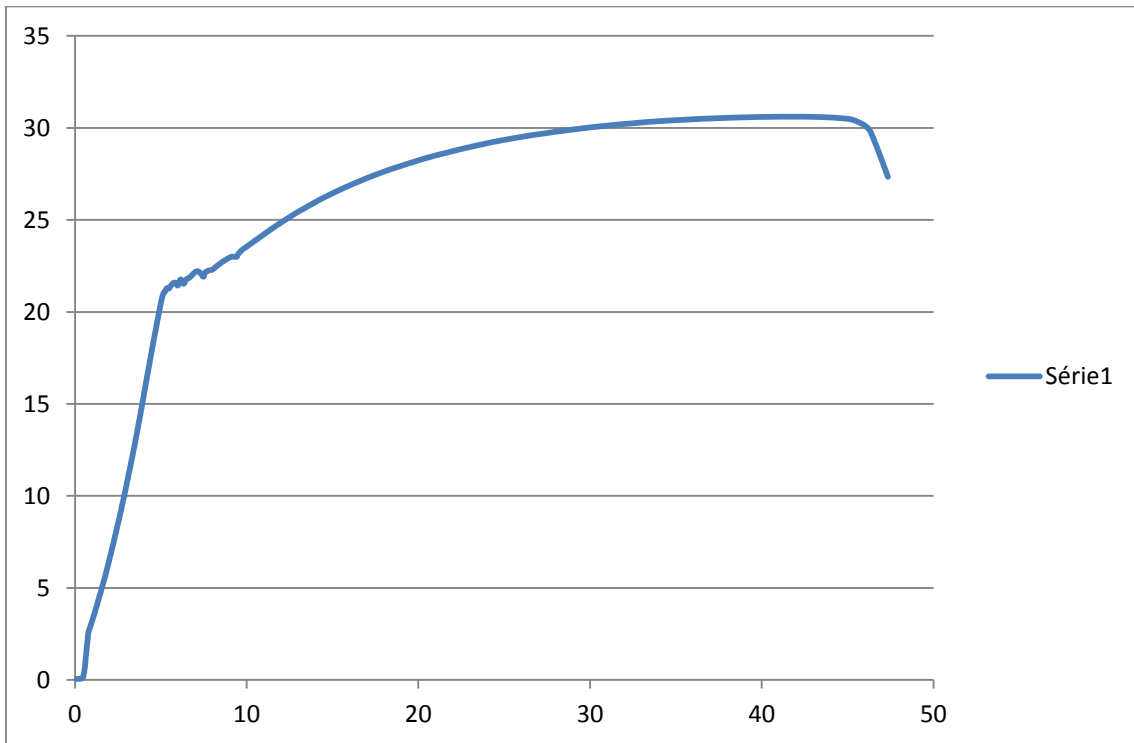


3

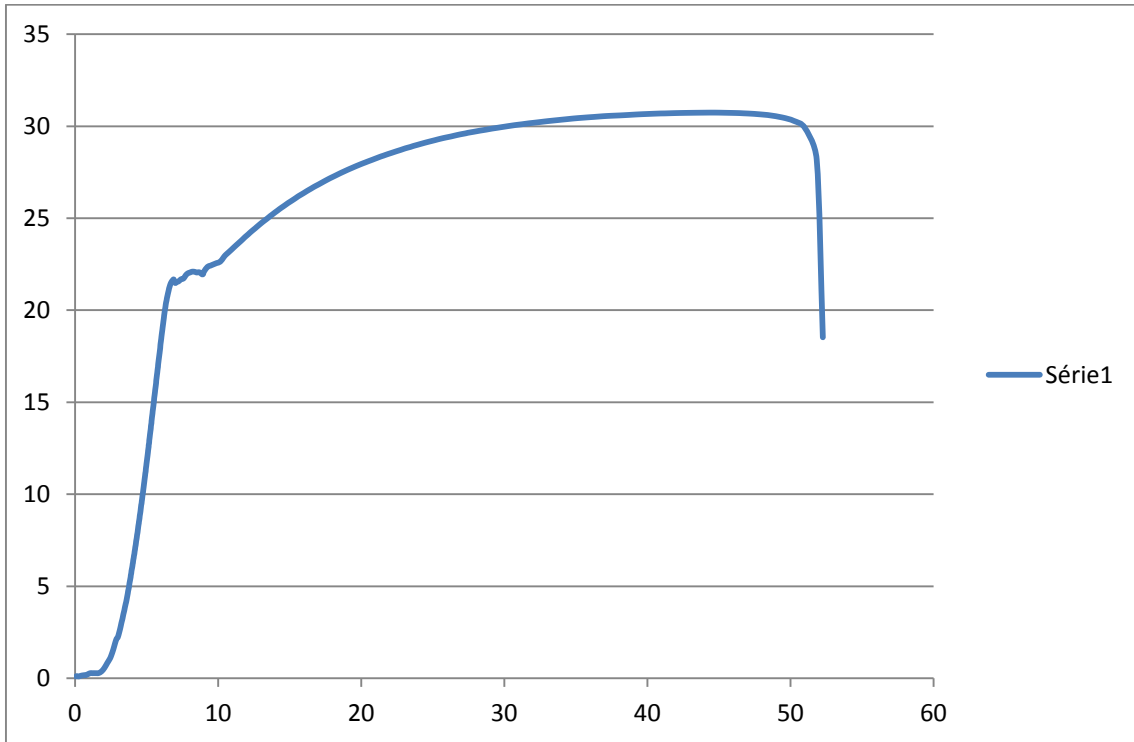


Varões de  $\phi 8$

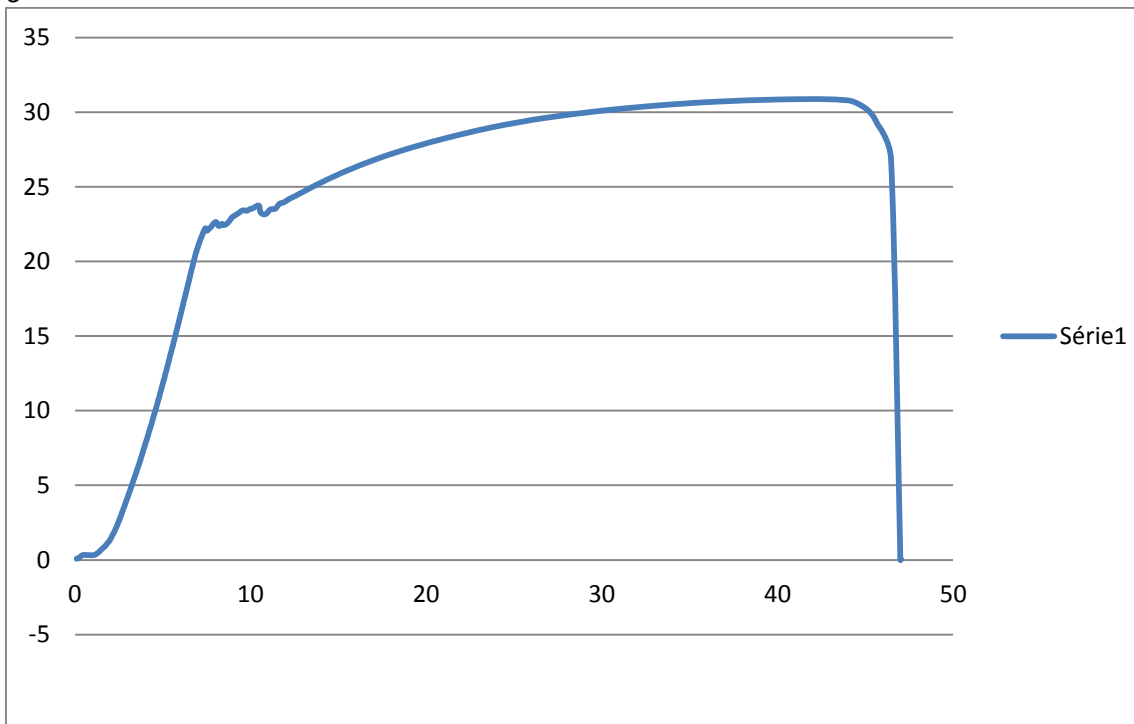
1



2

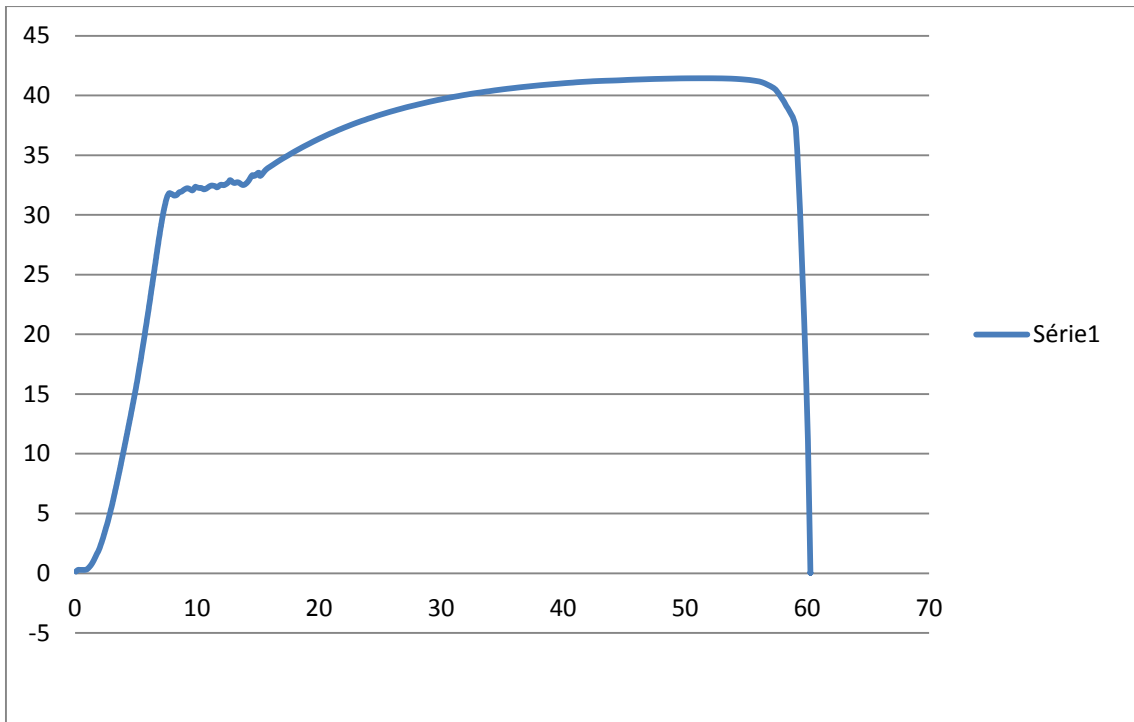


3

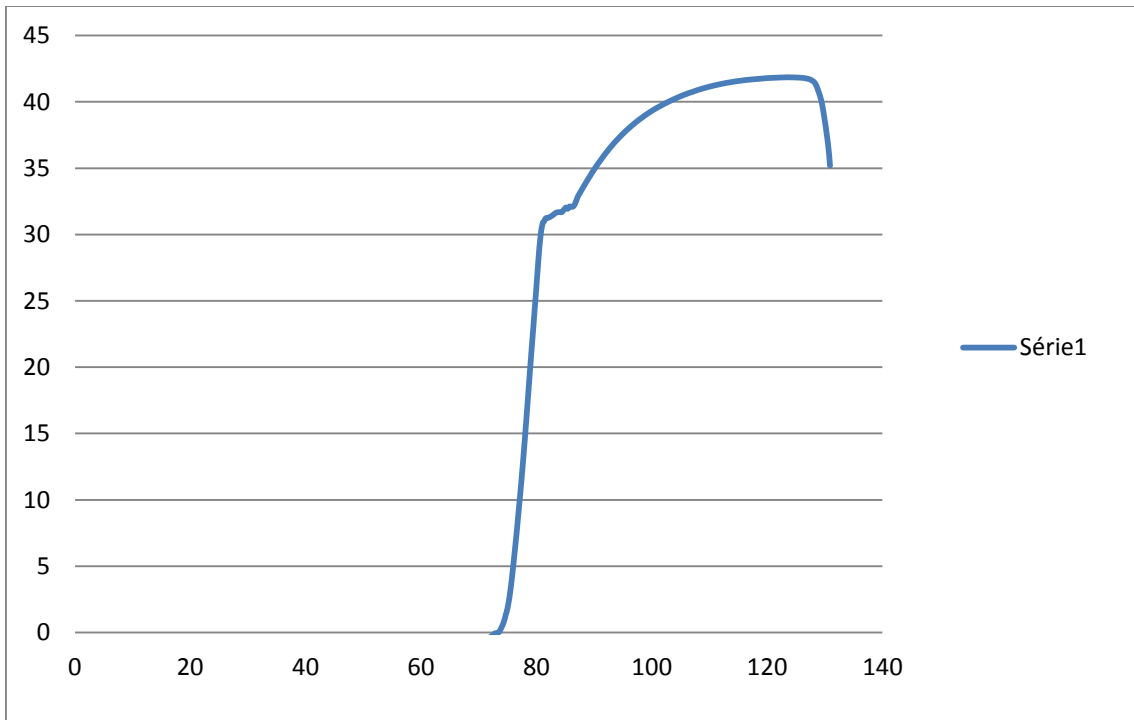


### Varões de $\phi 10$

1



2



3

