



Mestrado em Engenharia Civil

---

**Aplicação de métodos avançados de  
processamento de imagem a ensaios de tirantes  
de betão armado**

Tese apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil  
Especialização em Construção Urbana

**Autor**

**David Lino Azevedo da Silva**

**Orientadores**

**Ricardo Nuno Francisco do Carmo**

Professor do Departamento Engenharia Civil  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Jónatas Miguel de Almeida Valença**

**Coimbra, Julho, 2016**

## **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor Ricardo do Carmo pelo empenho, rigor e ensinamentos ao longo de todo o trabalho. O seu fundamental contributo e disciplina melhoraram indubitavelmente a qualidade final deste trabalho.

Ao Professor Doutor Jónatas Valença, que sempre se disponibilizou a alcançar os objetivos propostos, pelo modo como planeou e estruturou todo o plano de trabalho. Foi com grande satisfação que desenvolvi este trabalho, e sem a sua orientação não seria possível.

Ao Técnico de Laboratório, Sr. António Amaral, que acompanhou com afínco todas as etapas dos ensaios laboratoriais deste trabalho, agradeço todo o tempo e disponibilidade despendidos.

Ao Professor Paulo Maranha, pela solução e obtenção do sistema de ancoragem utilizado nos ensaios, bem como todos os conhecimentos que me facultou ao longo do meu percurso académico.

Ao Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Engenharia Coimbra, por todas as condições oferecidas que permitiram a elaboração deste trabalho, em particular o Laboratório de Estruturas e o Laboratório de Materiais de Construção.

Aos meus pais e aos meus irmãos, por todo o apoio que sempre disponibilizaram.

A todos os meus amigos, que estiveram sempre presentes.

À Sofia, pela força que sempre me transmitiu.

## Resumo

A compreensão do comportamento estrutural de elementos de betão durante a realização de ensaios laboratoriais requer a sua monitorização detalhada. O padrão de fendilhação é um dos parâmetros essenciais a considerar na análise da resposta estrutural, sendo por isso fundamental caracterizar a fendilhação - deteção, mapeamento e medição. O recurso a métodos tradicionais torna esta tarefa muito morosa, trabalhosa e pouco precisa. O desenvolvimento recente de métodos e equipamentos óticos digitais tornou interessante e acessível a sua utilização em vários campos, incluindo a monitorização de estruturas e elementos de betão. A evolução de fendas, extensões e deslocamentos ao longo de ensaios laboratoriais em superfícies de betão tem sido estudada com recurso a técnicas de fotogrametria e processamento de imagem.

A utilização de métodos que utilizam a fotogrametria e o processamento digital de imagens, permite detetar, mapear e medir fendas automaticamente. O método *MCRACK*, (J. Valença *et al*, 2012) em particular, apresenta várias vantagens em relação aos métodos tradicionais, tais como: rapidez, eficiência, volume de informação obtida, e também fiabilidade, porque os dados são processados automaticamente e não correm o risco de sofrer erros originados pelo operador.

Esta dissertação incidiu no estudo de ensaios de tração a dois tirantes de betão armado, que foram monitorizados através de monitorização tradicional, LVDTs e extensómetros, bem como através de fotogrametria e processamento de imagem. A informação obtida permitiu a obtenção de mapas de deslocamentos e de extensões nas superfícies dos provetes. Permitiu também a medição e mapeamento de fendas e a sua evolução ao longo dos ensaios.

O principal objetivo do trabalho consistiu em estimar a extensão média no aço a partir da informação registada na superfície dos provetes, nomeadamente, largura e distância entre fendas e extensões do betão. Pretendeu-se apresentar um estudo exploratório de um método alternativo/complementar ao método tradicional de medição de extensões no aço.

**Palavras-chave:** monitorização; padrão de fendilhação; betão armado; fotogrametria; processamento digital imagem; extensómetros.

## Abstract

The complete understanding of structural behavior of reinforced concrete elements during laboratorial testing requires its detailed monitoring. The anomaly that provides most information in terms of structural pathology is the cracking, being the utmost importance that its evolution is detected, mapped and measured. However, using exclusively traditional methods of monitoring can make this task be time consuming, laborious and inaccurate. The recent development of both methods and digital optics equipment's provide the convenience and the attainability of its use in several fields, including structural and concrete specimen monitoring. Cracking evolution, extensions and displacements monitoring, during laboratorial testing has been studied using distinct techniques, such as photogrammetry and digital image processing.

The use of technics that uses photogrammetry and digital image processing, allows to obtain the information about the crack formation, its detection, mapping and measurement automatically. Technics like the MCRACK method (J. Valença *et al*, 2012) in particular, provide several advantages comparing with the traditional methods, such as speed, efficiency, amount of information obtained and also reliability, since all the information is automatically processed and therefore unable to suffer errors due to the interference of the operator.

This dissertation focused in the study of two reinforced concrete specimen that where tested and monitored, by both traditional methods, LVDTs and strain gauges, and by photogrammetry and digital image processing methods. The information obtained allowed to know the displacements and extensions on the surface of the specimens. Also, allows the mapping and measure of cracks throughout the tests with great accuracy.

The major objective of this work aims to estimate the median extension of the steel, using solely the information obtained by the monitoring of the specimen surface, namely the width and spacing between cracks and concrete extensions.

This dissertation aims to be an alternative/additional method to traditional monitoring methods, in particular, the steel strain gauge.

**Keywords:** monitoring; crack pattern; reinforced concrete; photogrammetry; digital image processing; strain gauges.

---

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>ii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iv</b>
<b>Índice</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice de Quadros</b> .....	<b>xii</b>
<b>Simbologia</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Abreviaturas</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Organização da dissertação .....	2
<b>2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b> .....	<b>5</b>
2.1. Análise e processamento de imagem .....	5
2.1.1. Enquadramento .....	5
2.1.2. Processamento digital de imagem .....	6
2.2. Fotogrametria .....	7
2.2.1. Breves notas históricas .....	7
2.2.2. Áreas de aplicação da fotogrametria .....	9
2.3. Fotogrametria e processamento digital na monitorização de estruturas .....	10
2.4. Monitorização tradicional .....	18
2.4.1. Enquadramento .....	18
2.4.2. Extensómetros .....	18
2.4.3. Transdutor de deslocamentos, LVDT .....	19
2.4.4. Célula de carga .....	20
2.5. Aderência aço-betão .....	21
2.5.1. Introdução .....	21
2.5.2. Mecanismo de aderência .....	22
2.5.3. Fatores que influenciam a aderência .....	23
2.5.4. Referência a alguns estudos sobre a aderência aço-betão: .....	23
2.6. Fendilhação e Deformação dos elementos de betão armado .....	24
2.7. Parâmetros de avaliação .....	29
2.7.1. Introdução .....	29

---

2.7.2. Exatidão e precisão .....	29
2.7.3. Erro das medições .....	30
2.7.4. Parâmetros estatísticos .....	31
<b>3. METODOLOGIA UTILIZADA .....</b>	<b>33</b>
3.1. Introdução.....	33
3.2. Método MCRACK adaptado .....	33
3.2.1. Enquadramento .....	33
3.2.2. Descrição do método MCRACK .....	33
3.2.3. Metodologia utilizada estimar extensão no betão.....	35
3.2.4. Metodologia utilizada estimar extensão no aço.....	35
3.2.5. Teste preliminar.....	36
<b>4. CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>39</b>
4.1. Introdução.....	39
4.2. Caracterização dos tirantes .....	39
4.2.1. Caracterização do aço .....	39
4.2.2. Caracterização do betão .....	40
4.3. Fabrico dos tirantes .....	41
4.4. Instrumentação instalada.....	42
4.4.1. Monitorização tradicional.....	42
4.4.2. Monitorização através de imagem.....	47
4.5. Setup de ensaio.....	47
<b>5. ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
5.1. Introdução.....	51
5.2. Definição do gráfico força-deslocamento dos ensaios.....	53
5.2.1. Gráfico força-deslocamento do tirante 0.....	55
5.2.2. Gráfico força-deslocamento do tirante 1.....	56
5.2.3. Gráfico força-deslocamento do tirante 2.....	57
5.3. Extensões nas armaduras obtidas por extensometria .....	59
5.3.1. Extensões nas armaduras obtidas por extensometria no tirante 1 .....	59
5.3.2. Extensões nas armaduras obtidas por extensometria no tirante 2 .....	61
5.4. Avaliação de distribuição de extensões nas armaduras .....	63
5.4.1. Extensões no tirante 0.....	63
5.4.2. Extensões no tirante 1.....	64
5.4.3. Extensões no tirante 2.....	65
5.5. Erros da fotogrametria e processamento de imagem .....	66
5.5.1. Erros no ensaio do tirante 0 .....	66

---

---

5.5.2. Erros no ensaio do tirante 1 .....	66
5.5.3. Erros no ensaio do tirante 2 .....	67
5.5.4. Comentário global dos erros nos ensaios .....	67
5.6. Mapa de deslocamentos .....	69
5.6.1. Mapa de deslocamentos do tirante 0 .....	69
5.6.2. Mapa de deslocamentos do tirante 1 .....	70
5.6.3. Mapa de deslocamentos do tirante 2 .....	71
5.6.4. Análise dos mapas de deslocamentos .....	71
5.7. Mapa de extensões .....	73
5.7.1. Mapa de extensões do tirante 0 .....	73
5.7.2. Mapa de extensões do tirante 1 .....	74
5.7.3. Mapa de extensões do tirante 2 .....	75
5.8. Comparação de deslocamentos determinados pelas duas metodologias .....	76
5.9. Largura das fendas obtida por fotogrametria .....	78
5.10. Estimativas das extensões no aço e comparação com as leituras dos extensômetros ..	80
5.10.1. Comparação de extensões previstas no tirante 1 .....	80
5.10.2. Comparação de extensões previstas no tirante 2 .....	84
5.10.3. Análise do efeito de $\epsilon_{cm}$ em $\epsilon_{sm}$ .....	88
5.10.4. Comparação de tensões no tirante 1 .....	88
5.10.5. Comparação de tensões no tirante 2 .....	89
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
6.1. Conclusões .....	91
6.1.1. Comparação de deslocamentos .....	92
6.1.2. Mapas de deslocamentos .....	92
6.1.3. Mapas de extensões .....	93
6.1.4. Comparação de extensões no aço .....	93
6.1.5. Erros da metodologia .....	93
6.2. Desenvolvimentos futuros propostos .....	94
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>



## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Ensaio; a) tração, b) esforço transversal, c) compressão, (Benning <i>et al</i> , 2004) .....	11
Figura 2.2 – Superfície de betão, (Benning <i>et al</i> , 2004) .....	11
Figura 2.3 - Superfície provete ensaiado; a) fotografia, b) mapa de extensões (Lange <i>et al</i> , 2006) .....	12
Figura 2.4 – Detecção de fissuras, (Barazzetti e Scaioni, 2009) .....	13
Figura 2.5 - Comparação de deslocamentos, (Barazzetti e Scaioni, 2010) .....	14
Figura 2.6 - Mesa sísmica e posição de alvos monitorizados (Kim e Kim, 2011) .....	15
Figura 2.7 - Viaduto Samseung e posição de alvos monitorizados (Kim e Kim, 2011) .....	15
Figura 2.8 – Extensómetro utilizado .....	19
Figura 2.9 - a) Estrutura básica de um LVDT; b) Amplitude de tensão de saída de um LVDT (Félix, 2004); c) Exemplo de LVDT utilizado .....	20
Figura 2.10 – a) Exemplo célula de carga, b) Representação esquemática (TML, 2012) .....	20
Figura 2.11 - Efeito do aumento de volume das armaduras na fendilhação do betão (Appleton, 2004) .....	27
Figura 2.12 – Exatidão e precisão .....	29
Figura 2.13 – Exatidão e precisão .....	30
Figura 3.1 Avaliação da fissura ao longo do seu desenvolvimento, (Valença <i>et al</i> , 2010) .....	34
Figura 3.2 - Perfis medição de largura de fendas, (Carmo <i>et al</i> , 2015) .....	35
Figura 3.3 Extensómetro na superfície do varão de aço (Bento, 2013) .....	36
Figura 4.1 - Diagrama tensão-extensão típico de aço laminado a quente (EC2 (3.2.4 a)) .....	40
Figura 4.2 - Provetes armazenados em tanque de cura .....	41
Figura 4.3 - Constituintes na misturadora; betonagem e vibração do betão na cofragem .....	42
Figura 4.4 – Pormenor do betão na cofragem .....	42
Figura 4.5 - Pormenor do entalhe no varão em corte transversal antes e depois da colocação de extensómetros .....	43
Figura 4.6 - Pormenor do entalhe no varão em vista e colocação dos extensómetros .....	44
Figura 4.7 - Pormenor do entalhe no varão e da colocação dos fios .....	44
Figura 4.8 - Pormenor da posição dos LVDTs durante os ensaios em vista frontal e lateral .....	46
Figura 4.9 - <i>Datalogger</i> e <i>Dynatester</i> .....	47
Figura 4.10 - a) Provede pronto a ser ensaiado; b) <i>Setup</i> completo do ensaio .....	49
Figura 4.11 - a) Teste ao sistema de ancoragem; b) Pormenor do sistema de ancoragem a ser ensaio .....	49
Figura 5.1 - Gráfico força - deslocamento do tirante 0 .....	51
Figura 5.2 - Gráfico força - deslocamento do tirante 1 .....	52
Figura 5.3 - Gráfico força - deslocamento do tirante 2 .....	52
Figura 5.4 - Relação tensão-extensão para um tirante betão armado (Carmo, 2012) .....	53
Figura 5.5 – Extensões no betão e na armadura na região da 1ª fenda (Carmo, 2012) .....	54

---

Figura 5.6 – Extensões no betão e na armadura depois da estabilização da fendilhação (Carmo, 2012).....	54
Figura 5.7 - Gráfico força-deslocamento do tirante 0.....	56
Figura 5.8 - Gráfico força-deslocamento do tirante 1.....	57
Figura 5.9 - Gráfico força-deslocamento do tirante 2.....	58
Figura 5.10 - Gráficos F- $\epsilon$ do tirante 1.....	59
Figura 5.11 - Gráficos $\sigma$ - $\epsilon$ do tirante 1.....	60
Figura 5.12 - Gráficos F- $\epsilon$ do tirante 2.....	61
Figura 5.13 - Gráficos $\sigma$ - $\epsilon$ do tirante 2.....	62
Figura 5.14 - Extensões no tirante 0.....	63
Figura 5.15 - Extensões no tirante 1.....	64
Figura 5.16 - Extensões no tirante 2.....	65
Figura 5.17 - RMS em X e Y, tirante 0.....	66
Figura 5.18 - RMS em X em Y, tirante 1.....	66
Figura 5.19 – RMS em X e em Y tirante 2.....	67
Figura 5.20 - Mapa de deslocamentos do tirante 0.....	69
Figura 5.21 - Mapa de deslocamentos do tirante 1.....	70
Figura 5.22 – Mapa de deslocamentos do tirante 2.....	71
Figura 5.23 - Mapa de extensões do tirante 0.....	73
Figura 5.24 - Mapa de extensões do tirante 1.....	74
Figura 5.25 - Mapa de extensões do tirante 2.....	75
Figura 5.26 - Comparação de deslocamentos do tirante 0.....	76
Figura 5.27 - Comparação de deslocamentos do tirante 1.....	77
Figura 5.28 - Comparação de deslocamentos do tirante 2.....	77
Figura 5.29 - Identificação de fendas tirante 1.....	78
Figura 5.30 - Identificação de fendas tirante 2.....	79
Figura 5.31 – Representação esquemática das áreas de influência do tirante 1.....	80
Figura 5.32 – Gráficos de comparação de extensões para o tirante 1.....	81
Figura 5.33 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 1.....	81
Figura 5.34 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 1.....	82
Figura 5.35 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 1.....	82
Figura 5.36 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 1.....	83
Figura 5.37 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 1.....	83
Figura 5.38 - Representação esquemática das áreas de influência do tirante 2.....	85
Figura 5.39 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 2.....	85
Figura 5.40 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 2.....	86
Figura 5.41 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 2.....	86
Figura 5.42 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 2.....	87

---

Figura 5.43 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 2 .....	87
Figura 5.44 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 2 .....	88
Figura 5.45 – Comparação de tensões do tirante 1.....	89
Figura 5.46 - Comparação de tensões do tirante 2 .....	89

## Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Classes exposição (CEN, 2004) .....	26
Quadro 3.1– Comparação de extensões .....	37
Quadro 4.1 - Composição do betão .....	40
Quadro 4.2 - Características do betão .....	41
Quadro 5.1 - Erro vs. deslocamentos .....	67
Quadro 5.2 - Largura de fendas, tirante 1 .....	78
Quadro 5.3 - Largura de fendas, tirante 2 .....	79

## Simbologia

$\Omega$	Valor de resistência elétrica
$\alpha_e$	Relação $E_s/E_c$ ou $E_f/E_c$
$\alpha_I$	Valores do parâmetro calculado para o estado não fendilhado
$\alpha_{II}$	Valores do parâmetro calculado para o estado fendilhado
$\beta$	Coefficiente que tem conta a influência na extensão média da duração do carregamento ou da repetição do carregamento
$\varepsilon$	Extensão
$\Delta L$	Variação de comprimento do elemento
$L$	Comprimento inicial do elemento
$R$	Resistência do extensômetro
$\Delta R$	Variação da resistência do extensômetro
$K$	Fator do extensômetro
$E$	Módulo de elasticidade, ou Módulo de Young
$\alpha$	Parâmetro de deformação considerando que poderá ser uma extensão, uma curvatura ou uma rotação
$\zeta$	Coefficiente de distribuição que tem em conta a distribuição do betão tracionado entre fendas
$\varepsilon_{sm}$	Extensão média no aço
$\varepsilon_{cm}$	Extensão média no betão entre fendas
$\sigma_s$	Tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada
$\sigma_{sr}$	Tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação
$M$	Momento fletor
$M_{cr}$	Momento fletor que provoca fendilhação
$N$	Esforço axial
$N_{cr}$	Esforço de tração que provoca fendilhação
$w_{max}$	Largura de fendas máxima
$w_k$	Largura de fendas característica
$c_{nom}$	Recobrimento nominal
$c_{min}$	Recobrimento mínimo de betão nas armaduras
$Sr_{máx}$	Distância máxima entre fendas
$\rho_{p,eff}$	Taxa de armadura de tração em relação ao betão tracionado
$K_t$	coeficiente em função da duração do carregamento
$\sigma$	Desvio-padrão
$n$	número de amostras
$\Delta$	Variação entre valores da amostra da variável
$x_i$	Valor $i$ da amostra
$\bar{x}$	Média dos valores da amostra

---

$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$E_c$	Módulo de elasticidade do betão
$w$	Largura de fendas
$\varepsilon_s$	Extensão no aço
$\varepsilon_c$	Extensão no betão
$f_t$	Resistência à tração
$f_{yk}$	a tensão de cedência ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%
$\varepsilon_{uk}$	Valor característico da extensão no aço na carga máxima
$\delta$	Deslocamento
$\delta_{,fot}$	Deslocamento estimado por fotogrametria
$\delta_{,lvdt}$	Deslocamento medido por LVDT
$F$	Força

## Abreviaturas

BEAL	Betão de agregados leves
CEB	Comité euro-International du Béton
EC2	Eurocódigo 2
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i> , transdutor de deslocamentos
CWR	<i>Crack width ruler</i> , régua de espessuras padrão
GROI	<i>Global Region of Interest</i> , região de interesse global
LROI	<i>Local Region of Interest</i> , região de interesse local
MM	Morfologia Matemática
RMS	<i>Root Mean Square</i> , raiz média quadrática
QSP	Qualidade Siderúrgica Portuguesa

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento

A monitorização estrutural é fundamental para a caracterização e compreensão do seu comportamento. A monitorização das secções chave dos seus elementos, em particular, para determinar deslocamentos e esforços, permitem compreender a sua resposta a ações externas.

Tradicionalmente, no caso de elementos de betão armado, a monitorização é realizada com transdutores de deslocamentos, para medição dos deslocamentos e rotações, e extensómetros, para medição de extensões. A instalação destes equipamentos pode tornar-se difícil e morosa, devido ao elevado número de secções a monitorizar. Estes métodos de monitorização estão também limitados pela quantidade equipamentos disponíveis, custos inerentes à sua utilização, espaço que ocupam, *software* específico de registo da informação, entre outros fatores. Os transdutores de deslocamentos (LVDT - *Linear variable differential transformer*) são colocados em secções chave da superfície do elemento a monitorizar. A informação que registam é pontual e unidirecional e apesar de rigorosa, em certas condições apresentam limitações. Nos casos em que os extensómetros são colocados nas superfícies de varões de aço no betão armado, pode haver interferência na aderência entre o aço e betão, e comprometer a sua resposta estrutural, visto ser necessário preparar a superfície do varão de aço. Adicionalmente é requerido que os extensómetros possuam dimensões reduzidas, para que a sua instalação não influencie o comportamento estrutural.

A fotogrametria e o processamento de imagem, para além de serem técnicas não destrutivas e de não contacto, permitem a caracterização do padrão de fendilhação e de deformações (deslocamentos, curvaturas e rotações). Estudos recentes demonstram a utilidade destas técnicas num vasto campo de aplicações, nomeadamente na determinação de momentos fletores em elementos de betão (Dias-da-Costa *et al*, 2013) e (Carmo *et al*, 2013), determinação de deslocamentos (Gomes, 2013) e em medição de fendas (Valença *et al*, 2011).

Esta dissertação incide na análise de dados obtidos por fotogrametria e processamento de imagem para caracterizar os campos de deslocamentos e deformações quer no betão quer nas armaduras. De realçar que o método proposto para estimar as extensões no aço não necessita de ter contacto com o aço, como acontece com os extensómetros tradicionais, e por isso não interfere com a aderência aço-betão.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo aplicar a fotogrametria e processamento de imagem de um modo inovador, mais especificamente, estimar a extensão média do aço no interior de elementos de betão armado através do processamento de imagens digitais da superfície do elemento estrutural.

Para se atingir este objetivo foi necessário: (1) calcular o campo de deslocamentos e de deformações em superfícies de betão a partir dos dados (coordenadas) obtidos por fotogrametria; (2) analisar o padrão de fendilhação através de processamento de imagem; e (3) desenvolver um procedimento para determinar as extensões nas armaduras em betão armado com os dados obtidos nos pontos anteriores. O método proposto foi aplicado em ensaios de tirantes de betão armado no âmbito de um programa experimental especificamente desenvolvido para este trabalho.

## 1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos.

No presente capítulo I é feita uma introdução à presente dissertação, no qual é realizado um enquadramento do tema abordado, são apresentados os objetivos propostos a atingir no decorrer do presente trabalho e é também descrito o modo de como a dissertação está organizada.

No capítulo II são apresentados os conceitos fundamentais, acerca dos temas e técnicas que se abordam neste trabalho, bem como os estudos mais relevantes tidos em conta, onde se descreve as aplicações da fotogrametria e do processamento digital na monitorização estrutural. É realizada uma comparação da fotogrametria com os métodos tradicionais, nomeadamente a extensometria. Neste capítulo é ainda analisado o fenómeno da fendilhação em elementos de betão armado e da aderência aço-betão.

No capítulo III é apresentado a metodologia desenvolvida que aplica a fotogrametria e processamento de imagem para estimar a extensão média nas armaduras que posteriormente permitirá determinar as tensões aplicadas. A metodologia desenvolvida é validada através de monitorização tradicional, nomeadamente com recurso a extensómetros bem como transdutores de deslocamentos, LVDTs.

No capítulo IV é analisado um caso de estudo que consiste no ensaio de dois tirantes de betão armado com as dimensões de  $0.1 \times 0.1 \times 0.8 \text{ m}^3$ , com apenas um varão no centro da sua secção. Os tirantes ensaiados são iguais, i.e., o varão tem o mesmo diâmetro, as dimensões são as mesmas e o betão utilizado mesmo é também igual. Os tirantes foram monitorizados usando os métodos tradicionais, através de extensómetros e LVDTs, e usando métodos mais recentes, fotogrametria e processamento de imagem.

No capítulo V é apresentada a análise dos resultados obtidos. Os dados obtidos foram tratados e são apresentados mapas de deslocamentos dos tirantes, bem como mapas de extensões. São realizadas várias análises e comparações entre as diferentes grandezas registadas pelos diferentes métodos de monitorização. É ainda apresentado o padrão de fendilhação dos tirantes, bem como a sua evolução ao longo do ensaio. Por fim, apresentam-se as estimativas das extensões nos varões de aço obtidas pela fotogrametria e compara-se com as extensões registadas pelos extensómetros.

No capítulo VI são apresentadas as principais conclusões relativas ao trabalho desenvolvido bem como sugestões para desenvolvimentos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas consideradas no estudo desenvolvido.



## 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

### 2.1. Análise e processamento de imagem

#### 2.1.1. Enquadramento

Desde o início da ciência, a observação visual desempenhou um papel fundamental. Inicialmente, o único modo de documentar os resultados de uma experiência era através de descrição verbal e desenho manual. A invenção da *fotografia* foi um grande passo que permitiu que as experiências e resultados pudessem ser objetivamente documentados. Dois exemplos proeminentes de aplicações científicas da fotografia são a *astronomia* e a *fotogrametria*. Os astrónomos foram capazes de medir posições e magnitudes de estrelas e através de fotogrametria produzir mapas topográficos através das imagens aéreas. Estes procedimentos manuais de avaliação eram contudo morosos. Alguns dispositivos optomecânicos semi ou totalmente automatizados foram desenvolvidos, contudo foram meramente adaptados a objetivos simples e específicos. Esta é a razão que justifica porque a avaliação quantitativa de imagens não se difundiu naquela altura. Geralmente, as imagens eram usadas unicamente para documentação, descrição qualitativa e ilustração do fenómeno observado. Contudo, atualmente estamos perante progresso de cálculo mais rápidos devido ao desenvolvimento da capacidade de processamento computacional. Os computadores tornaram-se mais capazes de processar os dados provenientes de imagens. Esta tecnologia está agora disponível a praticamente todas as pessoas, e como resultado, as técnicas de processamento de imagem podem ser aplicadas a virtualmente todas as ciências naturais e disciplinas técnicas associadas (Jähne, 2005).

Uma imagem pode ser definida como uma função de intensidade de luz bidimensional  $f(x,y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais, e o valor de  $f$  em qualquer par de coordenadas  $(x,y)$  é proporcional ao brilho ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Uma imagem digital é constituída por um número finito de elementos, cada um com determinada posição e valor, habitualmente tomam a designação de *picture elements*, *image elements*, *pels* ou *pixels* (Gonzalez *et al*, 2009), embora *pixel* seja a designação mais utilizada para designar esses elementos, e é a que será utilizada ao longo deste texto.

A visão é o sentido mais avançado da espécie humana, e não é surpreendente que as imagens desempenhem um papel importante na sua perceção da realidade. No entanto, ao contrário da visão humana, que está limitada à faixa visível do espectro eletromagnético, os equipamentos existentes para captação de imagens cobrem quase todo o espectro, desde os raios gama até às ondas de rádio. Além disso, existem equipamentos que permitem processar imagens geradas a partir de fontes que habitualmente os humanos utilizam ou associam à imagem, como por exemplo: ultrassonografia, microscopia eletrónica ou imagens virtuais. Desta forma, o processamento digital de imagem envolve um amplo e variado campo de aplicação, estando o seu desenvolvimento e interesse principalmente associado a duas áreas: a melhoria da informação discreta contida nos *pixels*, para uma

melhor interpretação humana; e o processamento de dados de imagem para o armazenamento, transmissão e representação, com o intuito de obter máquinas de percepção autónoma (Gonzalez *et al*, 2008).

Assim, o processamento de imagem digital em conjunto com outras técnicas permite obter informação relativamente a objetos, aos mais variados níveis: deteção, identificação, caracterização geométrica, realce e segmentação. Neste caso, *objeto* define todas as formas ou descontinuidades que possam ser isoladas na imagem (Gonzalez *et al*, 2008). Desta forma, é possível fazer análises precisas e exatas em vários domínios da Engenharia, nomeadamente: (1) a fotogrametria permite obter a geometria 3D de objetos a partir de imagens 2D, sendo aplicada na obtenção de informação cartográfica; (2) o processamento digital de imagem permite detetar, seleccionar e analisar objetos de forma automática e sistemática (Gonzalez *et al*, 2008; Valença, 2011), sendo aplicada nos mais diversos campos da sociedade e da ciência, em especial nas áreas da robótica e automação.

A aplicação destas técnicas na avaliação do estado de conservação e na monitorização do comportamento mecânico de estruturas de betão encontra-se em franco desenvolvimento, apesar de serem técnicas habitualmente utilizadas noutras áreas do Saber (Valença, 2011).

### **2.1.2. Processamento digital de imagem**

Por *processamento digital de imagem* entende-se o processamento de imagens digitais com recurso a um computador. As aplicações pioneiras da utilização de imagens digitais foram efetuadas na imprensa escrita, com o envio de imagens digitais utilizando um cabo subaquático, entre as cidades de Londres e Nova Iorque no início dos anos de 1920. A introdução do sistema de transmissão de imagens com recurso a cabos *Bartlane* diminuiu o tempo requerido para transportar uma imagem através do oceano Atlântico para menos de três horas, quando inicialmente era de mais de uma semana. Na década de 1930, foram realizadas mais experiências e diferentes aplicações nos processos desenvolvidos. De acordo com a definição apresentada anteriormente apesar destes processos envolverem imagens digitais, não existe processamento digital de imagem por não terem sido utilizados computadores. O processamento digital de imagem está intimamente ligado ao desenvolvimento do computador digital bem como das linguagens de programação (Gonzalez *et al*, 2008).

O progresso do processamento digital de imagem tem estado dependente de um modo indissociável do desenvolvimento dos computadores, devido à capacidade de armazenamento e de cálculo necessária. A juntar a esse facto, houve também a necessidade de apoio a tecnologias que incluam o armazenamento, a visualização e a transmissão de dados, para o seu desenvolvimento fosse impulsionado. A evolução da técnica foi essencialmente estimulada por aplicações espaciais que, posteriormente, levaram à sua aplicação, no final de 1960 e início de 1970, na área da Medicina, em observações remotas dos recursos da Terra, e na Astronomia. Atualmente, as aplicações são mais diversas,

tornando-se difícil organizar e captar toda a amplitude do campo de aplicação do processamento digital de imagem (Valença, 2011).

O processamento de imagem pode ser organizado através da fonte e do tipo de imagem utilizados. As fronteiras entre o processamento de imagem e outras áreas relacionadas tais como a análise de imagem e visão computacional, não são consensuais. Existe um procedimento habitual que faz a divisão do processamento digital de imagem em três tipos, que são realizados de forma contínua, e que são designados consoante o nível: *baixo*, *médio* e *alto*. Por processamento de *baixo nível* entende-se as operações básicas como o pré-processamento que reduz o ruído e permite realçar o contraste e a nitidez da imagem. Este tipo de processamento também é caracterizado pela sua entrada (*inputs*) e saída (*outputs*) serem imagens. Por processamento de *nível médio* entende-se as tarefas como a divisão da imagem em regiões ou objetos, designada como segmentação. O principal objetivo deste processamento é reduzir esses objetos à forma adequada, para aplicação do processamento e a caracterização (reconhecimento) de objetos individuais. Este tipo de processamento também é caracterizado pela sua entrada (*inputs*) serem imagens e a sua saída (*outputs*) serem atributos das imagens processadas (*edges*, contornos e identificação individual de objetos). Por último, o processamento digital de imagem de *alto nível* entende-se como as operações de interpretação (*making sense*) de um conjunto de objetos reconhecidos, à semelhança de uma imagem, mas desempenhando funções cognitivas normalmente associadas à visão humana (Rosenfeld *et al*, 1982; Luger, 2005; Gonzalez *et al*, 2008; Russel *et al*, 2010).

## 2.2. Fotogrametria

### 2.2.1. Breves notas históricas

A palavra fotogrametria tem origem nas palavras gregas *photos*, que significa luz, *gramma*, que significa descrição, e *metron*, que significa medir, podendo-se interpretar como a atividade de medição gráfica por meio de luz.

Segundo a ASP, *American Society of Photogrammetry*, (1980), a fotogrametria pode ser descrita como uma técnica que torna possível através da fotografia, retirar informações como formas, dimensões e posições de objetos que nela esteja contida.

Para Brito e Coelho, (2002), a fotogrametria é “*a ciência e a tecnologia de se reconstruir o espaço tridimensional, ou parte do mesmo (espaço objeto) a partir de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas (espaço imagem), sem contacto físico com o objeto ou alvo de interesse.*” A fotogrametria serve-se de métodos científicos no estudo do funcionamento de processos de captação de energia eletromagnética, e na análise de registos provenientes dos mesmos; utiliza a tecnologia para tornar os processos mais rápidos e eficazes; e deste modo, permite obter informação

confiável seja ela proveniente de um mapa, lista de coordenadas, modelo tridimensional, ou outro modo de representação geométrica.

A ASPRS, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, define fotogrametria como “a arte, ciência, e tecnologia de se obter informação confiável sobre objetos físicos e o meio-ambiente, através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos” e faz referência que sensor remoto são “técnicas usadas para adquirir e processar informação sobre um objeto sem contato físico direto (entre o sensor e o alvo de interesse)”, (Brito e Coelho, 2002).

A ISPRS, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, defende que “fotogrametria e sensoriamento remoto é a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável de imagens de sensores imageadores e outros, sobre a Terra e seu meio-ambiente, e outros objetos físicos e processos através de gravação, medição, análise e representação”, (Brito e Coelho, 2002).

A fotogrametria tem evoluído ao longo da história e pode ser caracterizada em quatro períodos distintos. O primeiro período (1840-1900) é designado de fotogrametria pioneira, e surge após a descoberta da fotografia. Inicialmente utilizada em levantamentos topográficos, era um procedimento dispendioso. Aimé Laussedat (1851) desenvolveu os primeiros princípios e técnicas da fotogrametria, posteriormente desenvolvidos por Meydenbauer e Ernst Mach na documentação de edifícios e prédios históricos. C. Koppe (1889) publica o Manual de Fotogrametria que é o primeiro livro teórico dedicada a fotogrametria. O segundo período (1901-1950) é designado por fotogrametria analógica e caracteriza-se com a invenção de um instrumento, o “estereocomparador”. Este instrumento foi inventado por Pullfrich e é visto como a primeira revolução na fotogrametria, e veio facilitar em muito o trabalho dos operadores, devido a inúmeros cálculos matemáticos serem substituídos pela sua utilização. Neste período também houve o aparecimento de câmaras métricas, criadas especificamente para serem utilizadas em fotogrametria, e permitiam aumentar a precisão das medições efetuadas. Neste período houve a criação de várias associações profissionais relacionadas com a fotogrametria, da qual se destaca a ISP (*International Society for Photogrammetry*), por E. Dolezal (1910), atualmente designada de ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*). O terceiro período (1951-1990) é designado por fotogrametria analítica e caracteriza-se com a utilização do computador na realização de grande quantidade de cálculos, que tornou possível uma grande transformação nos procedimentos até aí utilizados. Em 1976 é apresentado o restituidor analítico, em congresso da ISP (atualmente ISPRS). Este tipo de instrumentos revolucionaram a fotogrametria porque tornaram possível a utilização de câmaras comuns, e a aerotriangulação de conjuntos de fotos de maior dimensão. O quarto período (a partir de 1990) é designado por fotogrametria digital, e caracteriza-se com a utilização de imagens digitais como fonte primária de dados. Com o desenvolvimento de computadores com progressivamente maior capacidade de processamento de imagens

digitais, a utilização deste ramo da fotogrametria foi extensivamente beneficiado (Brito e Coelho, 2002).

### **2.2.2. Áreas de aplicação da fotogrametria**

A fotogrametria tem várias categorias ou especialidades, que se diferenciam através do tipo de fotografias obtidas ou dos sistemas sensoriais utilizados. Estas podem designar-se por fotogrametria terrestre e aérea, conforme o local onde as tomadas são realizadas, em terra ou a partir de aviões. Segundo a Sociedade Americana de Fotogrametria, ASP (*American Society of Photogrammetry*), em 1980, a fotogrametria terrestre pode ter a designação de fotogrametria horizontal, porque o eixo ótico pode estar posicionado nessa direção, enquanto a fotogrametria aérea pode ter a designação de fotogrametria aérea vertical ou oblíqua, variando em função do ângulo que as tomadas formam com a vertical (Valença, 2006).

Devido às suas características intrínsecas, a fotogrametria aérea está mais envolvida com a geomática (aquisição e gerenciamento de dados espaciais), enquanto a fotogrametria terrestre encontra maiores aplicações em áreas como a engenharia civil, arquitetura e controlo industrial entre outras.

A divisão das especialidades da fotogrametria também é feita consoante o meio de captação da imagem. Existe a captação de imagem através de radar em que a técnica designada é a radargrametria, e a captação de imagens através de raios-X, tomando a técnica a designação de fotogrametria raio-X. A divisão das especialidades da fotogrametria também é feita consoante o tipo de imagens utilizadas. Se ao contrário de serem utilizadas imagens imóveis, situação mais habitual, forem utilizadas imagens móveis, a técnica é designada de cinefotogrametria. Se forem utilizados hológrafos, a técnica designa-se hologrametria. Por último, a divisão das especialidades da fotogrametria também é feita através do número de imagens utilizadas. Se for utilizada apenas uma imagem (com efeito estéreo) a técnica designa-se de fotogrametria monoscópica, se forem utilizadas várias imagens, é possível a partir de 2D fazer uma reconstituição 3D, e a técnica designa-se estereogrametria (Slama *et al*, 1980).

Identifica-se assim a subdivisão desta técnica em várias categorias, contudo as duas categorias mais relevantes e utilizadas são a fotogrametria aérea e a terrestre.

### 2.3. Fotogrametria e processamento digital na monitorização de estruturas

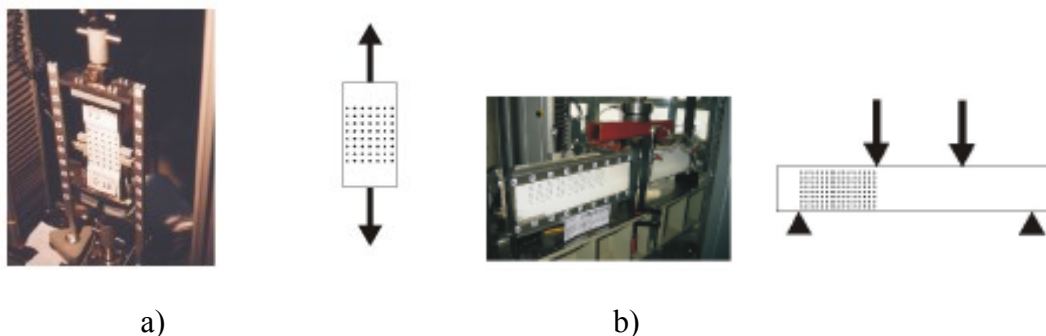
Este sub-capítulo apresenta algumas aplicações da fotogrametria e processamento digital de imagem na monitorização de estruturas, seja *in situ*, ou em ensaios laboratoriais.

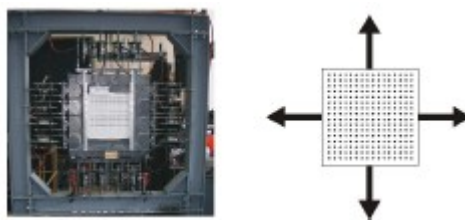
A deteção, mapeamento e quantificação exata da evolução das fendas é de fundamental importância. Contudo, a maioria das abordagens utilizadas presentemente para a obtenção destes parâmetros é empírica; os padrões de fendilhação são habitualmente representados com recurso a esboço a mão livre, e a largura de fendas é avaliada com a utilização de régua de espessuras padrão (CWR), ou com uma lupa de aumento graduada. Todos estes métodos tradicionais para monitorização e caracterização de fendas têm a si associado o facto de serem: (1) morosos; (2) subjetivos; e (3) sujeitos a erro humano (Valença, 2011).

Recentemente foram desenvolvidos algoritmos capazes de detetar descontinuidades nas imagens, através da análise de variação da intensidade de pixéis. As fendas localizadas na superfície do betão são consideradas como descontinuidades e podem ser avaliadas e caracterizadas. Existem algumas aplicações que podem ser encontradas: Lange, J. *et al*, (2006); Dare, P. *et al*, (2002); Sinha e Fieguth, (2006); Yamaguchi *et al*, (2008); Barazzetti e Scaioni, (2009); Barazzetti e Scaioni, (2010), e Kowalczyk *et al*, (2008) contudo, apenas apresentam bons resultados em condições controladas, e apenas uma fenda em cada etapa é analisada. Este facto impede que a totalidade da superfície em análise seja monitorizada, bem como uma vasta campanha de ensaios com diferentes padrões de fendilhação.

A fotogrametria tem sido utilizada em vários campos do conhecimento. No que diz respeito a monitorização de estruturas, realçam-se alguns estudos:

No trabalho de Benning *et al*, (2004) foram analisadas diferentes aplicações da fotogrametria, na monitorização de fendas em superfícies de betão. Foram conduzidos ensaios de tração em tirantes (Figura 2.1), ao esforço transverso em vigas, e de compressão em provetes de betão. A superfície de betão foi previamente preparada (Figura 2.2), com uma malha regular de alvos com 3mm de diâmetro, espaçados entre si com 5mm de distância. O *software* determina os deslocamentos entre as diferentes etapas dos ensaios, através da diferença de coordenadas das miras, entre as diferentes etapas.





c)

Figura 2.1 - Ensaio; a) tração, b) esforço transverso, c) compressão, (Benning *et al*, 2004)

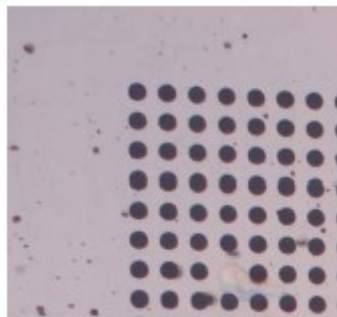
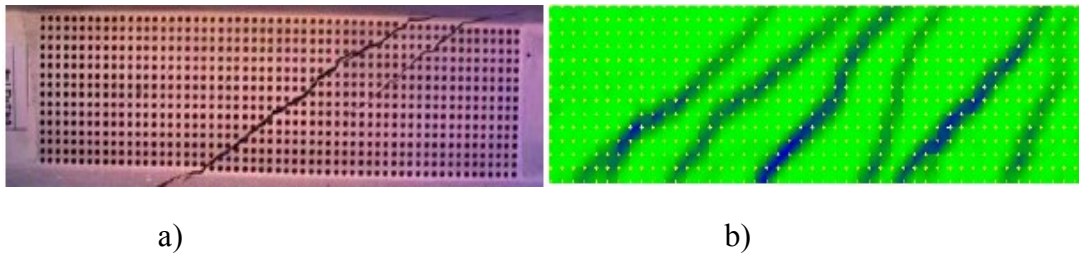


Figura 2.2 – Superfície de betão, (Benning *et al*, 2004)

Foram retiradas as seguintes conclusões: *i*) no caso do ensaio de tração, foi observado que a força de tração no betão e no aço são os dados mais importantes. Verificou-se que o plano da superfície monitorizada foi instável e alterou a sua posição no decurso do ensaio, levando à necessidade de aumentar o número de máquinas fotográficas; *ii*) a metodologia permitiu a deteção e medição de fendas com a largura de 5 a 10  $\mu\text{m}$ ; *iii*) foi demonstrado o amplo uso que a fotogrametria tem quando utilizada como técnica de monitorização, sem requerer contacto com o provete ensaiado, em projetos de investigação em engenharia civil.

No trabalho de Maas e Hampel, (2006), é defendido que a utilização da fotogrametria possui um vasto campo de aplicação no contexto da engenharia civil e é dado como um exemplo de aplicação a deteção de fendas e medição de largura de fendas. Foi concluído através de vários estudos e ensaios que a fotogrametria tem um amplo potencial em tarefas de monitorização laboratorial em engenharia civil bem como na monitorização de grandes estruturas (pontes, viadutos, barragens), oferecendo como vantagens uma versátil e eficiente técnica de medição a três dimensões, a um custo reduzido.

No trabalho de Lange *et al*, (2006), a fendilhação na superfície do betão de vigas em contexto laboratorial, foi monitorizada através de fotogrametria e processamento de imagem. O tipo de ensaio foi de esforço transverso, a superfície foi previamente preparada (Figura 2.3a), e foram obtidos mapas de extensões na superfície dos provetes (Figura 2.3b).



**Figura 2.3 - Superfície provete ensaiado; a) fotografia, b) mapa de extensões (Lange *et al*, 2006)**

As extensões foram medidas através da diferença de posições das miras na superfície do provete, ao longo do ensaio, para as etapas monitorizadas.

No trabalho de Jiang *et al*, (2008), é apresentada uma revisão bibliográfica das diversas aplicações da fotogrametria na monitorização de pontes até o ano de 2007, concluindo que a fotogrametria (*close range*) é uma técnica com vantagens únicas: (1) capaz de medir estruturas de difícil acesso, (2) não é tão trabalhosa de executar, (3) regista uma grande quantidade de informação geométrica num curto espaço de tempo, (4) permite rever os registos e executar análises adicionais posteriores e (5) pode ser usada como um instrumento de medição de rotina.

Os autores Barazzetti e Scaioni, (2009), desenvolveram um método baseado em imagem para análise de fendas, *Image-based Method for Crack Analysis* (IMCA), que permite: (i) a deteção e a avaliação da largura das fendas em toda a sua extensão longitudinal, (Figura 2.4) e (ii) a medição da largura de fendas, deslizamento e rotação, em períodos distintos. O equipamento utilizado para a aplicação deste método é uma câmara digital comercial, uma estrutura de orientação que suporta um sistema de objetos de referência, e um par de suportes sinalizados que serão colocados em posição permanente em ambos os lados da fenda para auxiliar na sua avaliação (Figura 2.4). Importa referir que estes alvos permanentes só são necessários para o caso (ii). O processo de medição é desenvolvido de modo totalmente automático, tornando esta técnica acessível para operadores não especializados em fotogrametria. Este método foi utilizado com diferentes tipos de câmeras digitais comerciais, e a precisão obtida foi de 5 a 20 micrómetros, à semelhança da precisão obtida com os instrumentos tradicionais, com a vantagem da automação e aumento de informação alcançável, e também o facto da sequência de imagens poder ser registada e posteriormente analisada. Por outro lado este método pode ser utilizado em situações particulares em que não seja possível, por limitações de espaço, o recurso de medições de fendas através de métodos clássicos. No que diz respeito à precisão deste método, avaliada em ensaios laboratoriais, foi observado que dependia exclusivamente da distância entre a câmara e a superfície ensaiada.

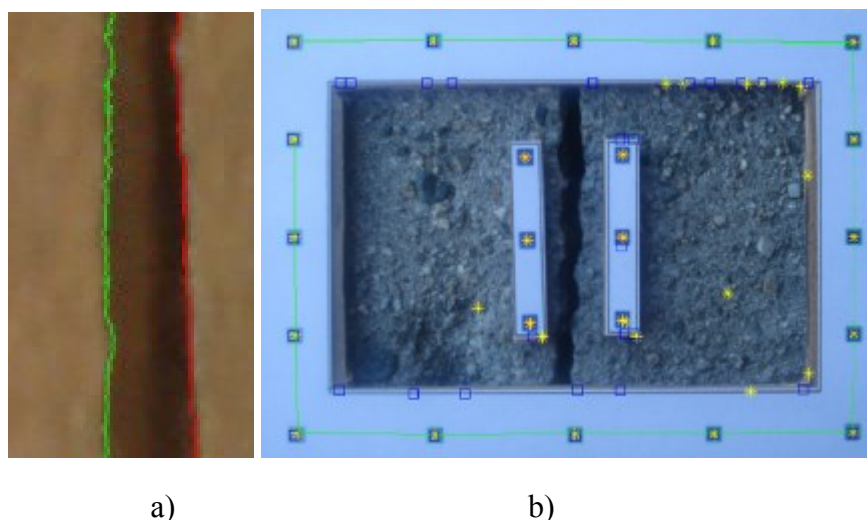


Figura 2.4 – Detecção de fissuras, (Barazzetti e Scaioni, 2009)

As conclusões provenientes deste estudo são que, a aplicabilidade deste método é transversal a vários campos da engenharia, como a estrutural, a geotécnica e a de edifícios. Devido à simplicidade da sua operação, o método *IMCA*, pode ser utilizado com sucesso, por operadores não especializados em fotogrametria. Considerou-se que este método é adequado para medições *in situ*, bem como para ensaios laboratoriais.

Dias-Da-Costa *et al*, (2010), apresentam um estudo através do qual uma nova técnica, baseada na fotogrametria e pós-processamento de imagem, é utilizada na monitorização laboratorial para ultrapassar as limitações inerentes à monitorização tradicional, nomeadamente: (1) limitações no posicionamento do *hardware*, (2) equipamento dispendioso e mão-de-obra, e (3) processamento de dados demorado. Com a utilização desta nova técnica (*visual-DSC – Visualisation of Displacements, Strains and Cracks*) é possível: (1) monitorizar adequadamente deslocamentos e campos de deformações em número virtualmente ilimitado de pontos-alvo, em qualquer etapa do ensaio; (2) é um método economicamente rentável, visto que os dados são adquiridos por máquinas fotográficas digitais não profissionais; (3) é um procedimento rápido devido ao facto dos dados serem automaticamente processados. Foi concluído que o *visual-DSC* é capaz de caracterizar deslocamentos e campos de deformações num número praticamente ilimitado de pontos pré-definidos, sem limitações de posicionamento de LVDTs, com um reduzido custo de equipamentos, de um modo rápido e fiável. Além disso, não há restrição no que diz respeito a grandes deformações e o processo de formação de fendas assim como a avaliação da orientação e largura de fendas pode também ser obtida. Salienta-se também que se pode realizar o registo dos dados até à rotura da estrutura, o que é muitas vezes inviável quando são utilizados os métodos de monitorização tradicionais (podem ser danificados quando ocorre a rotura).

Em Hampel, (2010), foi estudada a deteção de fendas e a medição de largura de fendas em ensaios de carga com recurso a fotogrametria digital (*close range*) onde foram

desenvolvidos algoritmos para diferentes aplicações laboratoriais, o que permitiu concluir que os resultados experimentais reconfirmaram o potencial da fotogrametria digital (*close range*) no contexto da monitorização de ensaios laboratoriais em engenharia civil. Os módulos desenvolvidos para a análise de fendas permitiram a deteção de fendas de largura superior a 5  $\mu\text{m}$ , numa área de dimensões 100 mm  $\times$  100 mm.

No trabalho de Barazzetti e Scaioni, (2010), foi desenvolvido um estudo onde foram utilizadas imagens para detetar e medir deslocamentos, num grande número de pontos, num contexto de ensaios laboratoriais de materiais utilizados na construção. Através da utilização dos algoritmos desenvolvidos, o seu uso pode complementar ou até substituir métodos tradicionais de monitorização laboratorial. A automação do método reduziu os erros introduzidos pelo operador e permitiu tratar a elevada quantidade de informação que é obtida nos ensaios de forma mais rápida. Foram efetuadas comparações com diferentes métodos de monitorização, para aferir a precisão e validar o método. As diferenças obtidas entre os deslocamentos registados com os LVDTs e os registados através das fotografias, tiveram um desvio-padrão de aproximadamente 0.02mm (Figura 2.5).

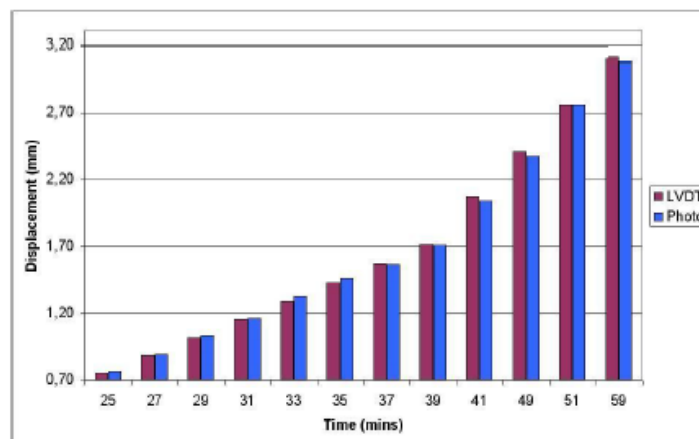


Figura 2.5 - Comparação de deslocamentos, (Barazzetti e Scaioni, 2010)

A comparação de deslocamentos em diferentes etapas dos ensaios permitiu observar a grande precisão deste método. Os bons resultados obtidos confirmaram as potencialidades da metodologia implementada. Os algoritmos desenvolvidos permitiram medições em 2D e 3D para toda a dimensão do provete ensaiado. O procedimento permite a rápida obtenção de medições após a conclusão dos ensaios. Foram obtidos bons resultados em ensaios de vigas e de pilares, mesmo quando se registaram grandes deformações nos provetes. Por último, os ensaios realizados demonstraram que a ordem de grandeza da precisão que se obteve com a monitorização através de fotogrametria, é semelhante, à ordem de grandeza da precisão dos métodos de monitorização tradicionais, quer dos LVDT, quer dos extensómetros.

No trabalho de Kim e Kim, (2011), foi sugerido um método que utiliza a técnica de processamento digital de imagem para medir deslocamentos em vários pontos em

simultâneo. Foi utilizada uma câmara digital comercial para registar remotamente os deslocamentos ocorridos. Foram realizados ensaios na mesa sísmica (Figura 2.6) e ensaios de carga num viaduto para aferir a validade do algoritmo desenvolvido. A estrutura ensaiada na mesa sísmica era uma estrutura metálica de aço de dois andares. À frente da estrutura foi colocado um pórtico, que permitiu a colocação de alvos que, durante o ensaio, ficaram imóveis. Foram utilizadas duas câmaras digitais comerciais, uma registou a evolução do ensaio no primeiro andar e a outra registou a evolução no segundo andar. A estrutura também foi monitorizada com recurso a LVDTs. A comparação de resultados obtidos entre a posição de alvos na estrutura ensaiada e a posição de alvos fixos permitiu aferir que o erro máximo num alvo foi de 3.18%, erro RMS (*Root Mean Square*, raiz média quadrática) de 0.89mm e um erro do sistema de 3.56%; enquanto o erro mínimo num alvo foi de 0.24%, erro RMS de 1.26mm e um erro do sistema de 2.13%. A análise destes resultados possibilitou concluir que em apenas dois alvos os erros obtidos eram significativos, enquanto nos restantes quatro alvos os erros obtidos eram desprezáveis.

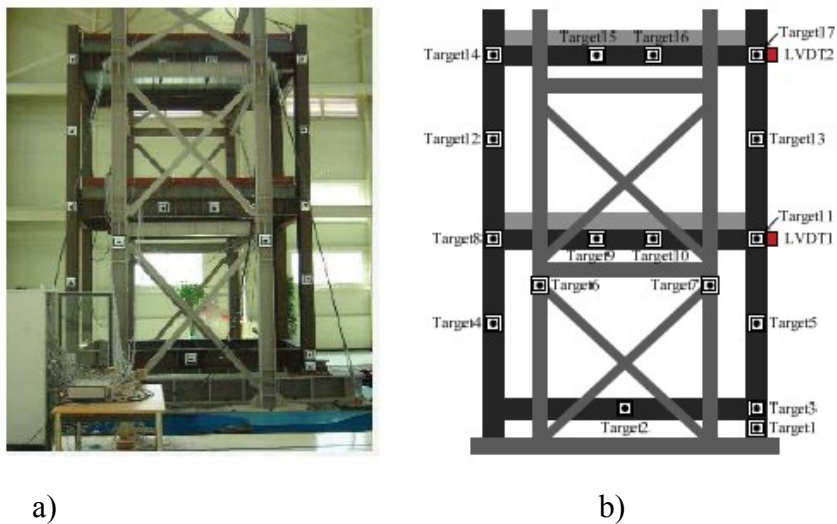


Figura 2.6 - Mesa sísmica e posição de alvos monitorizados (Kim e Kim, 2011)



Figura 2.7 - Viaduto Samseung e posição de alvos monitorizados (Kim e Kim, 2011)

O ensaio de carga foi efetuado na Coreia no viaduto Samseung e com recurso a um veículo pesado. Foram colocados alvos a meio vão e a um quarto de vão. O LVDT foi usado exclusivamente a meio vão. Foi utilizada uma câmara digital. Foi estimado um erro médio

inferior a 2%, um erro RMS inferior a 0.15mm e um erro do sistema de inferior a 5%. O erro neste ensaio foi um tanto elevado, facto justificado com fumo durante o ensaio que deteriorou a qualidade da imagem registada e a baixa resolução conseguida no alvo. No que diz respeito ao ensaio de carga conduzido, foi concluído que a fiabilidade do algoritmo de processamento digital de imagem utilizado era elevada, com os resultados obtidos serem semelhantes aos medidos com LVDT, se a resolução espacial fosse adequada. Por fim, concluiu-se que este método pode ser mais relevante, bem como mais económico na monitorização de estruturas, em situações que seja necessário o registo de deslocamentos em vários pontos.

O trabalho de Valença *et al*, (2012) apresenta e valida um método inovador, *MCRACK*. Este método utiliza o processamento digital de imagem e pretende caracterizar automaticamente a fendilhação em elementos de betão durante ensaios laboratoriais. Em primeiro lugar, o *MCRACK* foi testado numa régua de larguras de fendas, depois foi aplicado em ensaios *push-off* até à rotura para analisar as vantagens deste método quando comparado com a monitorização tradicional. É concluído que o *MCRACK* fornece um aumento considerável de informação, com maior fiabilidade, processada automaticamente e com uma significativa redução no tempo de operação. O principal objetivo do método *MCRACK* é ultrapassar as limitações inerentes à monitorização laboratorial, nomeadamente: (1) tempo despendido e (2) erro humano. O método foi desenvolvido para deteção, mapeamento e medição de fendas, podendo ser facilmente utilizado para monitorizar a evolução da fendilhação ao longo do tempo. O padrão de fendilhação pode ser registado num número ilimitado de etapas pré-definidas. Para a aplicação deste método deve-se, em primeiro lugar, definir as áreas críticas e executar uma análise local detalhada, depois procede-se à reconstituição global que permite obter o padrão de fendilhação e caracterizar a evolução de qualquer fenda. Quando comparado com os métodos de monitorização tradicionais, relativamente ao esboço do padrão de fendilhação, o *MCRACK* apresenta as seguintes vantagens: rapidez, eficiência, qualidade de informação e fiabilidade. O maior inconveniente do método *MCRACK* é que a seleção das regiões ter de ser efetuada por um operador. Atualmente, este método de medição é adequado exclusivamente para monitorização de ensaios laboratoriais devido: (1) a resolução espacial requerida para monitorizar convenientemente grandes estruturas, como pontes e barragens, não é conseguida e inviabiliza assim a utilização de câmaras fotográficas de baixo custo; e (2) heterogeneidades na superfície do betão são frequentemente identificadas como fendas.

Valença *et al*, (2013), apresentaram uma abordagem integrada para a monitorização automática da fendilhação com recurso a fotogrametria e processamento de imagem. O padrão de fendilhação obtido com a fotogrametria é usado para mapear as fendas, onde o processamento de imagem é aplicado. O processo é totalmente automático, sendo exclusivamente necessário fornecer valor limiar (*threshold value*) relacionado com a largura de fendas. Foram conduzidos ensaios de corte direto, *Direct Shear Tests*, através dos quais foi possível calibrar e validar a abordagem apresentada. Em suma, nas áreas

---

críticas, foi possível obter o padrão de fendilhação, bem como a largura de fendas, o seu comprimento, área e desenvolvimento, para qualquer etapa do carregamento dos provetes. Foi concluído que esta abordagem tem a limitação de considerar irregularidades na superfície do provete, como fendas. Esta característica tem particular importância relativamente ao ensaio considerado, devido ao facto do provete ser constituído por três diferentes betões, betonados com diferentes idades, o que levou a haver descontinuidades iniciais na interface entre os diferentes betões. Foi também possível aferir que o método proposto é totalmente capaz de monitorizar a totalidade da superfície do provete até à rotura. Toda a informação obtida requereu um baixo consumo de recursos computacionais sendo a sua utilização particularmente vantajosa em campanhas inúmeros ensaios.

No trabalho de Carmo *et al*, (2014), foi demonstrada a aplicabilidade prática do uso da fotogrametria e do processamento de imagem na monitorização de ensaios laboratoriais. A análise efetuada incidiu na curvatura, rotação plástica e na contribuição do betão entre fendas, parâmetros fundamentais para caracterizar o comportamento estrutural de vigas de betão armado, tanto em estado limite de serviço, bem como no estado limite último. Foi possível observar que estas novas técnicas permitiam obter informação de um elevado número de pontos, complementando assim os métodos de monitorização tradicionais, e tornaram possível a determinação de informação que era impossível de ser obtida com o recurso dos métodos de monitorização tradicionais. No que diz respeito aos deslocamentos verticais obtidos pela fotogrametria, quando comparados com os valores obtidos com a monitorização tradicional, foi possível observar uma diferença média de apenas 6%. Ao longo das quatro etapas distintas do ensaio que foram analisadas, foi demonstrada a potencialidade das ferramentas desenvolvidas, principalmente no que diz respeito a determinação do campo de extensões na superfície da viga, bem como a evolução e caracterização do padrão de fendilhação. O registo de informação do campo de extensões na superfície em análise tornou possível determinar a evolução detalhada da curvatura ao longo do eixo da viga. Esta última informação é muito difícil de se obter com os métodos tradicionais, nomeadamente, quando se usam alongâmetros porque devido às suas dimensões só é possível determinar a curvatura média para troços com 100 ou 200 mm. Com a utilização de fotogrametria pode obter-se a curvatura em troços de dimensão inferior, neste caso 20 mm. Em suma, o estudo possibilitou a validação e demonstração de que a fotogrametria e o processamento de imagem são técnicas que permitem complementar os métodos de monitorização laboratorial tradicionais, tanto em condições de serviço como estado limite último.

## 2.4. Monitorização tradicional

### 2.4.1. Enquadramento

Na monitorização de ensaios laboratoriais, alguns dos instrumentos mais usados em contexto de Engenharia Civil, e que são referidos neste texto, são os transdutores de deslocamentos (LVDTs – *Linear Variable Differential Transducers*), para medição de deslocamentos, e extensómetros de resistência elétrica, para a medição de extensões.

As tarefas de monitorização requerem o registo da forma geométrica dos provetes (pilares, vigas, etc.) sob diferentes condições. As dimensões geométricas são medidas para aferir o comportamento individual dos provetes e para verificação de teorias ou modelos mecânicos. Durante os ensaios de carga, certos parâmetros têm de ser monitorizados, tais como o valor da carga aplicada, a formação de fendas, a as extensões e deslocamentos em determinados pontos. A principal limitação da monitorização tradicional deve-se à sua capacidade de medição unidimensional. Sempre que seja necessário a monitorização simultânea de duas ou três dimensões em mais do que um ponto, a instrumentação requerida torna-se pesada. Estas técnicas de monitorização tradicional geralmente não são adequadas para tarefas que envolvam um grande número de pontos de medição distribuídos na superfície de um objeto.

Usando estes instrumentos apenas um número limitado de pontos pode ser monitorizado podendo limitar a interpretação total da resposta estrutural. Se for tomado em conta que, em muitos laboratórios, o volume de ensaios é elevado e o número de equipamentos limitado, este problema logístico pode ser agravado (Valença, 2011).

Nestes casos, as técnicas de monitorização que utilizam a fotogrametria digital podem apresentar-se como uma opção mais adequada.

### 2.4.2. Extensómetros

O extensómetro de resistência elétrica é um equipamento que mede extensões com base na deformação que o elemento monitorizado regista.

O princípio de funcionamento do extensómetro de resistência elétrica é baseado na variação da resistência de um condutor quando sujeito a deformação mecânica. Permite estimar a força que está a atuar sobre determinado elemento.

A extensão é determinada através da equação (2.1), e equação (2.2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

Onde:  $\varepsilon$  - é a extensão;

$\Delta L$  - Variação de comprimento do elemento;

$L$  - Comprimento inicial do elemento.

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (2.2)$$

Onde:  $\varepsilon$  - é a extensão;

$\Delta R$  - Variação da resistência do extensômetro;

$R$  - Resistência do extensômetro;

$K$  - Fator do extensômetro.

Na figura abaixo, é apresentado um dos extensômetros utilizados no programa experimental desenvolvido no âmbito desta tese, bem como as suas características.

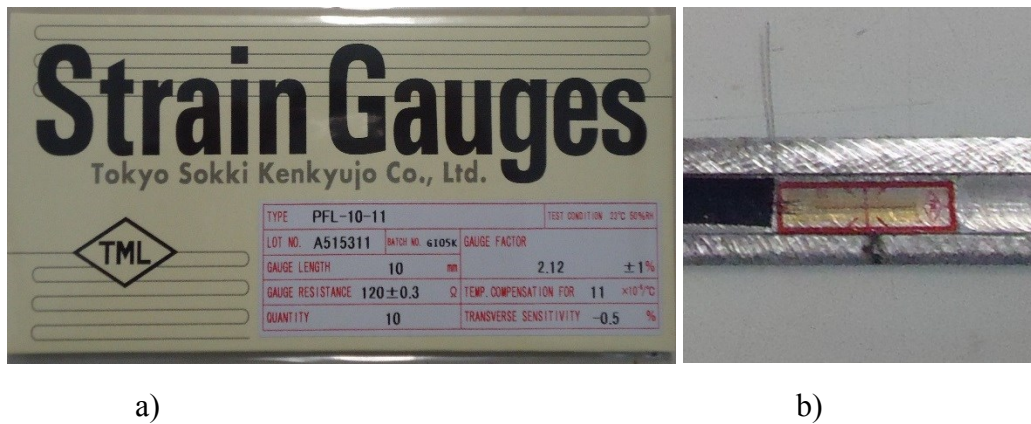


Figura 2.8 – Extensômetro utilizado

#### 2.4.3. Transdutor de deslocamentos, LVDT

O LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) é um transdutor indutivo de deslocamentos que permite a medição de deslocamentos relativos entre dois pontos. O princípio de funcionamento do equipamento consiste um núcleo móvel que é usado para variar o acoplamento do campo magnético entre três rolamentos (Figura 2.9a). A constituição do LVDT é um núcleo de material permeável e três rolamentos. O núcleo quando excitado com um enrolamento primário percorrido por uma corrente alternada e gera um campo magnético. Os dois enrolamentos secundários têm tensões induzidas devido ao acoplamento de fluxo com o primário. Quando o núcleo está centrado e não há deslocamentos registados no LVDT, a tensão induzida em cada secundário é a mesma. Mas quando o núcleo é deslocado, a variação no acoplamento de fluxo faz aumentar a tensão num secundário e diminuir no outro. Os dois secundários estão geralmente ligados em série e em oposição, de modo que as tensões produzidas em cada um estejam desfasadas. Neste caso, como se mostra na Figura 2.9, a amplitude da tensão de saída é zero quando o núcleo está centrado, e aumenta à medida que o núcleo é deslocado num sentido ou no outro (Félix, 2004).

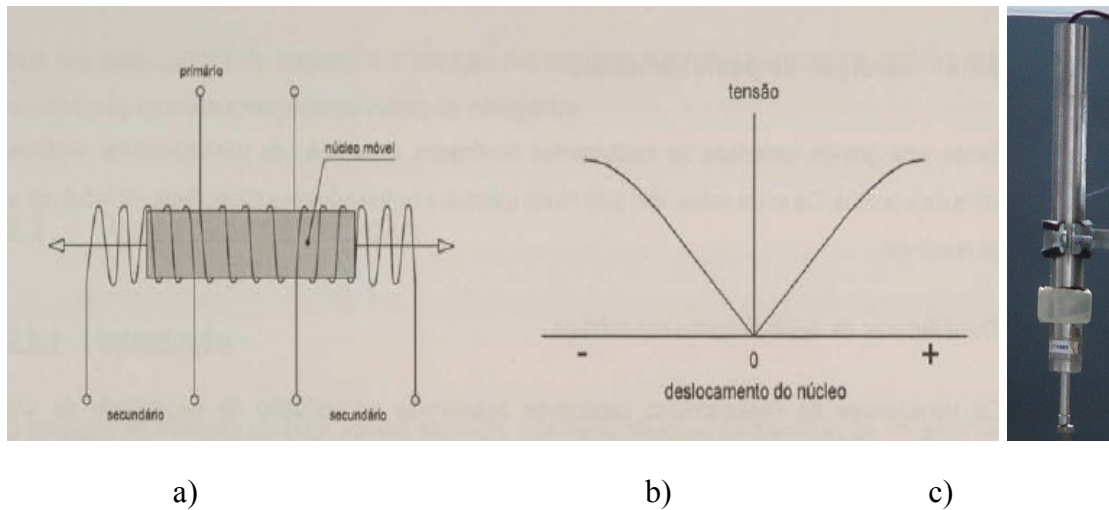


Figura 2.9 - a) Estrutura básica de um LVDT; b) Amplitude de tensão de saída de um LVDT (Félix, 2004); c) Exemplo de LVDT utilizado

#### 2.4.4. Célula de carga

Uma célula de carga é um equipamento que tem capacidade para se deformar no regime elástico, e possibilita a medição de forças através da medição da deformação com recurso a extensómetros. Os extensómetros geram um sinal elétrico em função da deformação registada. Este tipo de equipamento permite utilizações muito precisas e é muito versáteis principalmente quando se tem em conta a ordem de grandeza das cargas aplicadas. Normalmente as células de carga permitem medir forças que vão desde a dezena de N até a dezena de milhar de kN.

As células de carga mais utilizadas em contexto de engenharia civil quando se está a efetuar ensaios laboratoriais que envolvam aplicações de carga em provetes ou estruturas são semelhantes as apresentadas na Figura 2.10.

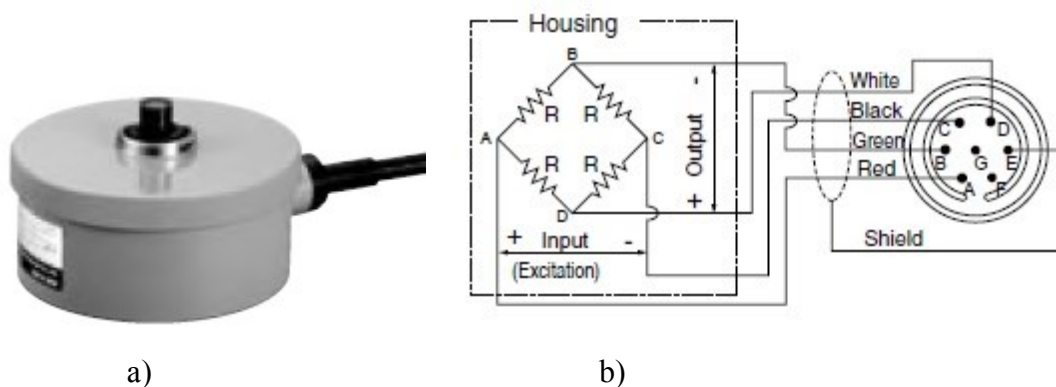


Figura 2.10 – a) Exemplo célula de carga, b) Representação esquemática (TML, 2012)

## 2.5. Aderência aço-betão

### 2.5.1. Introdução

A aderência aço-betão é um fator determinante no comportamento estrutural de elementos de betão armado, sendo responsável pela transferência de tensões entre aço e o betão que o envolve (Louro, 2011). O bom funcionamento de elementos de betão armado será tanto melhor quanto mais eficiente for a ligação entre aço-betão. Assim torna-se importante conhecer o modo de como a interação entre ambos os materiais se desenvolve e quais os fatores que mais afetam este fenómeno.

Os elementos de betão armado quando solicitados por ações, ficam sujeitos a tensões de compressão e de tração em determinadas regiões. Nas regiões comprimidas, o betão e o aço apresentam normalmente as mesmas deformações, enquanto nas zonas tracionadas a aderência entre aço-betão é fundamental para impedir o deslocamento relativo entre a armadura e o betão circundante (Silva, 2006).

Na interface aço-betão, as tensões que resultam das solicitações atuantes são denominadas de tensões de aderência. O estudo da distribuição das tensões de aderência ao longo de toda a interface tem motivado várias investigações, o que permitiu uma melhor compreensão do comportamento de ancoragens retas e ancoragens com ganchos (Louro, 2011).

A eficiência da aderência pode ser quantificada através da relação tensão de aderência *versus* o deslizamento, que representa a variação da tensão que surge na interface do aço com o betão, relacionada ao deslocamento relativo entre o varão de aço e o betão. Os valores máximos desse deslizamento podem ser usados para definir a destruição da aderência, geralmente associados a um certo estado de deformações e de fendilhação (Fernandes, 2000).

Quando um elemento de betão armado é solicitado com esforços de ordem de grandeza que provocam o início da fendilhação, aparecem deformações maiores no aço do que no betão. Esta diferença de deformação é devida à existência de escorregamento da armadura em relação ao betão. No caso de existirem deformações iguais, a aderência é rígida, dada a inexistência de escorregamento. Por outro lado, quando se registam diferentes deformações no aço e no betão, designa-se por aderência móvel.

Segundo os autores Leonhardt e Mönning, (1977), as tensões de aderência, em elementos de betão armado, surgem sempre que ocorre uma variação de tensões nos próprios elementos. As causas dessas variações de tensões podem ser:

- Ações externas – influenciam as alterações das tensões de tração e compressão no aço;
- Fendas – provocam um acréscimo de tensões na armadura, aumentando as tensões de aderência;

- Força de ancoragem nas extremidades dos varões – através das tensões de aderência, a força atuante na armadura é transferida para o betão;
- Variação de temperatura – a maior condutibilidade térmica do aço em relação ao betão, provoca uma maior deformação dos varões de aço aumentando assim as tensões de aderência. Em casos extremos, quando a variação de temperatura atinge valores elevadíssimos, como por exemplo numa situação de incêndio, as tensões de aderência atingem valores elevadíssimos que podem originar a rotura do recobrimento e a conseqüente exposição das armaduras;
- Retração do betão – impedida pela armadura, implica tensões de tração no betão e tensões de compressão na armadura;
- Deformação lenta do betão em peças comprimidas de betão armado (pilares) – devido ao encurtamento causado pela deformação lenta, a armadura sofre um acréscimo de tensões, enquanto o betão sofre um decréscimo de tensões.

### **2.5.2. Mecanismo de aderência**

O betão armado como material de estruturas deve o seu sucesso, à boa aderência entre o aço e o betão. A existência da aderência, ou seja, da existência da propriedade que torna possível que as forças aplicadas a um dos materiais sejam transmitidos ao outro, resulta que o betão e o aço trabalhem em conjunto, resultando assim num novo material, com propriedades distintas das dos materiais constituintes (D'Arga e Lima, 1997).

O mecanismo de aderência é composto por três parcelas: (1) a adesão ou aderência química, (2) aderência por atrito e (3) aderência mecânica. Devido à complexidade dos fenómenos envolvidos não é possível determinar o valor de cada parcela isoladamente (Castro, 2002; Fernandes, 2000).

#### **Aderência química ou adesão**

A aderência química tem início nas reações de presa do cimento e resulta das ligações físico-químicas na interface entre o betão e o aço, e depende da rugosidade bem como da limpeza da superfície das armaduras. Este contributo pode ser verificado através de um bloco betonado diretamente sobre uma chapa de aço, em que é possível registar uma resistência de adesão que se opõe à separação de ambos materiais.

A aderência química quando considerada isoladamente, não é suficiente para promover uma boa ligação entre os materiais, e é destruída para pequenos deslocamentos da armadura, solicitações baixas (ACI 408, 1992).

Estudos desenvolvidos para comparar o comportamento de varões de aço liso com varões revestidos a epóxi, mostram que a adesão pode ter um papel importante na aderência no caso de rotura por fendilhação (ACI 408, 1992).

### **Aderência por atrito**

A aderência por atrito resulta da interação entre a armadura e o betão e é mobilizada sempre que haja deslocamento relativo entre os dois materiais. As forças de atrito são quantificadas através de um coeficiente de atrito entre a armadura e o betão. A resistência por atrito é mobilizada quando a aderência por adesão é rompida, desde que existam pressões transversais às armaduras, resultantes de tensões de compressão transversais devido a cargas externas, retração ou expansão do betão (Leonhardt, 1979).

### **Aderência mecânica**

A aderência mecânica é a componente, entre as três parcelas, que mais contribui para o fenómeno de aderência. Depende da irregularidade da superfície da armadura, resultando da interação entre o betão e a armadura devido à presença de nervuras na superfície do varão. As saliências vão permitir que sejam criados pontos de apoio onde aparecem tensões de compressão no betão, conhecido como efeito de cunha (Fusco, 1995), ou seja, são formadas cunhas de betão que ancoram as nervuras e reagem conforme são comprimidas, restringindo o deslocamento dos elementos (Santos, 2012). Nos varões nervurados, a aderência mecânica depende da forma, altura inclinação e distância livre entre as nervuras (Silva, 2006).

Nos varões lisos a contribuição da aderência mecânica é pequena ou inexistente, devido à ausência de irregularidades na superfície do varão.

#### **2.5.3. Fatores que influenciam a aderência**

Os principais fatores que afetam a aderência sobre o efeito de carregamentos monotónicos são a tensão de cedência, o diâmetro dos varões, o recobrimento, o espaçamento entre armaduras, a geometria dos varões, estado da superfície dos varões (lisa, nervurada, tipo e geometria das nervuras, presença de ferrugem), a armadura transversal e a posição de armaduras durante a betonagem (Gan, 2000). Os principais fatores que afetam a aderência sobre o efeito de carregamentos cíclicos são todos os já referidos anteriormente somando ainda a variação da tensão de aderência e a variação do deslizamento (*bond slip range*). Em carregamentos monotónicos, a rotura da aderência entre betão e aço pode ocorrer de dois modos distintos, rotura por arrancamento direto do varão e rotura por fendilhação do betão.

#### **2.5.4. Referência a alguns estudos sobre a aderência aço-betão:**

Existem vários estudos relevantes ao fenómeno da aderência-betão dos quais se destacam os seguintes:

Um trabalho solicitado pela QSP - Qualidade Siderúrgica Portuguesa, Marreiros, (2005), reúne de forma sintética o estado do conhecimento sobre (os vários estudos conduzidos sobre o tema) o tema, no que diz respeito a mecanismos de aderência aço-betão, comparação entre diferentes regulamentos/especificações em vigor e apresenta como conclusões as diferenças entre estes, referindo também publicações que tratam destes tópicos com maior detalhe.

No âmbito da sua dissertação de mestrado, Louro, (2011), estudou as condições de aderência em ensaios de arrancamento sem gancho e ancoragens somente com amarração reta. Deste trabalho foi possível concluir: (1) a superfície do varão influencia os resultados, (2) o diâmetro do varão não influencia os resultados, (3) em comprimentos de amarração muito longos, a tensão média tem tendência a diminuir, e (4) a diferença de tensões entre uma armadura lisa e nervurada é cerca de 12 (doze). No caso de ensaios de arrancamento com ancoragem com gancho foi possível concluir: (1) é visível a influência do diâmetro nos resultados, visto que a tensão no aço, que aumenta com o aumento de diâmetro, e (2) a existência, ou não, de comprimento reto de amarração em provetes com gancho não tem influência na variação de tensão provocada no gancho.

O trabalho desenvolvido por Santos (2012), no âmbito da sua dissertação de mestrado, incidiu sobre o comportamento monotónico da aderência entre varões de aço nervurados e betão. Neste estudo foram realizados ensaios de escorregamento e analisadas as variáveis mais influentes no comportamento da aderência, como diferentes classes de betão, superfícies de varões, tipos de aço, compactações e diâmetros de varões. As principais conclusões obtidas foram que nos varões nervurados, quanto maior é o diâmetro maior é a sua tensão residual, ou seja, a aderência varia com o diâmetro dos varões nervurados, registando-se que os varões que mobilizam maior tensão de aderência são os de 12 (doze) mm. Foi registado que quanto maior for a classe de resistência do betão, maior é a sua tensão de aderência máxima e maior é o seu escorregamento, uma vez que a tensão máxima de aderência é função da resistência do betão à compressão. Foi também possível verificar que em todos os ensaios realizados em varões nervurados, de acordo com o CEB – *Bulletin D'information n° 217* (CEB 217, 1993), atingiram a rotura do varão de aço por tração, independentemente do tipo de amarração ser reta ou em gancho, indicando assim que os comprimentos de amarração são adequados. Por fim foi registado que os varões nervurados possuem uma tensão de aderência máxima superior, em cerca de 75%, quando comparados com os varões lisos, e que o uso de equipamento mecânico para a vibração dos betões e a sua consequente boa compactação, aumentou em cerca de 16% a aderência entre aço e betão.

## **2.6. Fendilhação e Deformação dos elementos de betão armado**

Em betão armado, a contribuição do betão é geralmente considerada apenas para as forças de compressão, embora este também resista a forças de tração, mas com um contributo menos relevante.

O contributo do betão entre fendas, *tension stiffening effect* aumenta a rigidez do elemento, diminuindo a deformação deste comparativamente com a hipótese de não se considerar qualquer contributo do betão na zona tracionada. Este aumento da rigidez existe devido ao contributo do betão entre fendas acontece porque o betão também vai resistir às tensões de tração e assim a rigidez global aumenta. É necessário que este parâmetro seja considerado

---

no cálculo de deformações de elementos em betão armado, sob pena de este não ser rigoroso. Os principais parâmetros que afetam o valor do *tension stiffening effect* são: (1) módulo de elasticidade (ou Módulo de *Young*) do betão, (2) resistência do betão à tração, (3) aderência no interface entre o betão e a armadura, (4) módulo de elasticidade da armadura e (5) número de carregamentos (Bento, 2013).

As deformações de elementos de betão são geralmente condicionadas por dois estados possíveis e distintos, o estado não fendilhado e o estado totalmente fendilhado. Contudo, a evolução do carregamento e a passagem dos elementos de betão desde o estado não fendilhado para o estado fendilhado leva a que exista uma situação intermédia entre os dois estados. No estado não fendilhado, a variação entre tensões no betão e na armadura é reduzida ao longo de todo o elemento. Com a formação de fendas, as tensões e deformações vão variar consoante a secção considerada. Em secções fendilhadas, a tensão na armadura aumenta devido ao facto de toda a força de tração estar aplicada na armadura, enquanto a tensão no betão é nula. Em secções não fendilhadas, a tensão de tração na armadura é menor quando comparada com a situação supracitada, porque existe a contribuição do betão, na qual as tensões de tração são transmitidas através de aderência entre o betão e a armadura.

O modelo de cálculo do EC2 (CEN, 2004) considera que os elementos de betão armado para os quais se prevê que possam estar fendilhados deverão ser analisados como estando num comportamento intermédio entre os estados não fendilhados e totalmente fendilhados. No caso de elementos solicitados principalmente em flexão, o seu comportamento pode ser previsto pela equação (2.3):

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I \quad (2.3)$$

Em que:

$\alpha$ : parâmetro de deformação considerando que poderá ser, por exemplo, uma extensão, uma curvatura ou uma rotação.

$\alpha_I, \alpha_{II}$ : valores do parâmetro calculado, respetivamente, para os estados não fendilhados e totalmente fendilhados

$\zeta$ : coeficiente de distribuição que tem em conta a distribuição do betão tracionado entre fendas, obtido através da expressão:

$$\zeta = 1 - \beta (\sigma_{st}/\sigma_s)^2$$

$\zeta = 0$  para secções não fendilhadas

$\beta$ : coeficiente que tem conta a influência na extensão média da duração do carregamento ou da repetição do carregamento:

= 1,0 para um único carregamento de curta duração;

= 0,5 para um carregamento de longa duração ou para repetidos carregamentos;

$\sigma_s$  tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada;

$\sigma_{sr}$  tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação.

Nota:  $\sigma_{sr}/\sigma_s$  poderá ser substituído por  $M_{cr}/M$  para a flexão ou  $N_{cr}/N$  para a tração simples, em que  $M_{cr}$  é o momento de fendilhação e  $N_{cr}$  o esforço de fendilhação.

Os requisitos e modelos de cálculo a adotar relativamente à análise da fendilhação dos elementos de betão armado estão descritos na secção 7 - Estados Limites de Utilização, do Eurocódigo 2 (CEN, 2004).

Nas considerações gerais do controlo de fendas, o Eurocódigo 2 preconiza que a fendilhação de elementos de betão deve ser limitada de modo que não comprometa o correto funcionamento e durabilidade da estrutura, bem como não torne o seu aspeto esteticamente inaceitável. A fendilhação é normal em estruturas de betão em serviço, e pode ser causadas por ações diretas, deformações impostas, retração plástica ou reações químicas expansivas internas do betão endurecido, através de fenómenos de etringite. Os valores limite para a largura de fendas,  $w_{m\acute{a}x}$  são determinados tendo em conta o tipo de estrutura considerada e a sua função, e são apresentados no quadro 2.1.

**Quadro 2.1 - Classes exposição (CEN, 2004)**

Classe de exposição	Elementos de betão armado e elementos de betão pré-esforçado com armaduras não aderentes	Elementos de betão pré-esforçado com armaduras aderentes
	Combinação de ações quase-permanente	Combinação de ações frequente
<b>X0, XC1</b>	0,4	0,2
<b>XC2, XC3, XC4</b>	0,3	0,2
<b>XD1, XD2, XS1, XS2, XS3</b>		Descompressão

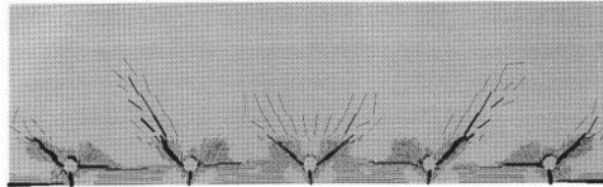
A durabilidade da estrutura está intrinsecamente ligada ao adequado recobrimento de armaduras, considerando que o recobrimento nominal é definido como o recobrimento mínimo acrescido de uma margem de cálculo para tolerâncias de execução, equação (2.4).

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \tag{2.4}$$

O recobrimento mínimo,  $c_{min}$ , pretende garantir concomitantemente que haja uma transmissão eficaz das forças de aderência, uma correta proteção do aço contra a corrosão,

e adequada resistência ao fogo. O valor de  $\Delta c_{dev}$  está definido em Anexo Nacional do Eurocódigo 2, e é de 10mm.

Elementos de betão com recobrimento insuficiente e fendilhação elevada, permitem a exposição das armaduras à atmosfera, levando à sua deterioração através da formação de ferrugem, que por sua vez aumenta de volume quando se forma, diminuindo a secção de betão e de armaduras, e posteriormente a resistência e a segurança do elemento onde se encontram, (figura 2.11).



**Figura 2.11 - Efeito do aumento de volume das armaduras na fendilhação do betão (Appleton, 2004).**

A formação da primeira fenda ocorre quando uma força  $F$  a atuar no tirante de betão armado, introduz esforços no betão iguais ao  $f_{ctm}$ , ou seja, quando o betão esgota a sua capacidade resistência à tração. Na secção fendilhada, o betão deixa de resistir à tração e a totalidade da força  $F$  é resistida pela armadura. A tensão na armadura é assim dada pela força  $F$  aplicada à secção da armadura. Como inicialmente a força estava aplicada em conjunto com o betão e a armadura, nesta fase apenas a armadura resiste, e verifica-se um acréscimo de tensões nesta.

O cálculo da largura de fendas pode ser efetuado através da equação 2.5 (CEN, 2004), a seguir indicada:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2.5)$$

Em que:

$s_{r,max}$  é distância máxima entre fendas;

$\varepsilon_{sm}$  é a extensão média da armadura para a combinação de ações considerada, incluindo o efeito das deformações impostas e considerando a contribuição do betão tracionado. Considera-se apenas a extensão de tração que ocorre para além do estado de extensão nula do betão no mesmo nível;

$\varepsilon_{cm}$  é extensão média no betão entre fendas.

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

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (2.6)$$

Onde:

$\sigma_s$  tensão na armadura de tração admitindo a secção fendilhada.

$\alpha_e$  relação  $E_s/E_{cm}$

$\rho_{p,eff}$  taxa de armadura de tração em relação ao betão tracionado.

$A_{c,eff}$  área efetiva de betão mobilizado por aderência

$K_t$  coeficiente em função da duração do carregamento; 0,6 para ações de curta duração e 0,4 para ações de longa duração.

## 2.7. Parâmetros de avaliação

### 2.7.1. Introdução

Este sub-capítulo pretende apresentar um conjunto de conceitos relevantes à informação e análises que serão apresentadas nos capítulos seguintes, nomeadamente conceitos sobre exatidão, precisão, erros das medições, e parâmetros estatísticos utilizados.

### 2.7.2. Exatidão e precisão

O conceito de exatidão é explicado como o grau de aproximação entre o valor obtido de uma medição e o verdadeiro valor da grandeza em estudo (*ground-truth*), ou a capacidade de um instrumento de medição para obter valores que se aproximem do valor da medição. A elevada exatidão de uma medição será dada pela maior aproximação à *ground-truth* (Figura 2.12). O conceito de precisão é explicado o grau de variabilidade entre as diferentes medições ou cálculos da grandeza em estudo (Figura 2.12), e também pode ser designada como *reprodutibilidade* ou *repetibilidade*. A elevada precisão de uma medição será tanto maior quanto menor a variabilidade entre os resultados obtidos (Silva, 1997).

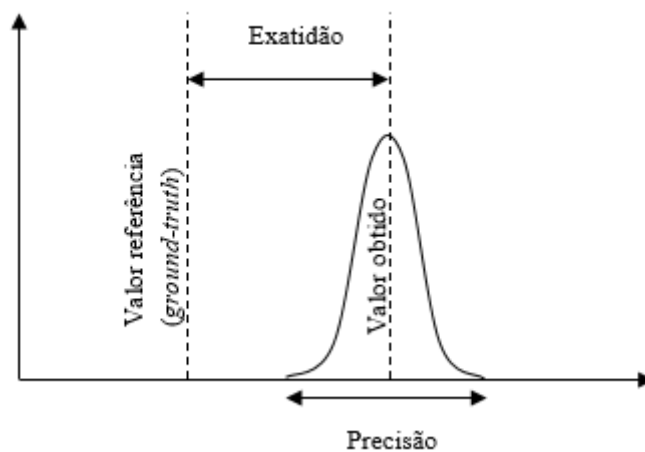
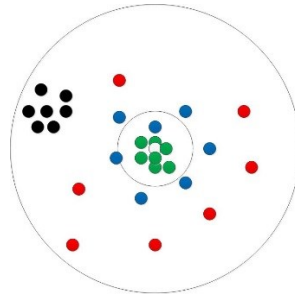


Figura 2.12 – Exatidão e precisão

De referir que as medidas, ou resultados de cálculos, podem pertencer a um de quatro tipos: nem exatos e nem precisos; serem exatos e não precisos; serem precisos e não exatos; e serem exatos e precisos. De modo a ilustrar o que se pretende demonstrar, é apresentada na Figura 2.13 um exemplo dos conceitos, com recurso à analogia do tiro ao alvo. O centro do círculo central e de menor raio é considerado o valor verdadeiro ou o valor referência. Assim, é possível observar os quatro tipos de resultados:

- (i) nem precisos nem exatos, a cor vermelha;
- (ii) precisos e não exatos, a cor preta;
- (iii) exatos e não precisos, a cor azul;
- (iv) precisos e exatos, a cor verde.



**Figura 2.13 – Exatidão e precisão**

O trabalho de Slama *et al*, (1980), refere que a precisão está dividida em dois conceitos: (1) *reprodutibilidade*, a variação de resultados proveniente da utilização do mesmo processo de medição, com recurso a diferentes equipamentos e técnicos, durante longos períodos de tempo; e (2) *repetibilidade*, a variação de resultados mantendo constantes as condições em que o processo de medição se efetua, repetindo as medições com o mesmo equipamento, durante um curto espaço de tempo. Considerando estes dois conceitos, um sistema de medição será considerado válido quando é preciso e exato, ou seja, apresenta ambos os requisitos de precisão e de exatidão.

Um método é considerado válido quando apresenta medições com baixa variabilidade entre si, e próximas do valor de referência (*ground-truth*). Deste modo, “a *precisão* e a *exatidão* de um processo de medição são normalmente estabelecidas através da repetição de uma dada grandeza, de forma a estabelecer um padrão de referência da sua variabilidade” (Valença, 2011).

### 2.7.3. Erro das medições

Todos os instrumentos de medição, independentemente do grau de sofisticação que possuem, não alcançam uma precisão absoluta. Os nossos órgãos dos sentidos são imperfeitos e as suas capacidades variam ao longo do tempo e entre diferentes pessoas. A conjugação destes fatores implica que todas as medições tenham a si associado um grau finito de precisão. Assim o resultado de qualquer medição não nos dá o verdadeiro valor medido mas um valor aproximado. A medição efetuada será melhor se for atingida a maior precisão que o aparelho de medição permitir. Antes de se iniciar uma medição, é conveniente que sejam identificados os limites de precisão que se podem obter com os instrumentos utilizados. A precisão de uma medição pode ser aumentada, através do aumento das medições efetuadas para iguais condições experimentais (Silva, 1997).

No presente trabalho a precisão da medição é aferida através da análise das 10 imagens iniciais, em que as imagens são comparadas e é verificada a reprodutibilidade e repetibilidade dos resultados obtidos.

Podem distinguir-se erros em duas categorias: erros sistemáticos e erros aleatórios. Os primeiros são resultado de causas permanentes como deficiente estado de conservação, calibração inadequada dos aparelhos de medida, incorreto método de medida e/ou falhas

regulares no processo de observação decorrentes do próprio operador. Normalmente este tipo de erro dá sempre o mesmo resultado e a menos que se mude de método ou aparelho, o aumento do número de observações do mesmo operador não irá contribuir para a sua diminuição. É possível diminuir a influência destes erros, ou evitá-los por completo, através de uma análise crítica de todo o método de medida, da verificação de bom funcionamento dos instrumentos de medida, e do cumprimento rigoroso de todas as regras de execução dos trabalhos. Os segundos são acidentais, e assim muito difíceis ou impossíveis de prever. Podem ter causas distintas como a imperfeição dos nossos órgãos dos sentidos, que podem levar a imprecisões involuntárias das leituras, ou a flutuações de estabilidade no funcionamento dos instrumentos de medida. Tal como o erro referido anteriormente, também este pode ser minimizado através do aumento do número de vezes que a medição é efetuada (Silva, 1997).

#### 2.7.4. Parâmetros estatísticos

Este sub-sub-capítulo apresenta os parâmetros estatísticos considerados no trabalho desenvolvido. Foram determinados os valores mínimos, médio e máximo, e para além destes também foi determinado a raiz média quadrática RMS (*Root Mean Square*), apresentado na equação (2.7) e o desvio padrão equação (2.8):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta^2} \quad (2.7)$$

e o desvio-padrão,  $\sigma$ , na equação (2.8):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.8)$$

Sendo:

$n$  - é o número de amostras;

$\Delta$  - é a variação entre valores da amostra da variável em análise;

$x_i$  - é o valor  $i$  da amostra;

$\bar{x}$  - é a média dos valores da amostra.



## 3. METODOLOGIA UTILIZADA

### 3.1. Introdução

O presente capítulo pretende expor a metodologia utilizada e desenvolvida no decurso desta dissertação, através da qual é possível alcançar os objetivos inicialmente propostos, i.e. estimar a extensão média no aço, usando a fotogrametria e processamento de imagem. A informação obtida nos métodos referidos anteriormente, nomeadamente a largura e espaçamento de fendas, é relacionada, através do modelo de cálculo do Eurocódigo 2, para obter uma estimativa da deformação do aço no interior do elemento de betão armado.

### 3.2. Método MCRACK adaptado

#### 3.2.1. Enquadramento

O método *MCRACK*, *Image Processing of Cracking in Concrete Surfaces*, (Valença *et al*, 2010; Valença, 2011) permite a deteção automática, bem como o mapeamento, e medição de fendas usando o processamento digital de imagem, de um modo rápido e fiável. Com recurso a uma análise combinada, considerando uma abordagem global-local, é possível a deteção e caracterização de fendas em superfícies de elementos de betão, o que permite ter uma vantagem comparativa em relação aos algoritmos anteriormente referidos.

#### 3.2.2. Descrição do método MCRACK

Este método foi desenvolvido para monitorizar a fendilhação por Valença, (2011), através de processamento digital de imagem e morfologia matemática (MM). Utiliza uma análise global-local, permitindo que a deteção e caracterização de fendas seja significativamente melhorada na totalidade da superfície do provete.

As principais etapas deste método são a seguir enunciadas:

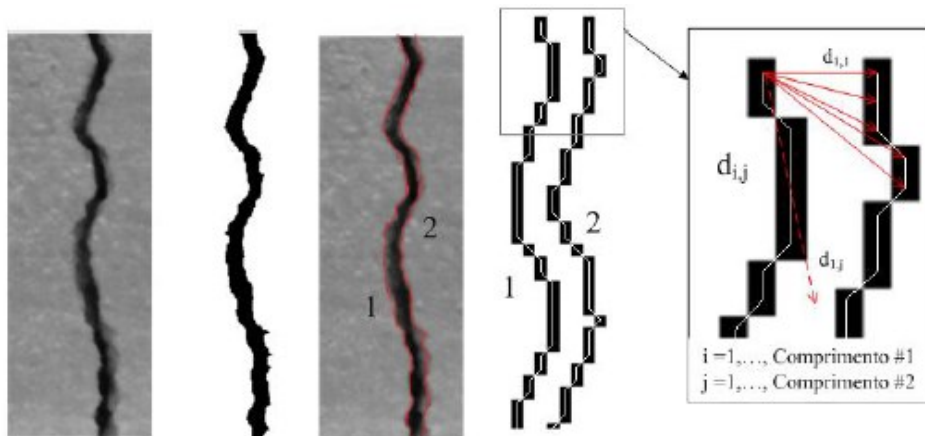
- (1) Preparação da superfície do provete, que pode ser pintada de branco para melhorar o contraste com o aparecimento das fendas, e a pintura das miras, que estão equidistantes entre si, em  $xx$  e em  $yy$ ;
- (2) Aquisição de imagens através de uma máquina fotográfica digital de baixo custo, colocada em posição ortogonal à superfície a monitorizar, de modo a que seja minimizada a distorção da imagem;
- (3) Utilização de uma região global de interesse, (GROI, *Global Region of Interest*), que é definida pelo operador para monitorizar a superfície do provete. Para cada etapa analisada é produzida uma imagem binária (preto e branco) que aumenta as descontinuidades na superfície do provete;
- (4) Seleção de uma região de interesse local, (LROI, *Local Region of Interest*), definida pelo operador, após a análise de imagens obtidas na etapa (2).
- (5) Análise detalhada de cada LROI selecionada pelo operador, permitindo a caracterização das fendas no que diz respeito à sua largura, desenvolvimento, área e perfil;

- (6) Reconstituição das LROI numa só imagem, que permite a obtenção do completo mapa de fendilhação.

Em ambas as análises, global (GROI) e local (LROI), são efetuados diferentes procedimentos para que os resultados sejam melhorados. Estes procedimentos incluem: (1) pré-processamento, (2) processamento, e (3) pós-processamento. Durante o pré-processamento, o contraste entre descontinuidades e o restante da imagem é melhorado. Esta melhoria é conseguida devido a um filtro de alto nível (*high-pass*) e um filtro que ajusta o contraste. Na fase do processamento, um algoritmo é aplicado para detetar descontinuidades (Otsu, N., 1975). Na fase do pós-processamento, os procedimentos incluem operações de morfologia matemática (MM) para remover descontinuidades não lineares (Valença *et al*, 2010). Na etapa (5), as operações relacionadas com a caracterização de fendas são aplicadas. Uma sequência de três passos (Figura 3.1), permite avaliar o comprimento das fendas, a sua largura e a sua área; (1) localização da fenda na superfície do provete, (2) definição dos limites das fronteiras, e (3) determinação de comprimento das fendas e correspondente abertura de fendas. Este procedimento permite a obtenção automática do perfil da fenda, seu comprimento, largura e área. O comprimento de determinada fenda é obtido pelo comprimento médio de ambas as fronteiras, enquanto a largura de fendas em cada ponto é determinada pela distância mínima entre cada *pixel* e a fronteira oposta, como apresentado na equação abaixo (Valença *et al*, 2010).

$$d_i = \min(d_{i,j}) \quad (3.1)$$

Sendo  $d_{i,j}$  a distância entre o pixel 'i' até a fronteira 'j'.



**Figura 3.1** Avaliação da fissura ao longo do seu desenvolvimento, (Valença *et al*, 2010)

No caso particular do trabalho que foi desenvolvido, foi utilizado o método *MCRACK* adaptado, que consiste numa adaptação da metodologia existente. A modificação está relacionada com uma etapa extra, que dado ser um ensaio de tração, e ser necessário a medição rigorosa da largura de fendas na direção em que o tirante estava a ser ensaiado, em detrimento da avaliação da fenda ao longo do seu desenvolvimento, como demonstrado no método *MCRACK*. A medição desta largura de fendas foi medida devido à

implementação de três perfis longitudinais ao tirante, e assim foi possível medir a largura de fendas em três pontos distintos. É apresentado na figura 3.2, um exemplo de como os perfis longitudinais considerados foram utilizados na medição do valor médio da largura de fendas.

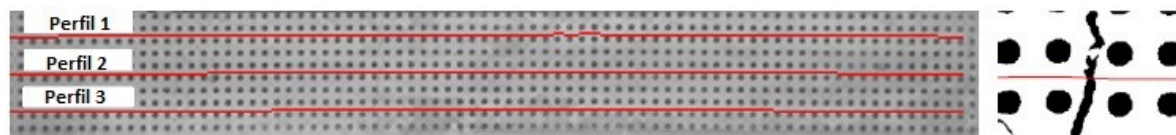


Figura 3.2 - Perfis medição de largura de fendas, (Carmo *et al*, 2015)

### 3.2.3. Metodologia utilizada estimar extensão no betão

Este sub-sub-capítulo pretende dar uma explicação da metodologia que possibilita que através dos dados da posição das miras ao longo do ensaio, é possível estimar a extensão do betão. Inicialmente, a superfície dos tirantes é preparada, conforme descrito anteriormente no sub-sub-capítulo 3.2.2. A superfície é pintada de branco e pinta-se uma malha regular de miras de cor distinta, que permite que as miras sobressaiam no branco da superfície. No decorrer do ensaio do tirante, são monitorizadas as etapas consideradas mais relevantes, que são registadas através de fotografias. Posteriormente as fotografias são analisadas com recurso a rotinas de *MatLab* (Dias-da-Costa *et al*, 2011; Valença *et al*, 2012). Estas rotinas registam para cada mira, a sua identificação e posição 2D (plano xy). Estas coordenadas são comparadas para cada etapa do ensaio, a que correspondem diferentes fotografias, o que permite calcular o seu deslocamento. Com o deslocamento de cada ponto aferido, é feita a comparação com a distância inicial entre os respetivos pontos e é calculada a sua extensão na superfície de betão.

O erro de deteção das miras foi determinado através de 10 fotografias tiradas consecutivamente, na fase inicial do ensaio antes de existir qualquer carregamento no tirante.

### 3.2.4. Metodologia utilizada estimar extensão no aço

Este sub-sub-capítulo pretende dar uma explicação da metodologia que possibilita que através dos dados da largura de fendas e espaçamento entre fendas, é possível estimar a extensão do aço. Com os dados obtidos pela fotogrametria é medir a largura de fendas, e o espaçamento entre fendas para todas etapas monitorizadas. Com o decorrer do ensaio, a formação de fendas irá desenvolver-se até se obter um padrão de fendilhação que se manterá até final do ensaio, aumentado essencialmente a largura de fendas. Durante esta fase de fendilhação estabilizada, a largura de fendas é igual ao espaçamento de fendas multiplicado pela diferença entre a extensão média da armadura e a extensão média do betão entre fendas (Equação 3.2).

O modo de como se pode estimar a extensão média no aço  $\epsilon_{sm}$  é através das equações 2.5 e 3.2, sendo que as parcelas  $w_k$ ,  $s_{r,max}$  e  $\epsilon_{cm}$  obtidas através de fotogrametria e processamento de imagem.

$$w = \int_0^s (\varepsilon_s - \varepsilon_c) dx \approx (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot s \Rightarrow \varepsilon_{sm} = \frac{w}{s} + \varepsilon_{cm} \quad (3.2)$$

Sendo:  $w$  – largura de fenda,  $\varepsilon_s$ - extensão no aço,  $\varepsilon_c$ - extensão no betão, ;  $\varepsilon_{sm}$ - extensão média no aço,  $\varepsilon_{cm}$ - extensão média no betão, e  $s$  – espaçamento entre fendas.

### 3.2.5. Teste preliminar

Com o intuito de testar e validar esta metodologia foram analisados os dados obtidos provenientes de um trabalho realizado anteriormente por Bento, (2013). O tirante de betão armado era constituído por um varão no seu interior com diâmetro de 12 mm de aço A500 NR SD, o betão utilizado foi de agregados leves (BEAL) com uma resistência média à compressão de 35 MPa.

Este tirante foi monitorizado com recurso a monitorização tradicional, com extensómetros elétricos colocados na superfície no varão do tirante, mas também foi alvo de monitorização com recurso a fotogrametria. A análise do tirante proveniente desta segunda monitorização não estava no âmbito da tese referida anteriormente.

O tirante de teste foi instrumentado com recurso a 11 extensómetros espaçados 7,5 cm ao longo do varão, colocados a partir do centro do varão. Os extensómetros usados tinham uma resistência de  $120 \pm 0.3 \Omega$  e um comprimento de 10mm. A colocação destes extensómetros implicou um desgaste na superfície do varão, de modo a que fosse obtida uma superfície plana e lisa para tornar possível uma boa colagem do extensómetro.

Após os extensómetros terem sido colados foram soldados os fios, sendo necessário proteger os fios para que não entrassem em contacto com o varão de aço. Uma pequena tira plástica foi utilizada para proteger a zona da solda. Após isso foi aplicada cola por cima do extensómetro de modo a que o extensómetro bem como as ligações ficassem protegidas, e de seguida foi aplicada uma camada de material viscoso para proteção e não haver contacto com o betão. Esta operação foi fundamental para evitar danos nos extensómetros provenientes da betonagem do tirante, bem como das respetivas ligações.

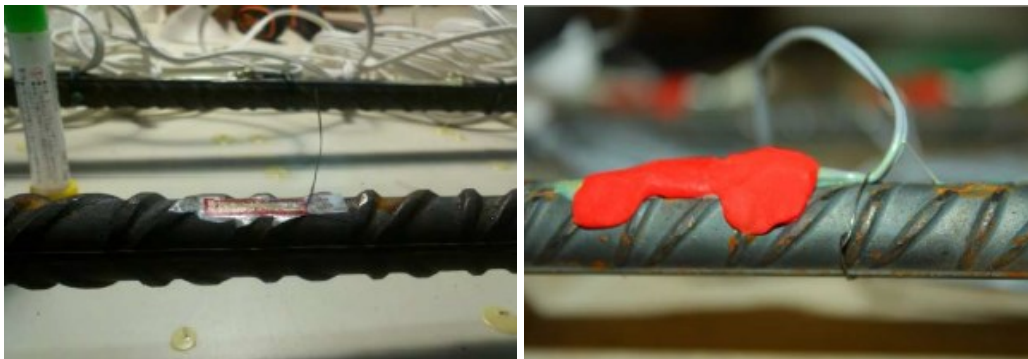


Figura 3.3 Extensómetro na superfície do varão de aço (Bento, 2013)

Como é possível observar através da figura 3.3, o elevado número de extensómetros colocados no varão diminuíram as nervuras no varão.

Foi considerado que esta redução das nervuras do varão de aço, afetou a ligação por aderência entre o aço e o betão e conseqüentemente alterou o comportamento estrutural do tirante (Bento, 2013; Carmo *et al*, 2014).

No caso de estudo apresentado no capítulo seguinte o procedimento de colocação de extensómetros foi alterado para evitar este problema. Optou-se pela instrumentação no interior dos varões para anular a interferência que os extensómetros colados na superfície do varão teriam na aderência.

De seguida, quadro 3.1, mostram-se dados (análise de resultados) obtidos por Bento, (2013) onde são comparadas a extensão média teórica com a extensão média obtida experimentalmente.

**Quadro 3.1– Comparação de extensões**

Fase	$\epsilon_{sm}$ teórica ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\epsilon_{sm}$ experimental ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Extensão experimental/ extensão teórica
1	1428	925	64.8 %
2	1414	775	54.8 %
3	1405	657	46.8 %
4	1419	1425	100.4 %
5	1387	1283	92.5 %
6	1383	905	65.4 %

Como se pode concluir após análise do quadro resumo, os valores de extensão obtidos experimentalmente são inferiores do que o previsto teoricamente. Este é um dos motivos que levou a optar por uma abordagem diferente de monitorização com os extensómetros, visto ter sido considerada uma relação entre a diminuição das nervuras no varão com e os valores de extensões registados.



## 4. CASO DE ESTUDO

### 4.1. Introdução

O caso de estudo que se considerou para esta dissertação consiste num procedimento experimental composto por ensaios de tração a dois tirantes de betão armado. Os tirantes utilizados nos dois ensaios têm a mesma secção e comprimento. O tipo betão usado e o varão de aço (diâmetro e classe de resistência) foi igual em ambos os ensaios. Os tirantes foram monitorizados de modo tradicional, com recurso a extensómetros e LVDTs, e também com recurso a fotogrametria e processamento de imagem.

Como já se referiu, para testar e validar o procedimento de fotogrametria e processamento de imagem de um modo prévio ao caso de estudo apresentado, foram utilizados dados de um estudo anterior já referido Bento, (2013) e Carmo *et al*, (2014). O estudo e o tratamento dos dados obtidos neste ensaio permitiu aferir que os resultados obtidos apresentavam suficiente rigor para serem considerados. A análise de resultados também motivou uma alteração no procedimento da monitorização tradicional, nomeadamente na aplicação dos extensómetros, (Carmo *et al*, 2014), com o intuito de alcançar informação mais rigorosa.

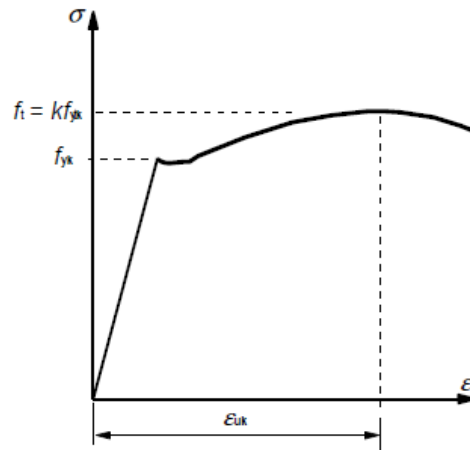
Através da utilização da fotogrametria e processamento de imagem foi possível detetar padrões de fendilhação e deslocamentos. O método que se estudou neste trabalho constitui um primeiro passo na aplicação da fotogrametria e processamento de imagem de um modo inovador. A nova abordagem permite, concretamente, estimar as extensões do aço no interior dos tirantes ensaiados, com recurso exclusivo da informação obtida através fotografias da monitorização da superfície dos tirantes. A informação obtida inclui o padrão de fendilhação, em especial a largura de fendas e espaçamento entre elas (CEN, 2004), (CEB, 1985), (Borosnyói e Balázs, 2005).

### 4.2. Caracterização dos tirantes

Os tirantes de betão armado utilizados nos ensaios experimentais têm as seguintes dimensões  $100 \times 100 \times 800 \text{ mm}^3$ . Os varões utilizados são de aço A500 NR SD, com diâmetro de 12mm. Cada tirante é constituído por um varão localizado no centro longitudinal do provete e que se prolonga mais alguns centímetros para ser devidamente amarrado durante o ensaio.

#### 4.2.1. Caracterização do aço

O aço A500 NR SD é um aço fabricado pelo processo de laminagem a quente, a partir de billetes procedentes de lingotes ou por vazamento contínuo, com uma superfície nervurada e ductilidade especial. As propriedades do aço consideradas foram as previstas no EC2 (CEN, 2004),  $f_{syk}$  500 MPa,  $550 f_{suk}$  MPa e  $\epsilon_{suk}$  12%. A relação tensão-extensão tipo deste aço é ilustrada abaixo (Figura 4.1).



**Figura 4.1 - Diagrama tensão-extensão típico de aço laminado a quente (EC2 (3.2.4 a))**

Sendo:

$f_{yk}$  a tensão de cedência ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%,

$f_t$  a resistência à tração,

$\epsilon_{uk}$  a extensão de carga máxima.

#### 4.2.2. Caracterização do betão

O betão usado nos provetes foi um betão de densidade normal. O volume de betão produzido foi de 30 litros. O betão produzido foi necessário para a betonagem dos 2 tirantes de betão armado, que foram ensaiados à tração, 2 provetes de betão com as dimensões de  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  e um provete  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ , para ensaiar o betão à compressão. São apresentadas no quadro abaixo as dosagens para uma amassadura de 30L, bem como as dosagens para 1000L.

**Quadro 4.1 - Composição do betão**

Amassadura	30L	1000L
Constituintes	Massa (Kg)	
Cem I 52,5 R	9.600 Kg	320.00 Kg
Filler calcário	2.400 Kg	80.00 Kg
Superplastificante GS 526	0.077 Kg	2.57 Kg
Areia guia 0/1	8.540 Kg	284.67 Kg
Areia – M lav II	15.860 Kg	528.67 Kg
Areão	5.970 Kg	199.00 Kg
Brita 8/14	24.160 kg	805.33 kg
Água	4.730 kg	157.67 kg

**Resistência à compressão, massa volúmica e idade no dia do ensaio.**

A determinação da resistência à compressão seguiu a norma NP EN 12390, (2003) e (EN 206-1, 2005), utilizando os provetes cúbicos de 150mm e o 100mm, provenientes da mesma amassadura que os tirantes de betão. Os provetes depois de betonados e descofrados foram armazenados num tanque de cura, e mantidos a temperatura constante, aproximadamente 20°C e imersos em água (figura 4.2).

Os provetes foram ensaiados no laboratório de materiais de construção do ISEC. No quadro abaixo, estão resumidas as características do betão. A betonagem foi efetuada a 23 de Junho 2014 e os ensaios do betão foram a 24 de Julho 2014, perfazendo assim 31 dias de idade.

**Quadro 4.2 - Características do betão**

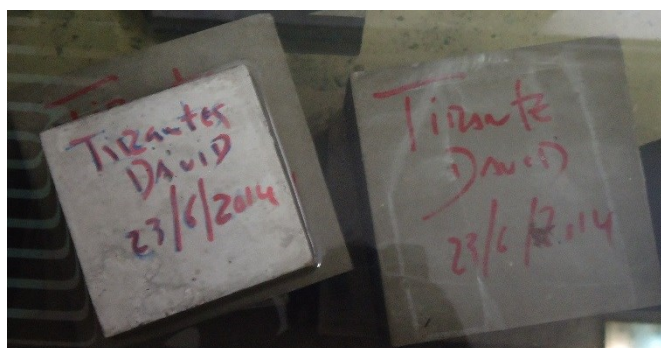
Tipo de betão	Idade no dia do ensaio	Massa volúmica		Resistência à compressão	
		Kg	(Kg/m <sup>3</sup> )	kN	Tensão (MPa)
C45/55	31 dias	8.243	2446	1479.12	66
		8.281		1502.73	
		2.443		651.80	

Foi determinado que a resistência média do betão à compressão em provetes cúbicos foi de 66 MPa.

Com base no EC2 (CEN, 2004), na EN 206-1, (2005), e nos dados anteriormente referidos foi calculada a resistência de compressão característica, e determinou-se ser um betão de classe de resistência C45/55.

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \quad (4.1)$$

Segundo o quadro 3.1 do EC2, a  $f_{ctm} = 4.2$  MPa e  $E_{cm} = 38$  GPa.



**Figura 4.2 - Provetes armazenados em tanque de cura**

### 4.3. Fabrico dos tirantes

Depois de ter os constituintes do betão e as suas proporções terem sido determinadas, foram betonados os provetes, bem como os tirantes. As cofragens foram preparadas, limpas e foi

aplicado um descofrante para mais tarde, aquando do desmolde dos provetes, esta tarefa ser mais fácil de executar.

Os constituintes do betão foram pesados e em seguida foram colocados na misturadora de eixo vertical (Figura 4.3). Depois de terem sido adicionados todos os constituintes na misturadora, esta foi ligada para que todos os constituintes fossem misturados. Quando o betão já se encontrava adequadamente misturado, foi colocado na cofragem (Figuras 4.3 e 4.4), onde foi convenientemente vibrado para que fosse reduzido o seu teor de vazios e assim obter uma melhor compacidade.

Devido à capacidade da misturadora não permitir que os 30 litros de betão fossem misturados ao mesmo tempo, foram feitas duas amassaduras de iguais proporções, de 15 litros cada e, obviamente, com quantidades iguais de todos os constituintes.



**Figura 4.3 - Constituintes na misturadora; betonagem e vibração do betão na cofragem**



**Figura 4.4 – Pormenor do betão na cofragem**

## **4.4. Instrumentação instalada**

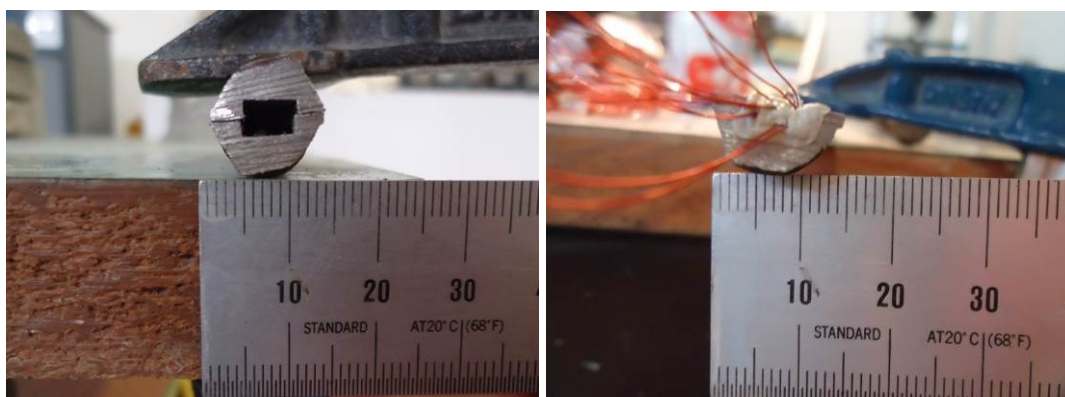
### **4.4.1. Monitorização tradicional**

Os tirantes ensaiados foram alvo de monitorização tradicional, com recurso a extensómetros e LVDTs. Na monitorização tradicional decidiu-se que era adequado a colocação de extensómetros espaçados 10 cm entre si de modo a obter valores da extensão

do varão ao longo do seu eixo para assim se realizar a análise que se pretende efetuar. Normalmente, a utilização de extensómetros elétricos implica a sua colocação na superfície dos varões. Para uma correta instalação dos extensómetros foi necessário preparar a superfície do varão, limando ou desbastando a superfície do varão até que esta se encontre lisa de modo a permitir a colocação do extensómetro.

Os extensómetros foram posteriormente colados na superfície limada/preparada do varão, e revestidos com uma camada protetora de modo a ficarem protegidos. Contudo, foi efetuada uma abordagem um pouco diferente na colocação dos extensómetros. Com o intuito de reduzir a interferência na aderência entre aço e betão causada pelo elevado número de extensómetros na superfície dos varões, decidiu-se proceder à colocação dos extensómetros no interior dos varões de aço. Para efetuar a monitorização com recurso a esta técnica, foi necessário a resolução de vários problemas para que se atingisse o resultado desejado.

Na tentativa de ultrapassar este problema foi aplicada uma abordagem que consistia em desbastar o varão longitudinalmente até meia secção. Em seguida, procedeu-se a um entalhe no varão (Figura 4.5). Neste entalhe longitudinal criado no interior do varão, foram colados os extensómetros. Este entalhe diminuiu a seção do varão de aço de 12mm para uma seção de varão semelhante a um varão de 10mm ( $0,785\text{cm}^2$ ). O entalhe longitudinal permitiu também a acomodação dos fios dos extensómetros ao longo do varão, sendo distribuídos metade deles para a extremidade superior e a outra metade para a extremidade inferior (Figura 4.5).



**Figura 4.5 - Pormenor do entalhe no varão em corte transversal antes e depois da colocação de extensómetros**

No caso de estudo desenvolvido, os extensómetros utilizados foram de 11 extensómetros para o tirante 1, e 9 extensómetros para o tirante 2. Os extensómetros foram colocados a partir do centro do varão e distanciados entre si 100 mm, de modo a monitorizar a totalidade do comprimento dos varões embebidos em betão.

Foi necessário isolar os fios dos extensómetros na zona da ligação (figuras 4.6 e 4.7), caso contrário entraria em contacto com o varão metálico e iria “fechar o circuito” e inviabilizar a leitura das extensões. Foi utilizada fita isoladora para eliminar esse problema. Era

fundamental que este revestimento dos fios, formasse uma película não aderente entre os fios e a interface do varão, porque com o decorrer do ensaio de tração, se houvesse uma ligação entre os fios e o varão, os fios iriam romper-se devido à extensão do varão.



a)

b)

**Figura 4.6 - Pormenor do entalhe no varão em vista e colocação dos extensómetros**



**Figura 4.7 - Pormenor do entalhe no varão e da colocação dos fios**

Foi verificado o funcionamento dos extensómetros antes das metades dos varões serem coladas e previamente à betonagem dos tirantes, e todos se encontravam a funcionar corretamente.

Depois de devidamente instrumentados e colados os varões, foi necessário dotar os varões de um sistema de amarração que permitisse transferir adequadamente a força do atuador hidráulico ao tirante de betão armado. Inicialmente tinha sido idealizado utilizar como sistema de amarração umas chapas retangulares de secção 10cm soldadas nas extremidades do varão.

Após reflexão e análise decidiu-se não prosseguir com este sistema de amarração devido ao facto da soldadura implicar temperaturas muito elevadas que podiam danificar os extensómetros, bem como os fios utilizados nas ligações aos extensómetros, tinham um

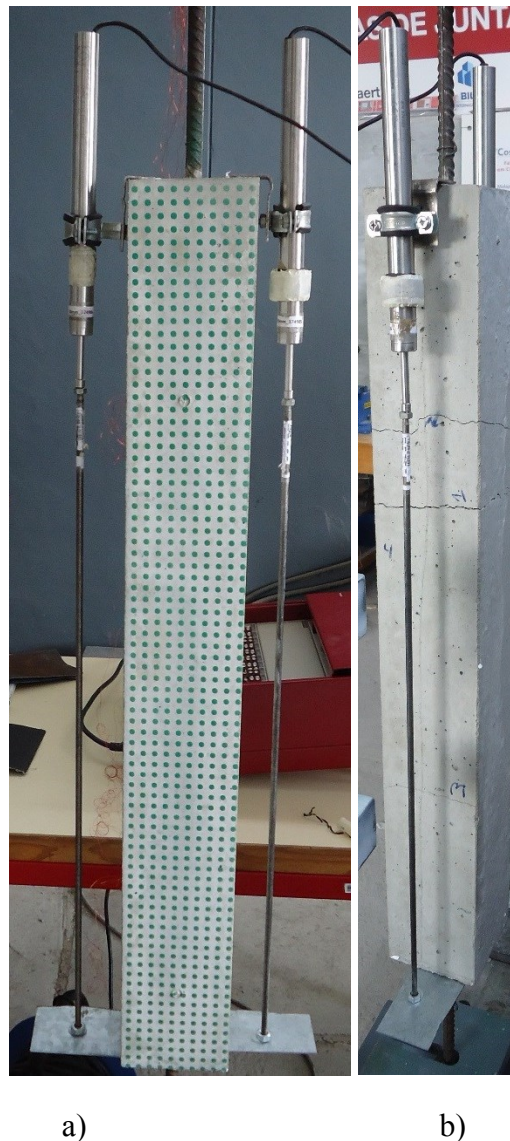
revestimento que era facilmente retirado com uma simples chama de um isqueiro. Tendo em conta estas condicionantes e o fato desta monitorização ter sido trabalhosa e morosa, foi decidido que o sistema de amarração não seria soldado ao varão, e foi utilizado um de cunha.

Os extensómetros utilizados foram fabricados pela Tokyo Kenkyujo Co. Ltd. Estes tinham 10mm de comprimento,  $120 \pm 0.3 \Omega$  e um fator (K) de 2.12 para ser usado na configuração dos canais no *datalogger*.

### **LVDTs**

Com o intuito de obter mais informação sobre a evolução dos deslocamentos dos tirantes de betão armado ao longo do ensaio, foram utilizados 2 (dois) LVDTs. O uso destes dispositivos permitiu comparar os valores obtidos da monitorização tradicional com o obtido através de fotogrametria processamento de imagem, conforme será apresentado na análise de resultados.

Os LVDTs utilizados foram colocados (Figura 4.8) nas extremidades laterais dos tirantes, onde foram fixados, e com o uso de varões de aço liso que foram apoiados em chapas metálicas fixas na extremidade oposta do tirante. Para que este sistema funcionasse corretamente, e permitisse leituras com precisão foi montado um sistema de roscas que fazia com que o transdutor de deslocamentos, o varão de aço bem como a chapa funcionassem sem folgas.



**Figura 4.8 - Pormenor da posição dos LVDTs durante os ensaios em vista frontal e lateral**

### **Sistema de aquisição de dados**

O sistema de aquisição de dados utilizado na monitorização dos ensaios efetuados consistia num computador dotado de *software* designado de *Dynatester* (Figura 4.9b). Este *software* desempenha duas funções, efetua as leituras dos instrumentos de medição e permitir controlar o atuador.

Os fios dos extensómetros por sua vez estavam ligados a um *datalogger* (Figura 4.9a) que assim tornava possível a leitura dos dados dos extensómetros. Estes dois sistemas eram distintos, sistema que controlou o atuador e o sistema que recebia os dados dos extensómetros, foram sincronizados, tarefa fundamental para a análise posterior dos resultados obtidos.



a)

b)

Figura 4.9 - Datalogger e Dynatester

#### 4.4.2. Monitorização através de imagem

Na monitorização com fotogrametria, a aquisição de imagem foi realizada com uma câmara fotográfica montada num tripé, conjunto que se manteve estático durante os ensaios. A captura das imagens foi acionada por comando remoto, para evitar instabilização do conjunto.

A câmara foi posicionada de modo a garantir a verticalidade e horizontalidade em relação à superfície a monitorizar e a uma distância de aproximadamente 2.5m. As imagens foram capturadas com uma resolução de  $4608 \times 3072$  pixel e uma lente de 55mm de distância focal. A calibração do sistema foi previamente efetuado usando o procedimento de calibração de câmeras de Bouguet, (2014).

Na superfície do provete foram pintadas as miras, numa malha regular de alvos circulares de 5mm de diâmetro, espaçados 10mm entre si. Estas dimensões foram estabelecidas com base em resultados experimentais anteriores, procurando obter uma precisão no campo das extensões de aproximadamente 0,3% (Dias-da-Costa *et al*, 2011; Carmo *et al*, 2015). O setup permitiu atingir uma resolução espacial de 0.2mm/pixel (Carmo *et al*, 2015).

#### 4.5. Setup de ensaio

Os tirantes de betão armado foram ensaiados num pórtico de reação constituído por dois pilares e quatro vigas metálicas reforçadas com o intuito de aumentar a rigidez. Os ensaios dos tirantes foram executados na vertical. Foi ajustado o pórtico em altura, para responder às necessidades inerentes do ensaio.

Cada tirante foi ensaiado individualmente com a aplicação de uma força de tração nas extremidades do varão de aço. Para além do pórtico de ensaio e do atuador, o *setup* de ensaio também era composto pelo sistema de monitorização, LVDTs, transdutores de deslocamentos, em que foram colocados, um em cada face lateral do tirante e assim

registrando a evolução de deslocamentos do tirante ao longo do ensaio para posterior análise.

Os LVDTs estavam ligados a um sistema de aquisição de dados *dynatester*, que para além de registar os dados destes instrumentos, permitia o controlo do atuador. A sua posição era centrada em ambas as faces laterais do tirante, como demonstra a figura 4.10a.

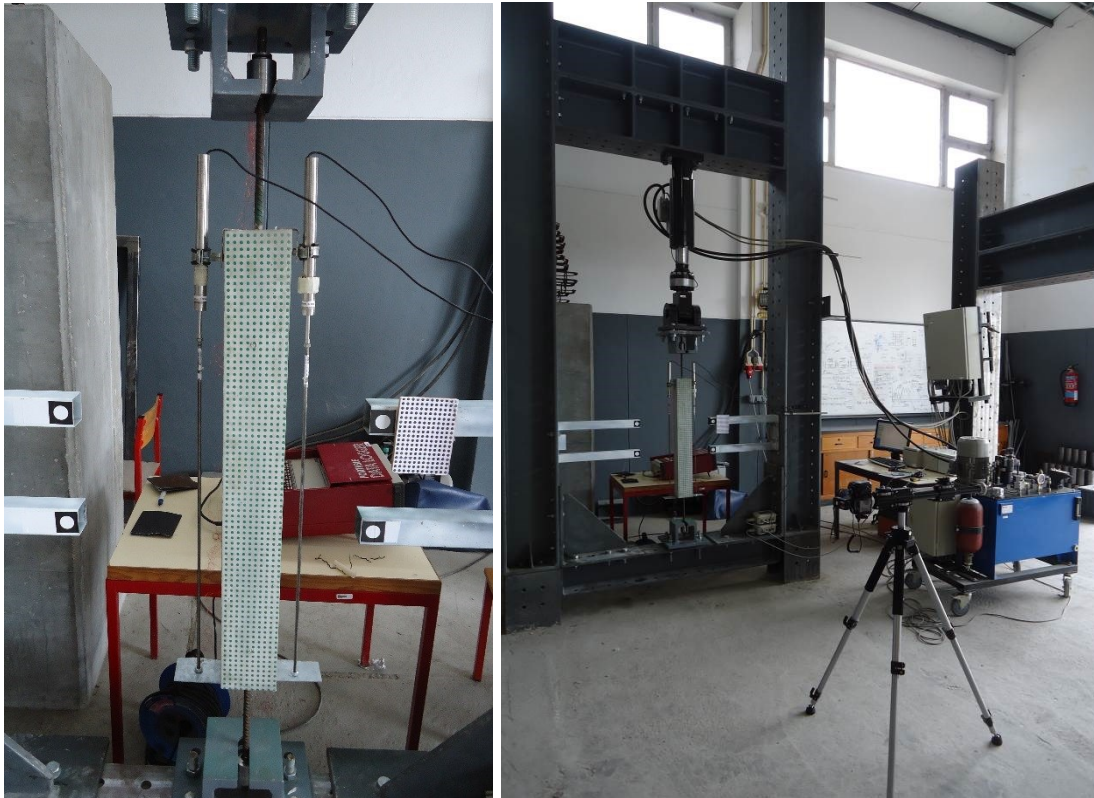
O servo-atuador hidráulico tinha uma capacidade máxima de 180 kN e estava posicionado no centro da viga de reação do pórtico. A carga foi aplicada com uma velocidade constante de 0.02mm/s, ação controlada através de deslocamentos. A força em carga foi medida com a utilização de uma célula de carga associada ao servo-atuador hidráulico.

O servo-atuador hidráulico tinha a si associado uma unidade hidráulica que permitia o seu funcionamento e o *software dynatester* a sua operação. Os extensómetros estavam ligados a um *datalogger* que registava a evolução dos valores das extensões. No que diz respeito à monitorização fotogramétrica, foi necessário preparar a superfície do provete com uma malha regular de miras circulares de raio 5mm distanciadas 10 mm verticalmente e horizontalmente entre si.

Para além destas miras no tirante foram também colocadas miras fixas, para aferir se o tirante quando ensaiado tinha rotações no plano. Foram utilizadas duas câmaras para monitorizar o ensaio, uma foi mantida em posição frontal e estática durante a duração de ambos os ensaios. O *setup* completo de ensaio está representado na figura 4.10b.

Todos os sistemas de monitorização utilizados foram previamente sincronizados, para que as leituras do *datalogger*, do atuador e da máquina fotográfica, coincidissem no tempo.

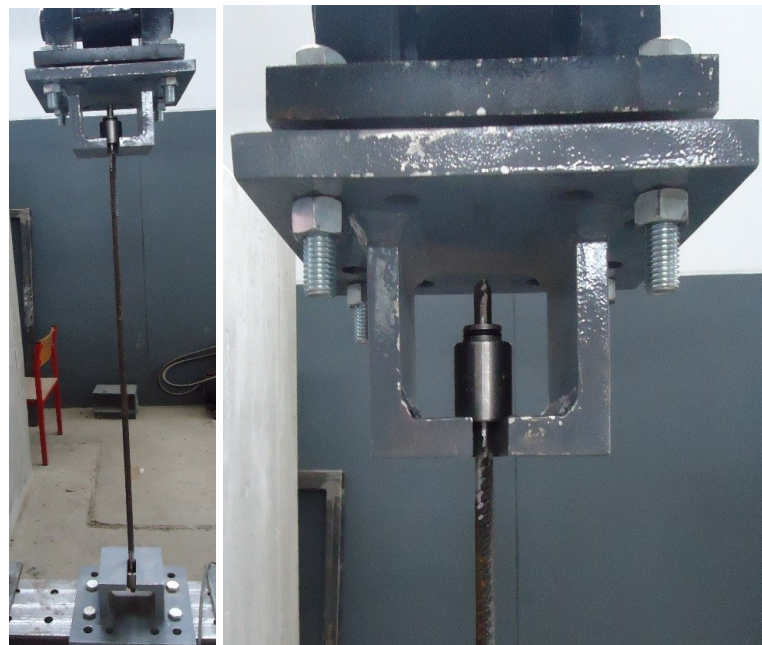
O sistema de ancoragem foi previamente testado utilizando um varão de aço, (Figura 4.11) e como não foram identificadas limitações na sua utilização, foi utilizado nos ensaios dos tirantes de betão.



a)

b)

Figura 4.10 - a) Provete pronto a ser ensaiado; b) *Setup* completo do ensaio



a)

b)

Figura 4.11 - a) Teste ao sistema de ancoragem; b) Pormenor do sistema de ancoragem a ser ensaiado



## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1. Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos, explicar o tratamento dos dados efetuado, e realizar a sua análise crítica.

Foram previamente definidas fases do ensaio para análise. Quando os valores de carga se aproximavam dos previstos para as fases consideradas, o ensaio foi interrompido, num total de 7 fases para os dois ensaios realizados: início, início da fendilhação, fim da fendilhação, cedência das armaduras (2 fases) e patamar de cedência (2 fases). De referir que no caso do tirante 0, ou teste preliminar, foram apenas analisadas 6 fases.

Durante estas pausas foram tiradas as fotografias. Contudo, alguns patamares foram ajustados, para que fosse possível obter mais pontos entre a fendilhação do betão e a cedência de armaduras. As fases analisadas pela pelo método proposto estão identificadas nos gráficos força-deslocamento (figuras 5.1, 5.2 e 5.3), através de um marcador quadrangular de cor preta.

Como é possível observar pelos gráficos abaixo representados, a primeira fase monitorizada, A fase inicial, ou fase 0, corresponde ao instante antes do início do carregamento, com força e o deslocamento nulos, sendo a fase referencia para as restantes.

A fase 1 é caracterizada pela proximidade da formação da primeira fenda. A fase 2 localiza-se logo após a formação da primeira fenda. As fases 3 e 4 caracterizam-se por se encontrarem na zona de fendilhação estabilizada. As fases 5 e 6 localizam-se na fase de cedência dos materiais.

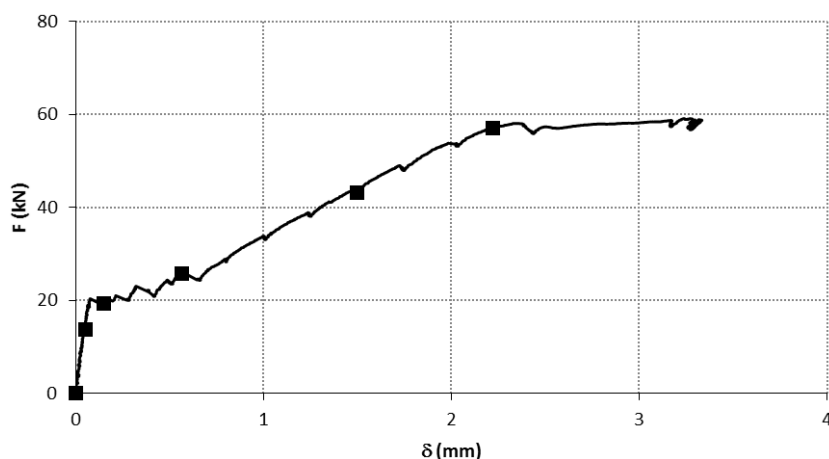


Figura 5.1 - Gráfico força - deslocamento do tirante 0

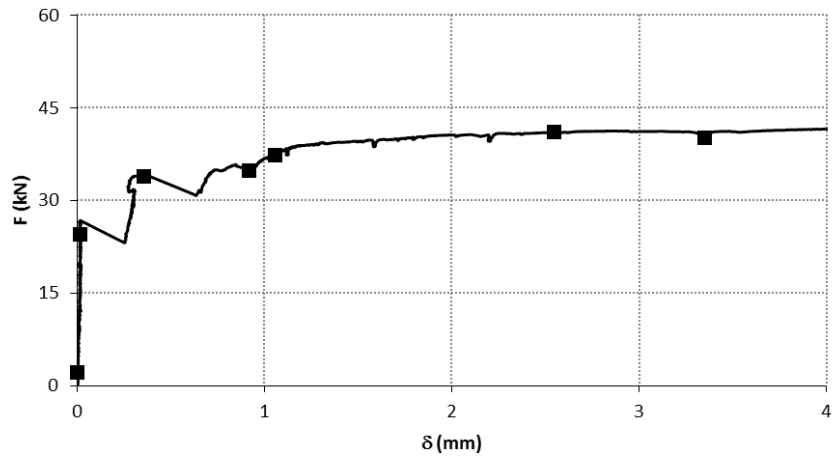


Figura 5.2 - Gráfico força - deslocamento do tirante 1

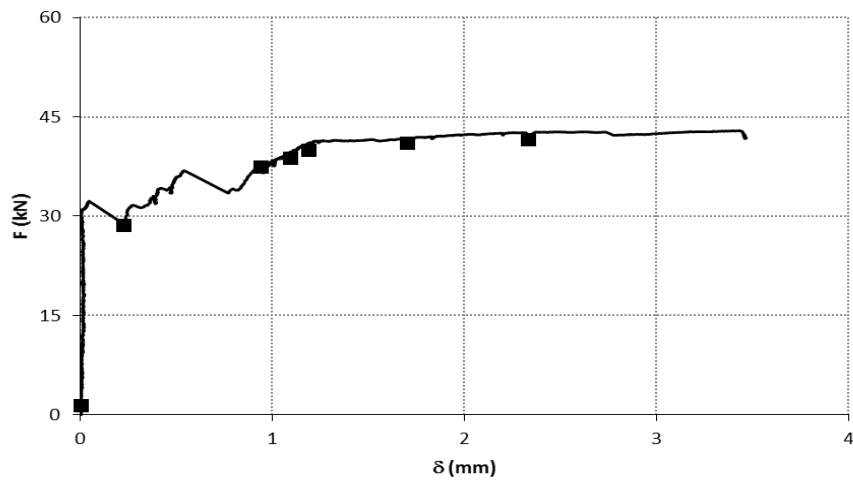


Figura 5.3 - Gráfico força - deslocamento do tirante 2

## 5.2. Definição do gráfico força-deslocamento dos ensaios

Neste sub-capítulo são apresentados as curvas força-deslocamento dos ensaios, e é feita uma análise das mesmas. É demonstrado na figura 5.4, o gráfico tensões-extensões ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) com o comportamento típico de um tirante de betão armado. A análise do gráfico representa o aumento das tensões proporcionalmente com as extensões e o módulo de elasticidade. Esta fase inicial é a fase elástica e linear, que termina com a formação da primeira fenda (Figura 5.5). Seguida desta fase inicial, existe a fase de formação de fendas, observável no gráfico com o considerável aumento de deslocamentos para forças relativamente próximas. É apresentado (Figura 5.6) um gráfico que relaciona as tensões-extensões para um tirante de betão armado. Neste gráfico é possível observar o *tension stiffening effect*, contributo do betão entre fendas que também resiste à tração. Devido à aderência entre as armaduras e o betão circundante, existe um contributo de força que é transmitida para o betão. Este comportamento aumenta a rigidez do tirante, e ao mesmo tempo, diminui o valor médio das extensões das armaduras. A linha a traço contínuo representa o contributo do tirante de betão armado, e a linha a traço e ponto representa o contributo exclusivo da armadura do tirante. O comportamento referido é dado pela distância entre estas duas linhas.

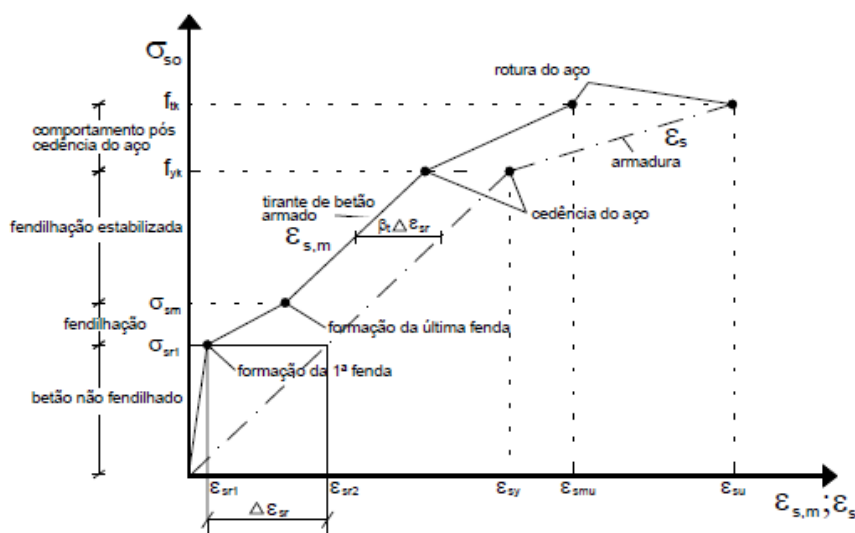


Figura 5.4 - Relação tensão-extensão para um tirante betão armado (Carmo, 2012)

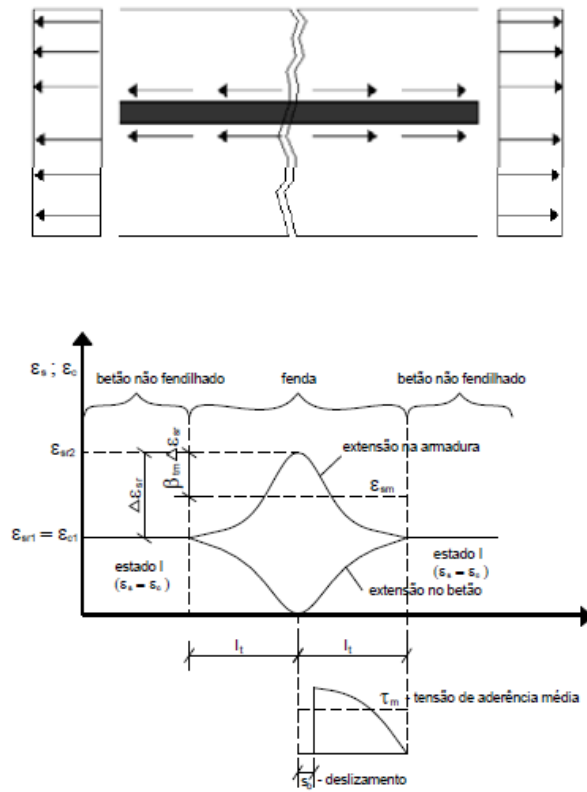


Figura 5.5 – Extensões no betão e na armadura na região da 1ª fenda (Carmo, 2012)

Segue-se a fase da estabilização das fendas (Figura 5.6), em que o aumento da força aplicada se traduz num pequeno aumento dos deslocamentos. Por último segue-se o patamar de cedência, observável no gráfico, o último patamar horizontal, no qual se registam elevados deslocamentos, para valores de força aproximadamente semelhantes. Nesta última fase, é atingida a força máxima, associada à tensão máxima (ou tensão última).

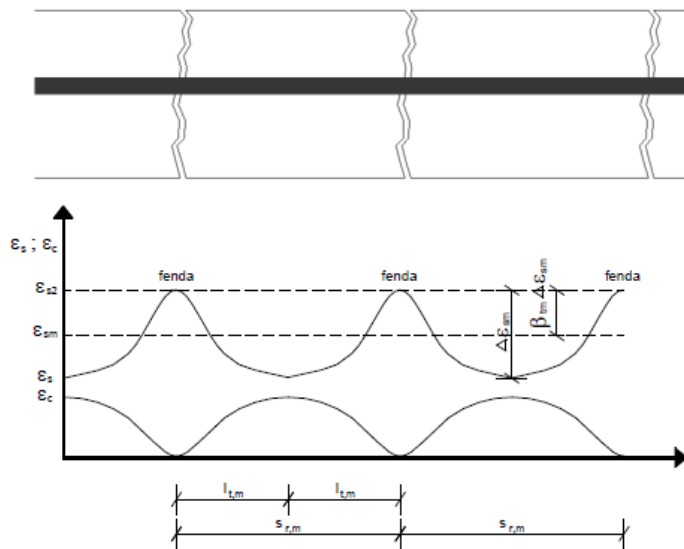


Figura 5.6 – Extensões no betão e na armadura depois da estabilização da fendilhação (Carmo, 2012)

Nos sub-sub-capítulos seguintes (5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3) são representados os gráficos força-deslocamento para os ensaios. Nestes são apresentadas duas retas; uma delas representa o comportamento exclusivo do betão a resistir à força aplicada no tirante, enquanto a outra reta apresenta o comportamento exclusivo do varão de aço. Estas retas permitem verificar que numa fase inicial do ensaio, enquanto a força aplicada no provete era relativamente baixa, o comportamento global do tirante é muito próximo do comportamento exclusivo do betão. Até este ponto, as tensões aumentam proporcionalmente com as extensões e o módulo de elasticidade.

### 5.2.1. Gráfico força-deslocamento do tirante 0

No ensaio do tirante de teste (Figura 5.7) o início da formação de fendas ocorreu quando se registava uma força de 20.40kN, com uma perda de força instantânea de 1.28kN e um aumento de deslocamento do tirante de 0.063mm, evoluindo de 0.077mm para 0.14mm. A rigidez do tirante antes da formação da fenda era de 265kN/mm.

Após a formação das fendas, ocorreram alguns pequenos picos de força com reduzidas perdas de força. Nesta fase de formação de fendas, os dois picos de força registados com maiores deslocamentos e perdas de força associadas são correspondentes à formação de novas fendas. A última fenda formou-se quando se registava uma força de 26kN e um deslocamento no tirante de 0.57mm e registou-se uma perda de força instantânea de 1.58kN e um aumento de deslocamento do tirante de 0.075mm. A partir deste ponto iniciou-se a fase de estabilização da fendilhação, não havendo formação de novas fendas, havendo apenas o aumento da largura de fendas já formadas e da deformação do tirante.

O estado II, correspondente à fase da fendilhação estabilizada, decorreu até um deslocamento total de 2.34mm e uma força de 58kN, ponto no qual se registou o início da cedência do aço. A rigidez do tirante no estado II foi de 24.8kN/mm. Depois do ponto em que se iniciou o patamar de cedência, registou-se um aumento considerável dos deslocamentos até atingir o valor máximo de 3.27mm, ponto considerado como fim do ensaio.

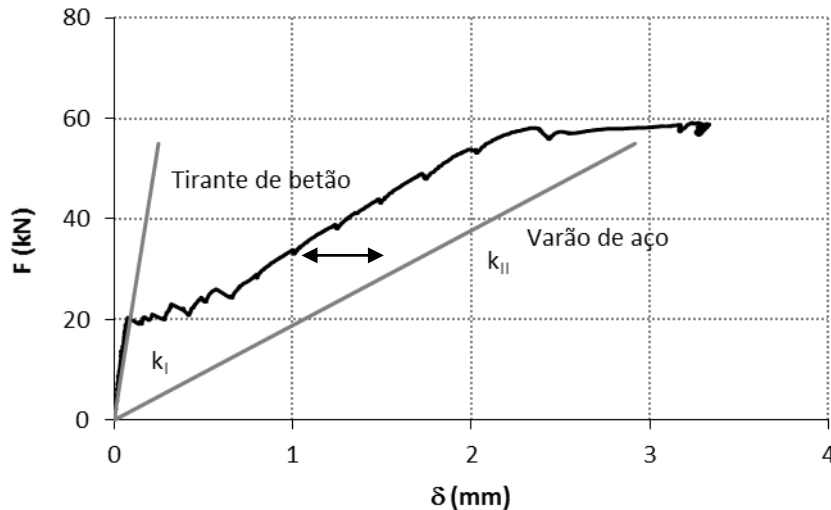


Figura 5.7 - Gráfico força-deslocamento do tirante 0

### 5.2.2. Gráfico força-deslocamento do tirante 1

O gráfico carga-deslocamento do tirante 1 (Figura 5.8) permite observar a evolução das forças atuantes bem como os deslocamentos associados ao longo do ensaio. Numa fase inicial é possível observar um reduzido deslocamento até fase final da fase linear-elástica. Esta fase termina com a abertura da primeira fenda, registada com a diminuição da força concomitantemente com um aumento significativo do deslocamento. O início da formação de fendas ocorreu quando se registava uma força de 26.8kN e um deslocamento do tirante de 0.016mm. A perda de força instantânea neste ponto foi de 3.7kN, baixando para os 23.1kN e o deslocamento aumentou 0.237mm para os 0.253mm. A rigidez do tirante antes da formação de fendas, estado I, era de 1675kN/mm.

Após a formação da fenda inicial, houve mais um pico de força, seguido de diminuição de força e aumento de deslocamentos. Neste pico, que está associado a formação de uma segunda fenda, registava-se uma força de 34kN e um deslocamento do tirante de 0.382 mm, houve perda de força instantânea de 3.1kN e aumento de 0.245mm de deslocamento do tirante. Esta fase é a de formação de fendas. Este aumento do deslocamento está relacionado com a resistência do betão à tração, por outro lado a reduzida deformação do tirante na fase inicial está relacionado com o módulo de elasticidade do betão, que conferiu ao tirante de betão armado uma grande rigidez.

Nesta fase, as tensões no betão e no aço vão aumentando ao longo do carregamento, registando os dois materiais iguais extensões, mas diferentes tensões devido aos diferentes módulos de elasticidade que possuem. Entre o fim da fase elástica e o patamar de cedência, há a formação de fendas e a fase em que a fendilhação está estabilizada.

O ensaio progrediu sem registo de picos de força da ordem de grandeza dos referidos anteriormente, contudo houve mais uma diminuição de força mas de menor valor. Quando o estado II foi atingido a rigidez registada foi de 35.8kN/mm. Quando se registava uma força de 41.7kN e um deslocamento do tirante de 4.19mm, iniciou-se a cedência do aço.

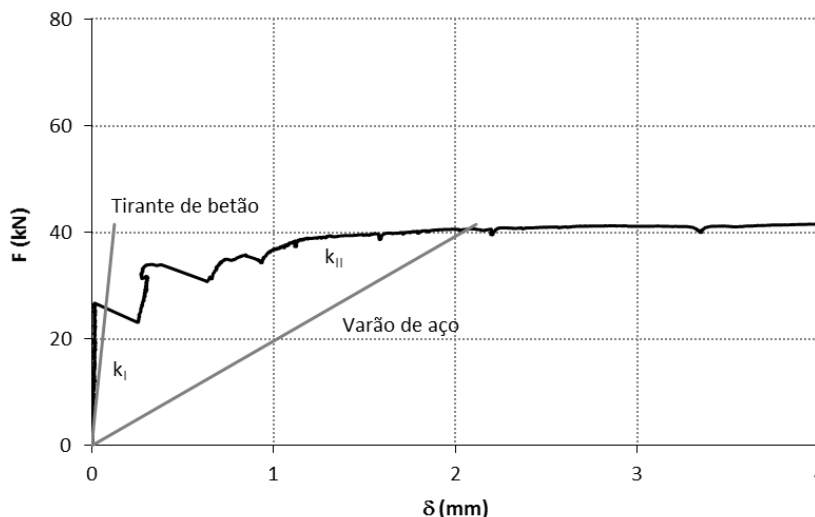


Figura 5.8 - Gráfico força-deslocamento do tirante 1

### 5.2.3. Gráfico força-deslocamento do tirante 2

O gráfico do tirante 2 (Figura 5.9) permite observar a evolução das forças atuantes e os deslocamentos associados. Na fase inicial é possível observar um reduzido deslocamento até fase final do regime elástico que termina com a abertura da primeira fenda.

A força que provoca a primeira fenda foi mais elevada neste tirante comparativamente com o anterior. O início da formação de fendas ocorreu quando se registava uma força de 32.3kN e um deslocamento do tirante de 0.048mm. A perda de força instantânea neste ponto foi de 3.7kN, baixando para 28.6kN e o deslocamento aumentou 0.193mm para os 0.241mm. A rigidez no estado I, antes da formação das fendas foi de 673kN/mm.

A força máxima registada também foi mais elevada do que o tirante anterior. Na fase da formação de fendas, houve um pico de força, em que se registou uma redução de força de 36.9kN e 0.546mm de deslocamento, para 33.5kN e 0.768mm, que se traduz numa perda de força de 3.4kN e um aumento do deslocamento de 0.222mm.

O estado II foi atingido com a rigidez registada de 43.6kN/mm. Registava-se uma força de 42.8kN e um deslocamento do tirante de 3.24mm, no ponto considerado como fim do ensaio.

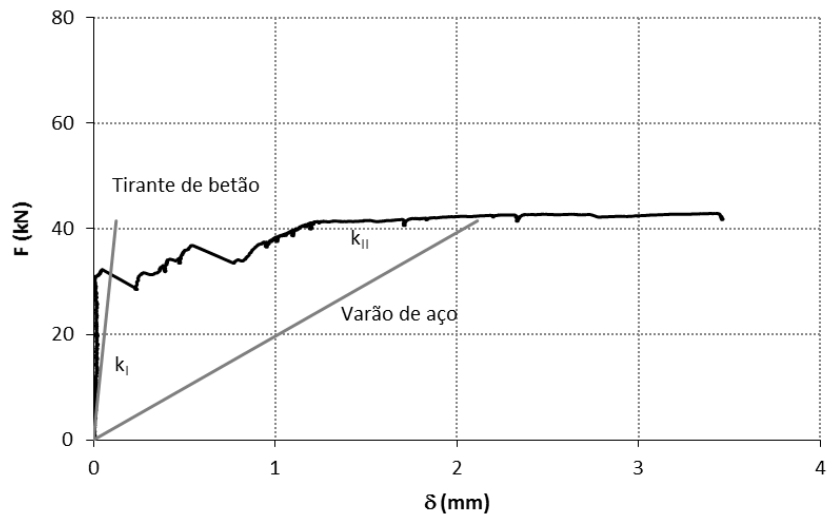


Figura 5.9 - Gráfico força-deslocamento do tirante 2

### 5.3. Extensões nas armaduras obtidas por extensometria

#### 5.3.1. Extensões nas armaduras obtidas por extensometria no tirante 1

Em seguida (Figura 5.10) são apresentados os valores de extensões obtidas através da extensometria, inseridos em gráficos força (kN) vs. extensões ( $10^{-6}$ ), exclusivamente nas fases em que os tirantes foram monitorizados através de fotogrametria. Posteriormente é realizado um comentário aos resultados.

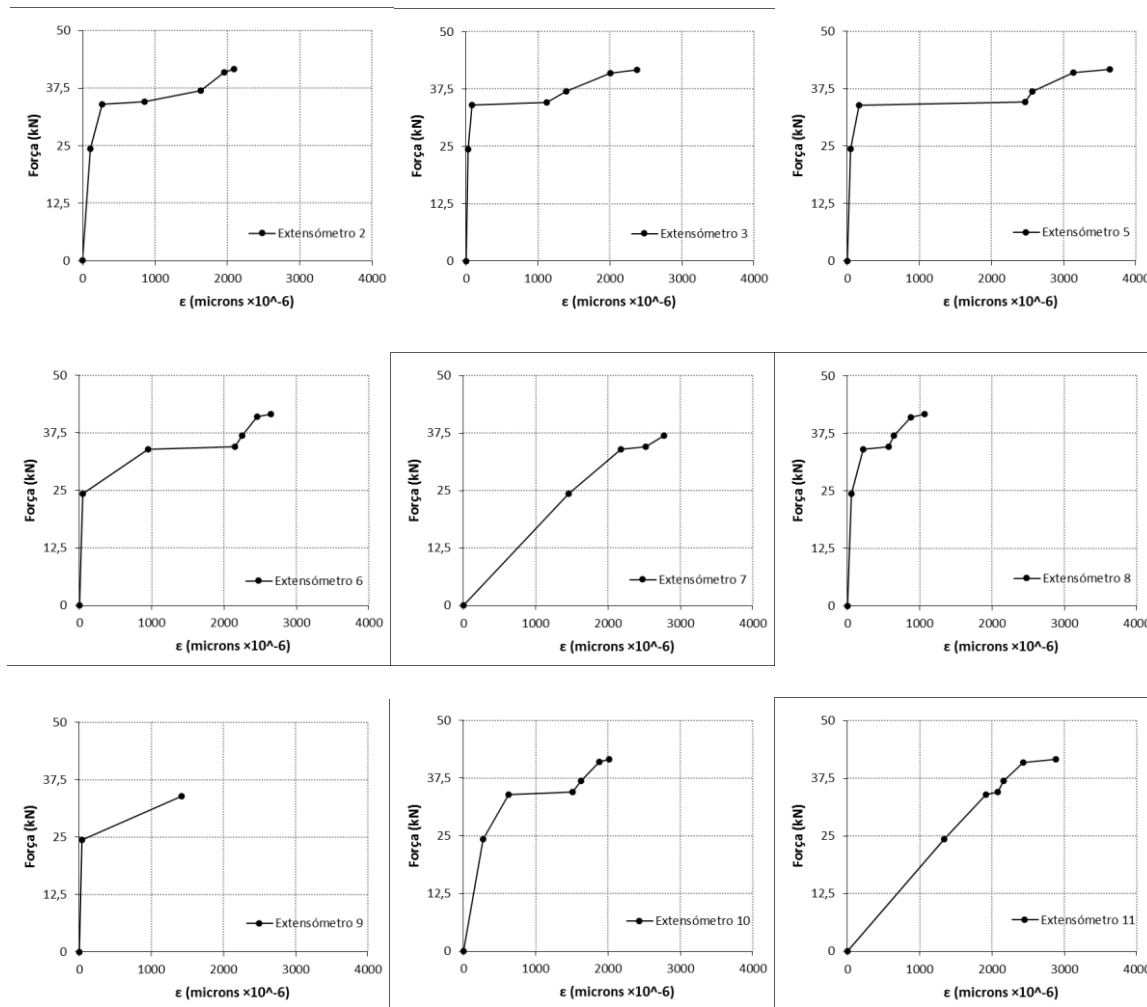


Figura 5.10 - Gráficos F- $\epsilon$  do tirante 1

No ensaio do tirante 1, verificou-se que o comportamento do extensômetro #2 registou baixos valores nas fases iniciais, no entanto nas fases finais estes valores têm um aumento que é coincidente com a formação de uma fenda, de largura 0.4mm, muito próxima da localização do extensômetro.

O comportamento do extensômetro #3 é semelhante ao anterior, e coerente com a sua posição. O comportamento do extensômetro #5 regista um grande aumento de extensões entre a fase 3 e 4, que coincide com a formação de uma fenda muito perto a sua localização.

Nesta fase a fenda tinha uma largura de 0.53mm, valor que no final do ensaio era de 2.07mm. O comportamento do extensómetro #6 tem uma evolução semelhante ao anteriormente referido, contudo ligeiramente inferior, fruto do seu maior afastamento relativamente à localização de uma fenda.

O comportamento do extensómetro #7 registou um grande aumento de extensões desde o início, entre a fase 1 e 2, que coincide com a formação da primeira fenda no tirante. Os extensómetros #8 e #9 apresentaram baixos valores ao longo de todo o ensaio.

Os extensómetros #10 e #11 apresentaram valores mais elevados devido a proximidade de uma fenda longitudinal formada na parte superior do tirante.

São apresentados também os correspondentes gráficos (Figura 5.11) de tensões (MPa), em ordenadas, e de extensões ( $10^{-6}$ ), em abcissas, através dos quais é possível relacionar a evolução das tensões e extensões ao longo do ensaio do tirante #1.

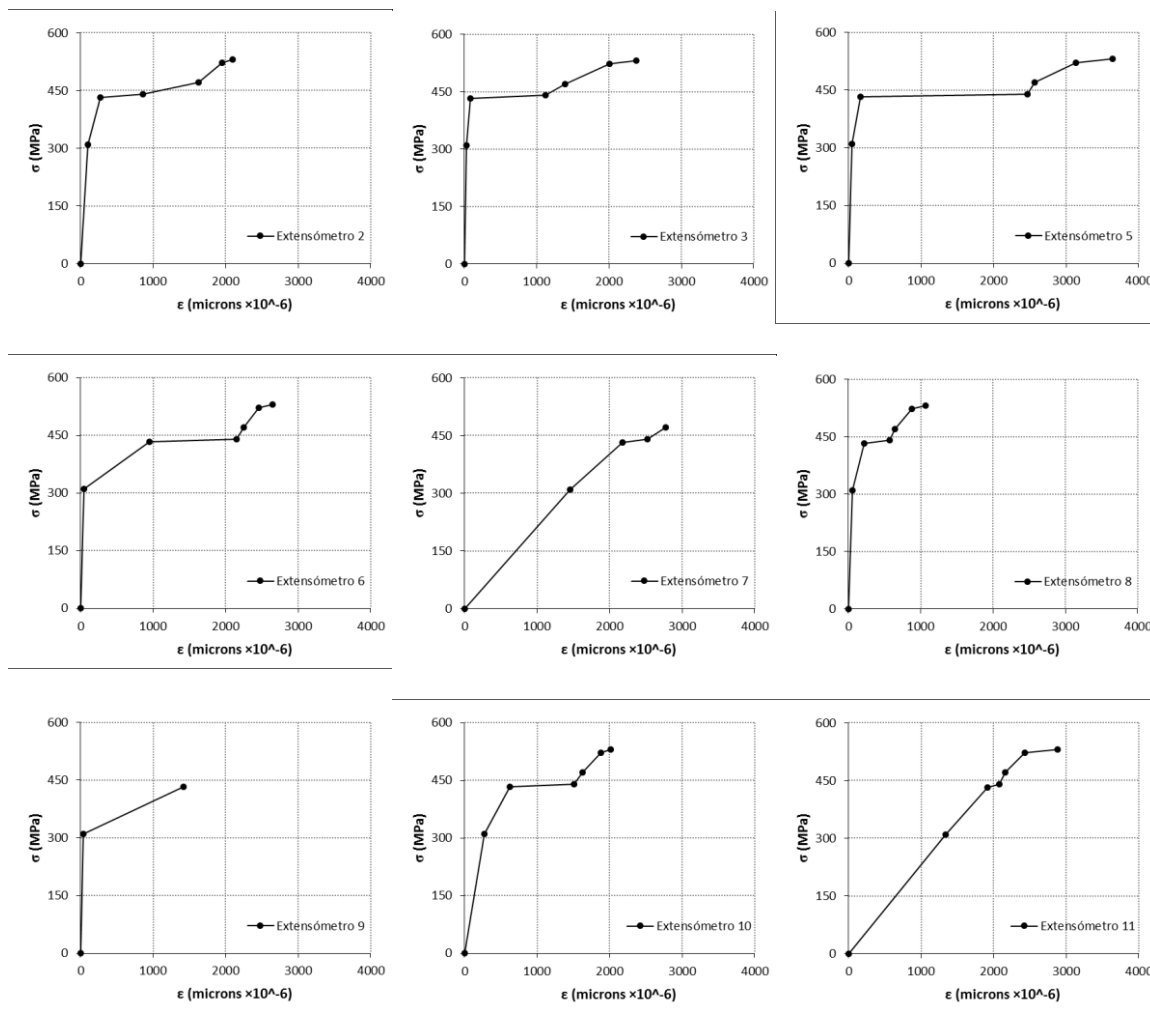


Figura 5.11 - Gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$  do tirante 1

### 5.3.2. Extensões nas armaduras obtidas por extensometria no tirante 2

Em seguida (Figura 5.12) são apresentados os valores de extensões obtidas através da extensometria, inseridos em gráficos força (kN) vs. extensões ( $10^{-6}$ ), exclusivamente nas fases em que os tirantes foram monitorizados através de fotogrametria. Posteriormente é também realizado um comentário aos resultados.

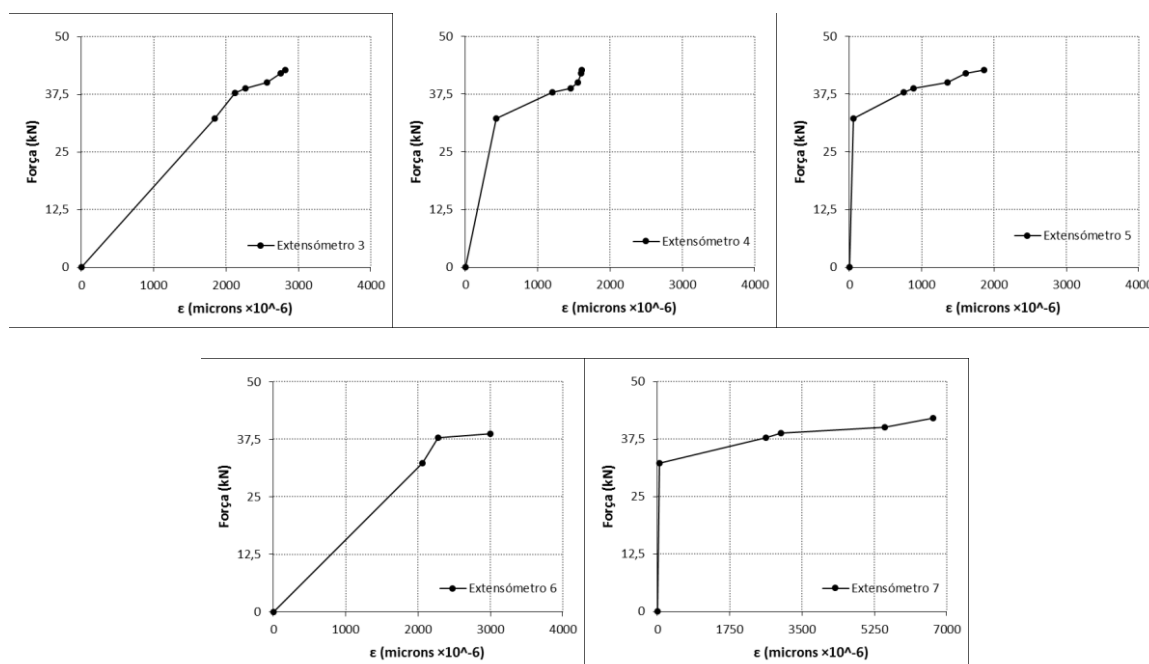


Figura 5.12 - Gráficos F-ε do tirante 2

No ensaio do tirante 2, registou-se que o comportamento do extensómetro 3 demonstrou um rápido aumento das extensões desde o início do ensaio, que justifica-se pelo facto de uma fenda formar-se numa localização próxima do extensómetro.

O extensómetro 4 demonstrou uma evolução ligeiramente inferior ao extensómetro anterior, coerente com o seu maior afastamento às fendas. O extensómetro 5 é o extensómetro que mais longe está da zona de formação de fendas e regista menor valor de extensões.

Os extensómetros 6 e 7 localizam-se na zona de formação de duas fendas que estão próximas, e assim possuem valores mais elevados desde o início do ensaio, e rapidamente evoluem a par da formação de fendas, na fase 2 e 3.

São apresentados também os correspondentes gráficos (Figura 5.13) de tensões (MPa), em ordenadas, e de extensões ( $10^{-6}$ ), em abcissas, através dos quais é possível relacionar a evolução das tensões e extensões ao longo do ensaio do tirante 2.

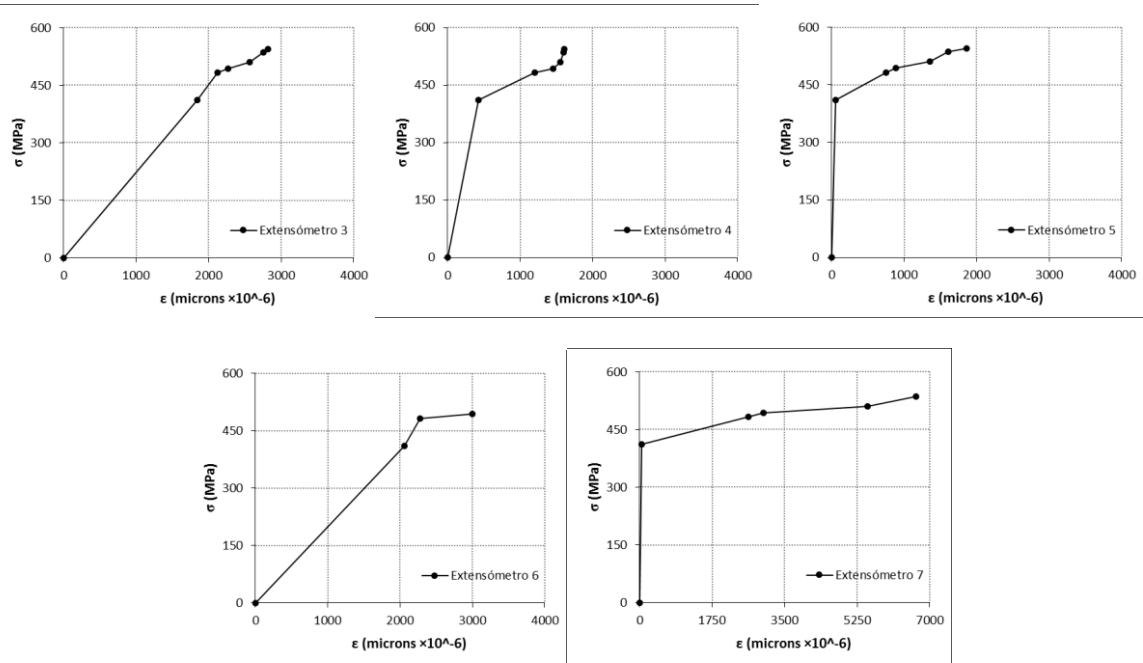


Figura 5.13 - Gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$  do tirante 2

## 5.4. Avaliação de distribuição de extensões nas armaduras

A extensão média do aço longitudinal registada através dos dados recolhidos pelos extensómetros para os ensaios estão representados abaixo.

### 5.4.1. Extensões no tirante 0

No caso do tirante 0 (Figura 5.14) a evolução das extensões ao longo do ensaio foi a seguinte:

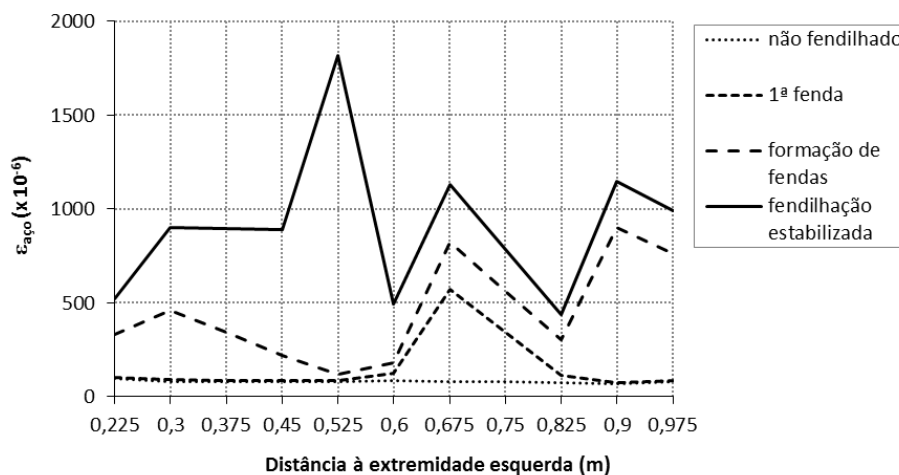


Figura 5.14 - Extensões no tirante 0

No que diz respeito ao funcionamento dos extensómetros, todos registaram informação até ao final do ensaio, com exceção do extensómetro #3 e #8.

Durante a fase 1 do ensaio, as leituras permitiram observar uma evolução das extensões semelhante em todos os extensómetros, com valores da ordem de grandeza de  $48 \times 10^{-6}$  (m/m) a  $60 \times 10^{-6}$  (m/m). Com a formação da primeira fenda, correspondente ao início da fase 2, as extensões aumentaram significativamente, com valores entre  $90 \times 10^{-6}$  (m/m) e  $164 \times 10^{-6}$  (m/m) nos extensómetros #2, #3, #4, #5, #6 e #11. O extensómetro #1 aumentou para  $239 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #7 para  $625 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #8 para  $427 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #9 para  $230 \times 10^{-6}$  (m/m) e o extensómetro #10 para  $720 \times 10^{-6}$  (m/m).

Os valores de extensões aumentaram ao longo do ensaio, apresentando na última fase (fase 5), valores entre  $2300 \times 10^{-6}$  (m/m) e  $3200 \times 10^{-6}$  (m/m) para a generalidade dos extensómetros, com exceção do extensómetro #2 com  $4778 \times 10^{-6}$  (m/m) e o extensómetro #11 com  $3156 \times 10^{-6}$  (m/m). Através da análise do gráfico pode verificar-se que a extensão do aço ao longo do eixo do varão não é constante devido à contribuição do betão entre fendas que também resiste a tensões de tração. Este comportamento deve-se ao *tension stiffening effect*, conceito referido no sub-capítulo 5.2.

### 5.4.2. Extensões no tirante 1

No caso do tirante 1 (Figura 5.15) a evolução das extensões ao longo do ensaio é a seguinte:

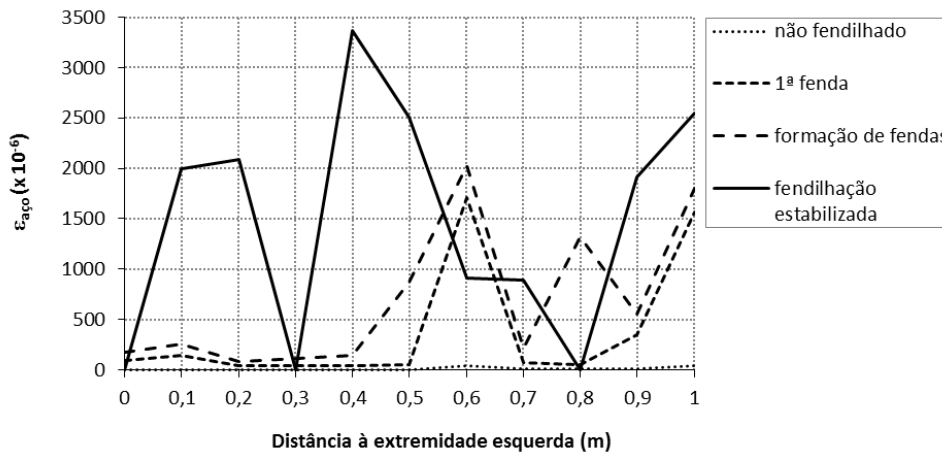


Figura 5.15 - Extensões no tirante 1

Relativamente ao seu funcionamento os extensómetros #1 e #4 não funcionaram, e o #9 só funcionou até uma parte do ensaio (fase 2).

As leituras dos extensómetros permitiram ver a evolução das extensões de modo semelhante em grande parte dos extensómetros, com valores da ordem de grandeza (fase 1) de  $40 \times 10^{-6}$  (m/m) a  $141 \times 10^{-6}$  (m/m) nos extensómetros #2, #3, #5, #6, #8 e #9; mas com registo de maiores extensões em duas posições,  $1708 \times 10^{-6}$  (m/m) no extensómetro #7 e  $1564 \times 10^{-6}$  (m/m) no extensómetro #11. Quando se regista a formação da primeira fenda (fase 2) o extensómetro #5, o mais próximo dessa fenda, aumentou de  $46 \times 10^{-6}$  (m/m) para  $116 \times 10^{-6}$  (m/m) e o extensómetro #6 aumentou  $694 \times 10^{-6}$  (m/m) de  $55 \times 10^{-6}$  (m/m) para  $749 \times 10^{-6}$  (m/m).

Quando se formou a segunda fenda (fase 3), houve extensões mais elevadas na generalidade dos extensómetros, sendo as extensões mais baixas correspondentes a um aumento de  $432 \times 10^{-6}$  (m/m) no extensómetro #2,  $657 \times 10^{-6}$  (m/m), no extensómetro #3 e  $480 \times 10^{-6}$  (m/m) no extensómetro #8, e, as extensões mais elevadas, num intervalo de  $1300 \times 10^{-6}$  (m/m) a  $2100 \times 10^{-6}$  (m/m) para os restantes extensómetros.

Ao longo das fases restantes as extensões foram aumentando, com exceção do extensómetro #7 que diminuiu. Na fase 6, o valor de extensão do extensómetro #7 era de  $877 \times 10^{-6}$  (m/m); do extensómetro #8 era de  $1066 \times 10^{-6}$  (m/m), enquanto em todas as posições restantes estavam entre os  $2000$  e  $3000 \times 10^{-6}$  (m/m).

De realçar que através da análise do gráfico pode verificar-se que a extensão do aço ao longo do eixo do varão não é constante, devido à contribuição do betão entre fendas que também resiste às tensões de tração.

### 5.4.3. Extensões no tirante 2

No caso do tirante 2 (Figura 5.16) a evolução das extensões ao longo do ensaio é a seguinte:

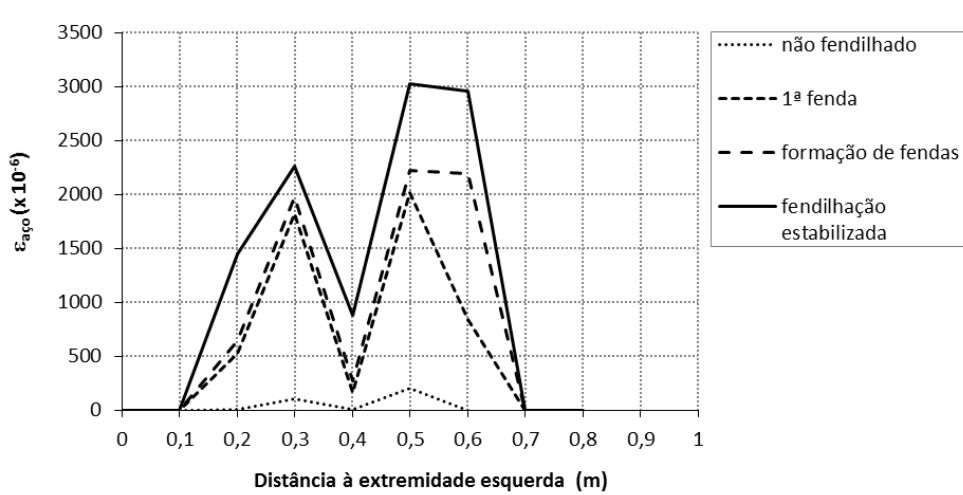


Figura 5.16 - Extensões no tirante 2

Relativamente ao seu funcionamento os extensómetros #1, #2, #6 e #7 não registaram qualquer informação. O extensómetro #6 só registou informação até a fase 3.

As leituras do extensómetro #3, aumentaram (fase 1) com a formação da primeira fenda, de  $424 \times 10^{-6}$  (m/m) para  $524 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #4 aumentou de  $1695 \times 10^{-6}$  (m/m) para  $1843 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #5 aumentou de  $59 \times 10^{-6}$  (m/m) para  $165 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #6 aumentou de  $1940 \times 10^{-6}$  (m/m) para  $2058 \times 10^{-6}$  (m/m) e o extensómetro #7 de  $58 \times 10^{-6}$  (m/m) para  $841 \times 10^{-6}$  (m/m).

Quando se formou a segunda fenda (fase 3), houve extensões mais elevadas na totalidade dos extensómetros; com o extensómetro #3 a apresentar  $1125 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #4 com  $2098 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #5 com  $683 \times 10^{-6}$  (m/m), o extensómetro #6 com  $2271 \times 10^{-6}$  (m/m), e por último o extensómetro #7 com  $2467 \times 10^{-6}$  (m/m).

Na última fase considerada, a fase 6, os valores de extensões registados eram no extensómetro #3 de  $1606 \times 10^{-6}$  (m/m), no extensómetro #4 de  $2822 \times 10^{-6}$  (m/m), no extensómetro #5 de  $1861 \times 10^{-6}$  (m/m), e no extensómetro #7 de  $4225 \times 10^{-6}$  (m/m).

É possível observar através da análise do gráfico das extensões do tirante ao longo do ensaio, que as maiores extensões registaram-se nas localizações mais próximas das fendas. É possível observar no gráfico o *tension stiffening effect*, a extensão do aço ao longo do eixo do varão não é constante devido à contribuição do betão entre fendas que também resistem as tensões de tração.

## 5.5. Erros da fotogrametria e processamento de imagem

### 5.5.1. Erros no ensaio do tirante 0

No tirante 0 (teste preliminar) o erro de detecção das miras obtido foi de 0.028mm (0.22 $pixel$ ). O erro de detecção das miras foi determinado com as 10 fotografias iniciais, compara a variação das coordenadas para os diferentes pontos. O valor 0.028mm é o erro de detecção das miras (RMS global), em mm. O erro médio da homografia (erro sistemático) foi de 0.015mm. O gráfico (Figura 5.17) compara os valores de RMS em X e em Y, para os dados em mm.

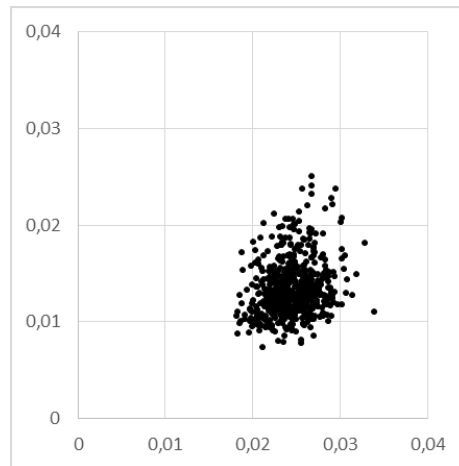


Figura 5.17 - RMS em X e Y, tirante 0

### 5.5.2. Erros no ensaio do tirante 1

No tirante 1 o erro de detecção das miras obtido foi de 0.040mm (0.4 $pixel$ ). O erro de detecção das miras foi determinado com as 10 fotografias iniciais, compara a variação das coordenadas para os diferentes pontos. O valor 0.040mm é o erro de detecção das miras (RMS global), em mm. O erro médio da homografia (erro sistemático) foi de 0.046mm. O gráfico (Figura 5.18) compara os valores de RMS em X e em Y, para os dados em mm.

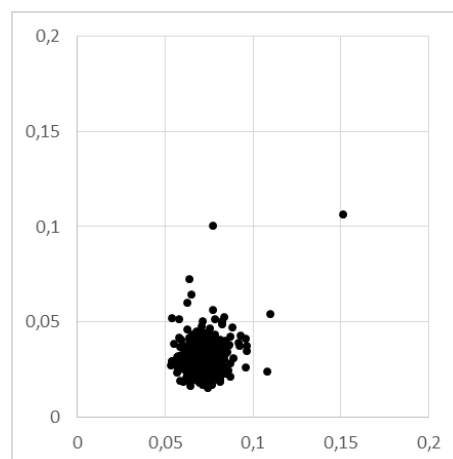


Figura 5.18 - RMS em X em Y, tirante 1

### 5.5.3. Erros no ensaio do tirante 2

No tirante 2 o erro de detecção das miras obtido foi de 0.030mm (0.167pixel). O erro de detecção das miras foi determinado com as 10 fotografias iniciais, compara a variação das coordenadas para os diferentes pontos. O valor 0.030mm é o erro de detecção das miras (RMS global), em mm. O erro médio da homografia (erro sistemático) foi de 0.051mm. O gráfico (Figura 5.19) compara os valores de RMS em X e em Y, para os dados em mm

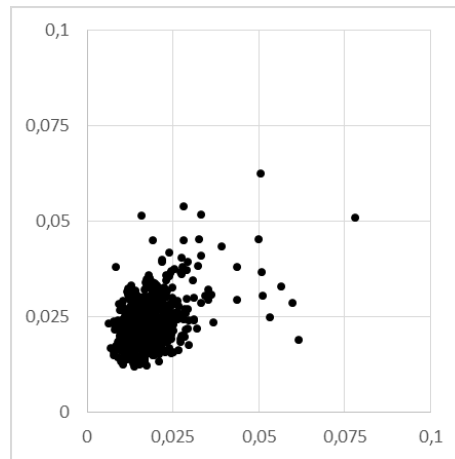


Figura 5.19 – RMS em X e em Y tirante 2

### 5.5.4. Comentário global dos erros nos ensaios

A análise dos resultados dos ensaios permitiu verificar que o erro médio das extensões foi de 0.35%, valor muito próximo da precisão de 0.3% que estava inicialmente prevista.

O erro vs. deslocamentos medidos em cada fase (%) estão resumidos no seguinte quadro:

Quadro 5.1 - Erro vs. deslocamentos

Fase	Tirante 1	Tirante 2
1	0.00	0.66
2	0.62	1.54
3	0.42	1.04
4	0.32	0.37
5	0.15	1.28
6	0.08	0.26

A análise do quadro permite observar que no ensaio do tirante 1 o erro vs. deslocamento atinge o valor mais elevado (0.62) na fase 2, diminuindo progressivamente até ao final do ensaio (0.08). No ensaio do tirante 2 o erro vs. deslocamento atinge na fase 2 o valor mais elevado

(1.54), diminuindo na fase 3 e 4. Na fase 5 regista-se um aumento (1.28) e na fase 6 o valor volta a diminuir.

A estimativa do erro nas extensões para os tirantes foi calculado para as regiões que englobam a zona de formação de fendas e a metade da zona do betão entre fendas em ambas as direções. A região 1 engloba a zona da fenda 1  $w_1$ , e assim sucessivamente. Assim, no tirante 1 a região 1 tem um erro nas extensões de  $<0.67\%$ , a região 2 tem um erro nas extensões de  $<0.46\%$ , e a região 3 tem um erro nas extensões de  $<0.36\%$ . No tirante 2 a região 1 tem um erro nas extensões de  $<0.36\%$ , a região 2 tem um erro nas extensões de  $<0.62\%$ , e a região 3 tem um erro nas extensões de  $<0.76\%$ . Com base nestes valores é possível verificar que quanto maior a região analisada, menor foi o erro estimado para ambos os tirantes.

## 5.6. Mapa de deslocamentos

### 5.6.1. Mapa de deslocamentos do tirante 0

Os mapas de deslocamentos obtidos através de fotogrametria do tirante 0 para as fases analisadas são apresentados em seguida, figura 5.20. A cada gradação de cor corresponde uma diferença de deslocamento, conforme a respectiva legenda abaixo apresentada. Os mapas de deslocamentos foram obtidos através de um *software* de pós-processamento de dados designado *OriginPro* (Versão 9.0.0, da *OriginLab Corporation*), que permite a configuração do tirante em termos de dimensões e os correspondentes deslocamentos que ocorreram na sua superfície.

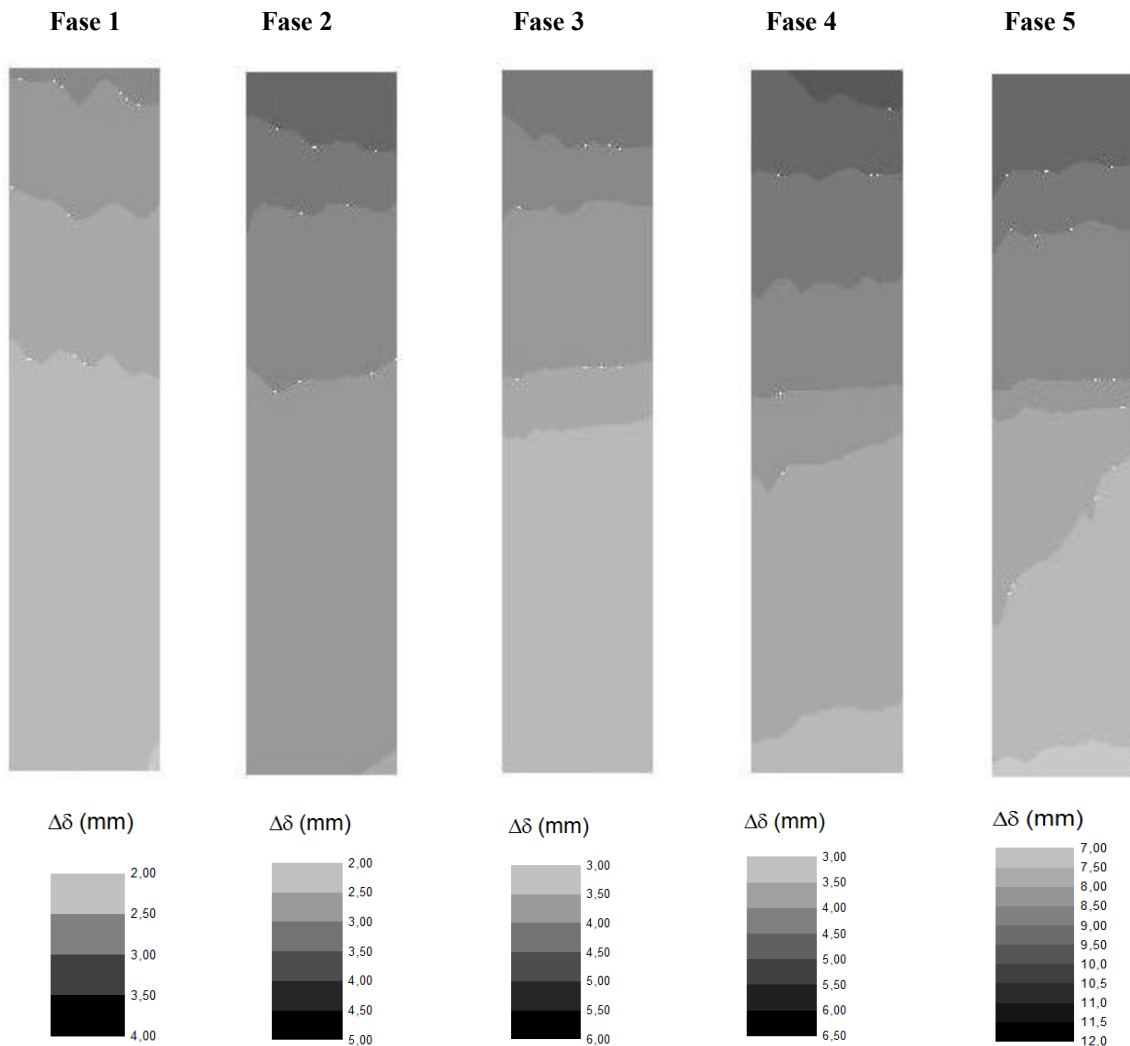


Figura 5.20 - Mapa de deslocamentos do tirante 0

### 5.6.2. Mapa de deslocamentos do tirante 1

Os mapas de deslocamentos obtidos através de fotogrametria e processamento de imagem do tirante 1 para as etapas analisadas são em seguida apresentados, figura 5.21. A cada graduação de cor corresponde uma diferença de 0,5 mm de deslocamento, conforme a legenda abaixo representada.

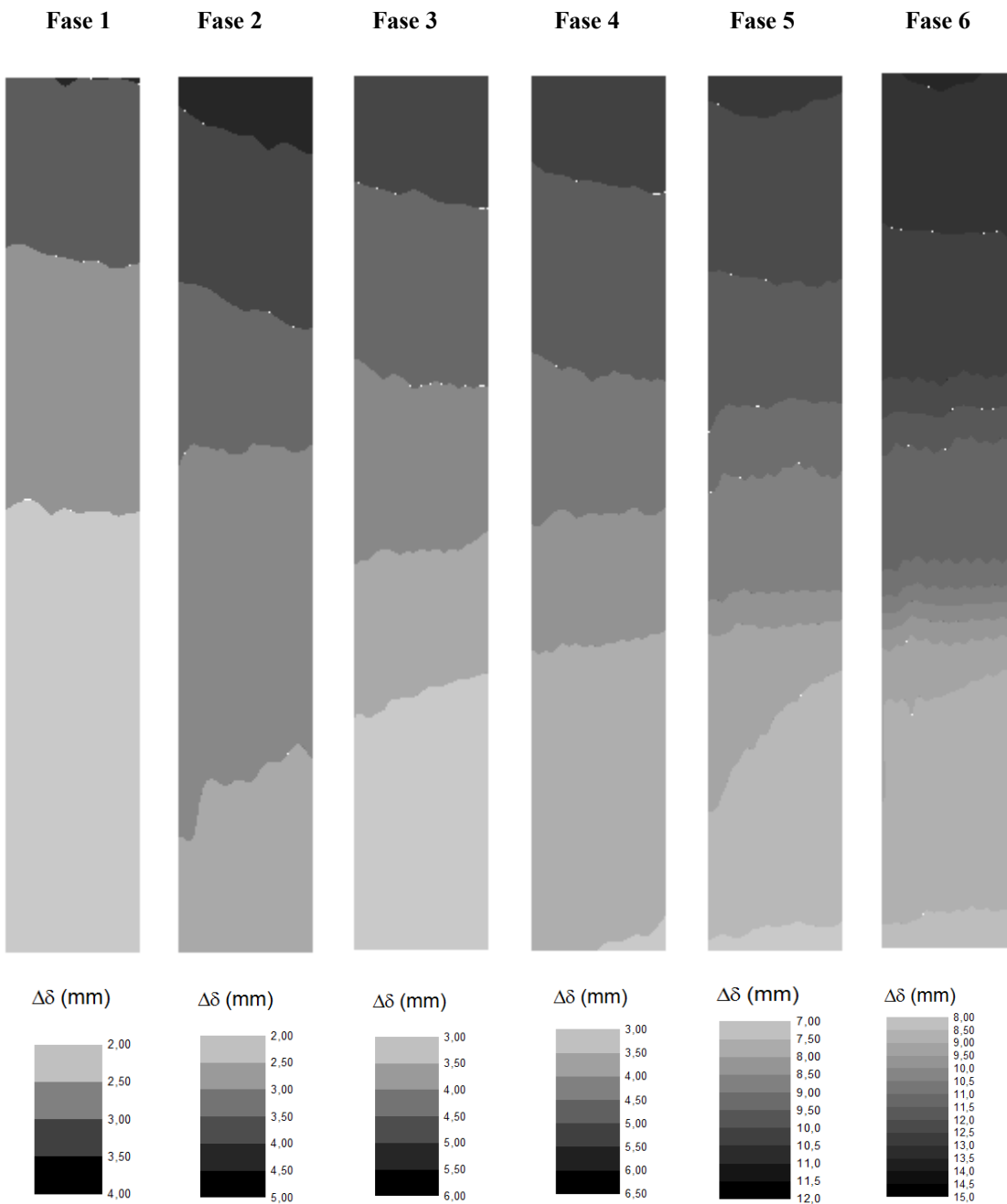
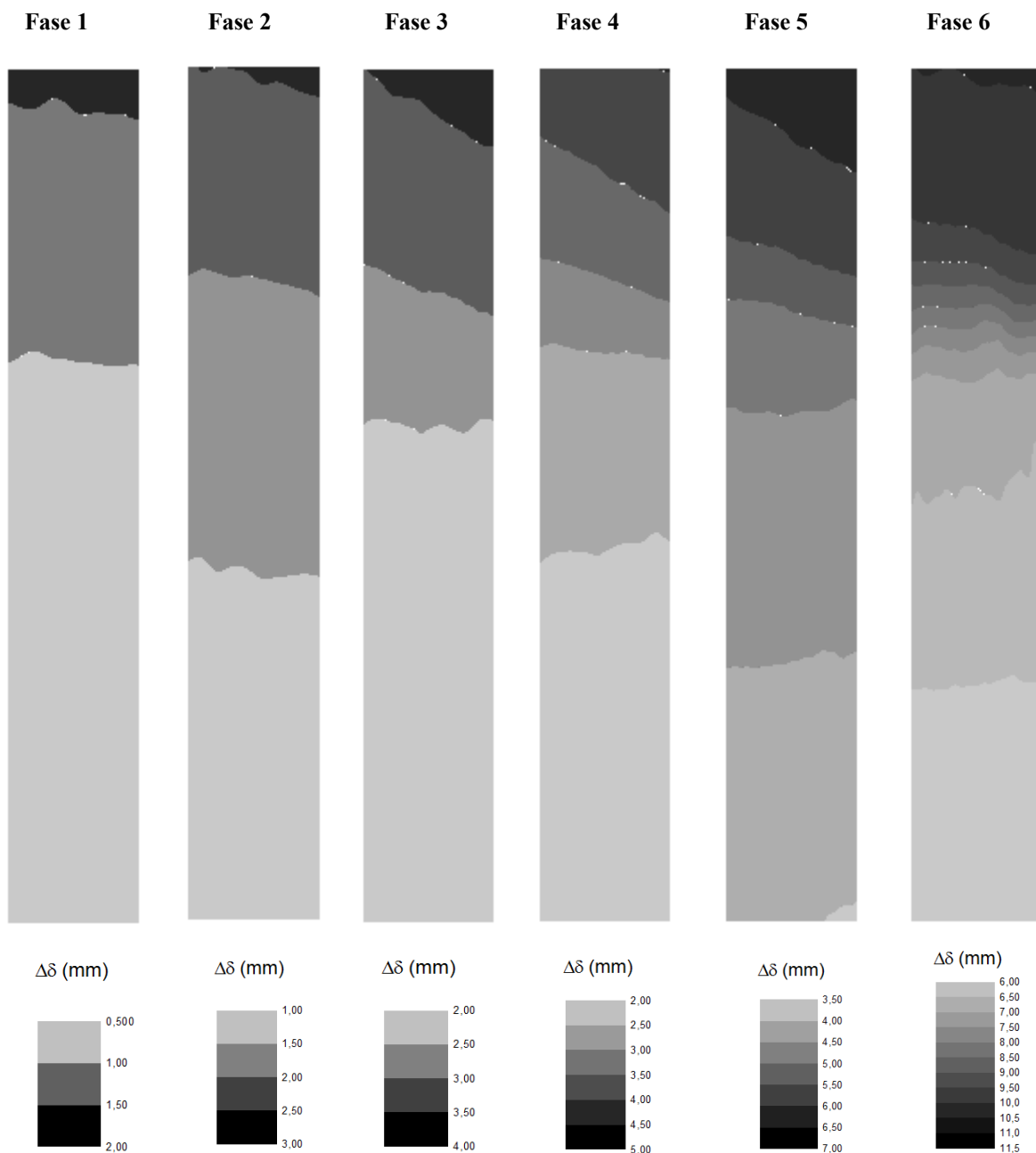


Figura 5.21 - Mapa de deslocamentos do tirante 1

**5.6.3. Mapa de deslocamentos do tirante 2**

Os mapas de deslocamentos obtidos através de fotogrametria e processamento de imagem do tirante 2 para as fases analisadas são em seguida apresentados, figura 5.22. A cada gradação de cor corresponde uma diferença de 0,5 mm de deslocamento, conforme a legenda abaixo representada.



**Figura 5.22 – Mapa de deslocamentos do tirante 2**

**5.6.4. Análise dos mapas de deslocamentos**

Os mapas de deslocamentos obtidos na superfície dos tirantes permitem observar para as fases consideradas, uma evolução de deslocamentos ao longo do ensaio. Os deslocamentos registam

maior valor nas zonas próximas da formação de fendas, e também na extremidade superior, facto que se deve a esta extremidade estar livre, e onde a força estava a ser aplicada aos tirantes. Os deslocamentos nos tirantes não foram uniformes, e foi possível observar que o nível de deslocamentos aumenta nas zonas em que existe formação de fendas. Os mapas de deslocamentos relacionam-se também com o padrão de fendilhação, sendo possível verificar principalmente nas fases iniciais a formação da primeira fenda.

## 5.7. Mapa de extensões

### 5.7.1. Mapa de extensões do tirante 0

Os mapas de extensões obtidos através de fotogrametria do tirante 0 para as etapas analisadas são em seguida apresentados, figura 5.23. A cada gradação de cor corresponde uma diferença do valor da extensão, conforme a legenda abaixo representada. Os mapas de extensões foram obtidos através de do *software* já referido no sub-sub-capítulo 5.6.1, que permitiu a configuração do tirante em termos de dimensões e as correspondentes extensões registadas na sua superfície.

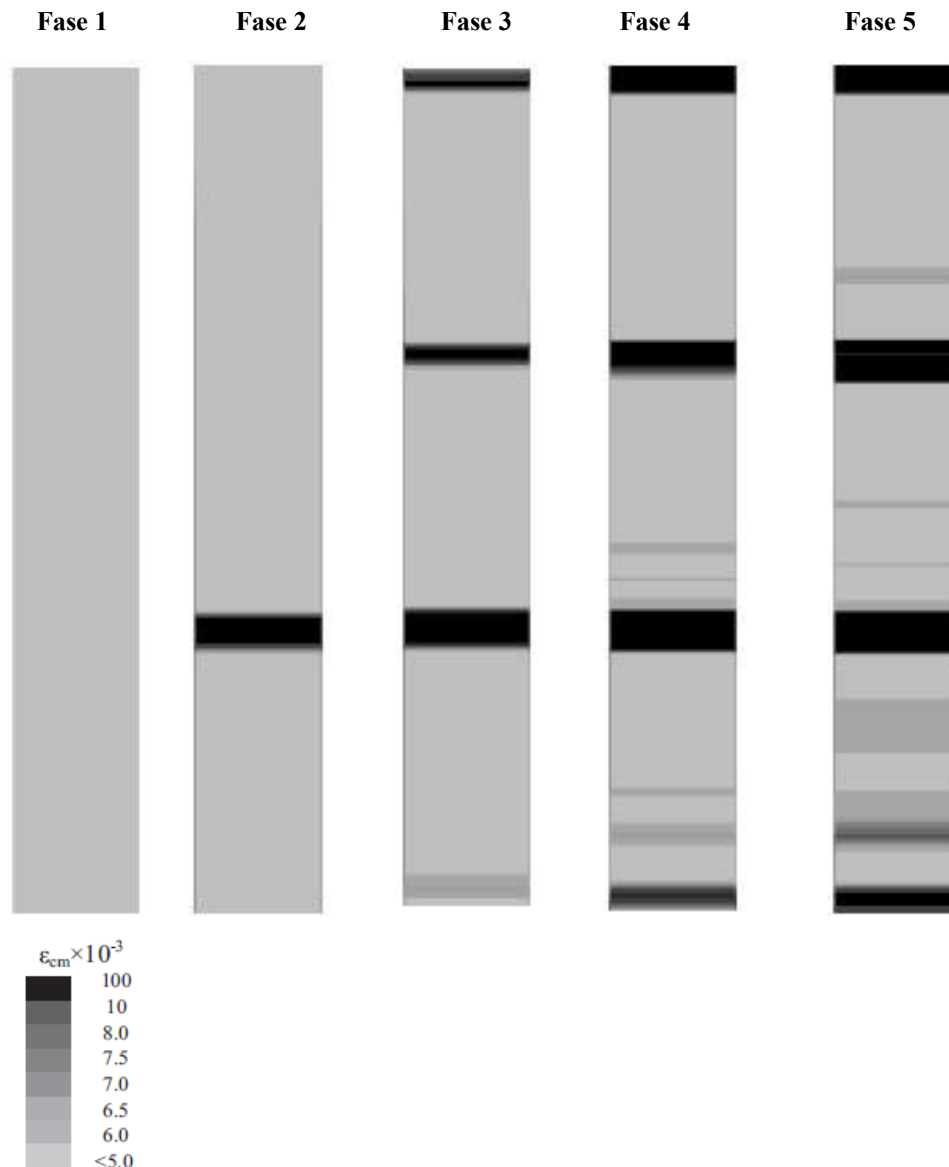


Figura 5.23 - Mapa de extensões do tirante 0

### 5.7.2. Mapa de extensões do tirante 1

Os mapas de extensões obtidos através de fotogrametria e processamento de imagem do tirante 1 para as fases analisadas são em seguida apresentados, figura 5.24. A cada gradação de cor corresponde uma diferença do valor da extensão, conforme a legenda abaixo representada.

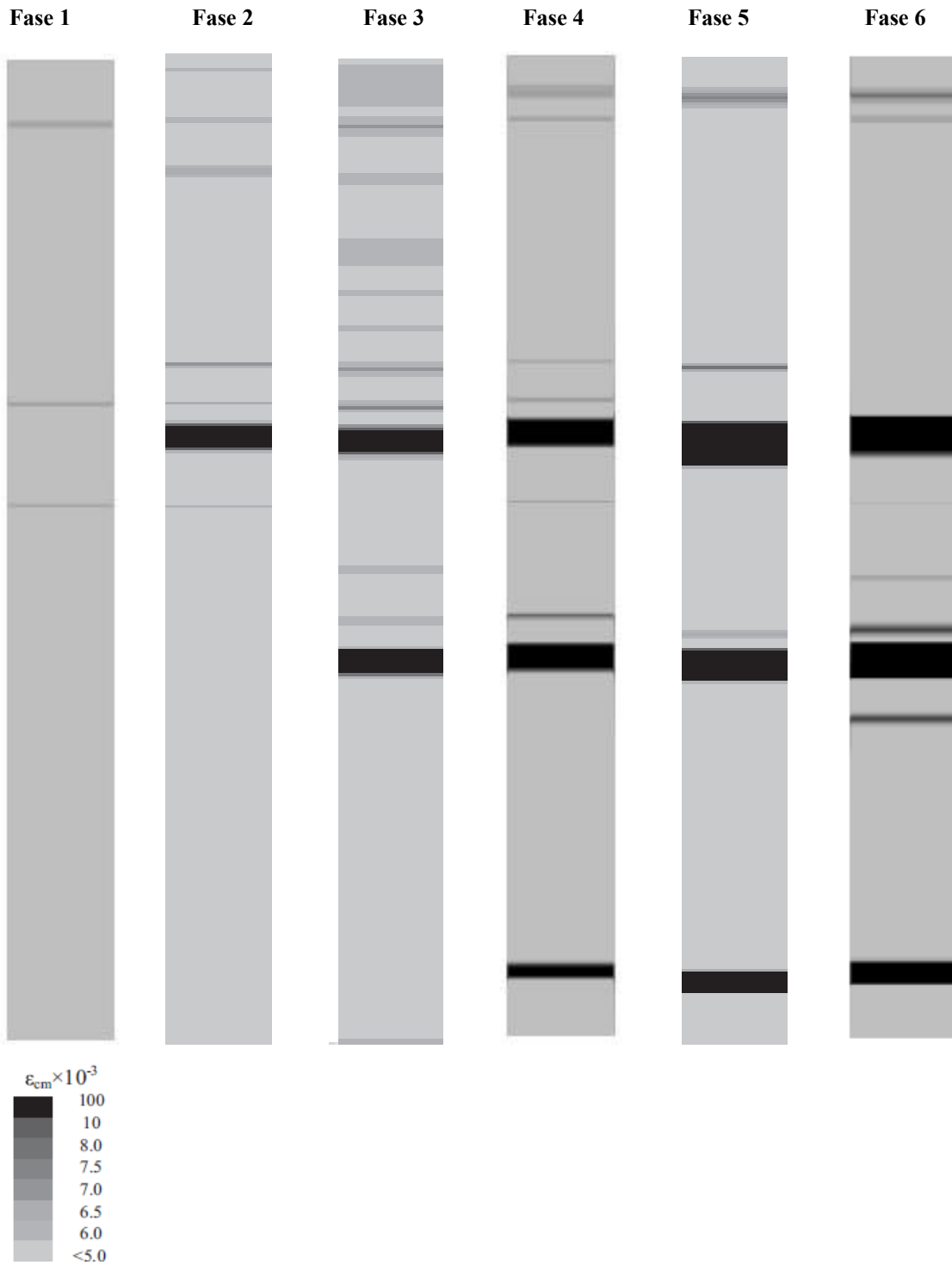


Figura 5.24 - Mapa de extensões do tirante 1

### 5.7.3. Mapa de extensões do tirante 2

Os mapas de extensões obtidos através de fotogrametria e processamento de imagem do tirante 2 para as fases analisadas são em seguida apresentados, figura 5.25. A cada graduação de cor corresponde uma diferença do valor da extensão, conforme a legenda abaixo representada.

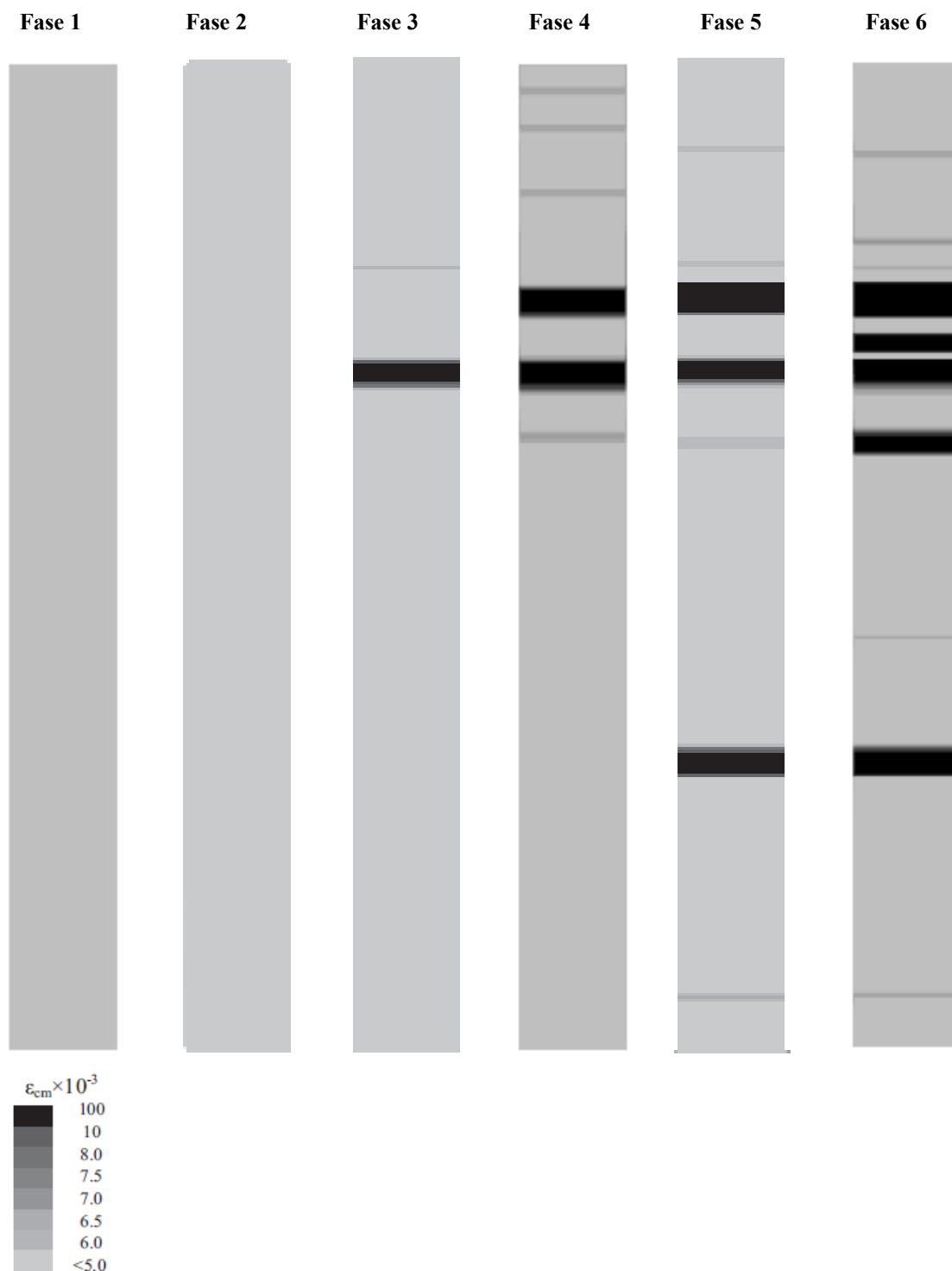


Figura 5.25 - Mapa de extensões do tirante 2

Os mapas de extensões obtidos na superfície dos tirantes permitem observar para as etapas consideradas, uma evolução de extensões ao longo do ensaio com maiores valores nas zonas

próximas da formação de fendas, sendo possível identificar nas fases finais a localização das fendas.

### 5.8. Comparação de deslocamentos determinados pelas duas metodologias

Este sub-capítulo apresenta uma comparação de deslocamentos entre os resultados obtidos com monitorização tradicional, nomeadamente com recurso a LVDTs, e os obtidos por fotogrametria. A bisetritz presente nos gráficos pretende representar uma linha na qual ambos os valores, os provenientes dos LVDTs e os da fotogrametria seriam iguais e coincidentes.

O valor do deslocamento obtido por fotogrametria foi determinado pela diferença entre o deslocamento na extremidade superior e o deslocamento na parte inferior do tirante.

Na comparação de deslocamentos no tirante 0, Figura 5.26, é possível observar que nas fases iniciais do ensaio os deslocamentos são muito próximos, e com o decorrer do ensaio, os valores de deslocamentos obtidos pelos LVDTs são ligeiramente superiores aos deslocamentos registados por fotogrametria.

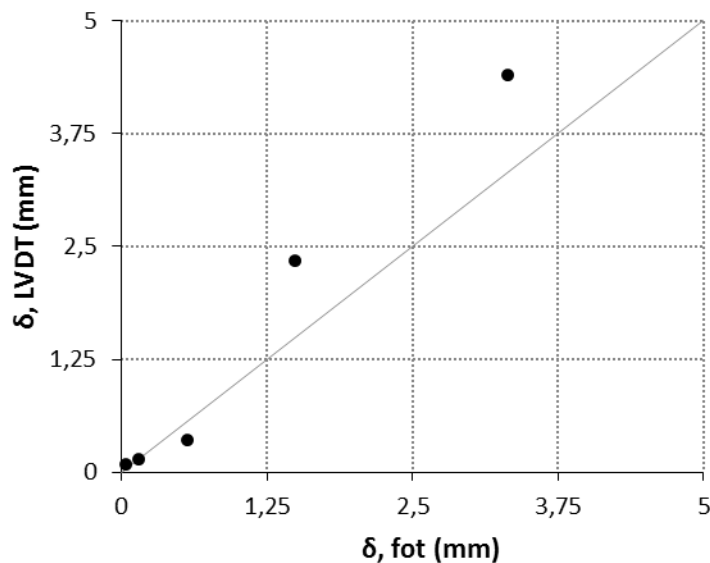


Figura 5.26 - Comparação de deslocamentos do tirante 0

A comparação de deslocamentos do tirante 1 entre a fotogrametria e os LVDTs teve uma diferença média de 0,12mm. É possível observar (Figura 5.27) que desde o início do ensaio até ao seu término, os resultados são muito próximos independentemente da metodologia com que foram obtidos, visível através da localização dos pontos junto à bisetritz do gráfico.

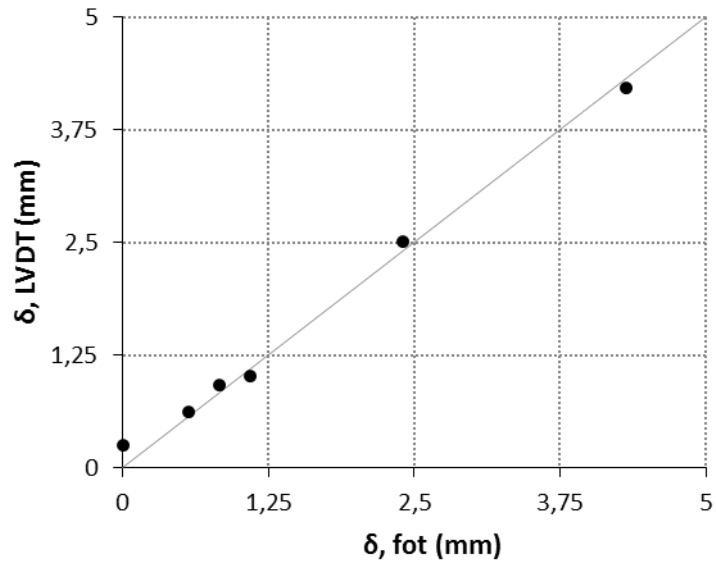


Figura 5.27 - Comparação de deslocamentos do tirante 1

A comparação de deslocamentos do tirante 2 entre a fotogrametria e os LVDTs teve uma diferença média de 0.61mm. É possível observar (Figura 5.28) que no início do ensaio havia relativa proximidade nos valores, porém na última fase a diferença é de maior valor. Esta diferença de valores (0.61mm) é elevada quando comparada com estudos anteriores (Dias-da-Costa *et al*, 2011; Valença *et al*, 2013), pode ser explicada com o fato de o sistema de monitorização tradicional (LVDTs) esteve instável durante o ensaio.

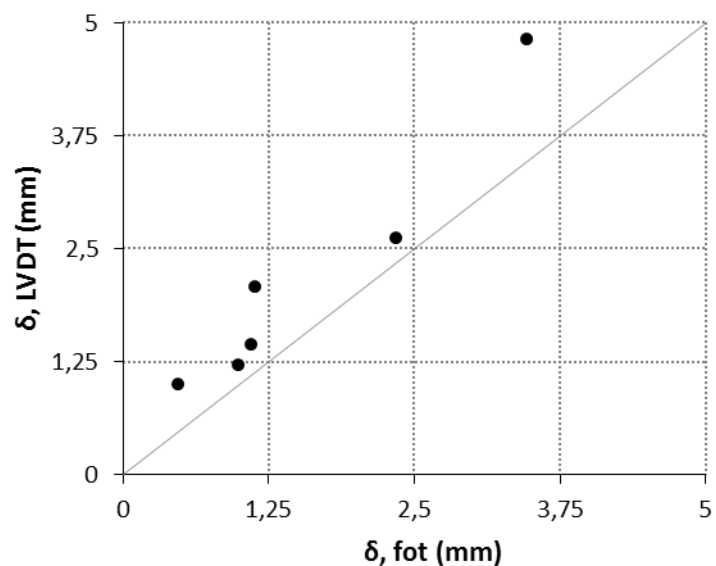


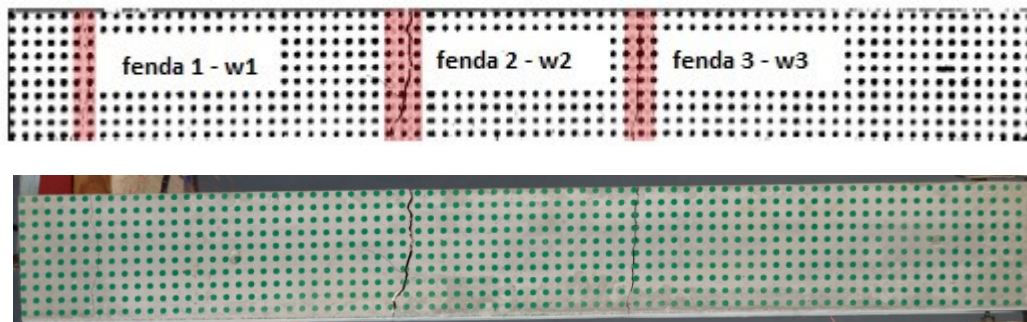
Figura 5.28 - Comparação de deslocamentos do tirante 2

### 5.9. Largura das fendas obtida por fotogrametria

Este sub-capítulo apresenta a informação sintetizada da largura das fendas nos vários ensaios e a sua evolução, ao longo das fases monitorizadas. Em primeiro lugar, no quadro 5.2, são apresentados os valores de força e de largura de fendas registados no ensaio do tirante 1, nas fases consideradas. Na figura 5.29 estão identificadas as fendas no tirante.

**Quadro 5.2 - Largura de fendas, tirante 1**

Etapa do ensaio	Força (kN)	largura das fendas (mm)		
		w1	w2	w3
Fase 0	0,0	0,00	0,00	0,00
Fase 1	24,0	0,00	0,00	0,00
Fase 2	34,0	0,00	0,00	0,20
Fase 3	34,6	0,00	0,40	0,40
Fase 4	36,9	0,20	0,53	0,53
Fase 5	41,0	0,60	1,13	0,80
Fase 6	41,7	0,40	2,07	1,13



**Figura 5.29 - Identificação de fendas tirante 1**

Em segundo lugar, quadro 5.3, são apresentados os valores da força e da largura das fendas registados no ensaio do tirante 2. A figura 5.30 identifica a posição das fendas.

Quadro 5.3 - Largura de fendas, tirante 2

Etapa do ensaio	Força (kN)	largura das fendas (mm)		
		w1	w2	w3
Fase 0	0,0	0,00	0,00	0,00
Fase 1	28,0	0,00	0,00	0,00
Fase 2	37,0	0,00	0,00	0,00
Fase 3	38,0	0,00	0,33	0,00
Fase 4	40,0	0,00	0,33	0,40
Fase 5	42,0	0,67	1,60	0,60
Fase 6	42,7	0,73	1,93	0,87

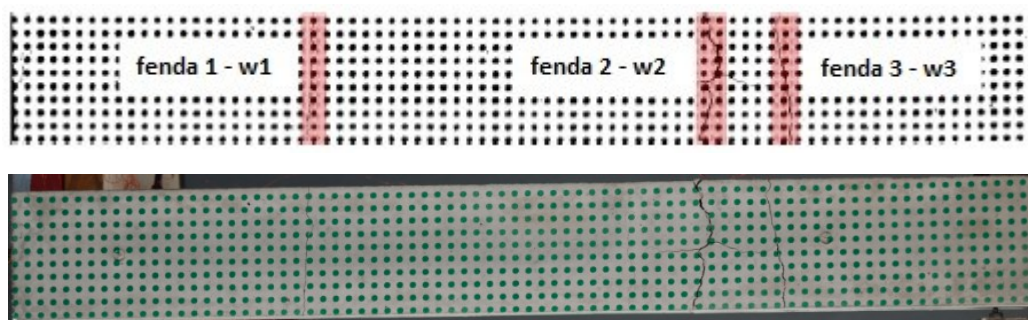


Figura 5.30 - Identificação de fendas tirante 2

## 5.10. Estimativas das extensões no aço e comparação com as leituras dos extensómetros

### 5.10.1. Comparação de extensões previstas no tirante 1

Este sub-sub-capítulo apresenta a comparação de extensões médias no aço, entre as diferentes metodologias utilizadas, a extensão média no aço estimada a partir dos valores obtidos pela fotogrametria, e a extensão média no aço obtida através das leituras dos extensómetros localizados nas respectivas áreas de influência.

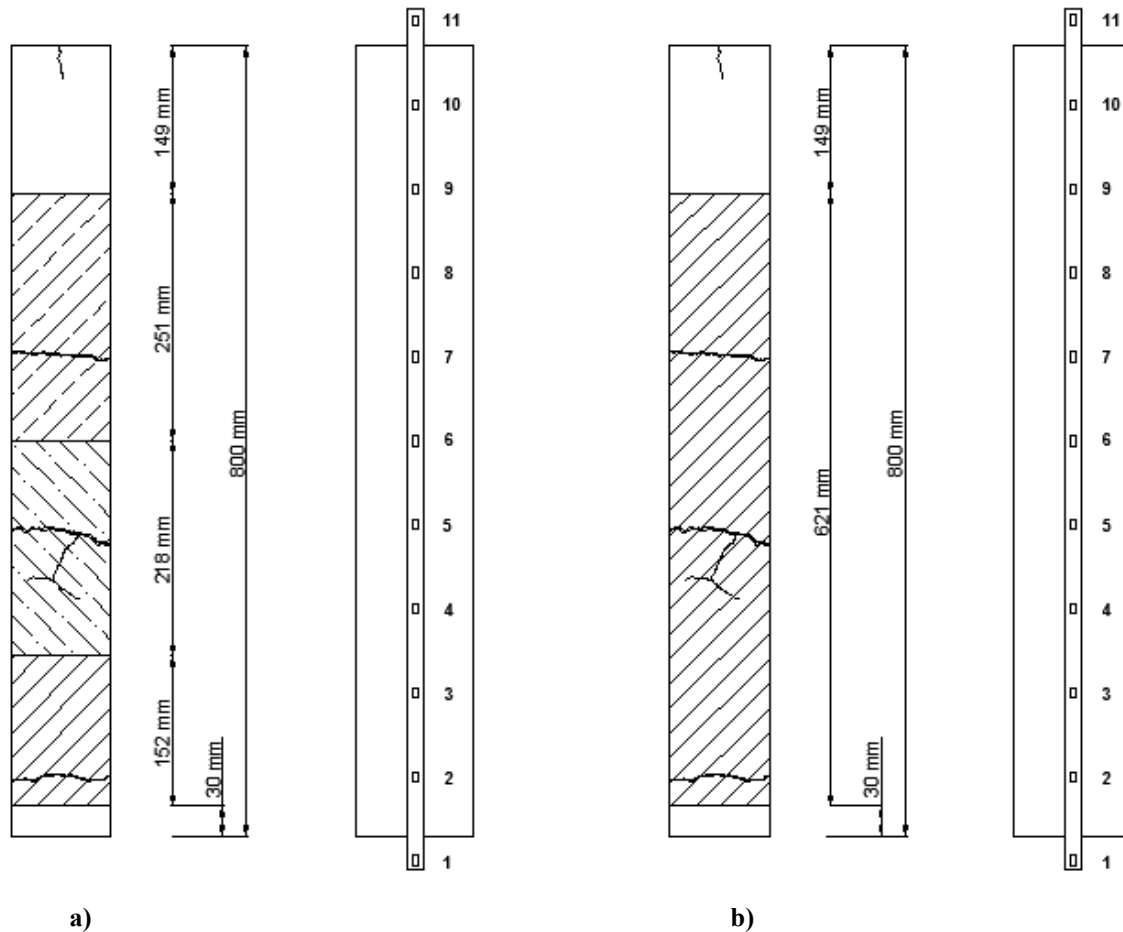


Figura 5.31 – Representação esquemática das áreas de influência do tirante 1

Na figura 5.31 está representado a posição dos extensómetros, o padrão de fendilhação e as áreas de influência de cada fenda, do tirante 1. Foram utilizadas duas abordagens distintas para a comparação das extensões, a primeira consiste numa abordagem “por fenda” que considera uma área de influência (Figura 5.31 a) de metade do bloco de betão entre fendas em ambas as direções; e a segunda abordagem designada “global” que considera os valores médios de uma área de influência global, (Figura 5.31 b).

Para além das duas abordagens já referidas, foram consideradas três hipóteses diferentes para a contabilização da extensão média do betão entre fendas,  $\epsilon_{cm}$ . Neste estudo paramétrico, em primeiro lugar foi considerada a hipótese da extensão média no betão entre fendas ser nula,  $\epsilon_{cm}$

= 0, ou seja, despreza-se nos cálculos a extensão média do betão entre fendas. Em segundo lugar, foi considerada a hipótese da extensão média no betão entre fendas ser igual ao máximo valor teórico,  $\varepsilon_{cm} = 1,3 \times 10^{-4}$ . Por último, foi considerada a hipótese da extensão média no betão entre fendas ser igual ao valor obtido através de fotogrametria.

Assim, para a abordagem “fenda a fenda” os valores de comparação entre as diferentes metodologias são apresentados de seguida. Os gráficos relacionam os valores das extensões obtidas através dos extensómetros, e a estimativa das extensões obtidas através da fotogrametria.

Na figura 5.32, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm} = 0$  e análise fenda a fenda:

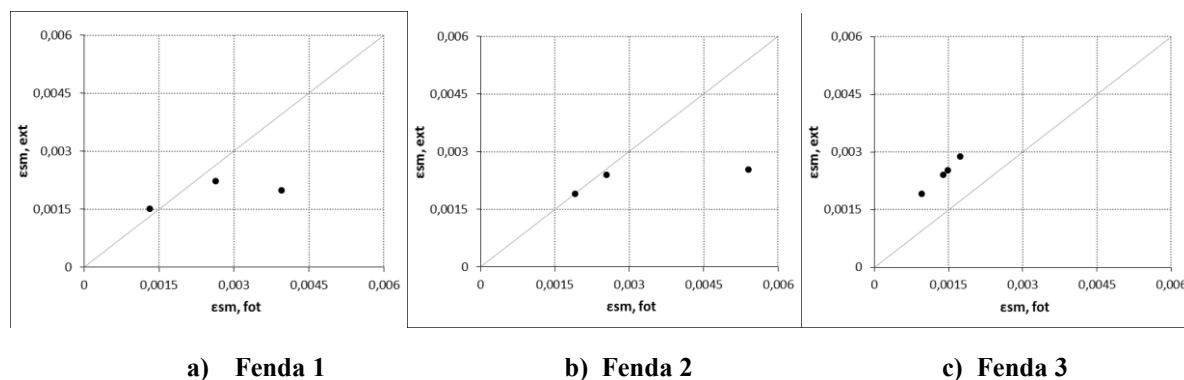


Figura 5.32 – Gráficos de comparação de extensões para o tirante 1

Na fenda 1, a comparação de  $\varepsilon_{sm}$  permite observar a grande proximidade dos valores, ao longo das etapas consideradas, com a exceção da última etapa que regista um valor estimado por fotogrametria mais elevado.

Na fenda 2, o comportamento é semelhante ao anterior, com grande proximidade nos valores das etapas iniciais, e, na última etapa, o valor estimado pela fotogrametria foi mais elevado.

Na fenda 3, a comparação de extensões demonstra que os valores das leituras dos extensómetros dão ligeiramente superiores, contudo relativamente próximos, das estimativas das extensões obtidas pela fotogrametria. As etapas consideradas na fenda 1 foram da 4 a 6, na fenda 2 foram da 3 a 6 e na fenda 3 foram da 2 a 6, conforme a formação de fendas no quadro 5.1.

Na figura 5.33, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm} = 0$  e análise global:

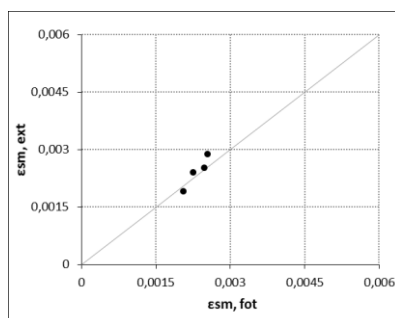
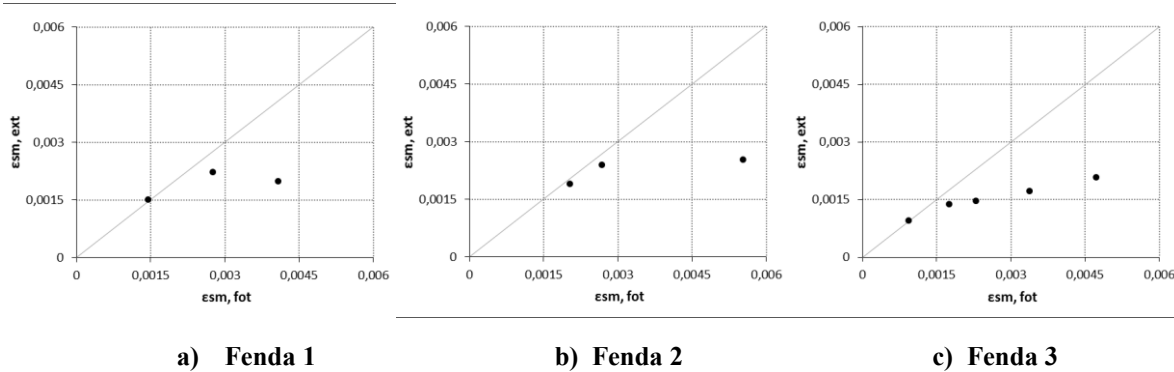


Figura 5.33 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 1

Na análise global foram consideradas as etapas (2 a 6) após a formação da primeira fenda, e verificou-se grande proximidade nos valores de comparação de extensões para o tirante nas fases consideradas.

Na figura 5.34, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm} = 1,3 \times 10^{-4}$ , máximo valor teórico, e análise fenda a fenda:

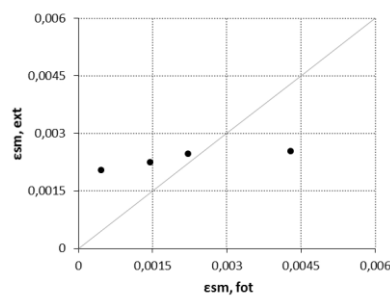


**Figura 5.34 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 1**

No caso do tirante 1, e considerando a extensão média do betão com um valor igual ao máximo teórico, registou-se que no caso da fenda 1, na primeira fase monitorizada (fase 4) existe coincidência entre os valores obtidos pelas diferentes metodologias. Ao longo do ensaio, (fase 5 e 6) os valores obtidos pela fotogrametria foram superiores aos registados através dos extensómetros.

No caso da fenda 2, nas primeiras duas fases (3 e 4) apresentam valores de comparação de extensão média no aço muito próximos, na fase 5 o valor de extensão média no aço registada através da fotogrametria é mais elevado do que o registado através dos extensómetros.

No caso da fenda 3, nas fases iniciais, (2, 3 e 4) os valores de comparação são muitos próximos entre si, nas fases seguintes, (5 e 6), é registado um progressivo aumento da extensão média no aço obtida através da fotogrametria. Na figura 5.35, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm} = 1,3 \times 10^{-4}$ , máximo valor teórico, e análise global:



**Figura 5.35 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 1**

Na análise global foram consideradas as fases (2 a 6) após a formação da primeira fenda, e verificou-se numa fase inicial, que as extensões médias no aço, registados através de extensómetros, eram superiores aos valores correspondentes obtidos pela fotogrametria.

Na fase 5 existiu a maior proximidade na comparação destes valores. Na última fase, fase 6, foi registado que o valor obtido pela fotogrametria era mais elevado.

Na figura 5.36, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm}$  obtida através de fotogrametria, e análise fenda a fenda:

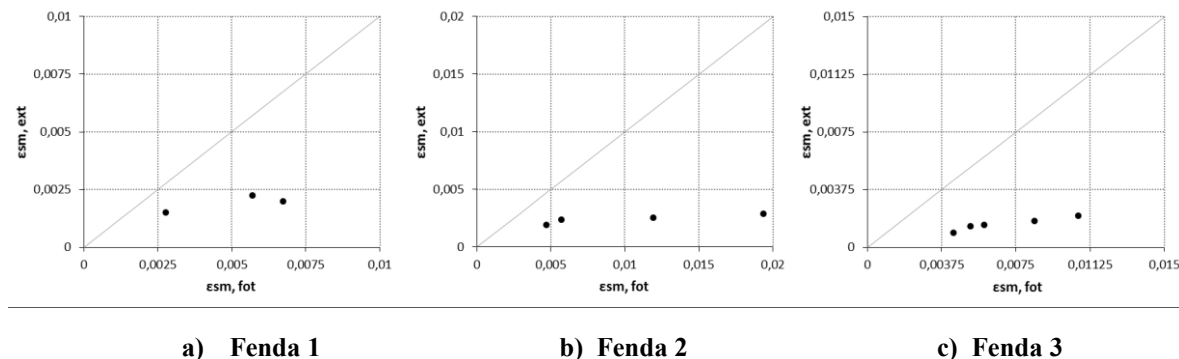


Figura 5.36 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 1

No caso do tirante 1, e considerando a extensão média do betão com o valor obtido através de fotogrametria, registou-se que no caso da fenda 1, na primeira fase monitorizada (fase 4) existe proximidade entre os valores obtidos nas diferentes metodologias. Ao longo do ensaio, (fases 5 e 6) os valores obtidos por fotogrametria foram superiores aos registados através dos extensómetros.

No caso da fenda 2, nas fases 3 e 4 apresentam valores de comparação de extensão média no aço relativamente próximos. Na etapa 5 e 6, o valor de extensão média no aço registada através da fotogrametria é mais elevado do que o registado através dos extensómetros. No caso da fenda 3, em todas as fases, (2 a 6) os valores de comparação registados da extensão média no aço obtida através da fotogrametria, são superiores aos correspondentes, registados através de extensómetros. Na figura 5.37, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm}$  obtida através de fotogrametria, e análise global:

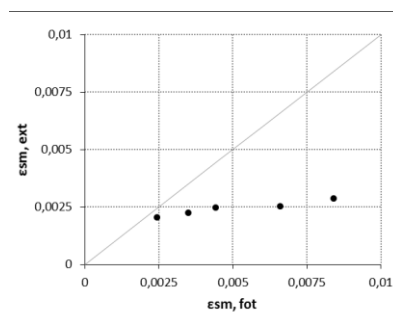
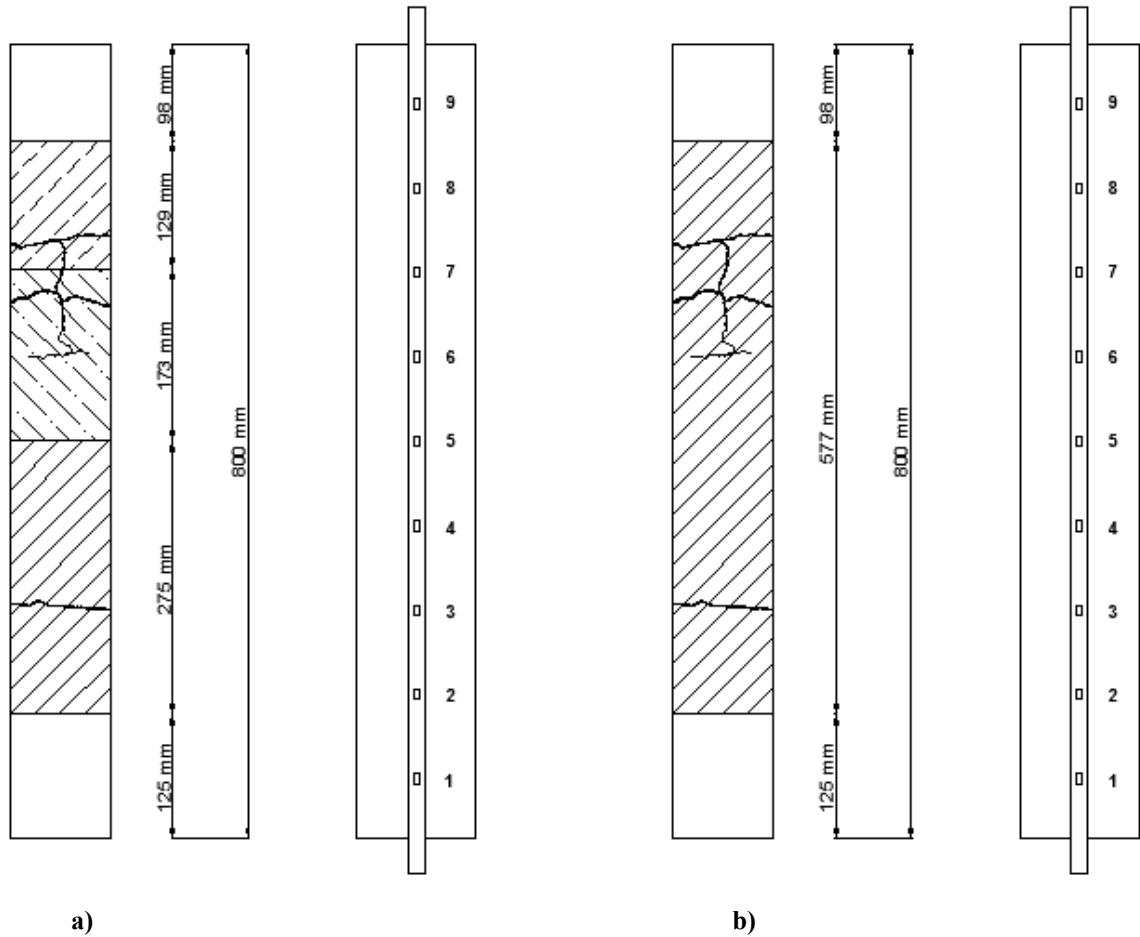


Figura 5.37 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 1

Na análise global foram consideradas as etapas após a formação da primeira fenda, nomeadamente as fases de 2 a 6. Registou-se, numa fase inicial, que as extensões médias no aço, registados através de extensómetros, eram próximas, dos valores correspondentes obtidos por fotogrametria. Contudo, com o decorrer do ensaio os valores obtidos pela fotogrametria foram progressivamente superiores aos dos extensómetros.

**5.10.2. Comparação de extensões previstas no tirante 2**

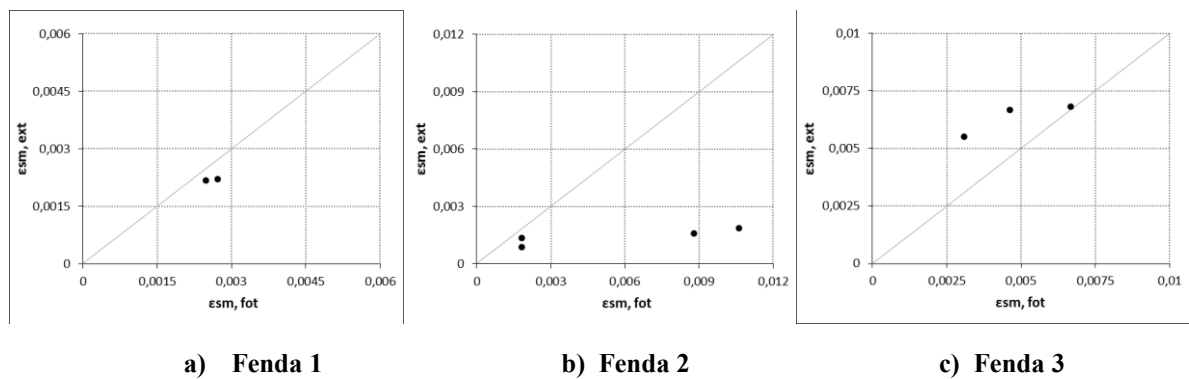
Este sub-capítulo apresenta a comparação de extensões médias no aço, entre as diferentes metodologias utilizadas, a extensão média no aço estimada com os valores obtidos por fotogrametria, e a extensão média no aço obtida através das leituras dos extensômetros localizados nas respectivas áreas de influência (Figura 5.38).



**Figura 5.38 - Representação esquemática das áreas de influência do tirante 2**

Assim, para a abordagem “fenda a fenda” os valores de comparação entre as diferentes metodologias são de seguida apresentados. Os gráficos relacionam os valores das extensões obtidas através dos extensómetros, e a estimativa das extensões obtidas através da fotogrametria. Na comparação de extensão média no aço foram efetuadas diferentes análises, de modo a observar o contributo da extensão média do betão.

Na figura 5.39, é apresentada a hipótese considerando a  $\epsilon_{cm} = 0$ , e análise fenda a fenda:



**Figura 5.39 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 2**

Na fenda 1, a comparação de  $\varepsilon_{sm}$  permite observar a grande proximidade dos valores, ao longo das fases consideradas, com o registo dos valores estimados por fotogrametria serem ligeiramente mais elevados, do que os registados pelos extensómetros.

Na fenda 2, o comportamento é de grande proximidade nos valores das fases iniciais, contudo, nas últimas fases, os valores estimados por fotogrametria são mais elevados.

Na fenda 3, a comparação de extensões demonstra que os valores das leituras dos extensómetros são ligeiramente superiores nas primeiras fases consideradas, contudo na última fase o valor de  $\varepsilon_{sm}$  é muito próximo, em ambas as metodologias.

Na figura 5.40, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm} = 0$ , e análise global:

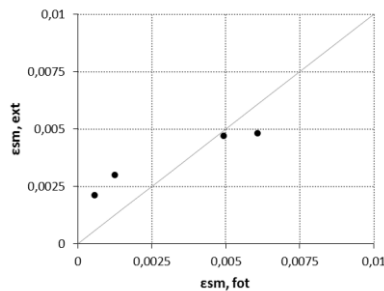


Figura 5.40 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 2

Na análise global, tendo em conta os valores médios, regista-se nas etapas iniciais um maior valor de  $\varepsilon_{sm}$ , nas leituras dos extensómetros, contudo na fase 5 os valores comparados são aproximadamente coincidentes, e na última etapa há um ligeiro aumento no valor estimado por fotogrametria.

As fases consideradas foram conforme a formação de fendas apresentadas no quadro 5.2.

Na figura 5.41, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm} = 1,3 \times 10^{-4}$ , máximo valor teórico, e análise fenda a fenda:

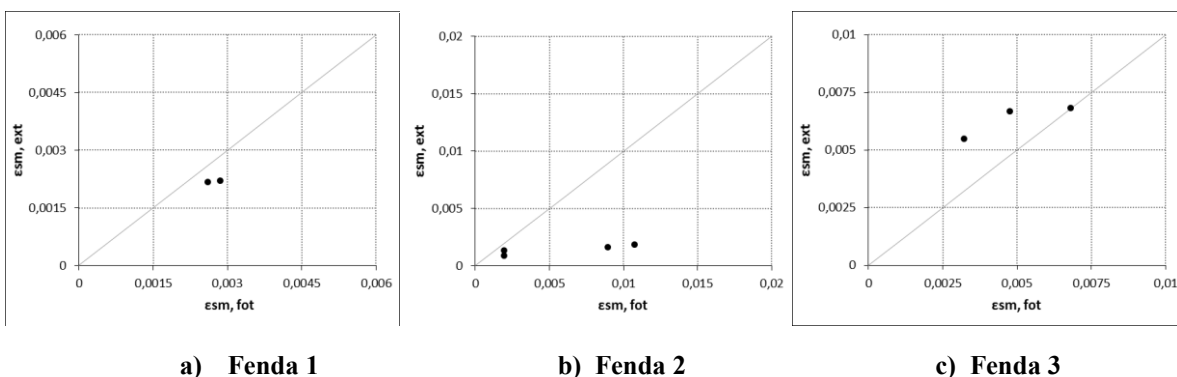


Figura 5.41 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 2

No caso do tirante 2, e considerando a extensão média do betão com o valor máximo teórico, registou-se que no caso da fenda 1, nas etapas monitorizadas (5 e 6) existe grande proximidade entre os valores obtidos nas diferentes metodologias.

Na fenda 2, nas fases (3 e 4) apresentam valores de comparação de extensão média no aço muito próximos. Na etapa 5 e 6, o valor de extensão média no aço registada através da fotogrametria é mais elevado do que o registado através dos extensómetros.

Na fenda 3, nas fases 4 e 5 os valores de comparação registados da extensão média no aço obtida através dos extensómetros, são ligeiramente superiores, aos correspondentes registados através de fotogrametria. Na última fase monitorizada os valores de comparação são coincidentes.

Na figura 5.42, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm} = 1,3 \times 10^{-4}$ , máximo valor teórico, e análise global:

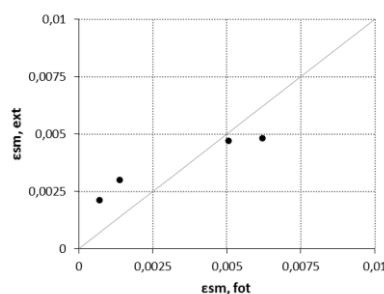


Figura 5.42 - Gráfico de comparação de extensões para o tirante 2

Na análise global, tendo em conta os valores médios, foi possível observar que nas fases 3 e 4, os valores registados através dos extensómetros são ligeiramente superiores aos estimados por fotogrametria. Na fase 5 os valores de comparação são muito próximos, e na fase 6, regista-se um valor superior obtido por fotogrametria.

Na figura 5.43, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm}$  obtida através de fotogrametria, e análise fenda a fenda:

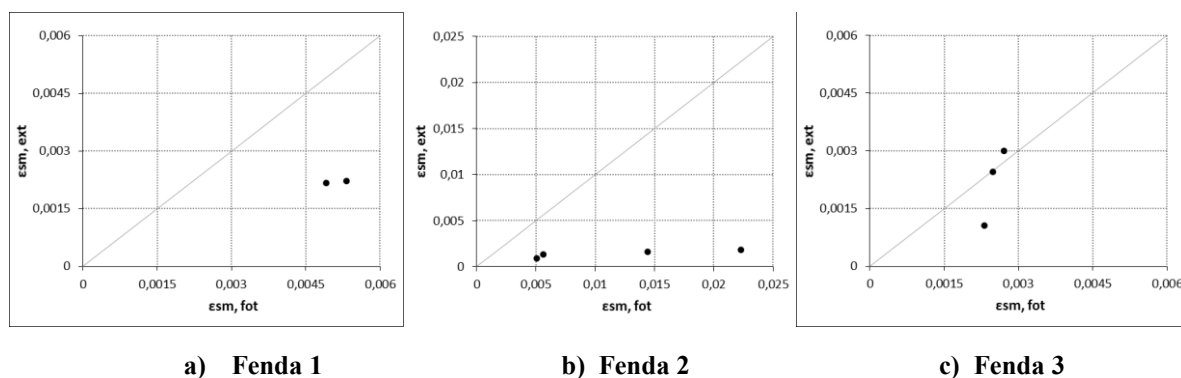


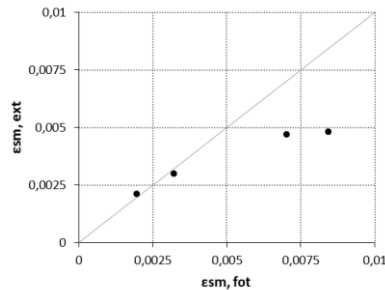
Figura 5.43 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 2

No caso do tirante 2, e considerando a extensão média do betão com o valor obtido por fotogrametria, registou-se que no caso da fenda 1, nas etapas monitorizadas (5 e 6) os valores obtidos através de fotogrametria são superiores aos obtidos por extensómetros.

Na fenda 2, as fases apresentam valores de comparação de extensão média no aço através da fotogrametria é mais elevado do que o registado através dos extensómetros. Na fenda 3, na fase

4, os valores de comparação registados da extensão média no aço obtida através de fotogrametria, são ligeiramente superiores aos correspondentes registados através dos extensómetros. Nas fases 5 e 6, os valores de comparação são muito próximos.

Na figura 5.44, é apresentada a hipótese considerando a  $\varepsilon_{cm}$  obtida através de fotogrametria, e análise global:



**Figura 5.44 - Gráficos de comparação de extensões para o tirante 2**

Na análise global, tendo em conta os valores médios, foi possível observar que nas fases 3 e 4, os valores registados através dos extensómetros são muito próximos dos estimados por fotogrametria. Nas fases 5 e 6, os valores obtidos por fotogrametria porém, são superiores aos obtidos através de extensómetros.

### 5.10.3. Análise do efeito de $\varepsilon_{cm}$ em $\varepsilon_{sm}$

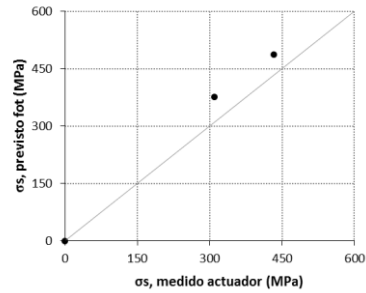
O contributo de  $\varepsilon_{cm}$  foi estudado tendo em conta diferentes análises em relação às fendas (fenda a fenda e global) e hipóteses ( $\varepsilon_{cm} = 0$ ;  $\varepsilon_{cm} = 1,3 \times 10^{-4}$  e  $\varepsilon_{cm}$  obtido por fotogrametria). A comparação de todos os diferentes resultados permitiu verificar que a análise global geralmente apresenta melhores resultados quando comparada com a análise fenda a fenda.

Em relação à hipótese  $\varepsilon_{cm} = 0$ , esta foi considerada devido ao contributo de  $\varepsilon_{cm}$  ser significativamente inferior a  $\varepsilon_{sm}$ . Os resultados de comparação obtidos desta hipótese são em geral os melhores. A hipótese  $\varepsilon_{cm} = 1,3 \times 10^{-4}$  obtém resultados ligeiramente superiores de  $\varepsilon_{sm}$ , devido ao facto de estar a ser contabilizado o contributo máximo teórico, que aumenta o parâmetro  $\varepsilon_{sm}$ . Os resultados da hipótese  $\varepsilon_{cm}$  obtido por fotogrametria apresentam os valores mais elevados de  $\varepsilon_{sm}$ , em todas as hipóteses consideradas

De realçar que de todas as hipóteses consideradas a hipótese de  $\varepsilon_{cm} = 0$  e análise global (Figura 5.38) é a que apresenta melhores resultados de comparação.

### 5.10.4. Comparação de tensões no tirante 1

Na figura 5.45, é apresentada a comparação de tensões médias no aço numa secção fendilhada vs. tensões médias no aço estimadas pela fotogrametria usando a extensão média no aço.

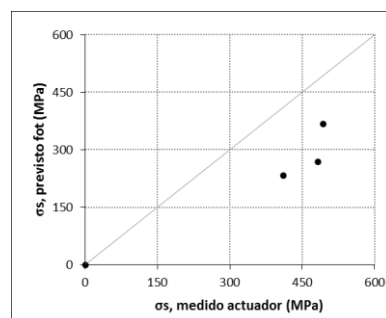


**Figura 5.45 – Comparação de tensões do tirante 1**

No caso do tirante 1, nas fases 3 e 4, observou-se que as tensões médias no aço estimadas por fotogrametria, registam valores ligeiramente superiores, aos registados através da tensão média no aço, determinados a partir da força do actuador.

#### **5.10.5. Comparação de tensões no tirante 2**

Na figura 5.46, é apresentada a comparação de tensões médias no aço numa secção fendilhada vs. tensões médias no aço estimadas pela fotogrametria usando a extensão média no aço.



**Figura 5.46 - Comparação de tensões do tirante 2**

No caso do tirante 2, nas fases 3, 4 e 5, observou-se que as tensões médias no aço estimadas por fotogrametria, registam valores ligeiramente inferiores, aos obtidos através da tensão média no aço, usando a força no actuador.



## 6. CONCLUSÃO

### 6.1. Conclusões

Com a elaboração deste trabalho era pretendido dar um contributo no sentido de estudar uma aplicação de uma metodologia que emprega técnicas de fotogrametria e processamento de imagem na monitorização de tirantes de betão armado em contexto de ensaios laboratoriais.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação, nomeadamente, a apresentação e validação desta inovadora técnica de estimar extensões nas armaduras no interior dos elementos de betão armado, através de retro-análise, apenas com base na informação registada na superfície foi publicada numa revista internacional da especialidade, a *Construction and Building Materials*, Carmo *et al.*, (2015).

Esta metodologia permitiu a deteção, mapeamento, e caracterização de larguras de fendas ao longo de todo o seu desenvolvimento e para todas as etapas monitorizadas nos ensaios laboratoriais. Com a informação obtida foi possível calcular uma estimativa de extensões médias no aço no interior do betão.

O caso de estudo que foi desenvolvido consistiu na análise de dois tirantes de betão armado, com características iguais. Estes tirantes foram monitorizados com recurso a: i) LVDTs, transdutores de deslocamentos colocados nas duas superfícies laterais dos tirantes; ii) extensómetros, colocados no interior do varão de aço, e iii) através de fotogrametria, que com recurso a uma máquina fotográfica comercial, monitorizou uma superfície do tirante, através de fotografias ao longo de todo o ensaio.

O conjunto de sistemas de monitorização utilizados permitiu estabelecer a comparação entre as diferentes metodologias de deslocamentos globais dos tirantes, a obtenção de mapas de deslocamentos e de extensões do betão com base na análise da superfície do tirante. Também foi possível a deteção, mapeamento e medição da largura de fendas, e por último estimar a extensão média no aço no interior do tirante e a sua comparação com a extensão registada nos extensómetros.

Os resultados obtidos demonstram que a metodologia pode ser aplicada para determinar a extensão média no aço, e auxiliar tanto a monitorização, como o diagnóstico do comportamento estrutural. Como anteriormente referido, a precisão da metodologia está diretamente relacionada com os limites da resolução espacial das câmaras fotográficas utilizadas.

Uma grande aplicação desta metodologia será a retro análise e previsão de extensões médias no aço, sempre que não seja possível a monitorização deste através de extensómetros. De referir que a abordagem utilizada de colocação dos extensómetros no interior no varão de aço, permite que não exista interferência na aderência entre aço-betão. Contudo esta metodologia apresenta a limitação de apenas poder ser utilizada quando existe fendilhação no betão, e em certas situações, quando a fendilhação está estabilizada; revelando assim não ser indicada para estruturas que estejam sob a influência de pequenos carregamentos que não originam a fendilhação do betão.

Esta metodologia pode ser aplicada nas regiões próximas de uma fenda ou em regiões de maior área, considerando que na segunda hipótese, a metodologia só permite a obtenção do valor médio das fendas. A partir dos resultados experimentais, a análise em regiões maiores, demonstrou ter menor dispersão em termos de resultados e os erros associados diminuíram. De toda a informação obtida pela metodologia, a que se revelou mais preponderante foi a largura de fendas, ou seja, foi o parâmetro mais importante para a obtenção da estimativa de extensão média do aço. Devido a este facto, é importante referir, que a precisão da metodologia irá diretamente depender do processo utilizado para realizar as medições das larguras das fendas.

A extensão do betão entre fendas apresenta um contributo diminuto, na estimativa de extensões médias no aço. Devido ao facto de, o valor da extensão do betão, se encontrar na ordem de grandeza igual à de precisão do método, o valor obtido pode ser sobrestimado, e consequentemente, sobrestimar também a extensão do aço.

Os resultados da metodologia demonstraram que esta é exequível e apresenta grande potencial na monitorização de estruturas. Os resultados/precisão no futuro deverão beneficiar dos melhoramentos da resolução das câmeras fotográficas.

#### **6.1.1. Comparação de deslocamentos**

A comparação de deslocamentos globais dos tirantes, tendo em conta os diferentes métodos utilizados, a fotogrametria e processamento de imagem e os LVDTs, permitiu aferir:

- No tirante 0, no decurso das 5 fases, foi registada grande proximidade no valor dos deslocamentos nos tirantes, mais diretamente nas primeiras três etapas; nas últimas duas etapas, o valor de deslocamento registado através dos LVDTs, é ligeiramente superior, ao deslocamento registado através de fotogrametria.
- No tirante 1, no decurso das 6 fases, foi registado grande proximidade no valor dos deslocamentos dos tirantes, em ambas as metodologias empregues.
- No tirante 2, no decurso das 6 fases, foi registado grande proximidade no valor dos deslocamentos dos tirantes, com a particularidade de, em dois pontos, o valor de deslocamento registado através dos LVDTs, ser ligeiramente superior, ao deslocamento registado através de fotogrametria.

Assim, considerando a análise dos resultados da comparação dos deslocamentos, é possível afirmar que a fotogrametria apresenta bons resultados, no registo de deslocamentos na superfície dos tirantes.

#### **6.1.2. Mapas de deslocamentos**

A análise das fotografias registadas por processamento de imagem, e dos dados obtidos pelo processamento de imagem, permitiu a elaboração de mapas de deslocamentos na superfície do betão, conforme definido inicialmente.

### 6.1.3. Mapas de extensões

A análise das fotografias registadas por processamento de imagem, e dos dados obtidos pelo processamento de imagem, permitiu a elaboração de mapas de extensões na superfície do betão, conforme definido inicialmente.

### 6.1.4. Comparação de extensões no aço

As extensões no aço foram comparadas tendo em conta os valores obtidos pelos extensómetros colocados no interior dos varões de aço, e os valores estimados por fotogrametria. Foram feitas duas análises distintas tendo em conta a zona de formação de fendas.

- Em primeiro lugar foi efetuada uma análise fenda a fenda, que considerava uma área de influência de cada fenda até metade da distância da própria fenda até à seguinte, em ambas as direções.
- Em segundo lugar foi efetuada uma análise global, que considerava uma área de influência que continha todas as fendas formadas, e os seus limites localizavam-se a metade da distância entre a fenda mais próxima da extremidade e as extremidades do próprio tirante.

Para além destas duas análises acima referidas, foram consideradas três hipóteses distintas, no que diz respeito ao contributo da extensão média no betão,  $\varepsilon_{cm}$ . Estas três hipóteses foram estudadas devido ao fato dos valores envolvidos serem de ordem de grandeza muito baixa, no limite da precisão da câmara fotográfica utilizada. Foi feito este estudo paramétrico para permitir aferir o contributo que esta grandeza apresentava em relação às restantes envolvidas.

- Em primeiro lugar foi considerado nulo o contributo deste parâmetro,  $\varepsilon_{cm} = 0$
- Em segundo lugar foi considerado que o contributo deste parâmetro era igual ao máximo valor teórico previsto,  $\varepsilon_{cm} = 1,3 \times 10^{-4}$
- Em terceiro lugar foi considerado para este parâmetro os valores obtidos através de fotogrametria e processamento de imagem.

Os valores da comparação das análises acima referidas, de um modo geral, apresentaram resultados mais próximos na análise global em relação à análise fenda a fenda.

### 6.1.5. Erros da metodologia

Os erros da metodologia inerentes à utilização da fotogrametria e processamento de imagem são em seguida apresentados.

No caso da deteção de miras, os valores dos erros foram:

- 0,028mm e 0,22pixel, para o ensaio 0;
- 0,040mm e 0,40pixel, para o ensaio 1;
- 0,030mm e 0,167pixel, para o ensaio 2.

A análise dos valores obtidos, revela que no ensaio 0 e no ensaio 2, a ordem de grandeza é bastante semelhante, e no caso do ensaio 1, os valores são superiores. Este facto representa uma menor precisão do ensaio 1 comparativamente aos restantes ensaios.

A homografia, que é uma transformação dos valores das coordenadas dos pontos monitorizados, de *pixel* para mm, tem os seguintes erros médios; 0,015mm, no ensaio 0; 0,046mm, no ensaio 1; e 0,051mm, no ensaio 2.

A análise do erro médio quadrático global, RMS, em *pixel* e em mm, permite observar que para o ensaio 0, a correlação dos valores é de 98,15%; de 99,75% no ensaio 1 e 99,99% no ensaio 2.

## **6.2. Desenvolvimentos futuros propostos**

Como desenvolvimentos futuros, é proposta a realização de um maior número de ensaios, em que a dimensão do provete seja distinta da utilizada, tanto no seu desenvolvimento como na sua secção, que sejam ensaiados varões de aço com diferentes diâmetros, diferentes betões com classes de resistência do betão inferiores.

A realização deste tipo de ensaios laboratoriais com recurso a esta metodologia, que possui amplo campo de utilização, beneficia com a utilização de uma segunda câmara fotográfica, utilizada exclusivamente na monitorização das zonas de formação de fendas.

Assim a monitorização da zona de formação de fendas podia ser efetuada com uma maior resolução espacial da obtida (0.2mm/*pixel*), e seria obtida com maior rigor o parâmetro mais relevante de todos os dados registados, a largura das fendas.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- NP EN 206-1, (2007). *Betão parte 1: especificação, desempenho, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- American Concrete Institute 408, (1992). Abstract of: State-of-the-Art-Report: Bond under Cyclic Loads. *ACI Materials Journal*, 88(6), Estados Unidos da América.
- Barazzetti, L., e Scaioni, M. (2009). *Crack measurement: Development, testing and applications of an automatic image-based algorithm*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, pp. 285–296.
- Barazzetti, L., e Scaioni, M. (2010). *Development and implementation of image-based algorithms for measurement of deformations in material testing*. *Sensors*, 10(8), pp. 7469–7495.
- Benning, W., Lange, J., Schwermann, R., Effkemann, C., e Görtz, S. (2004). *Monitoring crack origin and evolution at concrete elements using photogrammetry*. *ISPRS Congress Istanbul Commission (Vol. 2004)*, Turquia.
- Bento, G. (2013). *Tirantes de betão armado com varões de fibra de vidro*. Tese de Mestrado, ISEC-IPC, Coimbra.
- Borosnyói, A., e Balázs, G. L. (2005). *Models for flexural cracking in concrete: the state of the art*. *Structural Concrete*, 6(2), pp. 53–62.
- Bouguet, J.-Y. (2014). *Camera Calibration Toolbox for MATLAB*.
- Brito, J., e Coelho, L. (2002). *Fotogrametria digital*. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.
- Carmo, R. (2012). *Estados Limites de Utilização Betão Estrutural*. ISEC-DEC, Coimbra.
- Carmo, R., Costa, H., e Gonçalo, B. (2014). *Experimental investigation of Bond stress and deformation of LWAC ties reinforced with FRP bars*. *Strain - An International Journal for Experimental Mechanics*, 50, pp. 318–333.
- Carmo, R., Valença, J., e Dias-Da-Costa, D. (2013). *Análise da rotação plástica e da contribuição do betão entre fendas em vigas usando fotogrametria*. *IBRACON Structures and Materials journal*, pp. 475–498.
- Carmo, R., Valença, J., Silva, D., e Dias-Da-Costa, D. (2015). *Assessing steel strains on reinforced concrete members from surface cracking patterns*. *Construction and Building Materials*, 98, pp. 265–275.
- Castro, C. (2002). *Concreto de Alto Desempenho: Estudo da Aderência com a Armadura sob Acções Repetidas*. Universidade de São Paulo.
-

- CEB. (1985). *Design manual on cracking and deformations*. Ecole Polytechnique Federale.
- CEN. (2004). *NP EN 1992-1-1: 2010 Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão; Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*.
- D'Arga e Lima, J. (1997). *Betão armado. Armaduras: caracterização, fabrico, colocação e pormenorização. Aspectos Gerais*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Vol. 3).
- Da Silva, R. D. (2006). *Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Dare, P., Hanley, H., Fraser, C., Riedel, B., e Niemeier, W. (2002). *An operational application of automatic feature extraction: the measurement of cracks in concrete structures*. The Photogrammetric Record, 17(99), pp. 453–464.
- Dias-da-Costa, D., Valença, J., e Carmo, R. (2014). *Curvature assessment of reinforced concrete beams using photogrammetric techniques*. Materials and Structures, 47(10), pp. 1745–1760.
- Dias-Da-Costa, D., Valença, J., e Júlio, E. (2010). *Monitorização Estrutural até à Rotura Aplicando Técnicas de Pós-Processamento de Dados Obtidos por Fotogrametria*. Encontro Nacional de Betão Estrutural, pp. 1–9, Lisboa.
- Dias-da-Costa, D., Valença, J., e Júlio, E. (2011). *Laboratorial test monitoring applying photogrammetric post-processing procedures to surface displacements*. Measurement, 44(3), pp. 527–538, Coimbra.
- Félix, C. (2004). *Monitorização e análise do comportamento de obras de arte*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Fernandes, R. (2000). *A Inflência das Acções Repetidas na Aderência Aço-Concreto*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Fusco, P. B. (1995). *Técnica de armar as estruturas de concreto*. Pini.
- Gan, Y. (2000). *Bond stress and slip modeling in nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures*. Tese de Mestrado, University of Toronto, Toronto.
- Gomes, J. (2013). *Análise de vigas de betão sujeitas à flexão através de Fotogrametria*. Tese de Mestrado, ISEC-IPC, Coimbra.
- Gonzalez, R., e Woods, R. (2008). *Digital image processing*. (3rd ed.), Prentice Hall (em Inglês).
- Gonzalez, R., Woods, R., e Eddins, S. (2009). *Digital Image Processing using MatLab* (2nd ed.). Gatesmark Publishing (em Inglês).

- Hampel, U. (2010). *Crack detection during load tests in civil engineering material testing with digital closed range photogrammetry—algorithms and applications*. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, pp. 268–271.
- Jähne, B. (2005). *Digital image processing* (6th ed.). Springer (em Inglês).
- Jiang, R., Jáuregui, D. V., e White, K. R. (2008). *Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: literature review*. Measurement, 41(8), pp. 823–834.
- Kim, S.-W., e Kim, N.-S. (2011). *Multi-point displacement response measurement of civil infrastructures using digital image processing*. Procedia Engineering, 14, pp. 195–203.
- Kowalczyk, M., Koza, P., Kupidura, P., e Marciniak, J. (2008). *Application of mathematical morphology operations for simplification and improvement of correlation of images in close-range photogrammetry*. ISPRS.
- Lange, J., Benning, W., e Siering, K. (2006). *Crack detection at concrete construction units from photogrammetric data using image processing procedures*. ISPRS commission VII pp. 493–496.
- Leonhardt, F. (1979). *Construções de concreto: princípios básicos da construção de pontes de concreto*. Interciência, Rio de Janeiro.
- Leonhardt, F., e Mönnig, E. (1977). *Construções de concreto -princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado*. Interciência, Rio de Janeiro.
- Louro, S. (2011). *Estudo da aderência aço – betão em elementos estruturais de BA*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Luger, G. (2005). *Artificial intelligence: structures and strategies for complex problem solving* (5th ed.). Addison-Wesley (em Inglês).
- Maas, H., e Hampel, U. (2006). *Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
- Marreiros, R. P. C. (2005). *Estado do conhecimento em aderência de varões nervurados de aço ao betão em elementos de betão armado*. Publicação UNIC–RPS1.
- NP EN, 12390. (2003). *Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*. Instituto Português da Qualidade.
- Otsu, N. (1975). A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11(285-296), pp. 23–27.
- Rosenfeld, A., e Kak, A. (1982). *Computer science and applied mathematics: digital image processing* (2nd ed.), Computer Science and Scientific Computing.
- Russel, S., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: a modern approach*. Prentice Hall.

- Santos, R. (2012). *Avaliação da aderência aço-betão em elementos estruturais de B.A.* Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Silva, M. (1997). *Tratamento e apresentação de dados experimentais*. Instituto Superior Técnico.
- Sinha, S. K., e Fieguth, P. W. (2006). *Segmentation of buried concrete pipe images*. *Automation in Construction*, 15(1), pp. 47–57.
- Slama, C. C., Theurer, C., e Henriksen, S. W. (1980). *Manual of photogrammetry*. American Society of Photogrammetry.
- Valença, J. (2006). *Aplicações de fotogrametria à engenharia de estruturas*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Valença, J. (2011). *Monitorização do estado de conservação de estruturas de betão por processamento de imagem e análise multi-espectral*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Valença, J., Dias-da-Costa, D., e Júlio, E. (2012). *Characterisation of concrete cracking during laboratorial tests using image processing*. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 607–615.
- Valença, J., Dias-Da-Costa, D., Júlio, E., e Araújo, H. (2011). *Sistema integrado para detetar e caraterizar fissuras em superfícies de betão durante ensaios laboratoriais*. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Coimbra.
- Valença, J., Dias-da-Costa, D., Júlio, E., Araújo, H., e Costa, H. (2013). *Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing*. *Measurement*, 46(1), pp. 433–441.
- Valença, J., Júlio, E., e Araújo, H. (2012). *Applications of Photogrammetry to Structural Assessment*. *Experimental Techniques*, 36(5), pp. 71–81.
- Valença, J., Júlio, E., e Dias-da-Costa, D. (2010). *Desenvolvimento de um Método Inovador de Detecção e Medição de Fissuras em Estruturas de Betão*. Encontro Nacional de Betão Estrutural, Lisboa.
- Yamaguchi, T., Nakamura, S., Saegusa, R., e Hashimoto, S. (2008). *Image based crack detection for real concrete surfaces*. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 3(1), pp. 128–135.