

Versão final

**Medição do Módulo de Elasticidade
com Recurso à Videogrametria**
Comparação com a técnica tradicional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Carlos Nuno Fernandez de Gouveia
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

setembro | 2013

UMa
J Med

T/M uma
624
Gou Med
Ex.1

73342
HOHA

**Medição do Módulo de Elasticidade
com Recurso à Videogrametria
Comparação com a técnica tradicional**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Carlos Nuno Fernandez de Gouveia

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE DA MADEIRA
SECTOR DE DOCUMENTAÇÃO
E ARQUIVO

ORIENTAÇÃO

José Manuel Martins Neto dos Santos

COORIENTADOR

Luís Miguel Gouveia Correia



**Centro de Competências das Ciências Exatas e da Engenharia
Universidade da Madeira**

**Medição do Módulo de Elasticidade com Recurso à
Videogrametria – Comparação com a Técnica Tradicional**

CARLOS NUNO FERNANDEZ DE GOUVEIA

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador:

Doutor José Manuel Martins Neto dos Santos
(Professor Auxiliar Convidado, UMa)

Coorientador:

Engenheiro Luís Miguel Gouveia Correia
(Diretor do Departamento de Estruturas, Materiais de Construção e Vias de Comunicação,
LREC)

Esta tese foi realizada no âmbito do Protocolo UMa-LREC

Setembro 2013

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar
seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

(Madre Teresa de Calcutá)

Aos meus Pais José Carlos e Mireya;

Às minhas Irmãs;

Ao meu sobrinho.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE TEXTO	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	xvii
SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES	xix
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL	5
CAPÍTULO 3 - VÍDEO-EXTENSÓMETRO DO LREC	19
CAPÍTULO 4 - TRATAMENTO DE DADOS	31
CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO À MEDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE VARÕES DE AÇO	41
CAPÍTULO 6 - APLICAÇÃO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO À MEDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM PROVETES DE BETÃO	59
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS	85

AGRADECIMENTOS

Com o findar desta dissertação, não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que de uma forma direta ou indireta se envolveram neste trabalho.

Um agradecimento especial ao Professor José Santos, orientador científico da presente dissertação, que com os seus conhecimentos me acompanhou, analisou e corrigiu o desenvolvimento deste trabalho final de mestrado.

Ao Eng.º Miguel Correia, e coorientador desta dissertação, pela sua disponibilidade, transmissão de conhecimentos e discussão dos resultados obtidos bem como a sua preciosa ajuda na resolução de problemas que surgiram na campanha experimental.

Ao LREC- Laboratório Regional de Engenharia Civil pela disponibilização de recurso humanos e materiais necessários à realização desta tese na pessoa do seu diretor Professor Paulo França.

Ao Professor Lino Maia, pela sua cooperação na definição da campanha experimental dos moldes em betão.

Ao colega e Eng.º Luís Correia pelo seu empenho e persistência no desenvolvimento dos ensaios efetuados e discussão de resultados, no LREC.

A todos os que fazem parte do quadro técnico do LREC, nomeadamente, Sr. Humberto, Sr. Carlos e ao Sr. Fernando pela disponibilidade e prontidão.

À empresa Construções MKM Lda. – Construção Civil e Obras Públicas, nas pessoas de Eng.º Francisco Gouveia e Eng.º Nelson Assunção, pela disponibilidade constante e pela disponibilização de material para os ensaios de aço efetuados.

À empresa Beto Madeira - Betões e Britas da Madeira, S.A, pela disponibilização do betão para enchimento dos molde.

Ao Professor Paulo França, pela disponibilidade de material de enchimento para os ensaios de betão desenvolvidos.

Por fim, um agradecimento especial, e a quem dedico este trabalho, a todos aqueles que apóstaram em mim e confiaram nas minhas capacidades, nomeadamente os meus pais, às minhas irmãs e a toda a restante família.

RESUMO

A determinação do módulo de elasticidade dos materiais é fundamental para o dimensionamento de estruturas de engenharia civil, uma vez que os ensaios para determinação desta característica apresentam custos elevados, é frequente a utilização dos valores tabelados pelos regulamentos.

Sendo a medição por videogrametria, um sistema recente na aplicação a estruturas de engenharia civil não existe ainda suficiente experiência da sua utilização em certas áreas, como a medição do módulo de elasticidade.

Deste modo, esta dissertação avalia este parâmetro através de dois sistemas de medição distintos, sendo eles, o extensómetro tradicional e o vídeo-extensómetro, com o intuito de verificar se a medição de deslocamentos por videogrametria é um bom método para medir pequenas deformações.

As marcas de referência para medição por videogrametria são muito importante, assim sendo, foram desenvolvidos vários métodos de marcação no betão até atingir o tipo de marcação que induzia menor variação dos parâmetros medidos. Após a recolha dos dados foram aplicadas ferramentas de cálculo desenvolvidas em Excel a fim de compactar a grande quantidade de dados recolhidos ao longo dos ensaios desenvolvidos.

De forma a quantificar e comparar os valores de módulo de elasticidade pelos dois sistemas de medição foram desenvolvidas duas campanhas de ensaios, uma para aços em que foram ensaiados três provetes de aço de varões com os diâmetros de 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 16mm, 20mm, 25mm e 32mm. E uma outra campanha de ensaio que foi destinada ao betão em que foram ensaiados provetes cilíndricos, cúbicos e prismáticos em várias idades até aos 28 dias a fim de determinar o módulo de elasticidade dos mesmos.

Com o desenvolver desta dissertação mostrou-se que o sistema de medição por videogrametria para quantificar o módulo de elasticidade, pode ser considerado exato mas não totalmente preciso, assim sendo, este sistema de medição pode ser cuidadosamente aplicado em detrimento do sistema tradicional, sendo provável que com o evoluir tecnológico a sua precisão seja bastante melhorada.

Palavras-chave: Videogrametria, Vídeo-extensómetro, Extensómetro, Tensão, Deformação, Módulo de Elasticidade.

ABSTRACT

The determination of the elastic modulus of the material is essential to the design of civilian engineering structures. Since the tests to determinate this characteristic features are extremely expensive it is common to use values tabulated by the regulations.

Measuring by videogrammetry is a recent system in application to civilian engineering structures and there is not still enough experiences of their use in certain areas, such as the measurement of the modulus of elasticity.

Thus, the dissertation evaluates this parameter with two distinguished measurement systems, namely, the video-extensometer and traditional extensometer in order to check whether the measurement of displacements by videogrammetry is a good method for analyzing existing small deformations.

Reference marks for measuring videogrammetry are very important, so there were developed several methods of marking the concrete in a way to reach the type marking which induced smaller variation of the measured parameters. After collecting the data it were applied calculation tools which were developed in Excel in order to compress the large amount of data collected all over the tests which were developed.

In order to quantify and compare the values of the elastic modulus by the two measurement systems it were developed two series of tests: one for steel in which three specimens of steel rods with diameters from 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 16mm, 20mm, 25mm and 32mm were tested, and another campaign destined to the concrete where cylindrical ,cubic and Prismatic specimens of different ages were submitted to a 28 days test in order to determine the module elasticity of it.

With the development of this work it was showed that the measuring system by videogrammetry to measure the modulus of elasticity can be considered exact but not totally concise, therefore, the measurement system can be carefully applied over the traditional system, it is likely that with technological advance their accuracy is greatly improved.

Keywords: Videogrammetry, Video-extensometer, extensometer, Strain, deformation Modulus of Elasticity

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	3
CAPÍTULO 2 - MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS	6
2.2.1 Medição de grandezas físicas na monitorização de estruturas	6
2.2.2 Composição de um sistema de monitorização	10
2.3 VIDEOGRAMETRIA	12
2.3.1 Captura e filmagem de imagem	13
2.3.2 Distorção e correção da imagem	15
2.3.3 Cálculo dos deslocamentos entre imagens	15
2.3.4 Ruído da imagem redução do ruído dos resultados	16
2.3.5 Sistema de medição por videogrametria	16
CAPÍTULO 3 - VÍDEO-EXTENSÓMETRO DO LREC	19
3.1 INTRODUÇÃO	19
3.2 O SISTEMA "VIDEOEXTENSOMETER NG, VERSAO 5.12.3"	20
3.2.1 O <i>hardware</i> do sistema	21
3.2.2 O <i>software</i> do sistema	23
3.3 PREPARAÇÃO E TESTES INICIAIS PARA USO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO	26
3.3.1 Ensaios iniciais em aços	27
3.3.2 Ensaios iniciais em betão	28
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
CAPÍTULO 4 - TRATAMENTO DE DADOS	31
4.1 INTRODUÇÃO	31
4.2. METODOLOGIA UTILIZADA PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO SINAL AO LONGO DO TEMPO	32
4.2.1 Avaliação da estabilidade dos resultados e resolução do sistema no tempo	32
4.2.2 Validação do sistema de medição em condições controladas	35
4.3 FERRAMENTAS DE CÁLCULO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO APLICADOS AOS MATERIAIS ..	36
4.3.1 Ferramenta de cálculo de aços	37
4.3.2 Ferramenta de cálculo de betões	38
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38

CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO À MEDIÇÃO DO	
MÓDULO DE ELASTICIDADE DE VARÕES DE AÇO	41
5.1 INTRODUÇÃO	41
5.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO	42
5.2.1 Preparação das condições de ensaio com o equipamento DionPro	45
5.2.2 Preparação das condições de ensaio com o equipamento Videoextensometer NG	47
5.3 APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CÁLCULO DO SISTEMA	49
5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	51
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
CAPÍTULO 6 - APLICAÇÃO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO À MEDIÇÃO DO	
MÓDULO DE ELASTICIDADE EM PROVETES DE BETÃO	59
6.1 INTRODUÇÃO	59
6.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO	60
6.2.1 Recolha do betão e preparação dos provetes	61
6.2.2 Ensaio de compressão do betão	65
6.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO DO SISTEMA	69
6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	72
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES.....	81
7.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES GERAIS	81
7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sensor LVDT	7
Figura 2.2 - Extensómetro de corda vibrante de aplicar a superfície	7
Figura 2.3 - Extensómetros de resistência elétrica	8
Figura 2.4 - Extensómetro de fibra ótica	8
Figura 2.5 - Sensores de medição de rotações.....	9
Figura 2.6 - Princípio de funcionamento do termopares	9
Figura 2.7 - Detetores de temperatura resistivos - RTD.....	9
Figura 2.8 - Dispositivos hidráulicos (Célula de carga) para medição de forças	10
Figura 2.9 - Subconjuntos do sistema de monitorização de estruturas (Figueiredo, 2006).....	11
Figura 2.10 - Esquema da transmissão a de dados do local da obra para o laboratório. (Figueiredo, 2006).....	11
Figura 2.11 - Espectro eletromagnético (Scuri,2002)	14
Figura 2.12 - Fluxograma para aplicação da videogrametria (Santos, 2012).....	17
Figura 3.1 - Esquema de funcionamento do vídeo-extensómetro	21
Figura 3.2 - Câmara de filmar do sistema de medição por vídeo-extensómetro	22
Figura 3.3 - Janela de boas vindas de <i>Videoextensometer Ng</i>	23
Figura 3.4 - Janela de definição do tipo de ensaio.....	24
Figura 3.5 - Definição dos parâmetros do alvo	25
Figura 3.6 - Marcas de referencia do varão de aço.....	27
Figura 3.7 - Ruído da imagem nos ensaios de teste de aços.....	28
Figura 3.8 - Tipos de marcações testadas nos provetes de betão	29
Figura 3.9 - Ruído da imagem nos ensaios de teste do betão	30
Figura 4.1 - Deslocamento [mm] medido entre dois pontos fixos no ensaio de curta duração. μ - média, s_m - desvio-padrão.....	33
Figura 4.2 - Deslocamento [mm] medido entre dois pontos fixos no ensaio de média duração. μ - média, s_m - desvio-padrão.....	33
Figura 4.3 - Deslocamento [mm] medido entre dois pontos fixos no ensaio de longa duração. μ - média, s_m - desvio-padrão.....	33
Figura 4.4 - Curva da representação do intervalo de confianças de 95%	34
Figura 4.5 - Representação gráfica do modo de cálculo do módulo de elasticidade, segundo as normas	34

Figura 4.6 - Comparação do vídeo-extensómetro e o extensómetro no ensaio de aço (varão de 16mm).....	35
Figura 4.7 - Comparação do vídeo-extensómetro e o extensómetro no ensaio de betão (provete cilíndrico)	36
Figura 4.8- Gráfico da curva de ensaio de tração do aço	37
Figura 4.9 - Gráfico da curva de ensaio de tração do aço	38
Figura 5.1 - Medição dos diâmetros efetivos médios e marcação do centro de massa no varão.....	43
Figura 5.2 - Equipamento e marcação de centímetro a centímetro do varão	44
Figura 5.3 - Colocação do varão entre as garras do equipamento	44
Figura 5.4 - Sistema de medição em varão de aço	45
Figura 5.5 - Varão de aço após rotura.....	46
Figura 5.6-Fluxograma do procedimento experimental da campanha de aços.....	48
Figura 5.7 - Folha de cálculo de aplicação aos aços para os dados do vídeo-extensómetro....	49
Figura 5.8 - Folha de cálculo como os dados do aço organizados segundo a segundo	49
Figura 5.9 - Folha de cálculo como os dados do aço recolhidoS pelo extensómetro (LREC)	50
Figura 5.10 - Relatório final de ensaio de aços pelo dados do extensómetro (adaptado do LREC)	50
Figura 5.11 - Curva tensão deformação extensómetro diâmetro 6mm	52
Figura 5.12 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro diâmetro 6mm.....	52
Figura 5.13 - Curva tensão deformação extensómetro diâmetro 8mm	52
Figura 5.14 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro diâmetro 8mm.....	52
Figura 5.15 - Curva tensão deformação extensómetro diâmetro 10mm	52
Figura 5.16 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro diâmetro 10mm.....	52
Figura 5.17 - Curva tensão deformação extensómetro diâmetro 12mm	52
Figura 5.18 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro diâmetro 12mm.....	52
Figura 5.19 - Curva tensão deformação extensómetro diâmetro 16mm	53
Figura 5.20 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro diâmetro 16mm.....	53
Figura 5.21 - Curva tensão deformação extensómetro diâmetro 20mm	53
Figura 5.22 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro diâmetro 20mm.....	53
Figura 5.23 - Curva tensão deformação extensómetro diâmetro 25mm	53
Figura 5.24 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro diâmetro 25mm.....	53

Figura 5.25 - Curva tensão deformação extensómetro diâmetro 32mm.....	53
Figura 5.26 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro diâmetro 32mm	53
Figura 5.27 - Variação do módulo de elasticidade com o diâmetro e equipamento.....	54
Figura 5.28 - Variação do módulo de elasticidade médio com o diâmetro e equipamento.....	55
Figura 5.29- Diferença em percentagem do módulo de elasticidade em função do diâmetro.....	55
Figura 5.30 - Variação da extensão última com o diâmetro.....	57
Figura 6.1 - Moldes utilizados para receção do betão	61
Figura 6.2 - Ensaio de caracterização do betão.....	62
Figura 6.3 - Enchimento dos moldes	63
Figura 6.4 - Nivelamento dos moldes e identificação dos provetes	63
Figura 6.5 - Desmoldagem dos provetes	64
Figura 6.6 - Corte dos prismas e retificação dos cilindros e prismas	64
Figura 6.7 - Provetes em câmara de cura.....	65
Figura 6.8 – Ensaio à compressão do cubo de molde plástico	66
Figura 6.9 – Marcação e pintura dos provetes.....	66
Figura 6.10 – Fixação do extensómetro	67
Figura 6.11 – Ciclos de carga e descarga do módulo de elasticidade do betão.....	68
Figura 6.12 - Folha de cálculo de aplicação ao betão para os dados do vídeo-extensómetro .	70
Figura 6.13 - Folha de cálculo como os dados do betão organizados segundo a segundo.....	70
Figura 6.14 - Folha de cálculo como os dados do aço recolhidos pelo extensómetro (LREC)	71
Figura 6.15 - Relatório final de ensaio de betão pelo dados do extensómetro (adaptado do LREC).....	71
Figura 6.15 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro às 24 horas.....	72
Figura 6.16 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro às 24 horas	72
Figura 6.17 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro às 72 horas.....	72
Figura 6.18 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro às 72 horas	72
Figura 6.19 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro aos 7 dias.....	72
Figura 6.20- Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro aos 7 dias.....	72
Figura 6.21 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro aos 28 dias.....	73
Figura 6.22 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro aos 28 dias.....	73
Figura 6.23 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro 90° aos 28 dias	73

Figura 6.24 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro 90° aos 28 dias.....	73
Figura 6.25 - Curva tensão deformação extensómetro no prisma aos 28 dias.....	73
Figura 6.26 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no prisma aos 28 dias.....	73
Figura 6.27 - Curva tensão deformação extensómetro no prisma 90° aos 28 dias.....	73
Figura 6.28 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no prisma 90° aos 28 dias	73
Figura 6.29 - Curva tensão deformação extensómetro no cubo metálico aos 28 dias	73
Figura 6.30 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cubo metálico aos 28 dias	73
Figura 6.31 - Curva tensão deformação extensómetro no cubo metálico 90° aos 28 dias.....	74
Figura 6.32 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cubo metálico 90° aos 28 dias.....	74
Figura 6.33 - Variação do módulo de elasticidade nos diferentes ensaios com a idade do betão	74
Figura 6.34 - Variação do módulo de elasticidade médio com a idade do betão.....	74
Figura 6.35 - Variação do módulo de elasticidade nos ensaios do betão aos 28 dias em função do tipo de molde.....	75
Figura 6.36 - Variação do módulo de elasticidade médio do betão aos 28 dias em função do tipo de molde.....	75
Figura 6.37- Diferença em percentagem do módulo de elasticidade médio do betão aos 28 dias em função do tipo de molde	77
Figura 6.35 - Tensão de rotura experimental e teórica do betão nas diferentes idades	79

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 - Média e desvio padrão do deslocamento [mm] entre os pontos fixos	34
Quadro 4.2 - Parâmetros medidos pelo vídeo-extensômetro.....	37
Quadro 5.1 - Diâmetros nominais e número de varões utilizados.....	43
Quadro 5.2 - Limites da velocidade de aplicação da força (adaptado da norma NP EN 10002-1, 2006)	46
Quadro 5.3 - Parâmetros do relatório de ensaio (dados referentes ao varão de aço com diâmetro de 16mm).....	47
Quadro 5.4 - Módulo de elasticidade no aço com extensômetro.....	55
Quadro 5.5 - Módulo de elasticidade no aço com vídeo-extensômetro	55
Quadro 5.6 -Diferença do módulo de elasticidade no aço entre os sistema	56
Quadro 6.1 - Forma e número dos provetes de betão usas na campanha	61
Quadro 6.2 - Composição do betão auto-compatável.....	62
Quadro 6.3 - Módulo de elasticidade no betão com extensômetro	74
Quadro 6.4 - Módulo de elasticidade no betão com vídeo-extensômetro	75
Quadro 6.5 - Diferencas entre módulo de elasticidade.....	76
Quadro 6.4 - Variação do módulo de elasticidade teórico e prático com a idade do betão.....	78

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Coeficiente de correlação cruzada (Santos,2012)	16
Equação 4.1 - Equação do módulo de elasticidade (Lei de Hooke)	36
Equação 6.1 - Resistência do cilindro em função da resistência do cubo	67
Equação 6.2 - Equação da força em função da tensão.....	67
Equação 6.2 - Módulo de elasticidade em função da idade (EC2).....	77
Equação 6.3 - Tensão média de rotura do betão à compressão à idade de t dias (EC2)	78
Equação 6.4 - Coeficiente que depende da idade do betão t (EC2).....	78

SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES

Notações Romanas

A	Área do quadrado ou extensão após rotura do aço
A₀	Área do círculo
A_g	Extensão permanente
A_{gt}	Extensão permanente da força máxima
C(u,v)	Coeficiente de correlação cruzada
D_E	Diâmetro efetivo do varão
dL	Deslocamento entre marcas
E	Módulo de Elasticidade
E_c	Módulo de Elasticidade no betão aos 28dias
E_c(t)	Módulo de Elasticidade do betão à idade <i>t</i> (em dias)
E_{psL}	Deformação axial entre marcas
F	Força aplicada ou Frequência
<i>f_{c,cilindro}</i>	Resistência do cilindro
<i>f_{c,cubo}</i>	Resistência do cubo
<i>f_{cm}</i>	Tensão de rotura do betão aos 28 dias
<i>f_{cm}</i>(t)	Tensão de rotura do betão à idade <i>t</i>
<i>f_m</i>	Valor médio da imagem na escala de cinzentos
F_m	Força máxima
<i>g_m</i>	Valor médio na imagem deslocada na escala de cinzentos
L	Comprimento inicial entre marcas (vídeo-extensómetro)
L₀	Comprimento inicial entre marcas (extensómetro)
L_C	Distância entre garras
L_e	Comprimento do extensómetro
L_U	Comprimento final do varão
px	<i>Pixel</i>
s_m	Desvio-padrão da média
t	Tempo

Notações Gregas

μ	Valor médio
ε_a	Deformação inicial para tensão inicial
ε_b	Deformação inicial para tensão final
ε_c	Deformação no betão
ε_o	Deformação após rotura do Aço
ε_p	Deformação plástica do Aço
ε_y	Deformação elástica do aço
ϑ	Velocidade de aplicação de carga
λ	Comprimento de onda
σ	Tensão aplicada
σ_a	Tensão inicial aplicada
σ_b	Tensão final medida
σ_{cc}	Tensão crítica do betão
σ_{cr}	Tensão de rotura do betão
σ_{cy}	Tensão de cedência do betão
σ_r	Tensão de rotura do aço
σ_u	Tensão última do aço
σ_y	Tensão de cedência do aço
Φ	Diâmetro do círculo ou Diâmetro do varão
px	<i>Pixel</i>

Acrónimos

DIC	<i>Digital image correlation</i>
EC2	Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1,2010)
LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i>
RAM	Região Autónoma da Madeira
RGB	Sistema de cores: Vermelho (R), Verde (G) e Azul (B)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Com o passar dos anos, o estudo das propriedades mecânicas dos materiais aplicados à engenharia civil tem tomado grande importância para a comunidade científica da área, desenvolvendo métodos em que haja maior precisão nos resultados obtidos e minimização dos custos afetos à determinação das mesmas.

Uma das principais características mecânicas analisadas no estudo dos materiais aplicados na construção civil é o módulo de Elasticidade, sendo que, esta apresenta grande importância no dimensionamento de estruturas de engenharia civil.

Segundo Caetano *et al.* (2012), o conhecimento preciso do módulo de elasticidade é vital para o dimensionamento económico em serviço, no que diz respeito a limitações de deformações que conduzem a perda de funcionalidade. É sabido que para a realização dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade é necessário algum investimento por parte dos projetistas, uma vez que estes apresentam alguns encargos. Assim, é corrente os projetistas recorrerem ao valor estipulados nas normas, para a utilização deste mesmos valores no projetos. A realização de ensaio para determinação do módulo de elasticidade, hoje em dia, só é realizado em grandes obras onde o custo destes é irrisório face ao custo total do projeto final.

Um dos grandes problemas ou talvez o mais condicionante no preço da realização de ensaios de determinação do módulo de elasticidade é a necessidade de recorrer a extensômetros para determinação do mesmos, visto este ser um equipamento de alta precisão, também acarreta grandes valores para a sua aquisição e manutenção.

Com o evoluir da tecnologia principalmente no campo da imagem, quer na fotografia quer no vídeo, houve a necessidade de adaptar as restantes ciências tecnológicas, tais como a medicina e engenharia civil entre muitas outras, a esta nova forma de adquirir e tratar dados sem haver intervenção física no objeto a analisar.

A engenharia civil nos últimos anos tem beneficiado muito do avanço tecnológico da imagem, visto ser cada vez mais frequente a monitorização de estruturas e o estudo de materiais recorrendo a esta técnica.

Com o aparecimento da videogrametria foi possível realizar ensaios de determinação de certas propriedades de alguns materiais e estruturas no ramo da engenharia. Exemplo dessas propriedades são as deformações e deslocamentos que os materiais e/ou as estruturas apresentam num determinado intervalo de tempo quer estejam em fase de carregamento ou não.

Desde à muito tempo que os principais materiais utilizados na construção civil são o aço e o betão, por apresentarem boas características mecânicas ao comportamento que o Homem deseja para as suas construções. A determinação do módulo de elasticidade destes materiais envolve a medição de deformações e deslocamentos muito pequenos, que os sistemas de vídeo podem não conseguir captar rigorosamente por não terem resolução suficiente.

Tendo como base o vídeo-extensómetro do LREC esta dissertação surge na tentativa de avaliar se com os sistemas de medição por videogrametria atuais é possível medir o módulo de elasticidade do betão e do aço com o rigor necessário.

1.2 OBJETIVOS

A presente tese tem como principal objetivo a determinação do módulo de elasticidade com recurso à videogrametria e comparação com a técnica tradicional recorrendo a extensómetros.

Com a finalidade de atingir o objetivo principal foi necessário a realização dos seguintes objetivos secundários:

- Enquadrar o aparecimento da videogrametria e a sua utilização na monitorização de estruturas;
- Elaborar ferramentas de cálculo em Excel, a partir dos dados obtidos do vídeo-extensómetro, para posterior comparação com a técnica tradicional;
- Testar o vídeo-extensómetro do LREC, tendo em vista a escolha do melhor método de contraste de cores e a forma de utilizar vários sistemas de medição simultaneamente;
- Estudar uma vasta gama de diâmetros de aço para verificar se a variação do mesmo influencia a determinação do módulo de elasticidade;
- Estudar o módulo de elasticidade em betões com várias idades até aos 28 dias e verificar qual a variação do módulo de elasticidade ao longo do tempo;
- Analisar se a forma do provete de betão, cúbica, prismática ou cilíndrica bem como o tipo de molde (plástico ou metálico) influencia a determinação do módulo de elasticidade e a tensão última a que estes são sujeitos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

De forma a cumprir estes objetivos decidiu-se organizar este trabalho em 7 capítulos. De seguida é feita uma descrição sucinta de cada capítulo.

No capítulo 1, presente capítulo, é feito um enquadramento justificativo do trabalho a apresentar, bem como os objetivos que propomos a atingir.

No capítulo 2 faz-se uma apresentação dos conceitos da videogrametria, campos de aplicação, sistemas utilizados na monitorização de estruturas de engenharia civil.

No capítulo 3 é feita uma abordagem ao equipamento de medição por vídeo-extensómetro existente no LREC, onde é descrito toda a sua parte física e as suas componentes, bem como todos os parâmetros possíveis a quantificar, por este sistema. Ainda neste capítulo, é descrito os testes iniciais efetuados, com o intuito de calibrar o sistema e ajudar a desenvolver os modelos de cálculo.

No capítulo 4 é realizado o tratamento dos dados provenientes do vídeo-extensómetro. Neste capítulo é determinada a resolução do sistema, avaliada a estabilidade do sinal do sistema e a validação do mesmo. Por fim, são descritos os modelos de cálculo utilizados para os diferentes materiais.

O capítulo 5 tem por objetivo a aplicação dos capítulos anteriores, ou seja, os capítulos 3 e 4, a uma campanha de ensaios de aço, apresentando os resultados dos dois sistemas utilizados, isto é, o sistema tradicional (extensómetro externo) e pelo novo sistema de medição (vídeo-extensómetro). É, ainda, verificada a aplicabilidade do novo sistema ao ensaio do módulo de elasticidade de aço.

No capítulo 6 aplica-se os conhecimentos dos capítulos anteriores, ou seja, os capítulos 3 e 4, a uma campanha de ensaios de betão, apresentando os resultados dos dois sistemas utilizados, isto é, o sistema tradicional (extensómetro externo) e pelo novo sistema de medição (vídeo-extensómetro), ao longo do tempo. É, ainda, verificada a aplicabilidade do novo sistema ao ensaio do módulo de elasticidade de betão, bem como verificado se este varia com a idade do betão.

No capítulo 7 são apresentadas as principais considerações e conclusões da dissertação, a nível da avaliação do sistema por videogrametria, em detrimento ao sistema tradicional. Por fim, são propostos desenvolvimentos futuros que possam complementar esta dissertação.

CAPÍTULO 2

MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

2.1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo a medição contínua de deslocamentos em estruturas de Engenharia Civil tem sido efetuada com recurso a sensores elétricos ou mecânicos, cuja instalação podem provocar danos na estrutura.

Um outro problema que a aplicação destes sensores apresenta é a sua limitação de utilizações e a sobreposição de sensores em áreas próximas.

De forma a ultrapassar estes problemas que surgem na monitorização de estruturas é importante talhar um sistema de medição contínua de deslocamentos e deformações que não interfira diretamente com a estrutura, isto é, que seja externo a esta e que não a danifique, podendo haver múltiplas leituras em áreas próximas.

Com o aparecimento da fotografia e da imagem digital houve uma necessidade de aplicar este método de visualização às restantes áreas tecnológicas e científicas, como por exemplo, à medicina, às engenharias, entre muitas outras.

Sendo o princípio básico da fotogrametria, a correlação de imagem, a videogrametria não é mais que uma sequência de imagens captadas num intervalo de tempo, podendo ser aplicada a monitorização de estruturas.

Alguns estudos realizados como Valença *et al.* (2007); Valença (2011); Valença (2006); Temba (2000), Santos (2012), Dias (2011). relacionadas com a videogrametria, tendo como base a fotogrametria aplicada à imagem de vídeo em que é possível medir deslocamentos e deformações contínuos ao longo do tempo.

É, de salientar, que existem outros métodos de monitorização de estruturas, nomeadamente a nível de sensores elétricos e mecânicos.

2.2 SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Desde os primeiros tempos, o Homem tem a necessidade de observar todos os fenómenos alheios à condição humana, com o intuito de conhecer e desenvolver novos processos para o seu próprio desenvolvimento. Com o passar do tempo e com o desenvolvimento da construção, surge a necessidade de observar o que está construído com o objetivo de melhorar e aperfeiçoar as técnicas vindouras.

Com o desenvolvimento económico e social da Humanidade é “imposto” ao Homem a necessidade de evoluir, construindo cada vez mais estruturas de maiores dimensões, exigindo, assim, cada vez mais técnicas de monitorização mais complexas.

Segundo Félix (2004), a monitorização de estruturas consiste na observação do comportamento dos materiais da estrutura em condições de serviço e em situações que se aproximam a valores máximos previstos em projeto.

A observação de estruturas nos primeiros tempos baseava-se em observações visuais e inspeções e medições localizadas às mesmas. Hoje em dia, a monitorização de estruturas baseia-se em sistemas de sensores com base na eletrónica e na optoelectrónica.

Nesta secção será abordado o princípio de funcionamento dos sistemas de monitorização, bem como o tipo de sensores que permitem a medição de grandezas físicas que interessam à engenharia civil no sentido da monitorização de estruturas.

2.2.1 MEDIÇÃO DE GRANDEZAS FÍSICAS NA MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Na monitorização de estruturas, as grandezas podem se dividir em duas categorias, isto é, na observação do comportamento local da estrutura como por exemplo, tensões, extensões e

abertura de fendas e, ainda, na observação do comportamento global da estrutura, tais como deslocamentos, flechas, rotações, forças, aberturas de juntas de dilatação, temperaturas, deslocamentos de aparelhos de apoio, reações de apoio, entre outras Félix (2004).

A medição de deslocamentos consiste na medição de deslocamentos relativos entre dois pontos, sendo frequentemente utilizados os LVDT (da literatura da língua inglesa, *Linear Variable Differential Transformer*), Figura 2.1, que é um tipo de transdutor indutivo, cujo deslocamento é obtido através da variação de uma corrente Figueiredo (2006). Este transdutor apresenta grande sensibilidade e estabilidade a longo prazo em leituras dinâmicas e estáticas, tendo capacidade de medir deslocamentos inferiores às décimas de milímetro.



Figura 2.1 - Sensor LVDT

A extensão é uma medição efetuada pontualmente nas estruturas com recurso a extensómetros, sendo estes aplicados à superfície ou embebidos. Em estruturas de betão armado, é mais indicado a utilização de extensómetros embebidos, sendo que estes devem ser aplicados anteriormente à betonagem. Os extensómetros mais utilizados são os extensómetros de corda vibrante, e de resistência elétrica e/ou em fibra ótica, sendo que destes três tipos os extensómetros elétricos são os que apresentam custos mais baixos.

O extensómetro de corda vibrante, Figura 2.2 baseia-se na frequência de vibração de uma corda e a tensão a que essa corda está sujeita, o sinal é transmitido ao longo de cabos que ligam o sensor ao equipamento de aquisição de dados, sem perda de sinal.

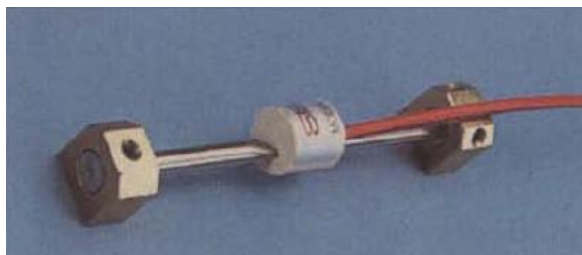


Figura 2.2 - Extensómetro de corda vibrante de aplicar a superfície

O extensômetro de resistência elétrica, Figura 2.3 baseia-se na variação de resistência de um condutor ou de um semicondutor quando sujeita a uma deformação mecânica.



Figura 2.3 - Extensômetros de resistência elétrica

O mais recente sensor é o extensômetro de fibra ótica, Figura 2.4, que está em grande expansão no mercado e que se apresenta em diferentes formas, sendo que o princípio de funcionamento do mais simples baseia-se nas alterações físicas ou ambientais que provocam variações na fase, na intensidade, no comprimento de onda ou na polarização da luz que se propaga através da fibra ótica, a partir da qual é possível extrair a informação que se pretende medir.



Figura 2.4 - Extensômetro de fibra ótica

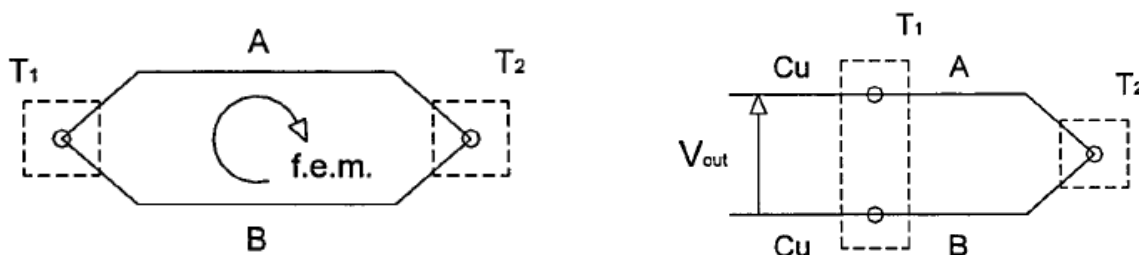
A medição de rotações assenta na medição da variação de ângulos entre uma posição inicial e uma final ou na medição do desvio angular de um dado eixo em relação a um plano de referência fixo, isto é, mede-se inclinações absolutas. O instrumento que permite medir as variações angulares é designado por clinómetro, Figura 2.5 a) e o instrumento que mede as inclinações absolutas designa-se inclinómetro, Figura 2.5 b).



a) - Clinómetro de bolha de ar
 b) - Inclinómetro
 Figura 2.5 - Sensores de medição de rotações

Os sensores de temperatura destinam-se à medição de variações da temperatura no interior ou exterior de uma estrutura, sendo que na engenharia civil, os sensores de temperatura mais utilizados são os termopares e os detetores resistivos.

Os termopares, são constituídos por dois metais dissimilares que quando unidos numa das extremidades cria uma malha fechada, estabelecendo, assim, uma força eletromotriz, que faz circular a corrente, num circuito fechado, Figura 2.6 a), gerando um gradiente térmico ao longo do seu comprimento. Se o circuito for aberto, a diferença de potencial é diretamente proporcional à temperatura da união e à composição dos metais, Figura 2.6 b).



a) - Termopar de circuito fechado
 b) - Termopar de circuito Aberto
 Figura 2.6 - Princípio de funcionamento do termopares

Em relação aos detetores de temperatura resistivos (RTD – da língua inglesa, *Resistance Temperature Detector*), Figura 2.7, são sensores de temperaturas que se baseiam no princípio do aumento da resistência do metal com a temperatura.



Figura 2.7 - Detetores de temperatura resistivos - RTD

A medição da força é importante quando se pretende acompanhar a tração em tirantes, em cabos de pré-esforço, em reações de apoio e recentemente desenvolvida em sistemas que permitem a pesagem de veículos em movimento. O processo frequentemente utilizado para a medição direta de forças é a utilização de células de carga, por sua vez, na monitorização de estruturas são utilizados dispositivos hidráulicos ou de deformação que posteriormente traduzem a força.

Nos dispositivos hidráulicos, Figura 2.8, um fluido de baixa compressibilidade preenche na câmara que se deforma elasticamente por ação da força que se pretende medir, sendo a estabelecida uma relação entre a pressão do fluido medida com sensor de pressão e a força aplicada. Quando aplicado um dispositivo de deformação, há uma força que induz uma deformação elástica numa peça, devidamente instrumentada com extensómetros, Figuras 2.2 e 2.3. A deformação elástica medida é convertida no valor da força por calibração.



Figura 2.8 - Dispositivos hidráulicos (Célula de carga) para medição de forças

2.2.2 COMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

O sistema de monitorização de estruturas ideal deve avaliar a integridade e de forma mais pormenorizada possível e fornecer informações acerca de danos estruturais. Segundo alguns estudos, tais como Figueiredo (2006), Félix (2004) e Dimande (2010), o processo de um sistema de monitorização deve-se dividir em 6 subconjuntos, de acordo com a Figura 2.9.

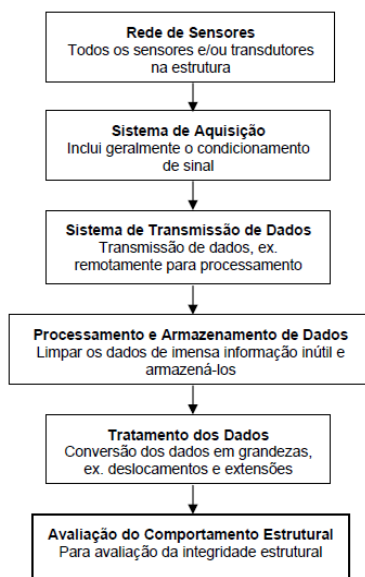


Figura 2.9 - Subconjuntos do Sistema de Monitorização de Estruturas (Figueiredo, 2006)

A rede de sensores deve de ser robusta, fiável e estável no tempo, de forma que seja capaz de medir todos os parâmetros pretendidos, evitando que esta seja vulnerável às condições ambientais e às influências eletromagnéticas com o intuito de minimizar o ruído do sinal à saída do sensor e ao longo dos cabos. O trajeto dos cabos de ligação entre os sensores e o sistema de aquisição deve ser o mais curto possível.

Os sistemas de aquisição são dispositivos responsáveis pela receção, condicionamento, armazenamento e transmissão das leituras registadas nos sensores, podendo ser um sistema do tipo analógico ou digital.

O sistema de transmissão de dados é entendido como meio de comunicação entre o sistema de aquisição do local da estrutura e o sítio onde se processam os dados, geralmente são gabinetes de projeto ou laboratórios, sendo essa transmissão realizada através de uma linha telefónica, como mostra a Figura 2.10.

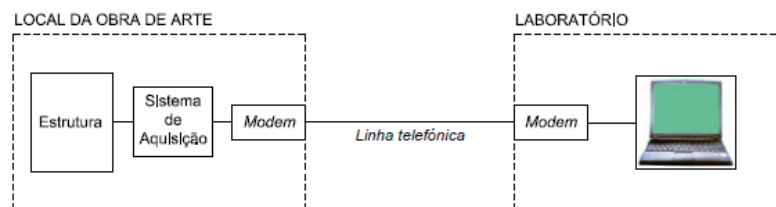


Figura 2.10 - Esquema da transmissão de dados do local da obra para o laboratório. (Figueiredo, 2006)

Após a recolha pelos sensores, os dados podem conter demasiada informação dispensável, através de técnicas de processamento de dados são eliminados os dados em excesso, tornando

estes mais fáceis, mais rápidos e com maior facilidade de interpretação. Após este processo, são armazenados numa base de dados de forma a serem tratados durante a avaliação do comportamento estrutural.

De seguida, é feita o tratamento de dados, isto é, os dados recolhidos pelos sensores são transformados em informações úteis para conhecimento do estado da estrutura, nesta fase muitas vezes são aplicados filtros e são feitas correções ao sinal recolhido pelo sensor.

Por fim, na fase de avaliação do comportamento estrutural, é avaliada a integridade da estrutura para que os dados recolhidos a partir da monitorização da estrutura coincidam com os resultados previstos em projeto e em condições de serviço. Caso não coincidam é nesta fase que são estudadas as soluções para mitigar possíveis danos maiores na estrutura.

2.3 VIDEOGRAMETRIA

Segundo Corrêa (2010), a videogrametria pode definir-se como a "ciência, a arte ou a tecnologia de se obter informações confiáveis sobre objetos físicos através de processos de gravação, medição e interpretação de dados de vídeo e padrões de energia eletromagnética".

Desta forma a videogrametria é uma extensão da fotogrametria ao longo de um intervalo de tempo. A fotogrametria consiste em determinar modelos geométricos de elementos, a partir da sobreposição de fotografias e das características e parâmetros da câmara utilizada, sendo estes parâmetros os que garantem a precisão do sistema.

Como é constatável, quanto mais preciso for o equipamento mais caro ele é, por isso atualmente em vez de utilizar equipamentos caros, é frequente recorrer-se a programas computacionais para correção de imagens.

O estudo da videogrametria tem sido abordado em vários ramos da ciência e tecnologia, obtendo resultados satisfatórios comparados com método já existente que forneciam dados e resultados fiáveis.

Corrêa (2010) aplica a videogrametria para estudar a marcha humana, comparando com o modelo virtual criado para exemplificar a movimentação do corpo humano, sendo que este estudo tinha como objetivo a medição de ângulos entre os diferentes membros do corpo humano quando este estivesse em marcha.

Os resultados obtidos com o sistema de videogrametria neste estudo foram satisfatórios apresentando um erro médio de 3.1° entre os sistemas de medição.

Dias (2011), aplica a videogrametria para avaliar o comportamento mecânico do polímero PTFE sujeito a diferentes taxas de deformações, comparando os seus resultados como os obtidos através do ensaio da tração de provetes de PTFE, o carregamento aplicado ao provete no ensaio de tração foi efetuado de forma que a taxa de deformação fosse constante no tempo a fim de obter resultados mais fáceis de comparar entre sistemas.

Este estudo obteve resultados satisfatórios, apresentando maior variação entre os dados registados pelos dois sistemas quando as deformações eram baixas, mas quando o provete ultrapassasse os 80% da deformação total os dados entre os sistemas eram idênticos.

Santos (2012), utilizou a videogrametria para avaliar a ductilidade de estruturas de betão armado, efetuando assim uma medição contínua de deslocamentos e deformação a quando do ensaio de vigas de betão armado, comparando os resultados deste com os obtidos através de dos equipamentos tradicionais existentes.

Após análise dos dados obtidos concluiu que os resultados obtidos foram muitos satisfatórios, na medida em que o sistema não é intrusivo na estrutura, é possível analisar um grande número de pontos do elemento em questão e apresenta uma resolução de 0,1 px (pixéis), o que na prática é como ter duas réguas perpendiculares, uma horizontal e outra vertical, com um número de intervalos igual a 10 vezes o número de pixéis da câmara de filmar, em cada uma das direções.

2.3.1 CAPTURA E FILMAGEM DE IMAGEM

A captura de uma imagem fotográfica é obtida através de câmaras ou sensores que captam a luz. A luz é uma radiação eletromagnética que possui um determinado comprimento de onda e que é difundida no espaço em todas as direções.

A captura de uma fotogrametria é feita como uma forma geométrica retangular em que cada posição deste retângulo é possível obter informação da cor correspondente a esse ponto. De uma forma mais matemática, a fotografia é uma função contínua bidimensional na horizontal e na vertical, isto é, em xx e yy , com domínio igual aos limites da imagem.

Para melhor armazenar imagem esta deve ser desfragmentada, cada fragmento destes corresponde a um pixel [px] (na literatura de língua inglesa, *Picture Element*). O número de total pixéis de uma imagem é igual às dimensões da imagem, isto é, quanto maior for a resolução da imagem mais pixéis esta apresenta.

Sendo a cor um conceito importante na imagem digital, visto que, quando se fala de cor de uma forma mais física, estamos a nos referir à luz. A luz pode ser caracterizada pela distribuição espectral, sendo que esta também é moldada matematicamente como função unidimensional para cada comprimento de onda. Uma vez que o que interessa é a cor, assim é fundamental conhecer a sensibilidade do olho humano para os diferentes espectros de luz. Na Figura 2.11 é apresentado o espectro eletromagnético e respetivos comprimentos de onda, sendo que a zona visível identificada é a zona que o olho humano consegue detetar.

Segundo Scuri (2002), a luz que o ser humano consegue identificar tem comprimentos de onda entre 380nm e 780nm, onde a luz de 380nm até 500nm parece azul, de 500nm a 600nm parece verde e de 600nm até 780nm parece vermelha.

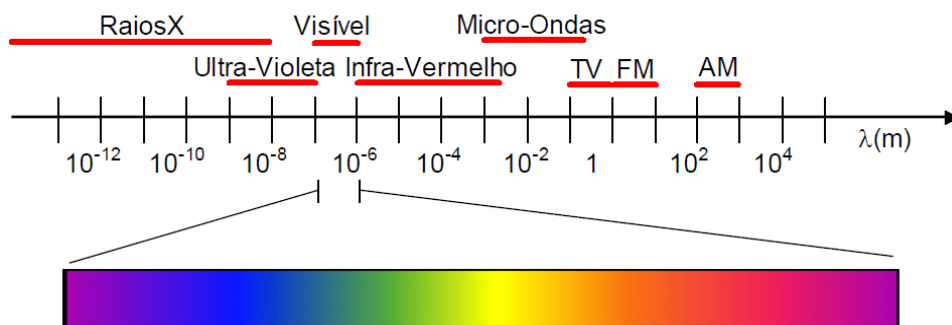


Figura 2.11 - Espectro Eletromagnético (SCURI,2002)

A partir do sistema de cores RGB, onde (R) a cor vermelha, (G) a cor verde e (B) a cor azul, é possível estimar a intensidade de cor cinzenta.

O vídeo tem como finalidade assegurar a continuidade da imagem ao longo do tempo, isto é, o vídeo não é mais do que uma sequência de imagens, igualmente espaçadas no tempo, associadas a um sinal de som, Santos (2011). Analogamente à fotografia, no vídeo é necessário uma discretização do espaço, da cor e do tempo com o intuito de armazenar digitalmente o vídeo.

A frequência de aquisição de uma imagem é muito variável e depende da capacidade do ser humano distinguir imagens consecutivas, sendo utilizadas, habitualmente, frequências próximas dos 50 Hz para equipamentos usuais do dia-a-dia.

2.3.2 DISTORÇÃO E CORREÇÃO DA IMAGEM

Toda a imagem digital captada apresenta ligeiras distorções da imagem real. O processo da correção da distorção é, normalmente, designado por calibração da imagem, de acordo com Santos (2012).

A existência de lentes na máquina fotográfica ou de filmar pode originar uma deformação interna ou externa da imagem, à medida que nos afastamos do centro da imagem, sendo esta, uma das principais causas da distorção Valença (2006).

A fim de eliminar tais problemas, é necessário conhecer as características do equipamento, a distância e os ângulos de filmagem relativamente ao objeto a medir, aplicando à imagem a transformação teórica inversa que originou a distorção. Caso a imagem contenha coordenadas específicas, basta aplicar o conhecimento vetorial e fazer coincidir os valores da imagem deformada e da imagem original a fim de eliminar a distorção.

2.3.3 CÁLCULO DOS DESLOCAMENTOS ENTRE IMAGENS

A partir de modelos matemáticos e estatísticos é possível calcular deslocamentos entre duas imagens, sendo este processo designado por correlação digital da imagem (da língua inglesa DIC- *Digital Image Correlation*).

O fundamento do DIC consiste em fazer correspondência entre duas imagens idênticas deslocadas entre si, sendo esse deslocamento a grandeza que se pretende determinar, de forma a obter a ideal correlação, isto é, a melhor semelhança entre duas imagens e avaliar o deslocamento que a imagem deformada apresenta em relação à imagem original.

Santos (2012), apresenta a equação 2.1, que permite calcular o coeficiente de correlação cruzada e que através desta é possível calcular deslocamentos entre imagens e procurar o seu máximo.

$$C(u, v) = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x, y) - f_m][g(x+u, y+v) - g_m]}{\sqrt{\left(\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x, y) - f_m]^2 \right) \left(\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [g(x+u, y+v) - g_m]^2 \right)}} \quad [2.1]$$

Onde: $C(u, v)$ é o coeficiente de correlação cruzada, N e M são as dimensões na horizontal e vertical das imagens, $f(x, y)$ e $g(x+u, y+v)$ são os valores de cada imagem na escala de cinzentos, f_m e g_m os seus valores médios e, x e y os deslocamentos que entre duas imagens. Sendo os deslocamentos verdadeiros, u e v , os valores que maximizam a função.

É, de salientar que a mínima unidade de deslocamento entre imagens é um pixel, visto esta ser a menor unidade da imagem.

2.3.4 REDUÇÃO DO RÚIDO DOS RESULTADOS

O ruído detetado na imagem advém das oscilações aleatórias no sinal recolhido.

As câmaras de filmar apresentam componentes analógicas e digitais, como estas apresentam componentes analógicas é natural apresentar ruídos provenientes de várias componentes físicas do sistema. Na maioria dos casos, o ruído das câmaras de filmar são eliminados de uma forma analógica, caso não seja possível utilizar este tipo de filtro, são utilizados, filtros digitais, como por exemplo, filtros numéricos, Santos (2012).

Nesta dissertação, o ruído toma uma função importante como é constatável na seção 4.2.1, uma vez que é a partir destes que se calcula o intervalo de confiança do sistema de medição, recorrendo à função densidade de probabilidade gaussiana.

2.3.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO POR VIDEOGRAMETRIA

A medição através da videogrametria é um processo que deve satisfazer certas etapas, como já foi referido nas subseções anteriores. É, de salientar, nesta seção, o modelo que Santos (2012) desenvolveu para o sistema de medição por videogrametria para uma câmara comercial, como ilustra a Figura 2.12, que detalha as varias fases do processo da videogrametria.

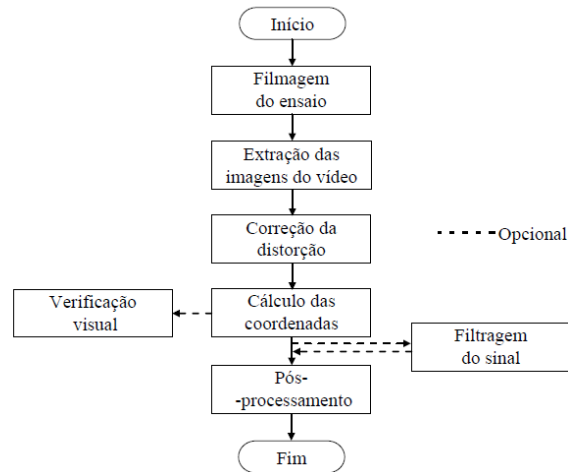


Figura 2.12 - Fluxograma para aplicação da videogrametria (Santos, 2012)

É evidente que este sistema é genérico uma vez que pode ser adaptado a diferentes casos de estudo consoante do objetivos e conclusões pretendidas dos mesmos. No âmbito desta dissertação em que o sistema disponibilizado pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), da Região Autónoma da Madeira (RAM), é o vídeo-extensómetro, a ordem de trabalhos é a mesma que esta descrita na Figura 2.12, sendo que neste caso todo este procedimento é efetuado pelo próprio equipamento e só é nos fornecidos os resultado processados.

CAPÍTULO 3

VÍDEO-EXTENSÓMETRO DO LREC

3.1 INTRODUÇÃO

O Laboratório Regional de Engenharia Civil da Região Autónoma da Madeira (LREC) é detentor de um sistema de medição por videogrametria designado por *Videoextensometer NG*, cuja sua versão é a 5.12.3.

Com base neste sistema que o LREC detém, foi proposto para este trabalho, a aplicação deste sistema de medição para ensaios de tração e compressão de materiais com auxílio dos equipamentos adequados, tendo como base que estes sejam realizados no futuro de uma forma não intrusiva, isto é, realizar os ensaios apenas com recurso ao vídeo-extensómetro sem aplicação de extensómetros externos (intrusivos ao material).

Para tal, são efetuadas medições por dois tipos de procedimentos, procedimento tradicional com auxílio de extensómetros e o procedimento com recurso ao vídeo-extensómetro, para posterior comparação de dados e validação dos mesmos.

Sendo a tensão máxima e a deformação última propriedades mecânicas importantes a conhecer nos materiais, estas têm de ser determinadas em ensaios, uma vez que estes, são

destrutivos e aplicados diretamente no material, surge a necessidade de criar sistemas de medição de extensões que não estejam em contacto com o material.

Sistemas óticos e extensómetros a laser foram nos últimos anos muitos usados, mas estes não possuem resolução suficiente para determinação exata das propriedades dos materiais a nível das pequenas deformações.

Devido a estas limitações, a empresa austríaca Messphysik GmbH, desenvolveu o vídeo-extensómetro com o princípio de: "*If it can be seen, then it can be measured*" (Se ele pode ser visto, então pode ser medido).

3.2 O SISTEMA "VIDEOEXTENSOMETER NG, VERSAO 5.12.3"

"O vídeo-extensómetro é um equipamento capaz de executar medidas de deformação da captura contínua de imagens da amostra durante o ensaio, usando uma ou mais câmaras de vídeo conectadas a um computador", de acordo com Dias (2011).

O sistema consiste na leitura de deslocamentos que ocorre no objeto de estudo. Tal deslocamento, é medido através de marcas realizadas no provete de ensaio, sendo a distância entre essas marcas, a posição no instantes inicial, ou seja, o comprimento de referência, como mostra a Figura 3.1.

Neste estudo foi utilizado uma câmara de filmar, um programa de processamento de imagem e conversão em ficheiro de dados, designado por *Videoextensometer NG*, equipamento para ensaios de tração de aços, utilizando o programa *DionPro* e um extensómetro externo, e para ensaios de compressão de betão foi utilizado o programa *Proteus* e um par de extensómetros externos e, ainda, equipamentos auxiliares aos ensaios nomeadamente tripé para a câmara e iluminação quando necessário.

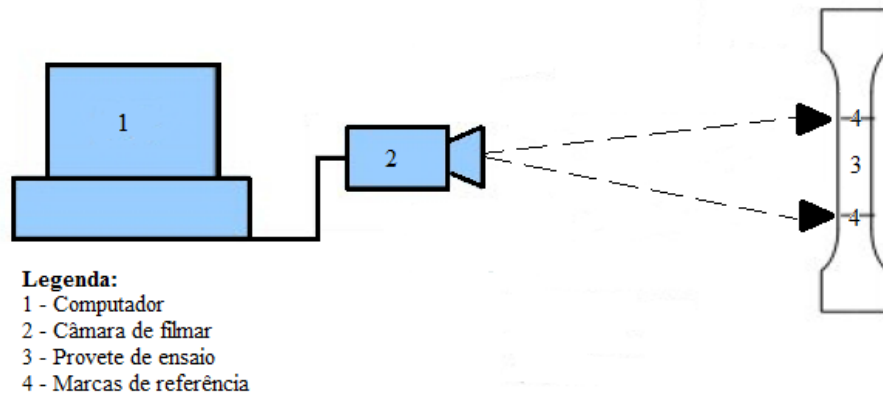


Figura 3.1 - Esquema de funcionamento do vídeo-extensômetro

Sendo o princípio básico do sistema de medição o contraste de cores, é necessário que as marcas tenham cor suficiente para serem captadas na imagem. Aquando dos ensaios de tração e compressão, as marcas são seguidas pelo programa e medindo a distância em pixéis entre elas, na imagem capturada. As distâncias medidas são captadas em tempo real, convertidas e registadas de acordo com os parâmetros configurados no programa *Videoextensometer NG*.

Dependendo se o programa é mais ou menos sofisticado, os parâmetros a medir são o tempo, o comprimento, alongamento e deformação axial, comprimento, alongamento e deformação transversal, coeficiente de *Poisson*, frequência, entre outros parâmetros.

Note-se que para o caso de se pretender efetuar medição axialmente e transversalmente é necessário que o sistema de medição detenha pelo menos duas câmaras a registar, uma em cada sentido.

No capítulo anterior foram introduzidos aspetos gerais nos sistemas de medição por videogrametria, abordando as suas componentes físicas e intrínsecas, ou seja, o seu *hardware*.

Assim, nesta seção é descrita de uma forma detalhada todo o funcionamento e caracterização dos sistemas de medição do vídeo-extensômetro que o LREC detém.

3.2.1 O HARDWARE DO SISTEMA

O sistema é constituído por uma câmara de filmar, lentes e um computador com *hardware* e *software* adequado.

A câmara de filmar, Figura 3.2, é uma câmara monocromática constituída por uma grande gama de filtros que facilmente ajusta a imagem captada à imagem real.

Esta câmara é equipada a um sistema de alta precisão CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) que permite grande precisão através de chipes que simulam as células fotossensíveis do olho humano, células estas que permitem a distinção das três cores primárias, vermelho, azul e verde (Sistema RGB) e a distinção entre a cor preta e a cor branca, isto é, a escala de cinzentos.



Figura 3.2 - Câmara de filmar do sistema de medição por vídeo-extensómetro

Esta câmara capta a imagem em sinal vídeo PAL, que de seguida o converte no formato digital de 8 bits e em simultâneo gera uma imagem com resolução de 768 x 576 pixéis.

Para a realização dos ensaios, esta câmara de filmar é facilmente adaptável a um tripé convencional, para não haver vibrações aquando da sua gravação.

A lente deste sistema é uma lente de alta precisão de fácil e direta montagem na câmara.

O processamento do vídeo é feito através de qualquer computador que possua as seguintes características mínimas:

- Processador Pentium IV
- 128 Mb de RAM
- 3 ^{1/2} unidade de disquetes
- 20Gb de disco rígido
- Drive de CD

- 2 Portas RS232 +1 Porta paralela
- Placa gráfica VGA de 32Mb
- Monitor a cores VGA
- Teclado e rato
- Sistema Operativo Microsoft® Windows2000/XP™

Caso se pretenda efetuar leituras de dados do vídeo-extensómetro juntamente com os dados do equipamento de tração e compressão e efetuar o seu cruzamento, é necessário que o computador em que está ligado o vídeo-extensómetro detenha varias portas RS232 para transferir os dados.

Caso se pretender ligar mais do que uma câmara de filmar ao sistema de cruzamento de dados tem de ser de alta aceleração de interface, que seja capaz de atingir velocidade de 460800 bits/segundo de transferência.

3.2.2 O SOFTWARE DO SISTEMA

Como é visível na Figura 3.3, a janela de boas vindas do vídeo-extensómetro é dividido em várias partes, seguidamente descritas.

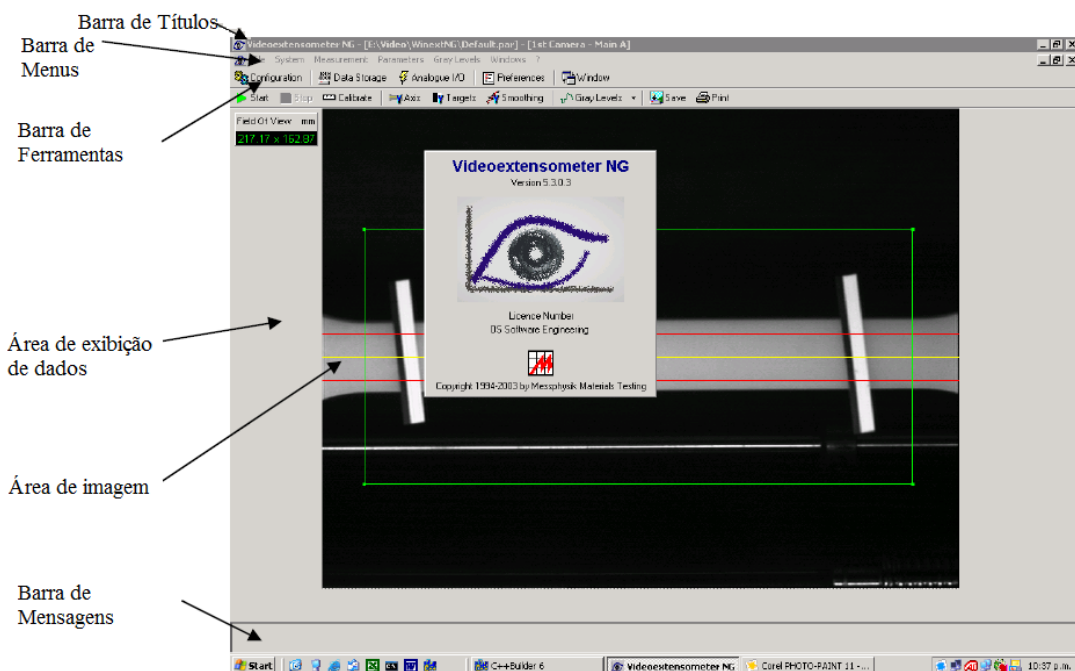


Figura 3.3 - Janela de boas vindas de *Videoextensometer NG*

A barra de títulos fornece detalhes sobre a localização e o nome atual do parâmetro a medir bem como o nome do usuário e a câmara que opera.

Os menus contendo comandos individuais de caracterização e programação encontram-se na barra de menus. Através destes comandos individuais que são dadas indicações ao programa para realizar algumas tarefas, tais como guardar os parâmetros medidos em ficheiro de texto, seleccionar os parâmetros que se pretende medir (definindo número de cada decimais), guardar e imprimir imagens, entre outros.

É no *Measurement Menu* (Menu medição) que é efetuado o início e fim do ensaio, bem como a calibração do sistema para a distância que pretendemos medir por base, fazendo, assim, o reconhecimento dos alvos pretendidos.

O *Parameters Menu* (Menu de Parâmetros) é sem dúvida o menu mais importante a ter em consideração quando preparamos um provete para ensaio. Neste menu que definimos o tipo de ensaio que pretendemos efetuar, como por exemplo, ensaio tensão-deformação ou de flexão e também definir o sentido em que queremos medir, podendo as medições serem realizadas axialmente (no sentido da carga) ou transversalmente (no sentido transversal à carga), como mostra a Figura 3.4.

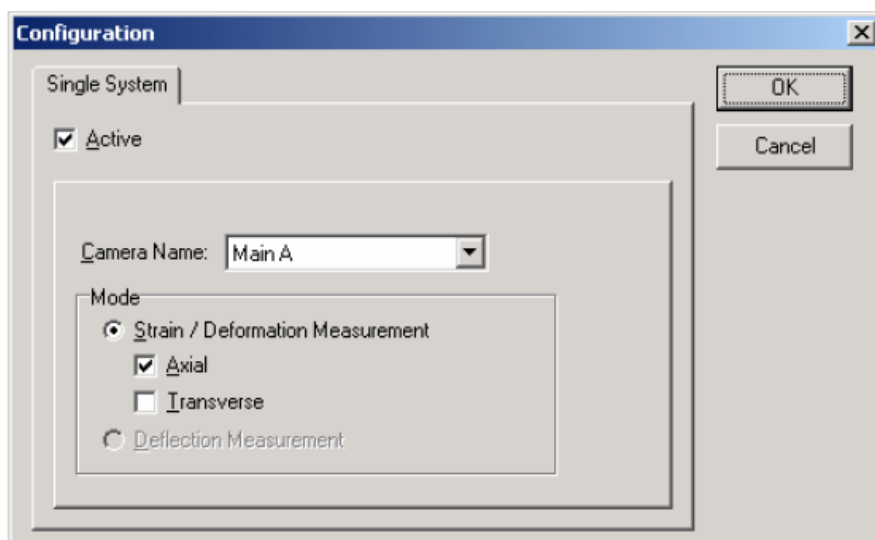


Figura 3.4 - Janela de definição do tipo de ensaio

No submenu *Settings* do menu anteriormente referido é definido a configuração do eixo, como orientação, o número de eixos, bem como a medição de seções separadamente, definindo os parâmetros do alvo, Figura 3.5, como a cor (se a medição for realizada do preto para o branco ou do branco para o preto), se o objeto é preto ou branco e se tem padrões. Por fim, definimos ainda, a precisão do sistema, isto é, tentamos reduzir o ruído do sinal em tempo real através da definição de dados no tempo em milésimas de segundo.

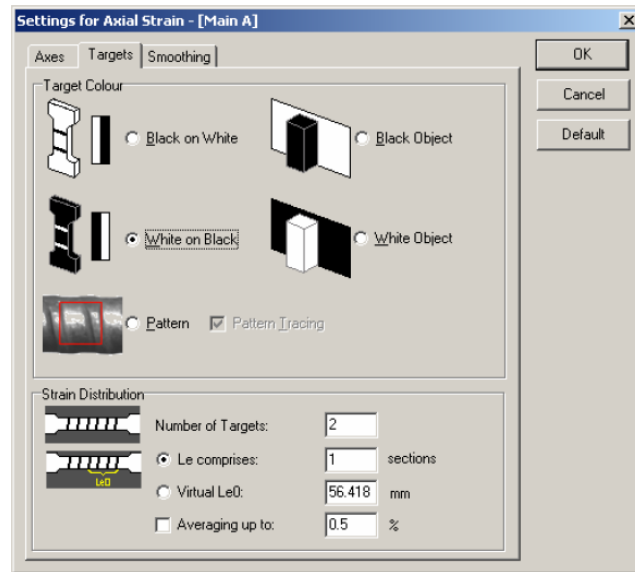


Figura 3.5 - Definição dos parâmetros do alvo

O menu *Grey Levels* (Níveis de cinzentos), é uma ferramenta útil, uma vez que através deste consegue-se definir a abertura do diafragma da lente e ajustar a iluminação corretamente. Através do gráfico de níveis de cinzentos e da sua percentagem, é definido o ponto ideal para realização das medições, isto é, o ponto onde há mais contraste.

A barra de ferramentas agrupa botões que dão acesso direto aos comandos localizados em submenus. O sistema *Videoextensometer NG* possui duas barras de ferramentas separadas, uma para os parâmetros gerais e outra para a câmara de filmar.

Na área de exibição de dados aparece os valores em tempo real que estão a ser medidos ao longo do ensaio. Nem todos os parâmetros impostos ao sistema para medir aparecem nesta área, aqui apenas aparecem os que se pretende visualizar no instante, como por exemplo, tempo, frequência, deformações, alongamentos, entre outros. Cada um destes valores é visível em painéis diferentes, com referências ao seu símbolo e unidade de medição, representando o valor medido no instante.

Na área de imagem apresenta-se a imagem captada pelo vídeo-extensómetro, bem como todos os limites utilizados na medição das deformações, alongamento e frequências, bem como todos os parâmetros pretendidos.

A imagem nesta área é atualizada em tempo real a cada 100 milésimas de segundo (10Hz), é de referir que esta frequência nada tem a ver com a frequência em que são medidos os parâmetros pretendidos.

A caixa delimitada pelas linhas a verde, como é visível na Figura 3.2, delimita a zona onde queremos que se realize as medições, o sistema não efetua qualquer medição ou avaliação de qualquer ponto que não se encontre dentro destas caixa, mesmo que no decorrer do ensaio as marcas existentes no provete saiam desta caixa, este ensaio deve ser tomado como inválido, visto não haver leituras fora deste espaço.

As linhas a vermelho e amarelo que são apresentadas na Figura 3.2, servem como eixo de medição e devem estar sempre alinhadas com o provete, isto é, a linha amarela, deve coincidir com o centro geométrico do provete e as linhas vermelhas com a largura do mesmo. Todas estas linhas são ajustáveis com o cursor do rato, bastando clicar em cima da linha e ajustar ao pretendido.

Na barra de mensagens são exibidas todas as mensagens de aviso para um correto funcionamento com o vídeo-extensómetro, sendo estas mensagens sempre catalogadas com a hora que foi apresentada.

3.3 PREPARAÇÃO E TESTES INICIAIS PARA USO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO

A utilização do vídeo-extensómetro requer que a marcação no provete se apresente visível na imagem gerada durante todo o tempo de ensaio de tração, segundo Reis (2011).

É esta marcação que permite a medição da deformação e alongamento do provete ao longo do ensaio de tração e compressão.

Uma vez que este sistema de medição é um pouco desconhecido, em primeira instância e grande parte do tempo de realização da parte prática desta dissertação foi familiarizar-se com o sistema e todas as suas componentes e desenvolver um método para pôr em pleno funcionamento a medição do módulo de elasticidade em aços e betões com recurso ao vídeo-extensómetro.

Assim, neste subcapítulo é descrito todo o processo bem como todos os métodos desenvolvidos até atingir o método ideal para a determinação do módulo de elasticidade através do vídeo-extensómetro.

3.3.1 ENSAIOS INICIAIS EM AÇOS

A marcação de referência de medição no provete é uma etapa muito importante na realização de ensaios com recurso a videogrametria, deste ponto de vista, é a definição do tipo e da forma da marcação que apresenta o maior entrave ao uso desta técnica em medições em laboratório.

Na medição com recurso ao vídeo-extensómetro, a variação de contrastes existentes no provete é muito importante, uma vez que é a partir desta variação que é efetuada a medição de deslocamentos e deformações, surge assim, um obstáculo que é a realização de marcas que permitem verificar uma mudança de cor (contraste) visível no provete, para que a medição possa ser bem quantificável ao longo do ensaio.

Como os provetes de aço apresentam uma cor escura (cinzento escuro), sendo assim, a cor que melhor contrasta com esta, que é a cor branca. De tal forma que a primeira opção analisada é efetuada para realizar um teste de preparação foi a realização das marcas com o uso de tinta branca, definindo, assim, o comprimento útil ou de referência para o ensaio que foi considerado com o extensómetro da máquina de tração que é de 100mm, como mostra a Figura 3.6.



Figura 3.6 - Marcas de referencia do varão de aço

Uma vez que a comparação da deformação medida pelo vídeo-extensómetro ao longo dos vários ensaios de teste em aços, com este tipo de marca, apresentava semelhantes deformações recolhidas pelo extensómetro da máquina de tração, com apenas ligeiras variações devido a vibrações existente no provete, aquando do ensaio e de ruído da imagem, como é visível na Figura 3.7. Não conseguindo prever outro tipo de marcação que melhor contraste fornecesse ao provete, foi assim utilizada este tipo de marcação ao longo da campanha experimental de aços, que é descrita no capítulo 5.

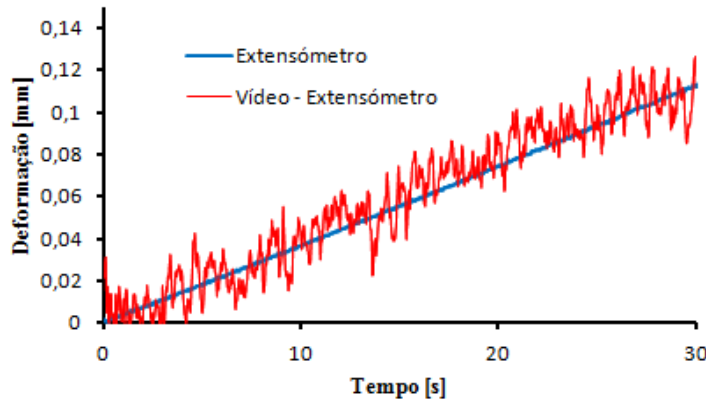


Figura 3.7 - Ruído da Imagem nos ensaios de teste de aços

3.3.2 ENSAIOS INICIAIS EM BETÃO

Analogamente aos ensaios iniciais de aços, no betão a marcação do comprimento útil ou de referência para o uso do vídeo-extensómetro é um obstáculo para a realização do mesmo.

Uma vez que o objetivo principal do trabalho é medir o módulo de elasticidade, isto é, medir pequenas deformações existentes no betão, definir marcas de referência apresentam uma maior importância, uma vez que esta está sujeita a menores deformações e tensões em fase elástica comparativamente ao aço.

No betão efetuaram-se vários tipos de marcação nos provetes a fim de determinar o modelo que melhores resultados oferecia a nível de sinal captado. O primeiro caso estudado recorreu-se a cliques metálicos colados ao provete para realização das marcas de referência, este método não foi muito desenvolvido, visto que é difícil efetuar o alinhamento dos cliques existentes nas laterais do provete, e assim, o sistema não conseguiria fazer o reconhecimento das marcas na perfeição, isto é, reconheceria 4 marcas em vez das duas pretendidas, havendo oscilações do sinal entre as várias marcas, efetuando uma leitura errónea.

Outro problema presenciado neste método foi a colagem dos cliques ao betão, isto é, após a colagem dos cliques ao betão, com o recurso a uma cola própria para o efeito, verificou-se que quando submetido ao ensaio de compressão e devido às deformações do betão, a cola não acompanha tais deformações, sendo desmembrado do provete.

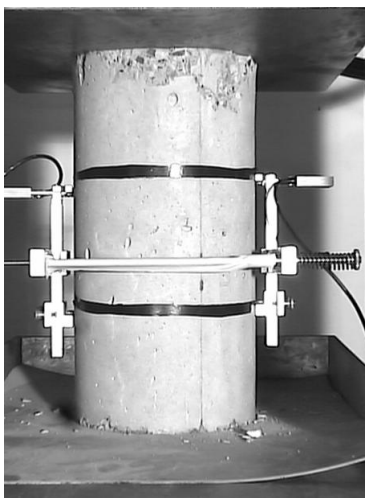
O segundo método testado consistiu em fazer a marcação da linha de referência com um marcador preto, este tipo de marcação em primeira estância pareceu ser um bom método visto ser bem diferenciável da cor do betão (bom contraste), só que na altura do teste com vídeo-

extensómetro, notou-se que com o passar do tempo o betão absorvia parte do pigmento ficando as marca mais claras, não havendo grande variação de contraste entre o betão e as marcas de referência. Devido a este fator, o sistema muitas vezes não detetava as marca para posterior leitura de dados.

Uma vez que o principal problema do método anterior é a absorção do pigmento do marcador preto, pelo betão, em que as marcas de referência ficavam mais claras, optou-se em efetuar as marcas com recurso a uma fita isoladora preta, como ilustra a Figura 3.8 a). Assim, tal pigmento já não era absorvido, sendo verificado o contraste das cores ao longo do ensaio.

No entanto, este método não foi o melhor porque em provetes provenientes de cura húmida, a fita não colava, isto é, ao longo do ensaio esta descolava-se, induzindo oscilações erróneas. De toda a forma em provetes de cura seca em que a fita se mantinha colada ao longo do ensaio, foi observado em vários provetes que a existência de imperfeições (vazios existentes) na face do provete influenciava a variação de contrastes, induzindo, muitas vezes, a erros na calibração e definição das marcas de medição.

Assim, a outra solução realizada para eliminar os contrastes existentes nas imperfeições da superfície do betão, foi pintar o provete de preto, no seu todo, com recurso a um *spray*, deixando por pintar as marcas de referência com o auxílio de uma fita de pintor, ver Figura 3.8 b). Este método foi testado em vários provetes, através deste método foi constatado que em todos os provetes, o sistema detetava bem as referencias marcadas, para calibração do sistema e medição por vídeo-extensómetro dos parâmetros pretendidos.



a) Marcação com fita isoladora preta



b) Marcação com *spray* preto

Figura 3.8 - Tipos de marcações testadas nos provetes de betão

Após a análise dos dados provenientes do vídeo-extensómetro com o método de marcação anteriormente referido e com os dados provenientes do extensómetro que os transmite à prensa hidráulica, verificou-se que a deformação ao longo do tempo do ensaio, era semelhante, tendo ligeiras variações devido ao ruído existente na câmara e vibrações no provete aquando do carregamento, como se verifica na Figura 3.9. Assim este método de marcação foi utilizado para marcar todos os provetes da campanha de ensaios de betão descritos no capítulo 6.

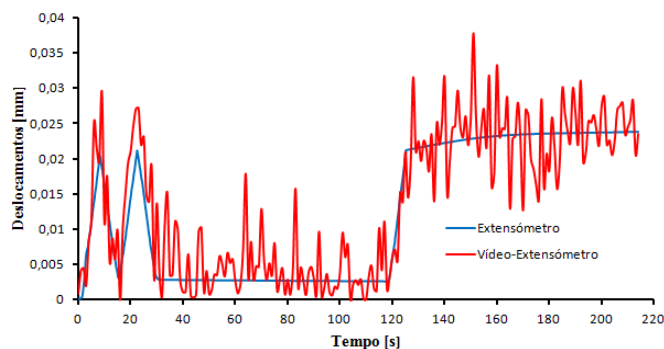


Figura 3.9 - Ruído da Imagem nos ensaios de teste do betão

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi descrito o sistema de medição por vídeo-extensómetro que o LREC detém para realização de ensaios. Este sistema além de ter várias aplicabilidades também pode ser usado para determinar pequenas deformações em ensaios de materiais.

É, de salientar que este método tem menores trabalhos envolvidos na determinação do módulo de elasticidade de aços, uma vez que a preparação dos provetes é muito mais fácil e consiste apenas na realização de duas marcas distanciadas a 100mm com tinta corretora. Por sua vez, no betão o procedimento é mais moroso, porque é necessário pintar o provete com *spray* e aguardar que este seque para então a realizar o ensaio.

A aplicação dos dois sistemas em conjunto (vídeo-extensómetro e extensómetro externo) é outra vantagem deste ensaio, uma vez que os dados podem ser comparados, gerando, assim uma maior fiabilidade nos resultados obtidos.

CAPÍTULO 4

TRATAMENTO DE DADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Como qualquer sistema de monitorização, a aquisição de dados executadas pelo vídeo-extensómetro têm de ser tratadas com o intuito de aumentar a eficiência na interpretação dos mesmos com o comportamento real.

Nesta seção são descritos as ferramentas desenvolvidas para o tratamento de dados adquiridos pelo vídeo-extensómetro e pelo extensómetro (técnica tradicional), aquando ensaiados provetes de betão e de aço, tendo estes como objetivo a determinação do módulo de elasticidade.

Nestes modelos desenvolvidos foram aplicados filtros estatísticos e probabilísticos, de forma a tratar os resultados, eliminando parte do ruído do sinal, vindo do sistema de medição *Videoextensometer NG*.

Foi igualmente quantificado a resolução do sistema de medição e a validação do mesmo em situação controlada.

4.2. METODOLOGIA UTILIZADA PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO SINAL AO LONGO DO TEMPO

Com base nos dados adquiridos pelo *software Videoextensometer NG*, houve necessidade de os tratar e acoplar para que estes fornecessem informação de fácil percepção e interpretação.

4.2.1 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS RESULTADOS E RESOLUÇÃO DO SISTEMA NO TEMPO

A fim de avaliar a estabilidade dos resultados no tempo procedeu-se à determinação da resolução do sistema de medição por vídeo-extensómetro. Esta avaliação assenta na análise dos erros observados na medição da distância entre dois pontos fixos, distanciados a 100 mm.

Para a realização deste objetivo colocou-se a câmara de vídeo do sistema, com resolução 768 x 576 pixéis a uma distância do provete marcado de 800 mm (menor distância possível para os ensaios de aço e betão, devido à logística dos equipamentos de ensaio).

Estas distâncias quer a nível dos pontos fixos, quer a nível do afastamento da câmara ao objeto foram mantidas constantes ao longo dos ensaios curto, médio e longo, de 1 (um) minuto, 30 (trinta) minutos e 2 (duas) horas, respetivamente.

Preparou-se um ficheiro de Excel que tem como função a leitura dos dados de ficheiro de texto e eliminação da informação desnecessária para atingir os objetivos desta tese.

Ao dados em ficheiro de Excel é aplicado um filtro que faz a média dos valores em cada segundo, uma vez que a frequência de aquisição de dados não é constante nem controlável, não é possível aplicar filtros matemáticos clássicos, como a média móvel, por exemplo.

Na Figura 4.1, está representado a variação das distâncias medidas entre dois pontos fixos ao longo do tempo no ensaio curto, onde é visível o sinal com ruído, o sinal filtrado pelo filtro anteriormente mencionado e o desvio-padrão médio do mesmo.

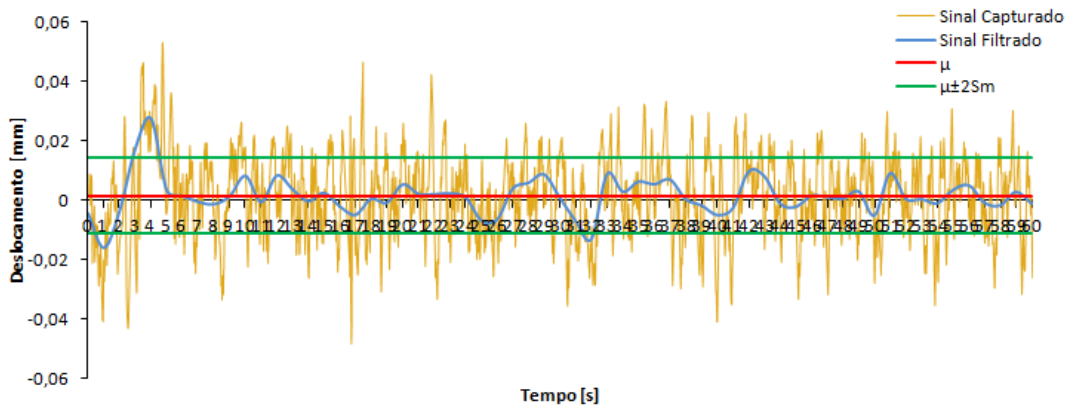


Figura 4.1 - Deslocamento [mm] medido entre dois pontos fixos no ensaio de curta duração. μ - Média, S_m - desvio-padrão

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram a estabilidade do sinal ao longo do tempo dos ensaios de média e longa duração, para a distância medida entre os dois pontos fixos.

Como era esperado, o sinal médio de deslocamentos ao longo do tempo, nos três ensaios, aproxima-se de zero, sendo que essa aproximação é tanto maior quanto maior for o tempo de ensaio. Este resultado advém de uma maior dispersão dos valores adquiridos. Assim, da análise das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, verifica-se que o sinal tem uma variação muito próxima da sinusoidal, o que significa mais uma vez, que o sinal é estável no tempo Santos (2012).

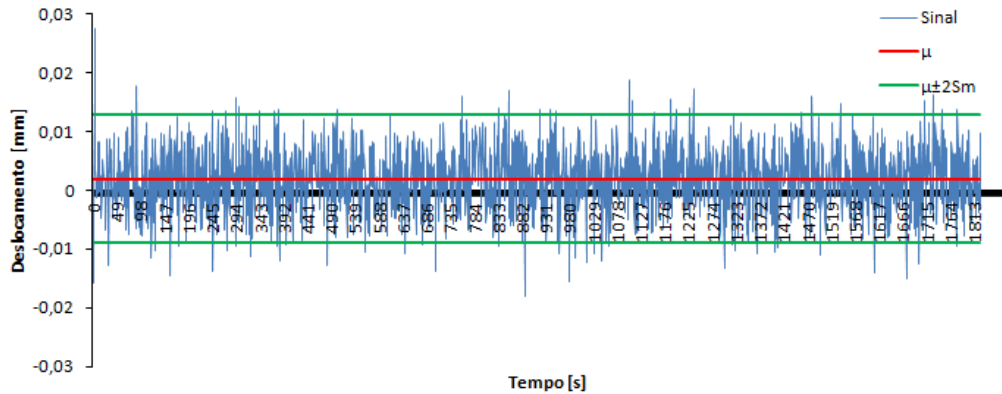


Figura 4.2 - Deslocamento [mm] medido entre dois pontos fixos no ensaio de média duração. μ - Média, S_m - desvio-padrão

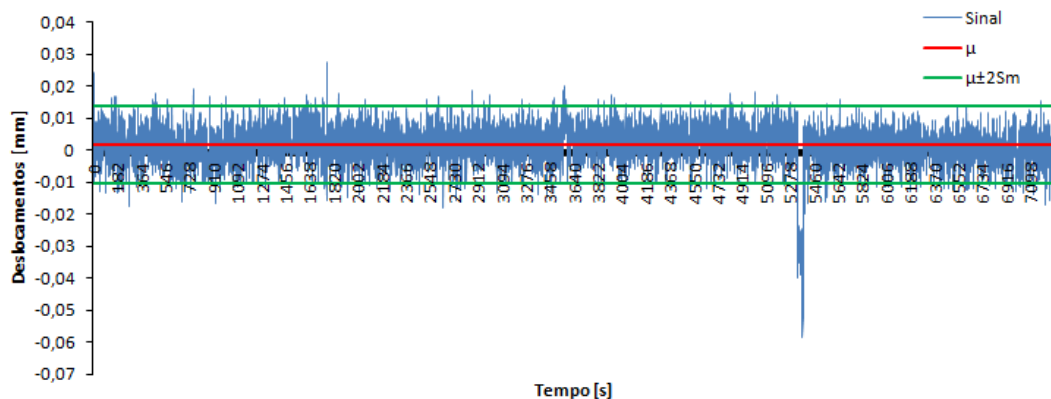


Figura 4.3 - Deslocamento [mm] medido entre dois pontos fixos no ensaio de longa duração. μ - Média, S_m - desvio-padrão

No Quadro 4.1 está presente o desvio-padrão, bem como a média dos deslocamentos nos ensaios de curta, média e longa duração, sendo constatável que a precisão dos resultados é maior no ensaio curto relativamente aos outros ensaios.

Uma vez que no ensaio curto a precisão é menor, assim, toma-se os valores deste para o cálculo do erro inerente ao equipamento de medição, que nesta dissertação foi tomado como metade do intervalo de confiança, para um grau de confiança de 95%, sendo então o valor da margem de erro 0,013 mm, como ilustra a Figura 4.4.

Quadro 4.1 - Média e desvio padrão do deslocamento [mm] entre os pontos fixos

Ensaio Longo		Ensaio Médio		Ensaio Curto	
μ	S_m	μ	S_m	μ	S_m
0,0018	0,0060	0,0019	0,0054	0,0016	0,0064

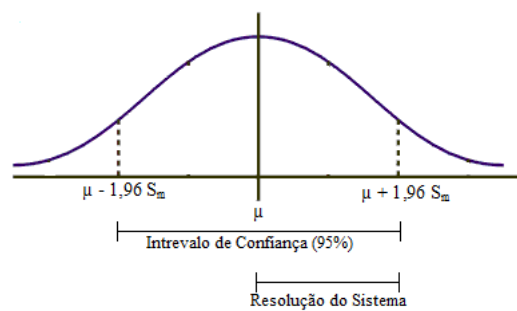


Figura 4.4 - Curva da representação do intervalo de confiança de 95%

Sendo que o cálculo do módulo de elasticidade é efetuado a partir de dois pontos, segundo as normas, Figura 4.5, no aço esse intervalo é de aproximadamente de 300 MPa de tensão, o que implica uma variação de deformação de 0,15 mm e no betão aos 28 dias é de 10 MPa de tensão, sendo a variação de deformação de 0,05 mm. Assim, constata-se que o sistema de medição por videogrametria detém um campo de leitura de 11 vezes maior para os aços e de 4 vezes maior para o betão, o que significa que os resultados podem não ser os melhores.

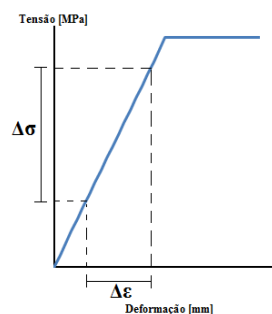


Figura 4.5 - Representação gráfica do modo de cálculo do módulo de elasticidade, segundo as normas

4.2.2 VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO EM CONDIÇÕES CONTROLADAS

Para validação do sistema de medição, efetuou-se a comparação dos resultados adquiridos ao pelo vídeo-extensómetro com os dados recolhidos através do extensómetro aplicado no mesmo provete.

Foram realizados dois tipos de ensaios de validação, um para o aço, sendo usado um varão de diâmetro de 16 mm e com comprimento de 700 mm, ensaiado à tração e outro para um provete de betão de forma cilíndrica de 300mm de altura e 150mm de diâmetro ensaiado à compressão.

Na Figura 4.6, constata-se a boa conformidade entre o sinal medido pelo extensómetro e o sinal filtrado medido pelo vídeo-extensómetro na fase elástica do ensaio à tração do provete de aço, sendo as curvas coincidentes nesta fase, o que significa que o sinal medido tem exatidão mas não tem precisão, aquando da medição do módulo de elasticidade em aços. É, ainda constatável, nesta figura que após a fase elástica o sinal tem grandes variações. Este facto acontece, uma vez que após a fase elástica o extensómetro de base 100mm é retirado do provete e a leitura dos deslocamentos passa a ser efetuada através das garras do equipamento, tendo esta uma base de 400mm (distância entre garras do equipamento de tração). Devido a uma má configuração do *software DionPro*, a leitura dos dados é sempre realizada com base de 100mm. Desta forma, para obter a extensão última de um provete de aço, após a fase elástica é necessário converter o valor medido que se apresenta em base de 100mm para um valor de base de 400mm.

Assim, na curva representada a azul a deformação última esta errada uma vez que esta é medida pelo extensómetro, mas salienta-se que em fase elástica os valores de deformação estão corretos.

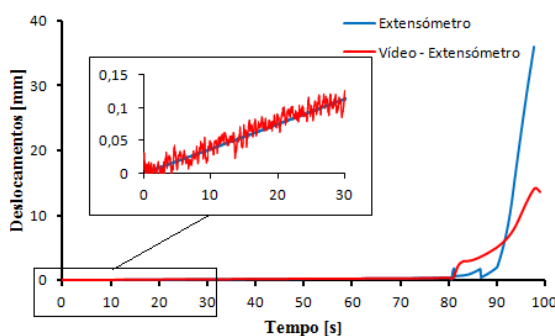


Figura 4.6 - Comparação do vídeo-Extensómetro e o extensómetro no ensaio de aço (varão de 16mm)

Na Figura 4.7, é verificada a comparação entre o sinal medido do extensômetro e o vídeo - extensômetro medido através do vídeo-extensômetro para o betão, onde é constatável que as curvas são coincidentes, o que significa que o sinal medido tem exatidão , mas não é preciso, aquando da medição do módulo de elasticidade em betão, uma vez apresentar ruído.

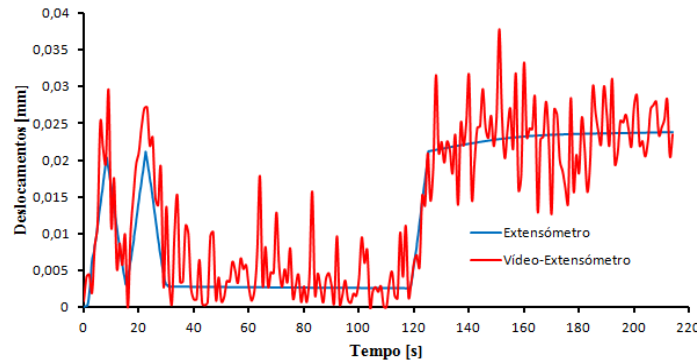


Figura 4.7 - Comparação do vídeo-Extensômetro e o extensômetro no ensaio de betão (provete cilíndrico)

4.3 FERRAMENTAS DE CÁLCULO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO APLICADOS AOS MATERIAIS

Um dos grandes desafios deste trabalho foi a realização de ferramentas de cálculo que permitissem, através dos dados adquiridos pelo vídeo-extensômetro, transformá-los em informação útil para o cálculo do objetivo principal desta dissertação, sendo este, a determinação do módulo de elasticidade.

Através dos parâmetros medidos pelo vídeo-extensômetro que se apresentam no Quadro 4.2, foi desenvolvido em formato Excel uma folha de cálculo que permite que, a partir destes parâmetros e da conhecida velocidade de carregamento dos respetivos equipamentos de ensaio dos materiais, seja possível determinar o módulo de elasticidade, sendo este definido pela relação tensão deformação do material pela Equação 4.1.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)}{(\varepsilon_b - \varepsilon_a)} \times 10^{-3} \quad [4.1]$$

Onde: σ_a é a tensão inicial aplicada, em [MPa], σ_b é a tensão final, em [MPa], ε_a é a deformação inicial para a tensão inicial em [%], ε_b é a deformação inicial para a tensão final em [%] e E é o módulo de elasticidade do material expresso em [GPa].

Quadro 4.2 - Parâmetros medidos pelo vídeo-extensômetro

Símbolo	Descrição	Unidades	Equação
Time	Tempo	Segundos [s]	
L	Comprimento inicial	Milímetros [mm]	
dL	Deslocamento	Milímetros [mm]	
EpsL	Deformação Axial	Porcentagem [%]	$EpsL = \frac{dL}{L} \times 100$
F	Frequência	Hertz [Hz]	

Uma vez que os dois sistemas recolhem dados em simultâneo, só com instante iniciais diferentes, foi necessário mover a escala de tempo do vídeo-extensômetro para esta corresponder co a escala do extensômetro e só assim podermos ter valores comparáveis. Esta tarefa foi realizada através de um cronómetro que quantificou o tempo que demorou entre iniciar o sistema de vídeo-extensômetro e o sistema de vide-extensômetro, sendo depois este tempo retirado ao início do tempo do vídeo-extensômetro.

4.3.1 FERRAMENTA DE CÁLCULO DE AÇOS

Uma vez que o vídeo-extensômetro não faz leituras de carga nem de tensão, estas são determinadas a partir dos valores de velocidade de carregamento dos equipamentos de ensaio.

O desenvolvimento desta folha de cálculo teve por base aplicar um média de segundo a segundo aos parâmetro a estudar e depois fazer uma ligação aos valores de força e tensão aplicadas no ensaio ao longo do tempo, estes valores são retirados dos parâmetros do equipamento *DionPro*.

Seguidamente, é efetuado um gráfico de tensão-deformação, Figura 4.8, a partir do qual é possível verificar a fase elástica, tensão de cedência (σ_y), tensão rotura (σ_r) e tensão última (σ_u) do cada provete e as respetivas extensões.

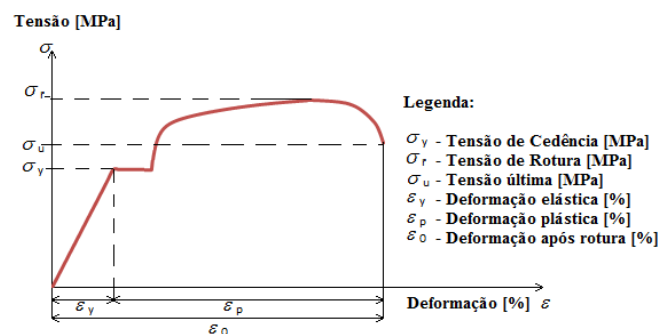


Figura 4.8- Gráfico da curva de ensaio de tração do aço

4.3.2 FERRAMENTA DE CÁLCULO DE BETÕES

De igual forma aos aços, o vídeo-extensómetro não faz leituras de carga nem de tensão no betão, assim, estes valores são determinados a partir dos valores de velocidade de carregamento dos equipamentos de ensaio.

O desenvolvimento desta folha de cálculo teve por base aplicar um média de segundo a segundo aos parâmetros a estudar e depois fazer uma ligação aos valores de força e tensão aplicadas no ensaio ao longo do tempo, estes valores são retirados dos parâmetros do equipamento *Proteus*.

Seguidamente, é efetuado um gráfico de tensão-deformação para o betão, Figura 4.9, a partir do qual é possível verificar a fase elástica, a tensão rotura (σ_{cr}), a tensão elástica (σ_{cy}), que corresponde a $0,3x \sigma_{cr}$ e a tensão crítica (σ_{cc}), que corresponde a $0,8x \sigma_{cr}$ do cada provete e as respetivas deformações (ε_c).

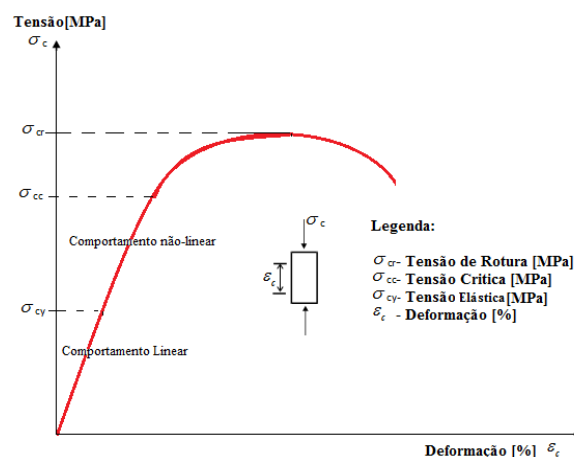


Figura 4.9 - Gráfico da curva de ensaio de tração do aço

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi desenvolvido e tratado com sucesso o tratamento dos dados provenientes do sistema de medição por vídeo-extensómetro para determinação do módulo de elasticidade em aços e betões. Tendo este sistema um erro associado de 0,013mm para o intervalo de elevada confiança de 95%.

Este sistema de aquisição de dados para a determinação do módulo de elasticidade apresenta boas condições para ser aplicado em diversos campos, e em diversos materiais, nas diversas

áreas de engenharia. Uma vez que este método não é intrusivo, permite adquirir uma grande gama de dados, sendo ajustável a quaisquer circunstâncias.

Como foi verificado este sistema apresenta uma boa exatidão nos resultados, mas não é um sistema preciso na medição de resultados ao longo do tempo, visto apresentar muito ruído. Esta conclusão tornou-se importante para o estudo do módulo de elasticidade destes materiais bem como a extensão total dos varões de aço, uma vez que, o *software* do equipamento apresenta um erro.

A criação de ferramentas de cálculo com base nos dados recolhidos no vídeo-extensómetro e nas características de aplicação de carga pelos equipamentos, nomeadamente a velocidade de aplicação, permitiu que se obtivesse os valores de tensão e de força aplicadas aquando do ensaio. Estes valores não eram possíveis de quantificar de forma direta através do sistema do vídeo-extensómetro.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO À MEDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE VARÕES DE AÇO

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será abordado numa perspectiva prática a medição do módulo de elasticidade em varões de aço, sendo este definido pela relação entre a tensão e a deformação.

Na medição do módulo de elasticidade procedeu-se com a utilização dos dois sistemas de medição abordados nesta dissertação, isto é, pelo vídeo-extensómetro e pelo extensómetro externo ligado a máquina de tração a fim de comparar os resultados e avaliar se o sistema de medição por vídeo-extensómetro pode ser aplicado em detrimento do extensómetro externo, não havendo, assim, intrusão no material quando se pretende estudar esta propriedade mecânica.

Para o conhecimento dos parâmetros de aplicação de carga, como a velocidade, nos ensaios de tração de aços, é fundamental efetuar este ensaio segundo uma norma, uma vez que estas oferecem todas informações para correta realização do mesmo e uniformização em todo o espaço nacional ou europeu.

Neste capítulo, além da serem aplicados os conhecimentos desenvolvidos nos capítulos anteriores nomeadamente no capítulo 3 e 4, é efetuada um breve descrição do procedimento de ensaio de tração de aço, segundo a norma NP EN 10002-1 2006 e o procedimento de ensaio para utilização do vídeo-extensómetro.

Por fim, são aplicados os modelos de cálculo desenvolvidos para análise dos dados e, ainda, discutidos os resultados obtidos.

5.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO

Nesta secção será abordado o procedimento realizado em laboratório, para a realização dos ensaios. Com a finalidade de determinar e comparar o módulo de elasticidade entre a técnica tradicional, extensometria, e a vídeo-extensometria.

Para determinar o módulo de elasticidade em aço recorreu-se à norma vigente NP EN 100002-1, ao equipamento *DionPro* e o vídeo-extensómetro, de forma a obter os resultados de deslocamentos, ao longo do tempo, e assim determinar a deformação existente no provete de aço.

De modo a clarificar a norma referida, nesta secção serão descritos, pormenorizadamente, todos os procedimentos realizados em laboratório, desde a inspeção, marcação, ensaio e observação após rotura do varão.

Para a realização da campanha dos ensaios à tração de aços foram utilizados vários provetes com diversos diâmetros, sendo que os diâmetros estudados são os mais correntes em obra, de acordo com o Quadro 5.1.

De forma a obter dados credíveis houve a preocupação de realizar, pelo menos, em cada diâmetro nominal, três ensaios. Devido à indisponibilidade de material na obra foram recolhidas as amostras, os dois varões de maior diâmetro apenas foram realizados dois ensaios. A opção da realização de vários ensaios para cada diâmetro, teve por base, realizar uma média entre os vários, com o intuito de obter um valor mais realista.

Quadro 5.1 - Diâmetros nominais e número de varões utilizados

Diâmetro nominal [mm] ϕ	Número de Varões utilizados no ensaio
6	3
8	3
10	3
12	3
16	3
20	3
25	2
32	2

De seguida, são descritos os passos a realizar na preparação dos provetes de ensaio antes de estes serem submetidos ao ensaio propriamente dito.

Em primeira instância é observado o varão de aço, caso este possua muita corrosão (dióxido de ferro) terá de ser limpo e neste caso recorre-se à aplicação de uma solução de ácido clorídrico solúvel em 39% para os varões que apresentassem maior grau de corrosão. Nos varões que apresentavam pouca corrosão esta foi eliminada através de uma escova de aço e água;

Seguidamente, foi confirmado que os provetes possuíam 750mm de comprimento, marcando o seu centro de massa aos 375mm, Figura 5.1 a). É efetuado também a medição do diâmetro efetivo, D_E , esta medição é calculada com recurso a três medições realizadas ao longo do comprimento do varão através de uma craveira. Figura 5.1 b).



a) Marcação do centro de massa



b) Medição do diâmetro efetivo médio

Figura 5.1 - Medição dos diâmetros efetivos médios e marcação do centro de massa no varão

Após este passo e com recurso a um equipamento para marcação de varões de aço, Figura 5.2 a), foi marcado no varão uns vincos de centímetro a centímetro, Figura 5.2 b), de forma a obter marcas que no fim do ensaio sirvam de referência na determinação do alongamento total

do provete. Estas marcas também serviram de referência para colocar o extensômetro bem como os pontos fixos utilizados para a utilização do vídeo-extensômetro, Figura 5.2 c)



a) Equipamento de Marcação

b) Marcação centímetro a centímetro

c) Marca de referência para o extensômetro e vídeo-extensômetro

Figura 5.2 - Equipamento e marcação de centímetro a centímetro do varão

Findada a preparação dos provetes, segue-se a realização do ensaio através da máquina de tração de aços, medindo as deformações através do extensômetro externo (extensometria) e do vídeo-extensômetro (videogrametria).

Segue-se a colocação do varão entre as garras da máquina de tração, estando estas distanciadas entre si a 400mm (L_c), Figura 5.3. A força que estas exercem sobre o varão é igual ao dobro do diâmetro do varão, por exemplo, para um varão de diâmetro efetivo de 6 mm, é necessário aplicar uma força de 12 kN.

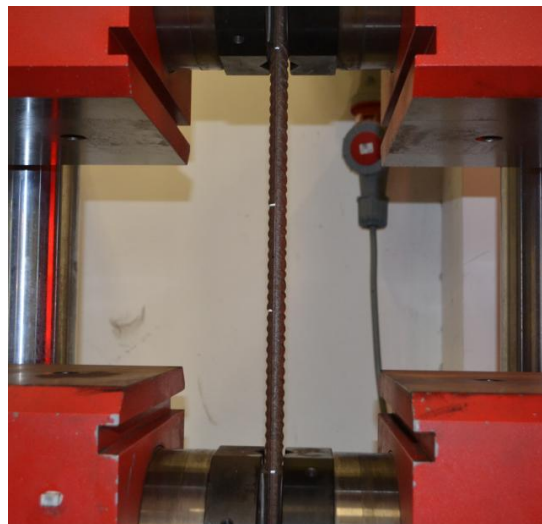
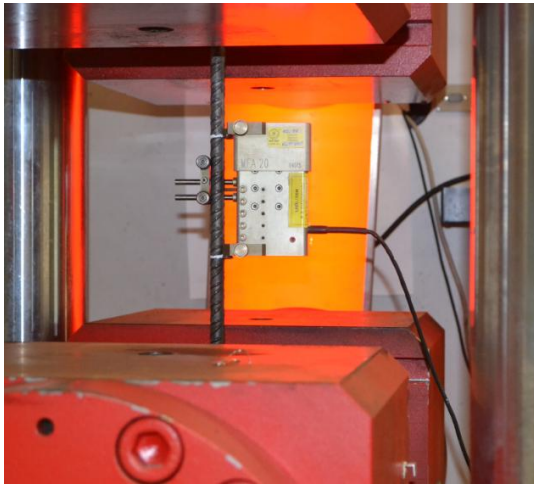


Figura 5.3 - Colocação do varão entre as garras do equipamento

Tendo por base as marcas efetuadas no varão de aço para colocação do extensômetro com dimensão de 100 mm, Figura 5.4 a), representando o comprimento inicial do extensômetro (L_c), o comprimento inicial entre referências (L_0). Estas referências devem ser efetuadas no centro do provete de forma a obter resultados fidedignos.

As referências utilizadas para o extensômetro são as mesmas utilizadas para o vídeo-extensômetro, Figura 5.4 b). De seguida é efetuada a calibração do sistema por vídeo-extensometria conforme o procedimento mencionado na seção 3.2.2 no *Measurement Menu*.

Com o findar da montagem dos sistemas de medição, inicia-se a definição dos parâmetros para a realização do ensaio.



a) Colocação do extensômetro no varão de aço



b) Colocação da câmara de filmar

Figura 5.4 - Sistema de medição em varão de aço

5.2.1 PREPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO COM O EQUIPAMENTO *DIONPRO*

O sistema de medição da força da máquina de ensaios é calibrado segundo a norma EN ISO 7500-1 de classe igual a 1, ou seja, a resolução do equipamento é de 1kN

A velocidade de aplicação da força neste equipamento depende do material que se está a ensaiar. Segundo a norma de ensaio, no Quadro 5.2, é definido as velocidades de aplicação de força em função do módulo de elasticidade. Uma vez que o aço possui um módulo de elasticidade superior a 150 GPa, a velocidade deve estar compreendida entre 6 e 60 MPa/s. Na aplicação destes ensaios, a velocidade utilizada foi de 8 MPa/s. Esta velocidade é mantida ao longo de todo o ensaio.

Quadro 5.2 - Limites da velocidade de aplicação da força (Adaptado da norma NP EN 10002-1, 2006)

Módulo de elasticidade do material (E) [GPa]	Velocidade de aplicação da força [MPa/s]	
	Mínima	Máxima
< 150	2	20
≥ 150	6	60

Dado o início ao ensaio e atingido uma deformação de 2 % é acionado um alarme que indica o fim do patamar elástico, e com o objetivo de alertar para a retirada do extensómetro externo, colado no varão, não danificando, assim, o restante ensaio em que o varão é levado a rotura, como mostra a Figura 5.5.

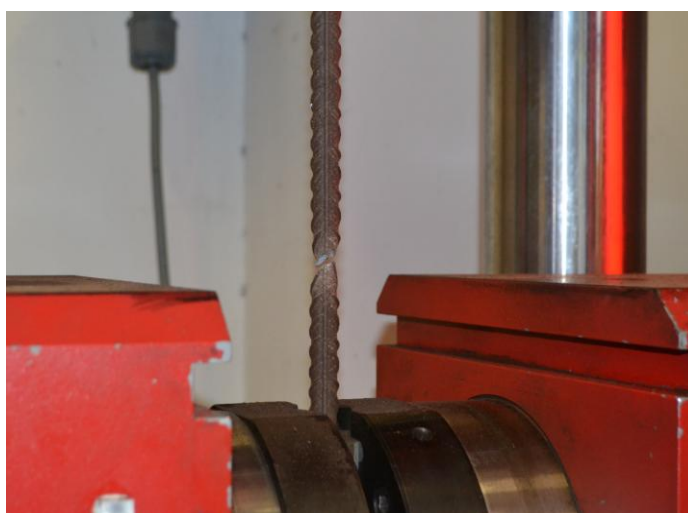


Figura 5.5 - Varão de aço após rotura

Após a rotura, o varão é retirado das garras e colocado sobre um suporte onde é efetuado a junção das duas partes com o intuito de medir o seu comprimento final (L_u) entre as marcas de referência para o cálculo da extensão após a rotura (A). Esta medição é efetuada através de uma craveira ligada ao equipamento a fim do programa efetuar os cálculos necessários para a determinação de todos os parâmetros necessários para o ensaio. De seguida, é impresso um relatório de ensaio, onde consta a norma a que está sujeito o ensaio, a descrição e resultados dos parâmetros a medir, representados no Quadro 5.3, e, ainda, um gráfico de tensão-deformação. Os dados extraídos desta análise são em ficheiro *Asci*.

É de referir que os valores da extensão permanente (A_g) e da extensão permanente da força máxima (A_{gt}) estão incorretos neste quadro devido aos problemas da base de cálculo que a máquina de tração possui, sendo este problema já foi referido nos capítulos anteriores.

Salienta-se que este erro não afeta os valores em fase elástica (valores pretendidos no âmbito desta dissertação).

Quadro 5.3 - Parâmetros do relatório de ensaio (dados referentes ao varão de aço com diâmetro de 16mm)

Descrição	Resultados
Data/Ensaio n.º	17.4.2012/1
Diâmetro efetivo - D_E	14.77 mm
Área de seção - A_0	171.34 mm ²
Força máxima - σ_r	152.98 kN
Tensão de rotura - R_m	892.86 MPa
Tensão limite proporcionalidade (0.2%) - R_p	487.98 MPa
Módulo de elasticidade - E	209.26 GPa
Comp. Inicial /Comp. Final - L_0/L_u	100.00/118.45
Ext. Permanente - A_g	0.18%
Ext. perm. Força máxima - A_{gt}	0.63%

5.2.2 PREPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO COM O EQUIPAMENTO *VIDEOEXTENSOMETER NG*

Após a preparação do provete e colocação dos equipamentos de medição e definidos os parâmetros que sustentam a medição pelo extensómetro externo, é necessário definir os parâmetros que se pretende medir no ensaio com recurso ao vídeo-extensómetro.

Com recurso ao que foi descrito na seção 3.2.2, foi definido os parâmetros que se pretende medir com o tempo (*time*) de ensaio, o comprimento inicial (L), o deslocamento (dL), a deformação axial ($EpsL$) e a frequência (F).

Após a definição dos parâmetros é calibrado o sistema, onde são realizados o reconhecimento do provete, as marcas para leitura e o campo de leitura de dados. Segue-se o início do ensaio em simultâneo com o ensaio realizado, utilizando o *software DionPro*, com o intuito de comparar dados nos dois tipos de leitura, permitindo, assim, avaliar se o sistema de medição é válido para a determinação do módulo de elasticidade.

Aquando da rotura do provete de aço, é necessário parar o ensaio com o uso do vídeo-extensómetro, guardando os dados em ficheiro de *texto*, para posterior tratamento.

A fim de consolidar todo o processo de ensaio à tração de aços, o fluxograma da Figura 5.6, mostra todo o procedimento e passos a ter em conta para a realização deste ensaio com recurso ao extensómetro e vídeo-extensómetro.

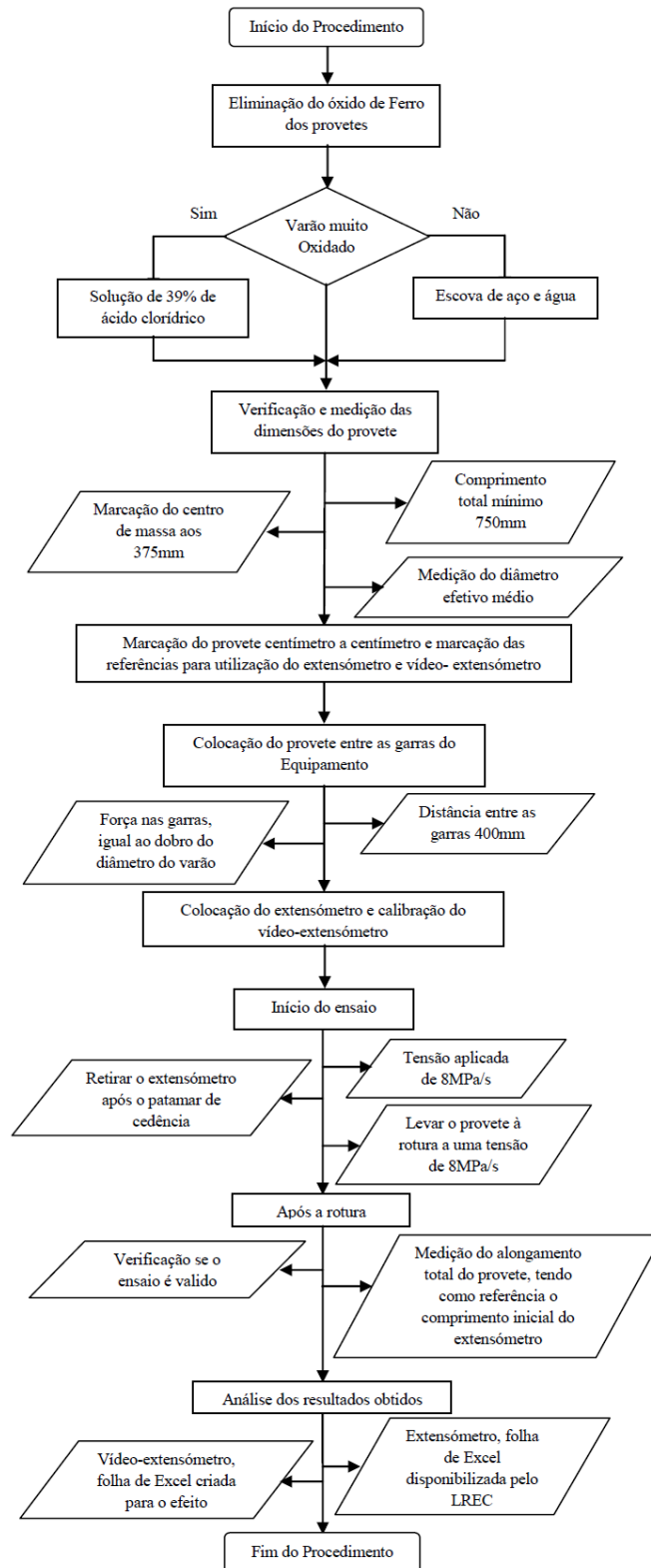


Figura 5.6-Fluxograma do procedimento experimental da campanha de aços

5.3 APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CÁLCULO DO SISTEMA

Nesta seção, pretende-se fazer a ligação entre o modelo de cálculo descrito na seção 4.3.1, onde foram definidos os parâmetros através dos quais permite o cálculo da tensão e da força com os dados recolhidos em através dos sistemas de medição.

Como é visível na Figura 5.7 está representado a folha de cálculo para onde são transferidos os dados recolhidos pelo vídeo-extensómetro, o diâmetro do varão, a velocidade de carga, a tensão e força em cada instante, bem como o tempo, tensão e força organizados de segundo a segundo.

D ₂ [mm]	14,77	A ₀ [mm ²]	171,34	Velocidade [MPa s]	8,00		
Tempo (Time)	Comp. Inicial (L)	Deslocamento (dL)	Deformação Axial (EpsL)	Frequência (F)	Tensão	Força	Tempo (1 em 1 seg)
s	mm	mm	%	Hz	MPa	kN	s
0,05	100,03	0,05	0,05	22,00	0,37	0,06	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	43,00	0,38	0,06	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	63,00	0,38	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	83,00	0,38	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	102,00	0,39	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	120,00	0,40	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	138,00	0,41	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	156,00	0,41	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	173,00	0,42	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	189,00	0,42	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	205,00	0,43	0,07	0,00
0,05	100,03	0,05	0,05	221,00	0,43	0,07	0,00
0,06	100,03	0,05	0,05	236,00	0,44	0,08	0,00
0,06	100,03	0,05	0,05	251,00	0,45	0,08	0,00
0,06	100,03	0,05	0,05	265,00	0,46	0,08	0,00
0,06	100,03	0,05	0,05	279,00	0,46	0,08	0,00
0,06	100,03	0,04	0,04	293,00	0,46	0,08	0,00

Figura 5.7 - Folha de cálculo de aplicação aos aços para os dados do vídeo-extensómetro

Após a organização dos dados recolhidos e com recurso às ferramentas do Excel (como as tabelas dinâmicas), estes são organizados de segundo a segundo, como mostra a Figura 5.8. Estes valores já são apresentados por intervalo de tempo.

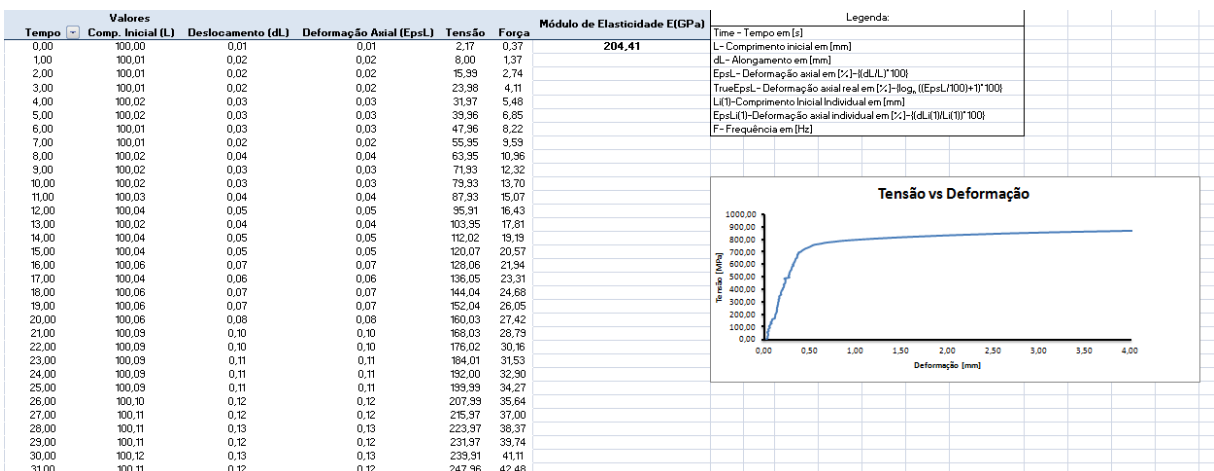


Figura 5.8 - Folha de cálculo como os dados do aço organizados segundo a segundo

De forma a comparar os valores do extensómetro com os valores do vídeo-extensómetro também foi utilizado uma folha de cálculo em formato Excel, conforme Figura 5.9, para transferir os dados do extensómetro (em ficheiro Ascii), e proceder ao cálculo dos parâmetros a medir.

		Força KN	Tensão MPa	Deformação mm	Deformação %
Diâmetro	14,77 mm	3,181	18,56576	-0,00064	-0,00064
Área	171,34 mm ²	2,806	16,37709	-0,00226	-0,00226
		2,659	15,51913	-0,0029	-0,0029
Le=L0	100 mm	2,561	14,94716	-0,0029	-0,0029
Lu	118,45 mm	2,528	14,75456	-0,00322	-0,00322
A	18,45 %	2,561	14,94716	-0,00322	-0,00322
Agt	%	2,708	15,80512	-0,00258	-0,00258
		2,904	16,94906	-0,00162	-0,00162
Fmax	152,98 KN	3,116	18,18639	-0,0013	-0,0013
Rm	892,86 MPa	3,189	18,61245	-0,0013	-0,0013
		3,205	18,70584	-0,00162	-0,00162
E	209,26 MPa	3,214	18,75837	-0,00096	-0,00096
		3,214	18,75837	-0,0013	-0,0013
		3,271	19,09104	-0,0013	-0,0013
		3,368	19,65718	-0,00096	-0,00096
		3,475	20,28168	-0,0013	-0,0013
		3,548	20,70774	-0,00032	-0,00032
		3,613	21,08711	0	0
		3,67	21,41979	0	0

Figura 5.9 - Folha de cálculo como os dados do aço recolhidos pelo extensómetro (LREC)

A folha de cálculo utilizada para os dados do extensómetro é a mesma folha de cálculo utilizada no LREC para o ensaio de aços. Esta folha de cálculo está preparada para receber os dados de todos os ensaios realizados com o mesmo diâmetro e efetuar um relatório final de ensaio, de acordo com a Figura 5.10.

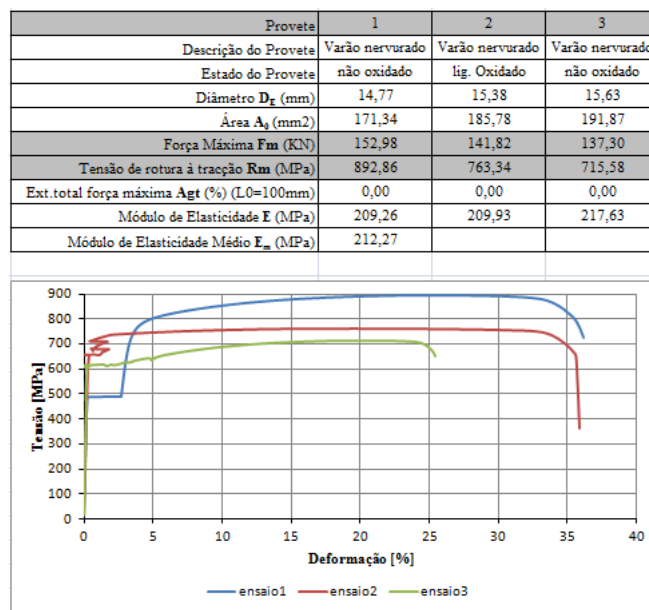


Figura 5.10 - Relatório final de ensaio de aços pelo dados do extensómetro (adaptado do LREC)

Assim, a partir dos dois modelos, efetuou-se o cruzamento de dados do vídeo-extensômetro com o extensômetro a fim de concluir se o sistema de medição com recurso a uma câmara de filmar é fiável e apresenta valores comparáveis ao método usado frequentemente.

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas Figuras 5.11 a 5.26, apresenta-se as curvas tensão-deformação obtidos pelo extensômetro e vídeo-extensômetro, para os diversos provetes ensaiados com diferentes diâmetros. Como é visível na representação gráfica o andamento das curvas pelo vídeo-extensômetro mesmo depois de filtrado o sinal apresenta muita variação relativamente aos dados de deformação, o que pode implicar que o sistema não seja credível para a medição de deformações em fase elástica do aço. A variação de valores a nível da tensão era previsível, visto nem todos os provetes pertencerem ao mesmo varão, mas sim à mesma série de fabrico.

Constatou-se que todos os varões ensaiados estão dentro da classe de resistência A500 NR, visto apresentarem uma tensão de cedência superior a 500MPa exceto no primeiro ensaio do varão de 16mm que este valor é ligeiramente abaixo.

Na fase elástica de todos ensaios é constatável que todos os provetes têm o mesmo andamento, isto é, as curvas sobrepõem-se umas às outras, exceto no 3º ensaio do varão de 8mm.

A nível de deformação em fase elástica, os dois sistemas de medição são semelhantes para o mesmo valor de carga, o que implica que o sistema de medição por vídeo-extensômetro tem resolução suficiente e satisfaz o principal objetivo a estudar. Assim, este é um bom método para determinar pequenas deformações em varões de aço, em detrimento ao extensômetro, visto este ser intrusivo à estrutura.

É, de salientar que na representação gráfica em que utilizou-se o extensômetro externo, os varões apresentam deformações últimas elevadas. Estes valores não são os realistas, devido ao erro existente no equipamento de tração, já referido anteriormente. Assim, as curvas que representam corretamente a extensão última no ensaio são as curvas do vídeo-extensômetro.

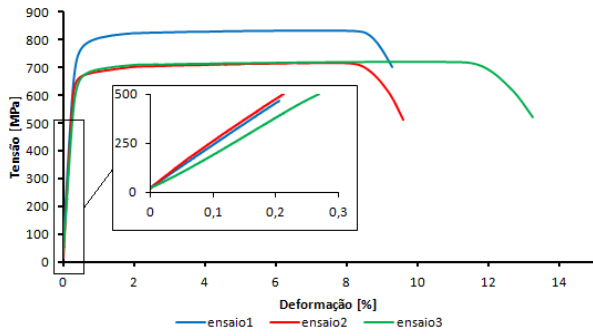


Figura 5.11 - Curva tensão deformação extensômetro diâmetro 6mm

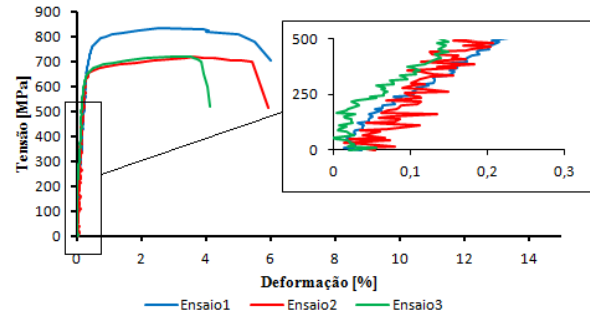


Figura 5.12 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro diâmetro 6mm

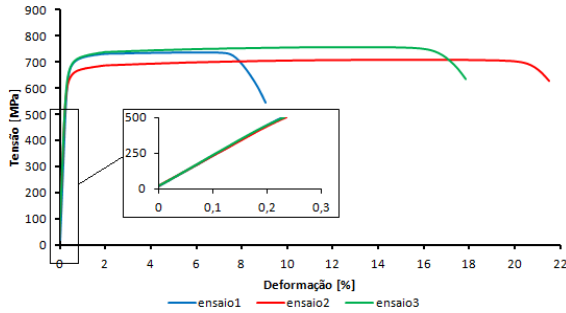


Figura 5.13 - Curva tensão deformação extensômetro diâmetro 8mm

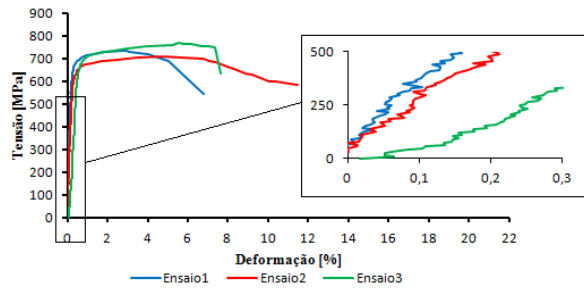


Figura 5.14 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro diâmetro 8mm

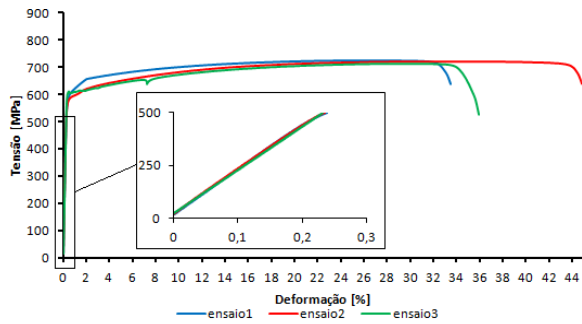


Figura 5.15 - Curva tensão deformação extensômetro diâmetro 10mm

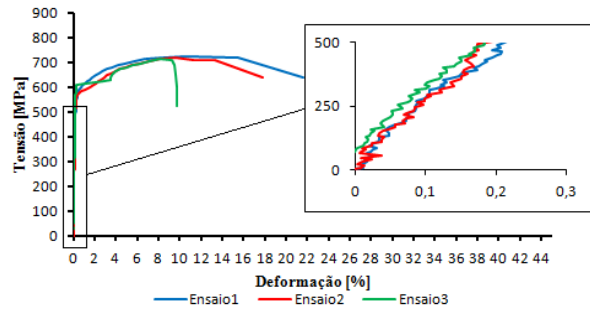


Figura 5.16 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro diâmetro 10mm

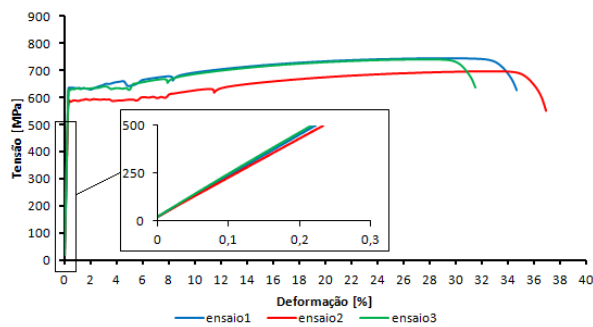


Figura 5.17 - Curva tensão deformação extensômetro diâmetro 12mm

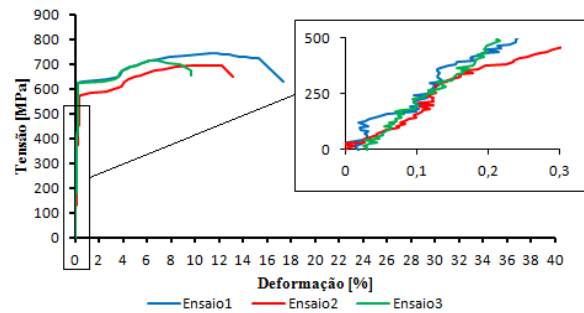


Figura 5.18 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro diâmetro 12mm

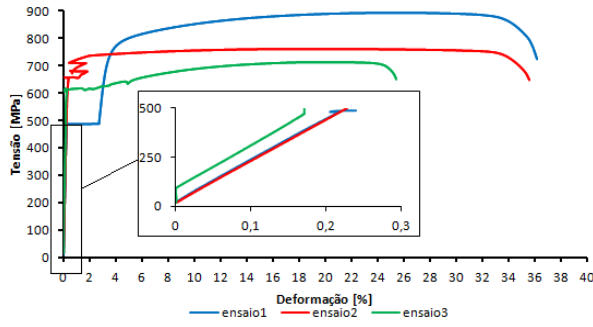


Figura 5.19 - Curva tensão deformação extensômetro diâmetro 16mm

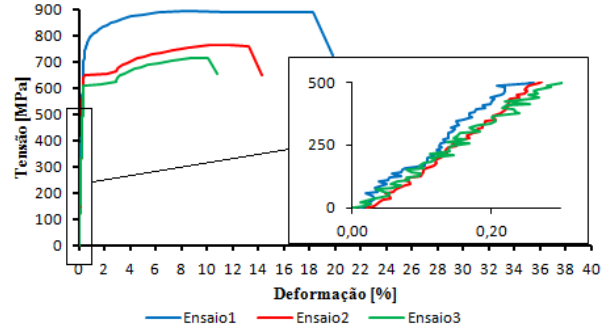


Figura 5.20 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro diâmetro 16mm

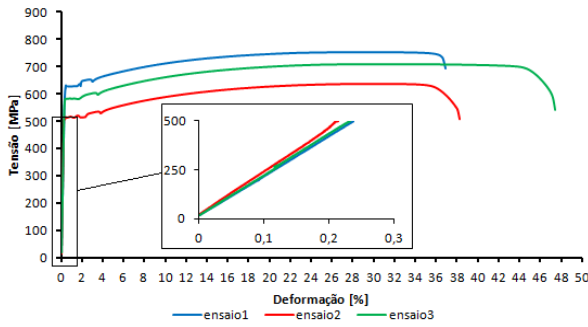


Figura 5.21 - Curva tensão deformação extensômetro diâmetro 20mm

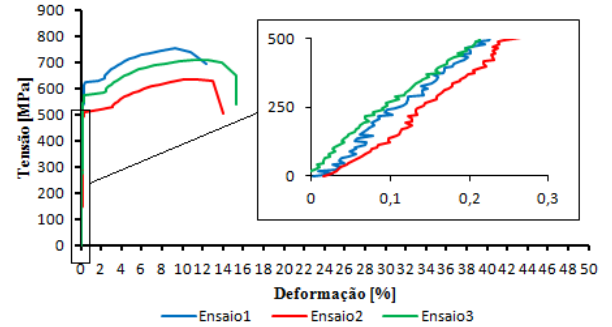


Figura 5.22 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro diâmetro 20mm

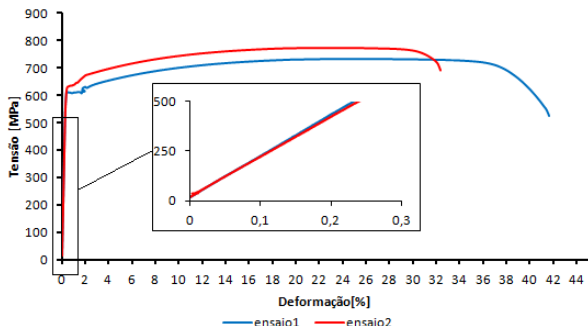


Figura 5.23 - Curva tensão deformação extensômetro diâmetro 25mm

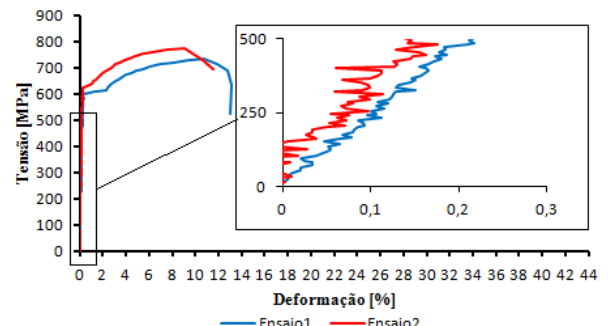


Figura 5.24 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro diâmetro 25mm

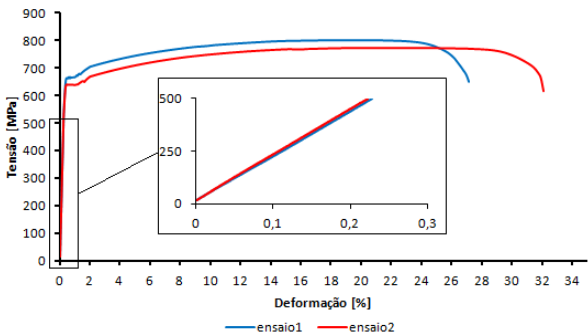


Figura 5.25 - Curva tensão deformação extensômetro diâmetro 32mm

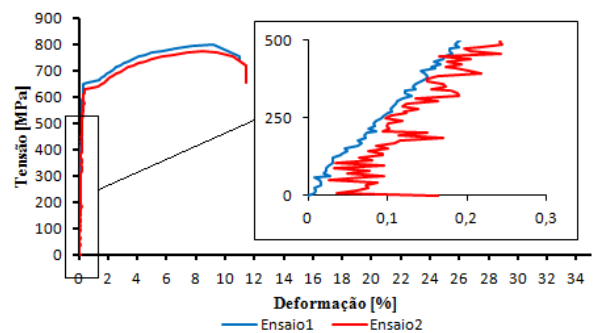


Figura 5.26 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro diâmetro 32mm

Segundo o EC2 (Eurocódigo 2), o valor para o módulo de elasticidade para varões de aço deve estar compreendido entre os 195 e 210 GPa.

Na Figura 5.27, é constatável a variação do módulo de elasticidade para os vários ensaios entre os dois sistemas de medição, sendo demonstrado que os resultados apresentados pelos dois sistemas são semelhantes, exibindo diferenças máximas na ordem dos 10 GPa, exceto no primeiro e terceiro ensaio do varão de 8mm em que há uma diferença de 37 GPa e 56 GPa, respetivamente e no primeiro ensaio do varão de 20mm esta diferença atinge os 29 GPa.

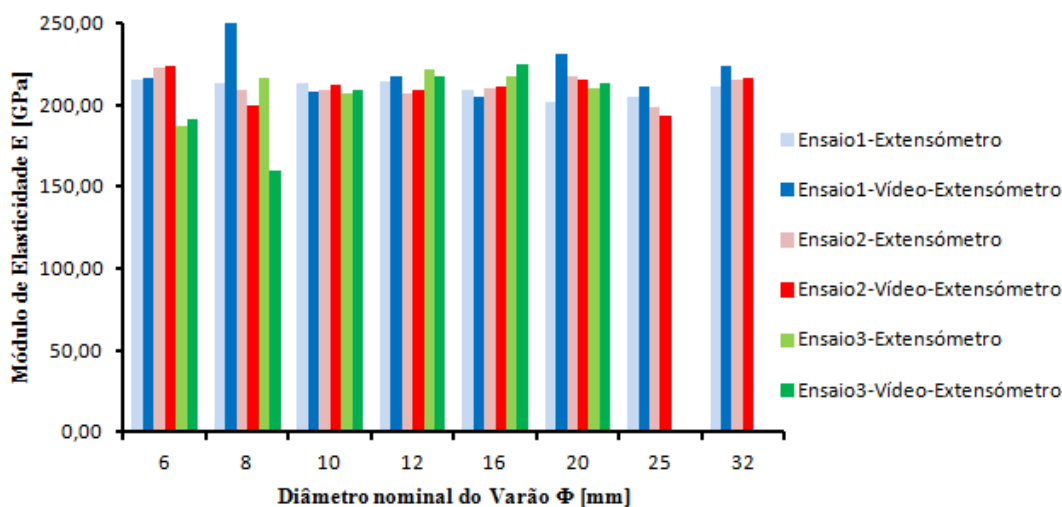


Figura 5.27 - Variação do Módulo de Elasticidade com o diâmetro e equipamento

Como mostra a Figura 5.28 e os Quadros 5.4 e 5.5, os valores médios de módulo de elasticidade dos varões ensaiados variam entre 201,62GPa e 214,46GPa, para as medições efetuadas pelo extensómetro externo e entre 202,02GPa e 219,67GPa para as medições efetuadas através do vídeo-extensómetro.

A diferença entre os resultados obtidos pelo vídeo-extensómetro e pelo extensómetro, nunca foi superior a 5%, a diferença dos valores é compreendida na Figura 5.29 e do Quadro 5.6. Esta análise é efetuada em função do diâmetro, sendo visível que a maior diferença está no varão de 20mm em que o módulo de elasticidade é 4,64% maior em relação ao do vídeo-extensómetro.

Os resultados obtidos pelo vídeo-extensómetro foram sempre superiores aos obtidos pelo extensómetro, exceto no varão de 8mm, ocorrendo o contrário. O facto dos resultados do vídeo-extensómetro serem superiores aos do extensómetro, advém da média (filtro) efetuada ao dados recolhidos pelo vídeo-extensómetro, que por sua vez, pode incrementar um pouco mais de deformação para ao mesmo valor de tensão .

Estes deslocamentos são analisados como ruído do sinal captado, uma vez que não é visível a olho humano, posteriormente dão um acréscimo ligeiro de deformação ao ensaio em fase elástica.

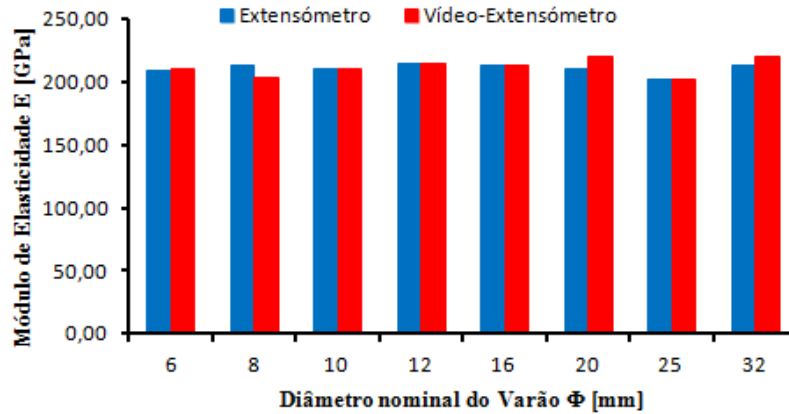


Figura 5.28 - Variação do Módulo de Elasticidade médio com o diâmetro e equipamento

Quadro 5.4 - Módulo de Elasticidade no aço com Extensômetro

Módulo de Elasticidade dos Varão de aço (Extensômetro)								
D. nominal do varão(mm)	6	8	10	12	16	20	25	32
E (GPa) Ensaio 1	215,46	212,96	213,22	214,67	209,26	202,02	204,74	210,83
E (GPa) Ensaio 2	222,45	209,13	209,00	206,87	209,93	217,50	198,50	215,05
E (GPa) Ensaio 3	186,54	215,97	206,61	221,84	217,63	210,25	-	-
E (GPa) Média	208,15	212,69	209,61	214,46	212,27	209,92	201,62	212,94

Quadro 5.5 - Módulo de Elasticidade no aço com Vídeo-Extensômetro

Módulo de Elasticidade dos Varão de aço (Vídeo-Extensômetro)								
D. nominal do varão(mm)	6	8	10	12	16	20	25	32
E (GPa) Ensaio 1	216,37	249,69	207,81	217,74	204,40	230,83	210,70	223,54
E (GPa) Ensaio 2	223,33	199,18	212,53	208,57	210,71	215,56	193,34	216,56
E (GPa) Ensaio 3	190,86	160,12	208,78	217,50	224,73	212,62	-	-
E (GPa) Média	210,19	203,00	209,71	214,61	213,28	219,67	202,02	220,05

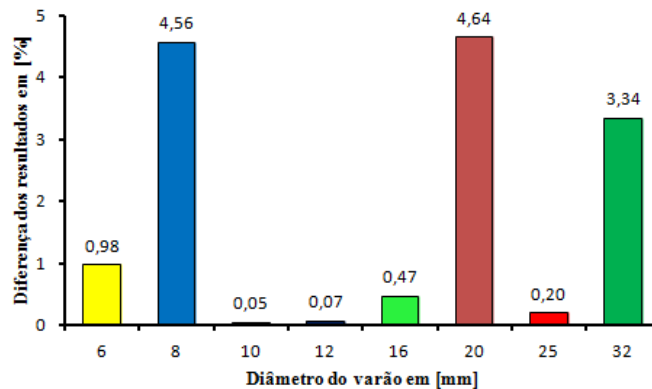


Figura 5.29- Diferença em percentagem do Módulo de Elasticidade em função do diâmetro

Quadro 5.6 -Diferença do Módulo de Elasticidade no aço entre os sistema

Módulo de Elasticidade dos Varão de aço (Diferença)								
D. nominal do varão(mm)	6	8	10	12	16	20	25	32
Ensaio 1 diferença [GPa]	-0,90	-36,73	5,41	-3,07	4,86	-28,81	-5,96	-12,71
Ensaio 2 diferença [GPa]	-0,88	9,95	-3,52	-1,71	-0,77	1,94	5,16	-1,51
Ensaio 3 diferença [GPa]	-4,32	55,86	-2,18	4,34	-7,10	-2,37	-	-
Média diferença [GPa]	-2,03	9,69	-0,10	-0,15	-1,01	-9,75	-0,40	-7,11
Diferença (%)	0,98	4,56	0,05	0,07	0,47	4,64	0,20	3,34

A partir destes valores e tendo em consideração que em 5 dos 8 diâmetros estudados a diferença entre os módulos de elasticidade é inferior a 1%, pode-se assumir que a utilização de sistemas de medição para pequenas deformações em aços é fiável e pode ser aplicável em ensaios laboratoriais, nomeadamente para a determinação de módulo de elasticidade, sem recurso a extensómetros externos.

É, de referir que estes resultados são bons devido ter sido aplicado no cálculo do módulo de elasticidade a norma, que refere que este é medido a partir de dois pontos em fase elástica. Caso se pretenda determinar o módulo de elasticidade pelo declive da reta que descreve em fase elástica, os resultados obtidos pelo vídeo-extensómetro seriam muito mais desfasados dos resultados do extensómetro, uma vez que apresenta muito ruído e variação do sinal ao longo do tempo.

Na Figura 5.30, são apresentadas as extensões últimas que os varões sofrem ao longo dos vários ensaios, salientando que esta comparação é feita através dos resultados do vídeo-extensómetro e do comprimento final (L_u) subtraindo o comprimento inicial (L_0) entre marcas do varão.

Como é visível, estes resultados apresentam grande variação entre o valor real e o valor do vídeo-extensómetro, esta diferença é devido ao facto da rotura do varão nem sempre acontecer no campo de medição do vídeo-extensómetro. Assim sendo, é impossível concluir a real extensão última que ocorreu entre as referências que serviram de base para a medição de deslocamentos pelo extensómetro e vídeo-extensómetro

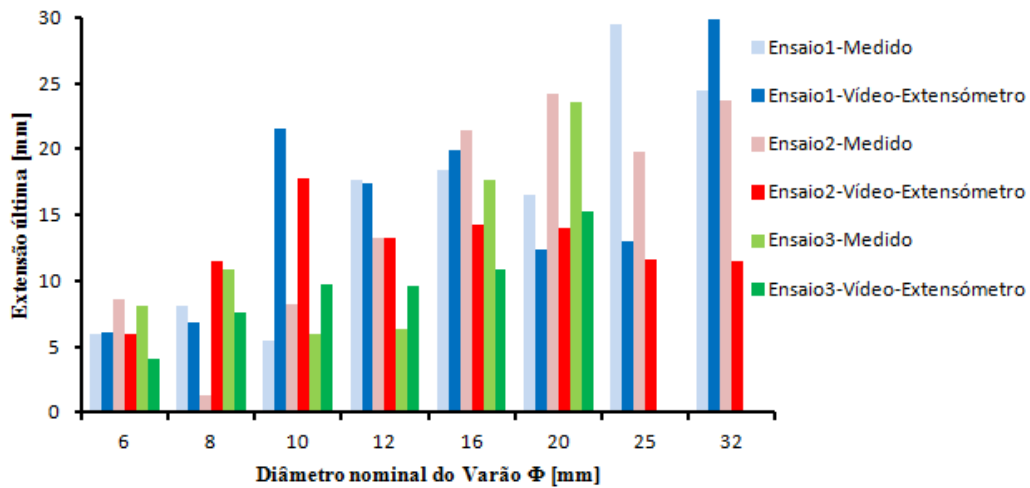


Figura 5.30 - Variação da extensão última com o diâmetro

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A marcação do provete é fundamental para que se obtenha resultados aceitáveis, uma vez que a videogrametria baseia-se na captura contínua de imagens ao longo do tempo, os deslocamentos destas marcas entre imagens é que permite calcular os deslocamentos que o varão sofre quando tracionado.

Uma vez que o EC2 limita os valores do módulo de elasticidade para varões de aço, e com base nos valores definidos, foi realizada a comparação entre os valores experimentais e realizada a avaliação do sistema de medição alternativo comparativamente ao sistema tradicional.

Sendo que na maioria dos casos em estudo, a diferença entre os dois sistemas foi inferior a 1% e em todos os casos estudados não excedeu os 5% de diferença. Uma vez que foi demonstrado que estas diferenças estão devidamente relacionadas com o equipamento de ensaio, e que podem ser corrigidas com filtros matemáticos é plausível afirmar-se que o sistema de medição por vídeo-extensómetro pode ser aplicado em recurso ao tradicional extensómetro, para medição de módulos de elasticidade em varões de aço.

Assim sendo, a extensão última só é possível comparar entre o vídeo-extensómetro e o valor real medido após a rotura, caso a rotura do varão ocorra entre o campo de leitura do vídeo-extensómetro.

Igualmente, pode-se afirmar que o vídeo-extensómetro é um equipamento que não permite medir com grande rigor as deformações em qualquer fase do material, seja ela elástica, elasto-plástica ou plástica. Apesar de na fase elástica os resultados serem satisfatórios, estes só são válidos desde que o cálculo do módulo de elasticidade seja efetuado através de dois pontos de tensão e deformação em fase elástica.

CAPÍTULO 6

APLICAÇÃO DO VÍDEO-EXTENSÓMETRO À MEDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM PROJETOS DE BETÃO

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, tal como no capítulo anterior, é abordado numa perspetiva prática a medição do módulo de elasticidade no betão, sendo este definido pela relação entre a tensão e a deformação.

A medição do módulo de elasticidade procedeu-se com a utilização dos dois sistemas de medição abordados nesta dissertação, isto é, pelo vídeo-extensómetro e pelo extensómetro externo ligado a prensa hidráulica, com o intuito de comparar os resultados e avaliar se o sistema de medição por vídeo-extensómetro pode ser aplicado em recurso do extensómetro externo, não havendo, assim, intrusão no material quando se pretende estudar esta propriedade mecânica.

Para o conhecimento dos parâmetros de aplicação de carga, como a velocidade, nos ensaios de compressão, é fundamental efetuar este ensaio segundo uma norma, uma vez que estas

oferecem todas informações para correta realização do mesmo e uniformização em todo o espaço nacional ou europeu.

Neste capítulo, além da serem aplicados os conhecimentos desenvolvidos nos capítulos anteriores, nomeadamente, nos capítulos 3 e 4, é efetuada um breve descrição do procedimento de ensaio do módulo de elasticidade para o betão, segundo a norma E 397-1993 e o procedimento de ensaio para utilização do vídeo-extensómetro.

Por fim, são aplicados os modelos de cálculo desenvolvidos para análise dos dados e, ainda, discutidos os resultados obtidos.

6.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO

Nesta secção será abordado o procedimento realizado em laboratório, para a realização dos ensaios. Tendo a finalidade de determinar e comparar o módulo de elasticidade entre a técnica tradicional, extensometria e a vídeo-extensometria.

Para determinar o módulo de elasticidade no betão recorreu-se à norma vigente E 397-1993, ao equipamento *Proteus* e o vídeo-extensómetro, de forma a obter os resultados de deslocamentos, ao longo do tempo, e determinando, assim, a deformação existente no provete de betão.

Para clarificar a norma referida, nesta secção serão descritos, pormenorizadamente, todos os procedimentos realizados em laboratório, para o ensaio dos provetes de betão.

Na campanha de ensaios de betão, foram utilizados vários provetes com várias formas e ensaiados em idades diferentes. O Quadro 6.1, mostra a idade em que o betão foi ensaiado, o número de provetes e suas dimensões. Para os cilindros, prismas e cubos metálicos ensaiados aos 28 dias foram feitas medições em duas faces, isto é, o provete foi rodado 90° e foi novamente ensaiado.

Os parâmetros a quantificar nos provetes cilíndricos, prismáticos e cúbicos metálicos foram o módulo de elasticidade (E_c) e a tensão de rotura (σ_{cr}), enquanto nos provetes plásticos foi apenas a tensão de rotura (σ_{cr}) a fim de quantificar a carga última que o betão resiste nas diferentes idades para posterior ensaio ao módulo de elasticidade.

Quadro 6.1 - Forma e número dos provetes de betão usas na campanha

Idade do Betão	Cilindro		Prisma		Cubo Metálico		Cubo Plástico	
	Nº	Dimensões [mm]	Nº	Dimensões [mm]	Nº	Dimensões [mm]	Nº	Dimensões [mm]
24 Horas	3	300x150	0	375x150x150	0	150x150x150	1	150x150x150
72 Horas	3		0		0		1	
7 Dias	3		0		0		3	
28 Dias	3		3		3		3	

De forma a obter dados credíveis houve a preocupação de realizar, pelo menos, em cada tipo de provete, três ensaios com vista a minimizar possíveis erros ao longo do ensaio. Note-se que para o ensaio à rotura dos cubos plásticos às 24 e às 72 horas é apenas utilizado um provete, devido à indisponibilidade de moldes aquando da recolha do betão.

6.2.1 RECOLHA DO BETÃO E PREPARAÇÃO DOS PROVETES

O primeiro passo na preparação dos provetes, consiste na montagem dos moldes que irão receber o betão. Os moldes utilizados na campanha foram 12 moldes plásticos cilíndricos, 3 moldes cúbicos metálicos, 10 moldes cúbicos plásticos e 3 moldes prismáticos metálicos, Figura 6.1.

Após a montagem dos moldes no local onde o betão irá ganhar presa, estes foram borrifados como óleo descofrante, para que aquando da desmoldagem dos provetes, o betão não ficasse agarrado ao molde.



a) Moldes Cilíndricos



b) Moldes Prismáticos



c) Moldes Cúbicos

Figura 6.1 - Moldes utilizados para receção do betão

A amassadura do betão auto-compátável de classe C30/37, com a composição descrita no Quadro 6.2, utilizado para realização dos provetes iniciou-se às 9:30 horas do dia 16 de julho de 2013, sendo que o enchimento dos moldes iniciou-se às 11:30 horas. Neste espaço de tempo foram realizados ensaios ao betão, nomeadamente de espalhamento com um diâmetro de 670mm, Figura 6.2 a) e de escoamento de funil V com o tempo de 3,49 segundos, Figura 6.2 b).

Quadro 6.2 – Composição do betão auto-compátável

Materiais	Composição do betão (Kg/m³)
Cimento (CEM II/A-L 42,5R)	337
Cinzas	103
Areia do mar (0/2)	419
Areia britada (0/4)	555
Brita 0 (4/10)	566
Brita 1 (8/16)	297
Água	186 Litros
Plastificante (Pozzolith 390N)	5,50 Litros
Superplastificante (Sky 548)	2,61 Litros
RheoMATRIX 175	2,00 Litros



a) Ensaio de Espalhamento



b) Ensaio de Escoamento do funil V

Figura 6.2 - Ensaios de caracterização do betão

O enchimento dos moldes efetuou-se com ajuda de uma pá e com ajuda de um varão, para efetuar o calcamento do betão de forma a eliminar os vazios existentes e obter as faces dos provetes mais planas e uniformes possíveis, como é visível na Figura 6.3.



a) Enchimento dos cilindros



b) Enchimento dos prismas



c) Enchimentos dos cubos

Figura 6.3 - Enchimento dos moldes

Passados alguns minutos do enchimento dos moldes foi realizado o nivelamento da superfície do provete, como mostra a Figura, 6.4 a) a 6.4 c), com ajuda de uma colher de pedreiro. Após algumas horas, todos os provetes foram catalogados de forma a identificá-los no decorrer da campanha, Figura, 6.4 d) a 6.4 f).



a) Nivelamento dos cilindros



b) Nivelamento dos prismas



c) Nivelamento dos cubos



d) Identificação dos cilindros



e) Identificação dos prismas



f) Identificação dos cubos

Figura 6.4 - Nivelamento dos moldes e identificação dos provetes

Decorridas 20 horas de cura do betão nos moldes em ambiente controlado com temperatura $22 \pm 5^\circ\text{C}$, procedeu-se à desmoldagem dos provetes, como mostra a Figura 6.5.



a) Desmoldagem dos cilindros



b) Desmoldagem dos moldes metálicos



c) Desmoldagem do cubos

Figura 6.5 - Desmoldagem dos provetes

Efetuada a desmoldagem de todos os provetes, procedeu-se ao corte dos provetes prismáticos de 750mm em dois provetes de 375mm cada, com auxílio de uma máquina de corte com disco adiantado, como é visível na Figuras 6.6 a) e 6.6 b). Segue-se a retificação das faces dos provetes cilíndricos e prismáticos com auxílio de um equipamento para o efeito, como é mostrado na Figuras 6.6 c) e 6.6 d).



a) Equipamento de corte e Prisma



b) Corte do Prisma



c) Retificação dos cilindros



d) Retificação dos prismas

Figura 6.6 - Corte dos Prismas e retificação dos cilindros e prismas

Por fim, colocou-se todos os provetes em câmara de cura, totalmente submersos em água a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ \text{C}$, como ilustra a Figura 6.7. Estes permanecem em câmara de cura até ao dia da realização do ensaio.



Figura 6.7 - Provetes em câmara de cura

6.2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DO BETÃO

O procedimento de ensaio seguidamente descrito é o procedimento efetuado no ensaio dos provetes de betão aos 28 dias, uma vez que é nesta data que são ensaiados todos os tipos de provetes.

Antes de prosseguir com a descrição do procedimento experimental, é, de salientar, que o seguinte procedimento é semelhante para as 24 horas, 72 horas e para os 7 dias, com a diferença que nestes dias apenas são ensaiado três provetes cilíndricos numa só direção e os provetes cúbicos de molde plástico (à compressão) para determinar a tensão de rotura do betão nestas idades.

O procedimento utilizado no ensaio do módulo de elasticidade do betão, foi o seguinte:

O primeiro passo consiste em retirar da câmara de cura todos os provetes a ensaiar e deixá-los secar à temperatura ambiente durante algum tempo.

Depois é efetuada a verificação das dimensões do cubo em molde plástico e de seguida é ensaiado à compressão, como mostra a Figura 6.8, a fim de quantificar, a resistência à rotura

do betão na idade a ensaiar. Este valor de resistência será o valor de base para limitar a tensão a aplicar no ensaio do módulo de elasticidade dos restantes provetes.

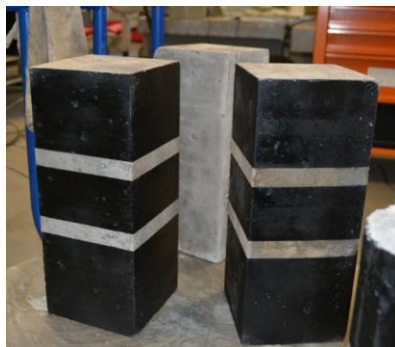


Figura 6.8 – Ensaio à compressão do cubo de molde plástico

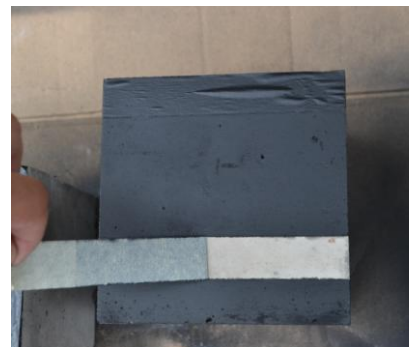
Segue-se a marcação e pintura dos provetes cilíndricos, prismáticos e cúbicos metálicos, conforme a Figura 6.9, estes são os provetes a ensaiar ao módulo de elasticidade, pelos dois sistemas de medição.



a) Pintura dos cilindros



b) Pintura dos prismas



c) Pintura dos cubos

Figura 6.9 – Marcação e pintura dos provetes

Após os provetes secarem, dá-se início à realização do ensaio do módulo de elasticidade, em que, inicialmente é determinado o valor da tensão limite a aplicar. Esta tensão varia como a forma da superfície de contacto entre a prensa e o provete, isto é, a forma do provete influencia a tensão última. Segundo EC2, a resistência dos cilindros é aproximadamente 80% da resistência dos cubos.

Assim, após determinada a resistência dos cubos é calculada a resistência prevista para o cilindro, pela equação 6.1.

$$f_{c,cilindro} = 0,8 \times f_{c,cubo} \quad [6.1]$$

Através desta resistência é calculada a força máxima que o provete suporta, pela equação 6.2.

$$F = \sigma \times \text{Área} \quad [6.2]$$

6.2.2.1 PREPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO COM O EQUIPAMENTO *PROTEUS*

De seguida, o provete é centrado na máquina, sendo fixado o extensómetro externo, como ilustra a Figura 6.10.



Figura 6.10 – Fixação do extensómetro

Depois, com auxílio do *software Proteus*, é aplicada uma tensão inicial de 0,5 MPa, e faz-se aumentar esta tensão de forma contínua a uma velocidade de $0,5 \pm 0,1$ MPa/s, até a tensão atingir 1/3 da tensão última esperada para o provete.

É, de salientar, que a velocidade do equipamento (por defeito) é expressa em kN/s, assim é necessário converter a velocidade de 0,5 MPa/s para esta unidade. Assim sendo, nos provetes cilindros a velocidade é de 8,84 kN/s e nos provetes prismáticos e cúbicos é de 11,25 kN/s.

Atingido o valor de tensão referido, é efetuada uma descarga à mesma velocidade da carga até a tensão atingir um valor igual a 0,5 MPa.

Este ciclo de carga e descarga é repetido e de seguida mantêm-se o valor de tensão de 0,5 MPa, durante 90 segundos, a fim de estabilizar o valor de deformação para o patamar de carga. Efetua-se um incremento de carga até a tensão atingir um 1/3 da tensão última, mantendo-se o valor de tensão aplicada, durante outros 90 segundos. Após este procedimento, é realizada uma descarga até a tensão igualar a zero.

Na Figura 6.11, é visível, todo o tempo de espera e tais incrementos de carga ao longo do tempo.

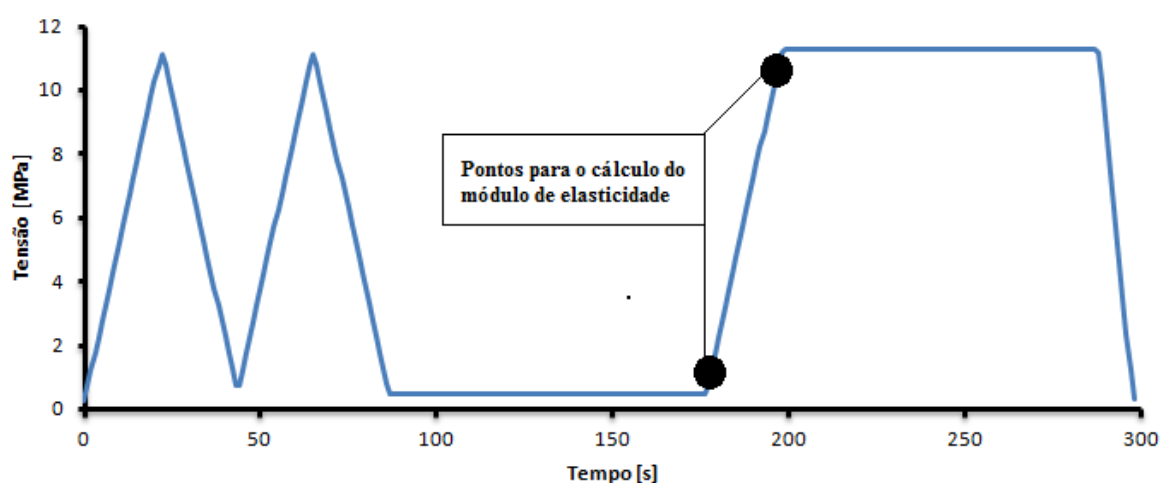


Figura 6.11 – Ciclos de carga e descarga do módulo de elasticidade do betão

Após o ensaio do módulo de elasticidade, todos os provetes foram ensaiados até à rotura, com o intuito de determinar a resistência máxima dos mesmos. A leitura dos dados, através do extensómetro é convertida em ficheiro de texto.

6.2.2.2 PREPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO COM O EQUIPAMENTO VIDEOEXTENSOMETER NG

Após a preparação do provete e colocação dos equipamentos de medição e definidos os parâmetros que sustentam a medição pelo extensómetro externo, é necessário definir os parâmetros que se pretende medir no ensaio com recurso ao vídeo-extensómetro.

Com recurso ao que foi descrito na seção 3.2.2, foram definido os parâmetros que se pretende medir com o tempo (*time*) de ensaio, o comprimento inicial (L), o deslocamento (dL), a deformação axial (EpsL) e a frequência (F).

Após a definição dos parâmetros é calibrado o sistema, onde são realizados o reconhecimento do provete, as marcas para leitura e o campo de leitura de dados. Segue-se o início do ensaio em simultâneo com o ensaio realizado, utilizando o *software Proteus*, com o intuito de comparar dados nos dois tipos de leitura, permitindo, assim, avaliar se o sistema de medição é válido para a determinação do módulo de elasticidade.

Após o término do ensaio com o vídeo-extensómetro, os dados são guardados em ficheiro de *texto*, para posterior tratamento.

Na realização do ensaio à rotura dos provetes, não foi efetuado nenhuma leitura com o vídeo-extensómetro, devido ao facto que não foi utilizado o extensómetro no provete, assim sendo, não existiram dados possíveis para efetuar a comparação. Sabendo que, nestes ensaios, o equipamento apenas fornece dados sobre a tensão de rutura.

6.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO DO SISTEMA

A partir do modelo de cálculo descrito na seção 4.3.2, onde foram definidos os parâmetros através dos quais permite o cálculo da tensão e da força no betão e com os dados recolhidos através dos sistemas de medição é desenvolvida esta secção a fim de obter os dados tratados e prontos a ser analisados e discutidos.

Na Figura 6.12, está representado a folha de cálculo para onde são transferidos os dados recolhidos pelo vídeo-extensómetro, e também para melhor organização dos dados e agilidade de cálculo. Nesta folha apresenta-se a força e a tensão no cubo de molde plástico ensaiado à rotura, a força, a tensão máxima e a área prevista para o provete a ensaiar (cilindro), bem como a velocidade de carga e o tempo que demora a acionar os dois sistemas. Este tempo designado como tempo inicial é cronometrado desde o instante em que é acionado o sistema de medição por vídeo-extensómetro até ao instante que é adicionado o equipamento *Proteus*.

Cubo		Cilindro					
Força [KN]	Tensão [MPa]	Tensão [MPa]	Força [KN]	Força Aplicar [KN]	Area [mm ²]	Velocidade [KN/s]	Tempo inicial [s]
949,77	42,21	33,77	596,76	198,92	17671,46	8,84	2,37

Tempo (Time)	Tempo Corrigido	Comp. Inical (L)	Deslocamento (dL)	Deformação Axial (EpsL)	Frequência (F)	Força	Tensão	Tempo (em 1 segundo)
s	s	mm	mm	%	Hz	KN	MPa	s
2,394	0,02	99,8907	0,0131	0,013	408	0,212057504	0,012	0
2,396	0,03	99,8908	0,0131	0,013	408	0,229728963	0,013	0
2,398	0,03	99,8909	0,0132	0,013	408	0,247400421	0,014	0
2,399	0,03	99,891	0,0133	0,013	408	0,256236151	0,0145	0
2,401	0,03	99,8911	0,0134	0,013	408	0,273907609	0,0155	0
2,402	0,03	99,891	0,0133	0,013	408	0,282743339	0,016	0
2,404	0,03	99,891	0,0134	0,013	408	0,300414797	0,017	0
2,406	0,04	99,891	0,0134	0,013	409	0,318086256	0,018	0
2,407	0,04	99,8911	0,0134	0,013	409	0,326921986	0,0185	0
2,41	0,04	99,8911	0,0135	0,013	409	0,353429174	0,02	0
2,412	0,04	99,8912	0,0135	0,014	409	0,371100652	0,021	0
2,414	0,04	99,8912	0,0135	0,014	409	0,388772091	0,022	0
2,415	0,04	99,8912	0,0135	0,014	409	0,39760782	0,0225	0
2,417	0,05	99,8912	0,0135	0,014	409	0,415279279	0,0235	0
2,418	0,05	99,8912	0,0136	0,014	409	0,424115008	0,024	0
2,42	0,05	99,8913	0,0136	0,014	409	0,441786467	0,025	0
2,424	0,05	99,8912	0,0136	0,014	409	0,477129384	0,027	0
2,426	0,06	99,8913	0,0136	0,014	409	0,494800843	0,028	0
2,427	0,06	99,8913	0,0136	0,014	409	0,503636572	0,0285	0
2,429	0,06	99,8913	0,0136	0,014	410	0,521308031	0,0295	0

Figura 6.12 - Folha de cálculo de aplicação ao betão para os dados do vídeo-extensómetro

Na Figura 6.12, o tempo corrigido refere-se ao tempo inicial de medição (time) subtraindo o tempo cronometrado entre o início do ensaio com os dois equipamentos em simultâneo.

Após a organização dos dados recolhidos e com recurso às ferramentas do Excel (como as tabelas dinâmicas), estes são organizados de segundo a segundo como mostra a Figura 5.8. Estes valores já são apresentados por intervalo de tempo

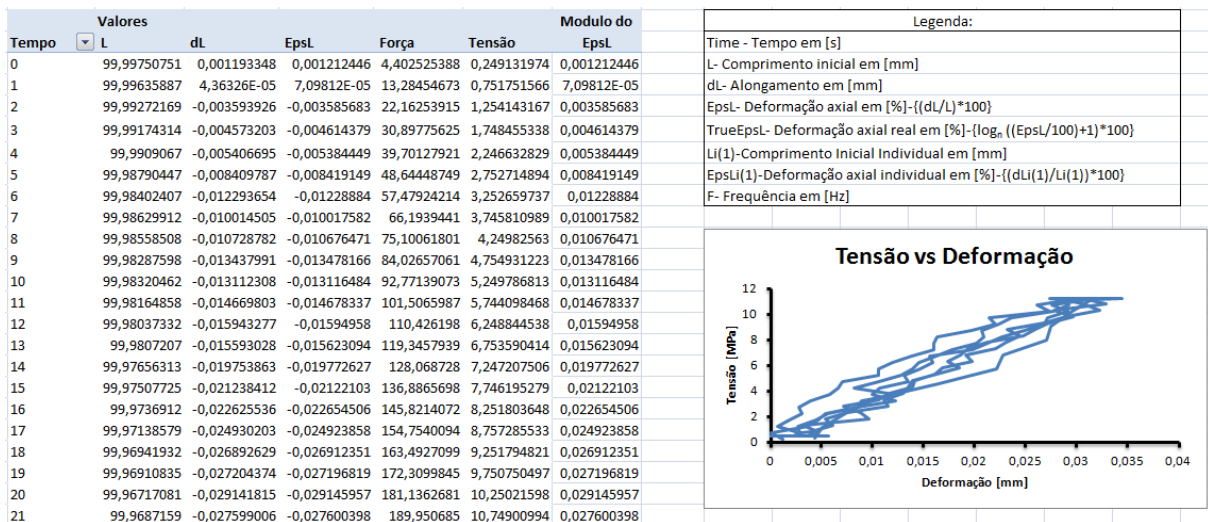


Figura 6.13 - Folha de cálculo como os dados do betão organizados segundo a segundo

De forma a comparar os valores do extensómetro com os valores do vídeo-extensómetro também foi utilizado uma folha de cálculo em formato Excel, conforme Figura 6.14, para transferir os dados do extensómetro (em ficheiro texto), e assim, proceder ao cálculo dos parâmetros a medir.

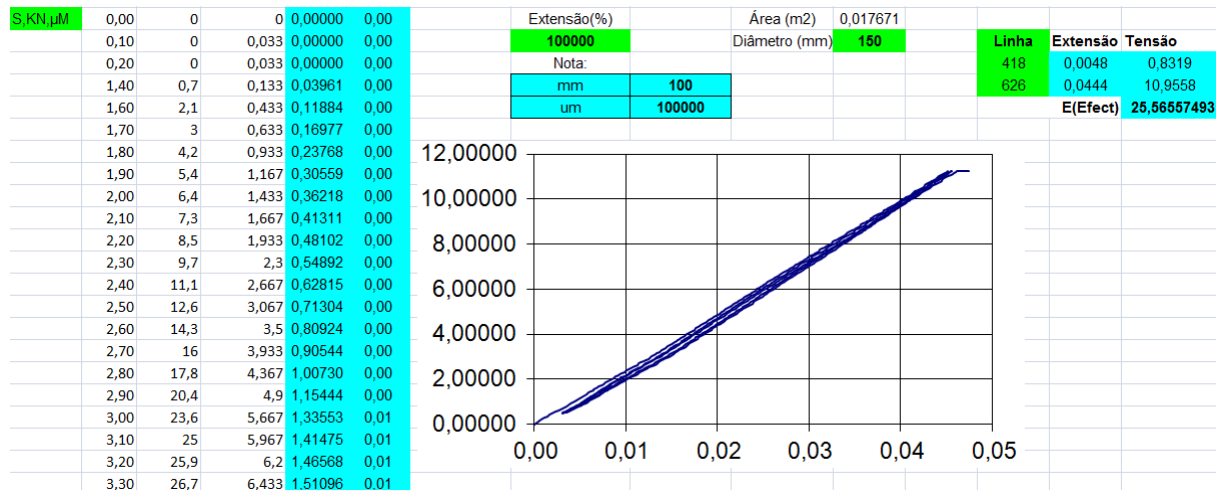


Figura 6.14 - Folha de cálculo como os dados do aço recolhidos pelo extensómetro (LREC)

A folha de cálculo utilizada para os dados do extensómetro é a mesma folha de cálculo utilizada no LREC para o ensaio de Betão. Esta folha de cálculo está preparada para receber os dados de todos os ensaios realizados com o mesmo tipo de provete e efetuar um relatório final de ensaio, de acordo com a Figura 6.15.

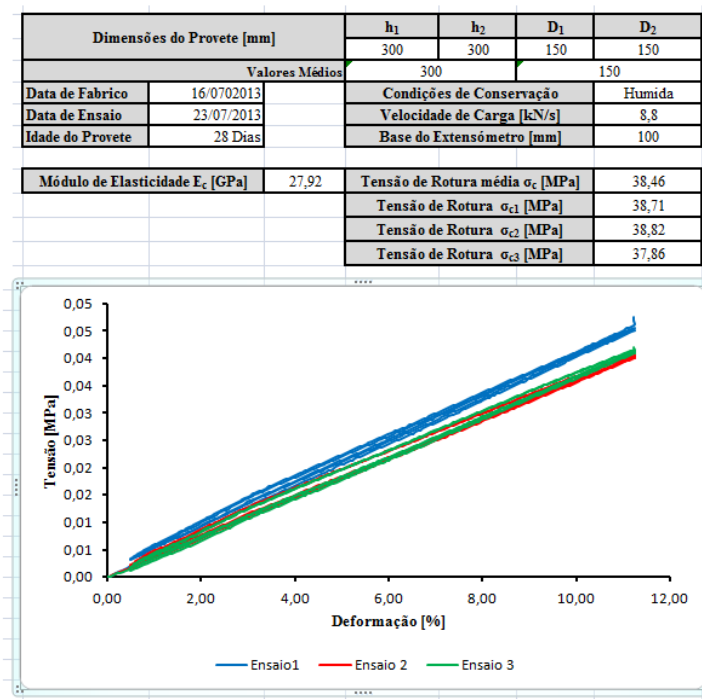


Figura 6.15 - Relatório final de ensaio de betão pelo dados do extensómetro (adaptado do LREC)

Assim, a partir dos dois modelos, efetuou-se o cruzamento de dados do vídeo-extensómetro com o extensómetro a fim de concluir se o sistema de medição com recurso a uma câmara de filmar é fiável e se apresenta valores comparáveis ao método usado frequentemente.

6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas Figuras 6.15 a 6.32, apresenta-se as curvas de tensão deformação obtidos pelo extensómetro e vídeo-extensómetro, para os diversos tipos de moldes e idades do betão. Como é visível na representação gráfica o andamento das curvas pelo vídeo-extensómetro mesmo depois de filtrado o sinal apresenta muita variação relativamente aos dados de deformação, o que pode implicar que o sistema não seja credível para a medição de deformações em fase elástica do betão.

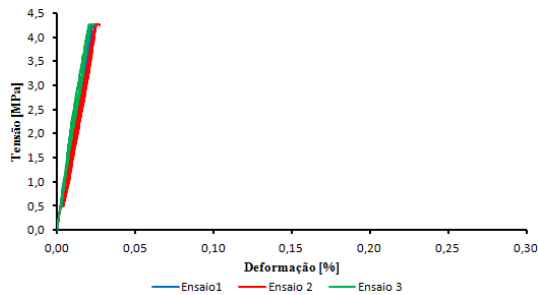


Figura 6.15 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro às 24 horas

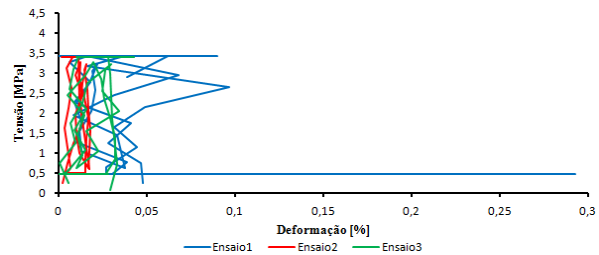


Figura 6.16 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro às 24 horas

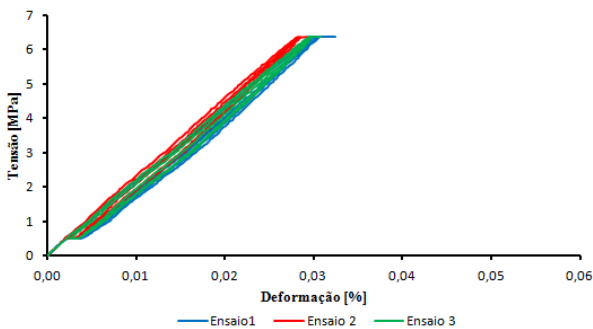


Figura 6.17 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro às 72 horas

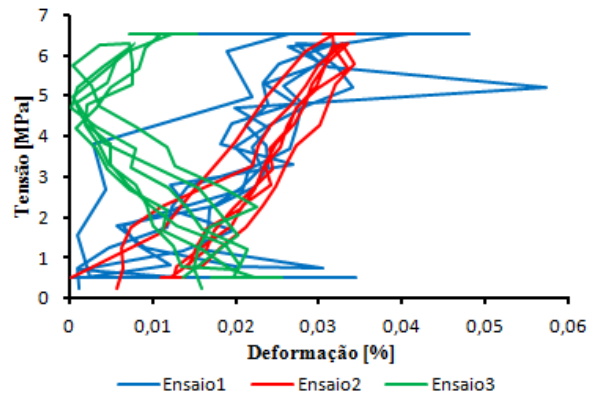


Figura 6.18 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro às 72 horas

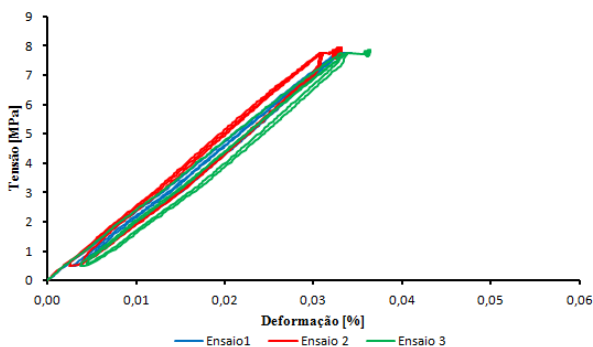


Figura 6.19 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro aos 7 dias

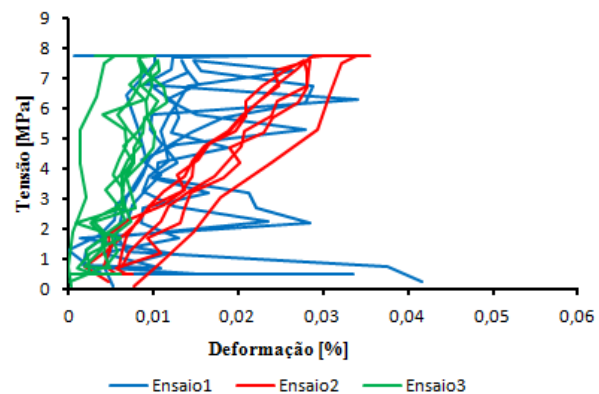


Figura 6.20 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro aos 7 dias

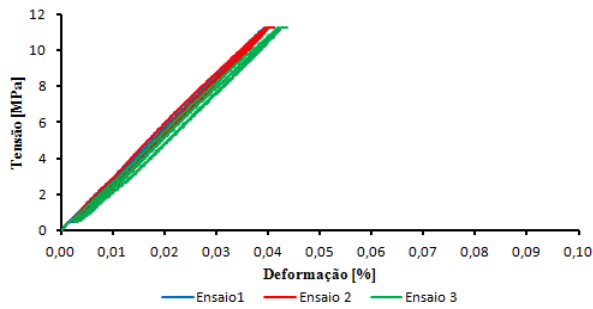


Figura 6.21 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro aos 28 dias

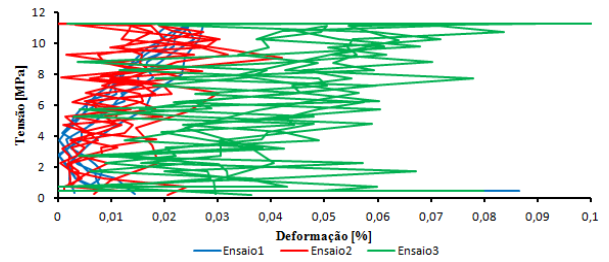


Figura 6.22 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro aos 28 dias

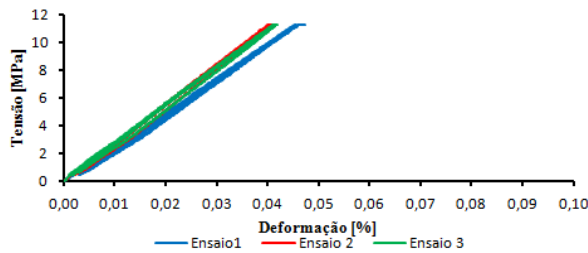


Figura 6.23 - Curva tensão deformação extensómetro no cilindro 90º aos 28 dias

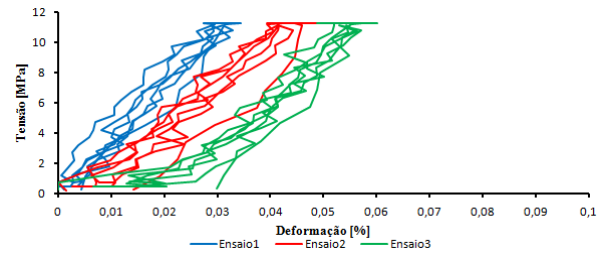


Figura 6.24 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no cilindro 90º aos 28 dias

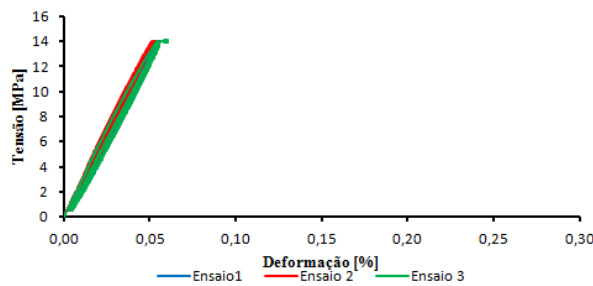


Figura 6.25 - Curva tensão deformação extensómetro no Prisma aos 28 dias

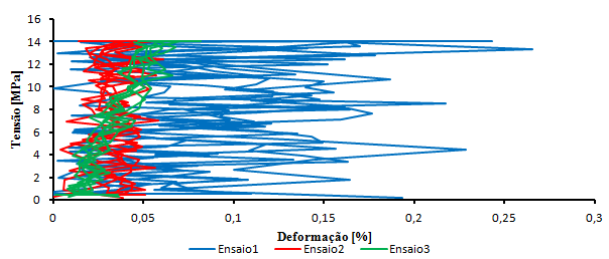


Figura 6.26 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no Prisma aos 28 dias

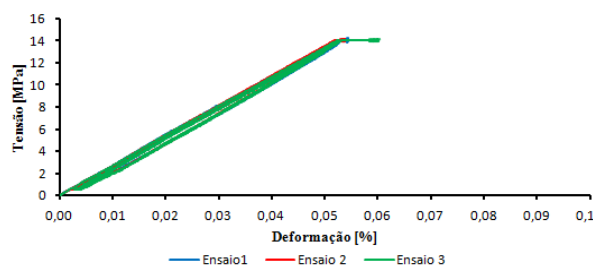


Figura 6.27 - Curva tensão deformação extensómetro no Prisma 90º aos 28 dias

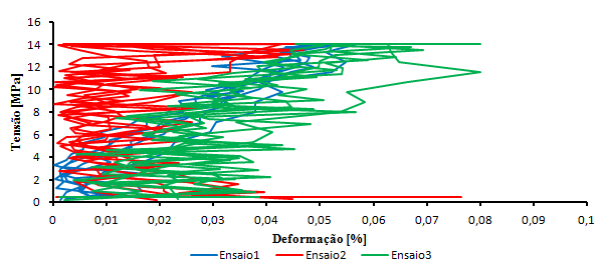


Figura 6.28 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no Prisma 90º aos 28 dias

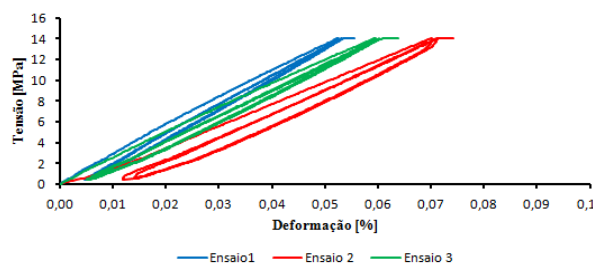


Figura 6.29 - Curva tensão deformação extensómetro no Cubo metálico aos 28 dias

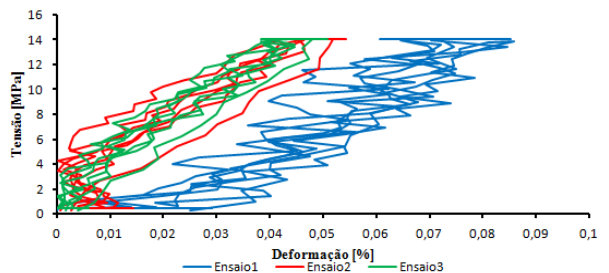


Figura 6.30 - Curva tensão deformação vídeo-extensómetro no Cubo metálico aos 28 dias

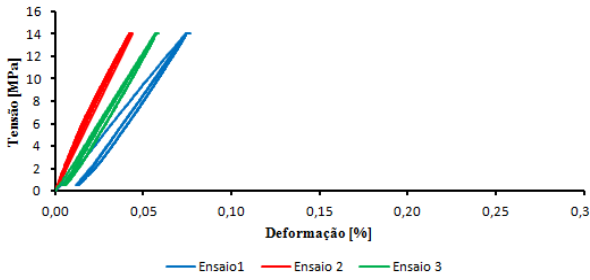


Figura 6.31 - Curva tensão deformação extensômetro no Cubo metálico 90° aos 28 dias

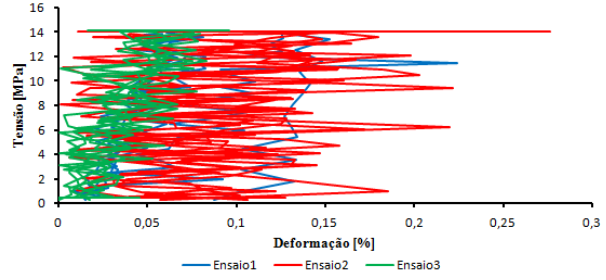


Figura 6.32 - Curva tensão deformação vídeo-extensômetro no Cubo metálico 90° aos 28 dias

Como é observável na Figura 6.33, e nos Quadros 6.3 e 6.4, os valores de módulo de elasticidade dos dois sistemas são muito próximos em todas as idades, exceto no terceiro ensaio aos 7 dias em que o valor obtido pelo o vídeo-extensômetro é cerca de 12 GPa superior ao obtido pelo extensômetro, contudo, quando efetuada a média dos três ensaios estes apresentam valores semelhantes entre os dois sistemas, com mostra a Figura 6.34.

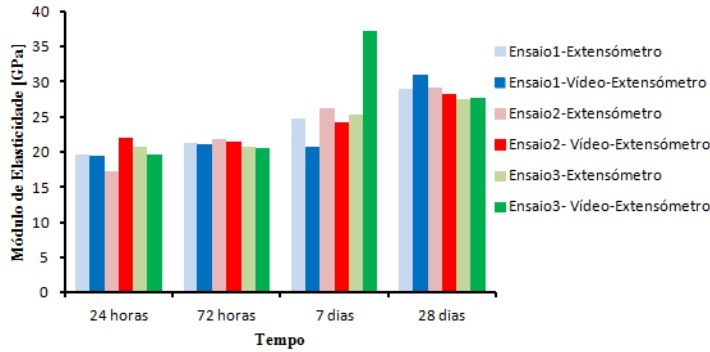


Figura 6.33 - Variação do Módulo de Elasticidade nos diferentes ensaios com a idade do Betão

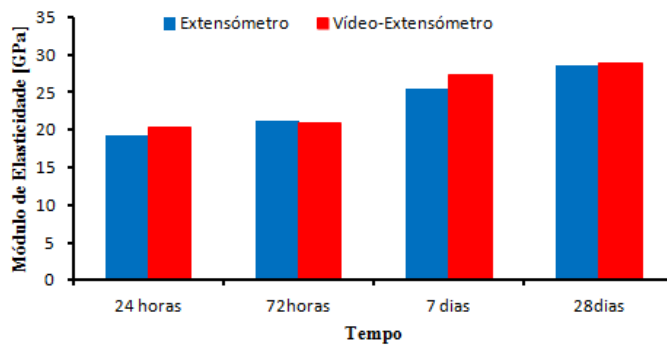


Figura 6.34 - Variação do Módulo de Elasticidade médio com a idade do Betão

Quadro 6.3 - Módulo de Elasticidade no betão com Extensômetro

Idade do Betão				
	24 Horas	72 Horas	7 Dias	28 Dias
Ec (GPa) Ensaio 1	19,62	21,33	24,77	28,95
Ec (GPa) Ensaio 2	17,18	21,79	26,20	29,22
Ec (GPa) Ensaio 3	20,71	20,69	25,27	27,53
Ec (GPa) Média	19,17	21,27	25,41	28,57

Quadro 6.4 - Módulo de Elasticidade no betão com Vídeo-Extensómetro

Idade do Betão				
	24 Horas	72 Horas	7 Dias	28 Dias
Ec (GPa) Ensaio 1	19,35	21,05	20,60	30,98
Ec (GPa) Ensaio 2	21,93	21,49	24,17	28,17
Ec (GPa) Ensaio 3	19,55	20,47	37,14	27,75
Ec (GPa) Média	20,28	21,00	27,30	28,97

A fim de averiguar se o módulo de elasticidade varia com o tipo de molde e com a orientação do mesmo no ensaio, obteve-se resultados semelhantes em todos os ensaios, como mostra a Figura 6.35 e os Quadros 6.5 e 6.6. Exceto no ensaio em cubos metálicos rodado 90° em que no segundo ensaio obteve-se resultados mais desfasados dos restantes, contudo quando efetuada a média dos resultados dos ensaios é constatável que estes são próximos e não variam muito consoante a sua forma, com o tipo de molde nem com a sua orientação, como demonstra a Figura 6.36.

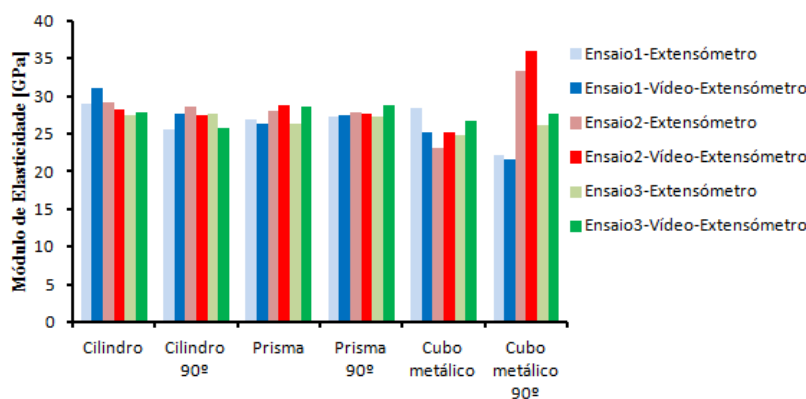


Figura 6.35 - Variação do Módulo de Elasticidade nos ensaios do Betão aos 28 dias em função do tipo de molde

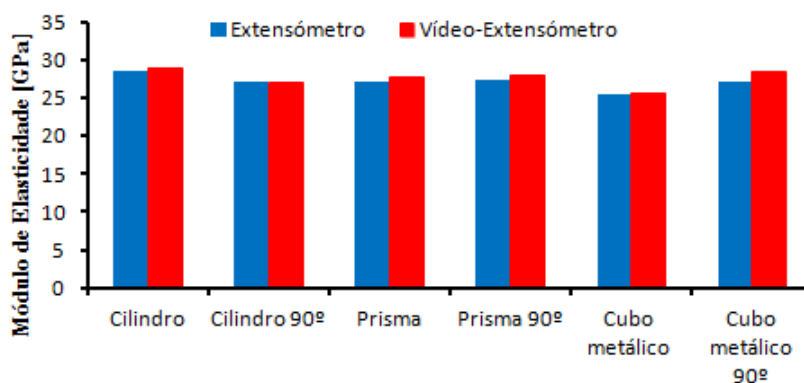


Figura 6.36 - Variação do Módulo de Elasticidade médio do Betão aos 28 dias em função do tipo de molde

A determinação do módulo de elasticidade para os provetes rodados a 90 graus, tem por objetivo verificar se a orientação deste influencia na sua determinação, como é visível na

Figura 6.36, em que está representado os valores médios do módulo de elasticidade, a orientação não influencia na determinação do módulo de elasticidade.

Na análise dos provetes cilíndricos é possível comprovar que a diferença entre a orientação dos mesmos aquando do ensaio é de aproximadamente 2% ,por sua vez, nos provetes prismáticos é de 0,5% e nos provetes cúbicos metálicos é de 3,5%, o que permite concluir que para a determinação do módulo de elasticidade em ambos os sistemas, a utilização de provetes cilíndricos ou prismáticos apresentam valores mais realistas.

O valor do módulo de elasticidade de um betão de classe C30/37, segundo o EC2 é de 33 GPa, para betão com agregados de quartzito, e com um acréscimo de 20% no caso de se tratar de um betão com agregados basálticos.

Uma vez que na ilha da Madeira os agregados são de origem basáltica é de esperar valores de módulo de elasticidade a rondar 40GPa para betões com 28 dias de idade.

Pela Figura 6.34 é verificado que os valores do módulo de elasticidade para um betão C30/37 com idade de 28 dias e com provetes de moldes diferentes, o valor do módulo de Elasticidade é bem inferior ao estabelecido pelo EC2 para betões com agregadas basáltico. Comprova-se, todavia, que este apresenta valores ainda inferiores aos tabelados pelo mesmo código para betões de referência com agregados de quartzito.

Na campanha de ensaios, os valores do módulo de elasticidade variam entre os 25GPa e os 29GPa, para os ensaios efetuados aos 28 dias, não havendo grande variação do valor, quando medido pelo o extensómetro ou pelo vídeo-extensómetro, como mostra o Quadro 6.5.

Quadro 6.5-Diferenças entre Módulo de Elasticidade

Provete	Módulo de Elasticidade obtido em [GPa]		Diferença entre os valores obtidos em [%]	
	Extensómetro	Vídeo-Extensómetro	Entre sistemas	Extensómetro e EC2
Cilindro	28,57	28,97	+1,38%	-13,43%
Cilindro 90°	27,26	26,98	-1,03%	-17,39%
Prisma	27,13	27,87	+2,67%	-17,80%
Prisma 90°	27,48	28,03	+1,96%	-16,73%
Cubo Metálico	25,41	25,03	+1,13%	-23,01%
Cubo Metálico 90°	27,26	28,43	+4,14%	-17,39%

Do Quadro 6.5 e da Figura 6.37, é possível concluir que a medição com recurso ao vídeo-extensómetro apresenta valores pouco desfasados dos valores obtidos pelo extensómetro,

assim sendo, o sistema de medição por vídeo-extensómetro é um bom método para determinar o módulo de elasticidade do betão. Esta conclusão só é possível devido à determinação do módulo de elasticidade ser efetuada através de dois pontos, como referencia a norma. Caso se pretenda calcular através do declive da reta esta conclusão não seria possível, uma vez que o sinal por vídeo-extensómetro apresenta muito ruído ao longo dos ensaios.

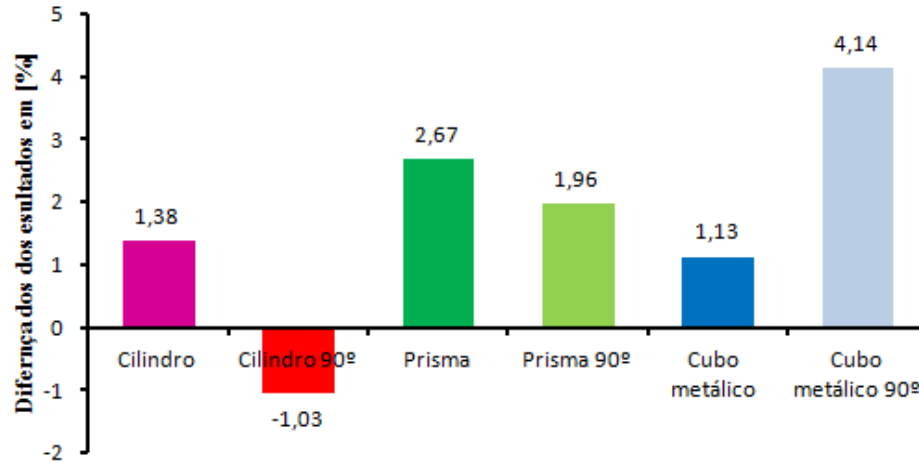


Figura 6.37- Diferença em percentagem do Módulo de Elasticidade médio do Betão aos 28 dias em função do tipo de molde

É constatável no quadro que a diferença entre os valores obtidos e os valores de referência no EC2 (agregados de quartzito) é superior a 16%, em que o betão estudado apresenta um módulo de elasticidade inferior 16% ao valor de referência do EC2.

Ainda pode ser observado que a forma do provete pouco influencia na determinação do módulo de elasticidade, uma vez que apresentam valores próximos em todos os tipos de provetes ensaiados aos 28 dias.

Analisando o módulo de elasticidade nas diversas idades, pode-se concluir que para o provete cilíndrico (visível na Figura 6.34) que ao fim de 24 horas de presa, este já possui mais de 50% do valor de módulo de elasticidade determinado aos 28 dias.

Segundo o EC2, o módulo de elasticidade do betão até aos 28 dias pode ser calculado pela Equação 6.2.

$$E_c(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \times E_c \quad [6.2]$$

onde; $E_c(t)$ é o módulo de elasticidade na idade t ; $f_{cm}(t)$ é a tensão de rotura do betão à compressão na idade t (em dias); f_{cm} é a tensão de rotura do betão aos 28 dias de acordo com o (Quadro 3.1 do EC2), cujo o valor é 38 MPa e E_c é o valor do módulo de elasticidade com idade de 28 dias.

De forma a obter a tensão de rotura ao longo da idade $f_{cm}(t)$ é necessário efetuar o cálculo recorrendo à equação 6.3 e 6.4 que pertence ao EC2. O Quadro 6.4 apresenta todos os valores esperados ao longo da idade do betão.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad [6.3]$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad [6.4]$$

em que:

$f_{cm}(t)$ - Tensão média de rotura do betão à compressão à idade de t dias;

f_{cm} - Tensão média de rotura do betão aos 28 dias de idade, de acordo com o Quadro 3.1 do EC2;

$\beta_{cc}(t)$ - Coeficiente que depende da idade do betão t ;

t - Idade do betão em dias;

s - Coeficiente que depende do tipo de cimento sendo igual a 0,20 para cimento de classe de resistência CEM 42,5 R

Quadro 6.4- Variação do módulo de elasticidade teórico e prático com a idade do Betão

Idade	Valores de tensão na idade (t) [MPa]		Ec(t) segundo Equação. 6.2 em [GPa]	Módulo de Elasticidade Obtido em [GPa]		Diferença entre Ec(t) e Ec do extensómetro em [%]
	$f_{cm}(t)$ calculado	$f_{cm}(t)$ experimental		Extensómetro	Vídeo-Extensómetro	
24 horas	18,98	13,58	26,79	19,17	20,28	-28,45%
72horas	27,69	21,62	30,01	21,27	21,00	-29,13%
7dias	33,10	27,37	31,66	25,41	27,30	-19,13%
28dias	39,20	38,46	33,31	28,57	28,89	-14,23%

A partir do Quadro 6.4, verifica-se mais uma vez que o módulo de elasticidade obtido experimentalmente é inferior ao teórico, definido pelo EC2. Esta diferença também é visível na tensão de rotura do betão, uma vez que esta sendo determinada experimentalmente é sempre inferior à calculada, definida no EC2, como mostra a Figura 6.35. Sendo este fenómeno uma consequência dos direta de fluência e fendilhação do betão.

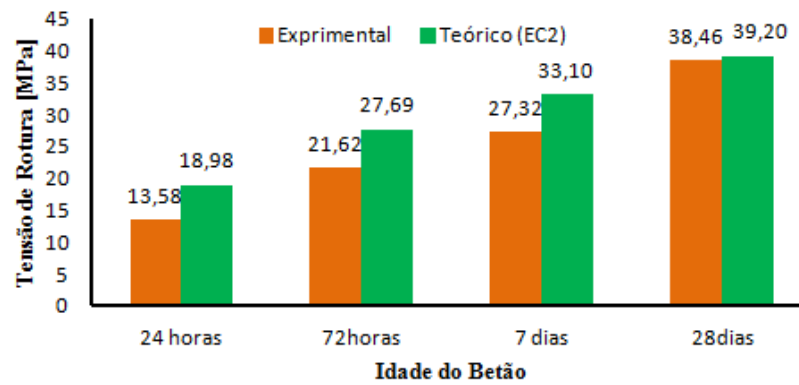


Figura 6.35 - Tensão de Rotura experimental e teórica do Betão nas diferentes idades

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A campanha de ensaios no betão, foi bem sucedida, quanto ao objetivo principal da dissertação, uma vez que os valores obtidos através do vídeo-extensómetro encontram-se dentro dos valores obtidos através do extensómetro, havendo apenas variações na ordem de 1% a 5% no valor de módulo de elasticidade, mas isto só foi possível porque o módulo de elasticidade é calculado apenas por dois pontos, caso se pretenda calcular através de outra forma, estes resultados seriam impensáveis visto que o sinal do vídeo-extensómetro apresenta muito ruído mesmo depois de filtrado.

À partir dos resultados obtidos para as diferentes idades do betão, conclui-se que o betão nas idades mais jovem já possui mais de 50% do módulo de elasticidade aos 28 dias, sendo que, o seu acréscimo de módulo de elasticidade é mais significativo nas primeiras 24 horas.

Da análise dos resultados obtidos para os diferentes tipo de moldes bem com o posicionamento dos mesmo é verificado que o tipo de molde e o posicionamento do mesmo não interfere na determinação do modulo de elasticidade, mas é de salientar que devido as suas dimensões reduzidas e devido a distância entre referências para aplicar os sistemas de medição este tipo de moldo deve ser evitado na determinação do módulo de elasticidade.

Assim, pode-se afirmar que o vídeo-extensómetro é um equipamento que ainda não permite medir com grande rigor as deformações em qualquer fase do material. Apesar de na fase elástica os resultados serem satisfatórios, estes só são válidos quando o cálculo do módulo de elasticidade é efetuado da forma acima referida.

É, de salientar, que o módulo de elasticidade do betão em estudo, com agregados basálticos, apresenta um valor inferior ao de referência, na ordem dos 16%. Sendo o de referência composto por agregados de quartzito, o EC2 faz referência que os betões de agregados basálticos devem possuir valor de módulo de elasticidade superior a 20% do valor de referência, sendo assim, estamos perante um caso em que o módulo de elasticidade estudado está abaixo do valor regulamentar em cerca de 36%, o que no dimensionamento de estruturas de engenharia civil pode ser gravoso e causar danos, daí surgir a necessidade de estudar os materiais antes do dimensionamento e da sua aplicação.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o aparecimento e evolução da tecnologia ligada à imagem, surge a necessidade de aplicá-la a todas as áreas científicas, sendo que na engenharia civil esta toma grande importância uma vez que passou a ser possível realizar a monitorização de estruturas através de sistemas como a fotogrametria e videogrametria que não são intrusivas, nem danificam as estruturas ao invés dos métodos tradicionais de monitorização.

A utilização do sistema de medição por vídeo-extensómetro para determinação do módulo de elasticidade apresenta exatidão nos resultados, mas ainda apresenta precisão limitada, visto haver muito ruído mesmo depois do sinal filtrado, assim sendo, este sistema de medição pode ser cuidadosamente aplicado em detrimento do sistema tradicional, sendo provável que com o evoluir tecnológico a sua precisão seja bastante melhorada.

A aplicação do sistema de medição por vídeo-extensómetro para determinação do módulo de elasticidade em detrimento ao extensómetro tradicional, que é intrusivo ao material, facilita as leituras de deslocamentos desde o início do ensaio até à rotura do material, sem haver paragem para retirar o extensómetro.

Para tal a correta marcação dos provetes são fundamental para verificar a variação de contraste no provete e efetuar uma leitura mais precisa dos deslocamentos entre marcas ao longo do tempo de ensaio.

Devido a grande frequência de aquisição de dados a aplicação de uma média por segundo aos dados recolhidos pelo vídeo-extensómetro é fundamental para a organização compactação e interpretação dos mesmos.

Da análise e comparação dos ensaios efetuados no aço conclui-se que o sistema aplicado nesta dissertação obteve, bons resultados para o módulo de elasticidade, uma vez que a variação do mesmo entre o extensómetro e o vídeo-extensómetro está entre 1 % e 5%, o que dá uma boa fiabilidade ao sistema. Visto este ser calculado segundo a norma, isto é, através de dois pontos de tensão e deformação.

É comprovado também que a variação do diâmetro do varão de aço não influencia na determinação do módulo de elasticidade uma vez que os resultados obtidos estão de acordo com os estabelecidos pelos regulamentos, nomeadamente o EC2

A determinação e comparação das extensões últimas do aço, só é possível realizar quando a rotura do varão acontece entre as marcas de referência, pois só assim é que a rotura acontece no campo de leitura de dados do vídeo-extensómetro.

Da análise de comparação dos ensaios efetuados no betão conclui-se que o sistema aplicado nesta dissertação obteve, bons resultados de módulo de elasticidade, uma vez que a variação do mesmo entre o extensómetro e o vídeo-extensómetro está entre 1 % e 5%, nos provetes ensaiados aos 28 dias de idade, o que dá uma boa fiabilidade ao sistema.

É verificado que a forma e a orientação do provete pouco influencia na determinação do módulo de elasticidade, visto estes terem valores próximos com uma variação de 2% para os provetes cilíndricos, de 0,5% para os provetes prismáticos e de 3,5% para os provetes cúbicos. Assim sendo, este último tipo de provete não é o mais aconselhável na utilização para determinação do módulo de elasticidade.

Da análise dos dados do betão, verificou-se que o betão ao fim de 24 horas já possui mais de 50% do valor do módulo de elasticidade que detém aos 28 dias de idade.

No betão estudado com agregados basálticos, o módulo de elasticidade foi inferior ao de referência (agregados de quartzito) em 16%, embora o EC2 aponte para um valor 20% superior ao de referência, conclusão também anteriormente obtida por Caetano *et al.* (2012).

Nesta dissertação verificou-se também que a tensão de rotura do betão para as diferentes idades é sempre inferior ao regulamentado, sendo essa diferença mais perceptível nas idades mais jovens do betão.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Um vez que a videogrametria não é um sistema de utilização frequente em engenharia civil, mas possui boas características para aplicar na monitorização de estruturas e no estudo das propriedades dos materiais, deixa-se algumas sugestões para eventuais trabalhos futuros nesta área de conhecimento.

- Criar sistemas de fácil aplicação e interpretação de dados, de modo a que possa ser utilizado por qualquer pessoa.
- Desenvolver sistemas de aquisição em conjunto pelo vídeo-extensómetro e extensómetro a fim de obter o valor correto de carregamento ao longo do ensaio, bem com criar sistemas que permitam iniciar e concluir os vários sistemas em simultâneo.
- Criar um sistema que permita realizar leituras de dados a partir de 3 ou mais referências com a mesma câmara de vídeo, a fim de contemplar todo o provete de ensaio a tração e assim ser possível determinar a extensão última corretamente, independentemente de onde ocorra a rotura do varão.

REFERÊNCIAS

- Brutch, R. - *History of photogrammetry*. Center Photogrammetry Training, Ferris State University. 2008.
- Caetano, C.; Maia, L.; Hilario, L.; Correia, M. - Encontro Nacional Betão Estrutural - *Módulo de Elasticidade em Betões com Agregados Basálticos*. 2012.
- Casarosa, G.; Sarti, B.; Roure, S. - *Development and Evaluatiopn of measurement system for Motin tracking and Estimation Based on Image Processing Tecniques*. In: 5th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes, Noordwijk, The Netherlands, 2004.
- Corrêa, D. S. - *Desenvolvimento de um Sistema para Estudo da Marcha Humana por Videogrametria e Acelerométria*. Prova para Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- Dias, F. W. - *Comportamento Mecânico do Polímero PTFE sujeito a Diferentes Taxas de Deformação*. Tese de Mestrado, Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, 2011.
- Dias-da-Costa, D.;Valença, J.; Júlio, E. - *Monitorização Estrutural até à Rotura Aplicando Técnicas de Pós-Processamento de Dados Obtidos por Fotogrametria*. In: Encontro Nacional Betão estrutura (BE2010). Lisboa. 2010.
- Dias-da-Costa, D.;Valença, J.; Júlio, E. N. B. S. - Laboratorial test monitoring applying photogrammetric post-processing procedures to surface displacements. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederatin*. 44:3 (2011). p. 527-538.
- Dimande, A. O. - *Análise Experimental de Pontes durante a Construção e em Serviço*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- E 397- 1993, Especificação LNEC. *Betões. Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão*. 1993.
- Félix, C. M. S. - *Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.

Figueiredo, E. J. F. - *Monitorização e Avaliação do Comportamento da Obras de Arte*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.

Geodetic - *Basics of Photogrammetry*. Melbourne, Florida, USA: Geodetic Systems, Inc., 1996.

Gil, S.; Reisin, H. D.; Rodriguez, E. E. - Using a digital camera as a measuring device. *American Journal of Physics*. 79:9 (2006). p. 768-775.

Gonzales, R.; Woods, R. - *Digital image processing*. ed. Second Edition, Prentice Hall. 2002.

Gruen, A. - Fundamentals of videogrammetry - A review. *Human Movement Science*. 16:2-3 (1997). p. 155-187.

Manual. - *Videoextensometer NG - Version 5.12.3*. no.235, p. 2-165.

NP EN 10002-1, Norma Portuguesa. *Materiais Metálicos Ensaio de tração, Parte1: Método de ensaio à temperatura ambiente*. 2006.

NP EN 1992- 1- 1, Eurocódigo 2 - *Projeto de estruturas de betão, Parte 1- 1: Regras gerais e regras para edifícios*. 2010.

Santos, J. M. M. N. - *Avaliação da Ductilidade das Estruturas de Betão Armado -Abordagem Experimental e Numérica*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

Scuri, A. E. - *Fundamentos da Imagem Digital*. Brasil: Tecgraf/PUC-Rio, 2002.

Temba, P. - *Fundamentos da Fotogrametria*. Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

Valença, J. - *Aplicações da fotogrametria à engenharia de estruturas*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2006.

Valença, J. M. A. - *Monitorização do Estado de Conservação de Estruturas de Betão por Processamento de Imagem e Análise Multi-Espectral*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2011.

Valença, J.; Júlio, E.; Araújo, H. -.A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia civil. *Aplicação da Fotogrametria na Monitorização de estruturas*. 2007.

Valença, J.; Júlio, E.; Araújo, H. -.*Aplicação de Fotogrametria em Engenharia Civil*. Patoreb 2006, Porto, Portugal. 2006. p. 803-812.

Young, I.T.; Gerbrands, J. J.; Vliet, L. J. V. - *Fundamentals of image processing*. The Netherlands: ISBN 90-75691-01-7, Delft University of Technology, 1998.

Zitová, B.; Flusser, J. - Image registration methods: A survey. *Image and Vision Computing*. 21:11 (2003). p. 977-1000.

