



Divaldo Valente Soroa

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Medição da deformação em materiais metálicos através de sistemas de visão

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Doutor Jónatas Miguel de Almeida Valença

Coorientador: Doutor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco

Júri:

Presidente: Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues

Vogal: Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos (Arguente)

Vogal: Doutor Jónatas Miguel de Almeida Valença (Orientador)



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Medição da deformação em materiais metálicos através de sistemas de visão

Copyright © Divaldo Valente Soroa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram a que eu chegasse até este momento de realização académica e profissional, mas como não podem ser todas referidas neste documento, gostava de citar apenas um conjunto de nomes aos quais gostava de reforçar o meu agradecimento:

- à avó Fela e o avô Moisés, a primeira me ensinou a ler e escrever, o segundo me exigia entrega nos estudos, ambos torceram por mim como ninguém.
- aos meus pais, Maria Regla, Maria dos Anjos, e Armando pelo carinho e a educação.
- aos meus irmãos, Natália, Jandira, Edilson, João e Márcia, pelo apoio, e as gargalhadas.
- à minha família mais extensiva pelo apoio incondicional.
- aos meus orientadores Jónatas Valenças e Eduardo Cavaco, pelos ensinamentos, e apoio em todas as fases do desenvolvimento desta dissertação.
- ao Bruno e Nycolas pelas revisões, pela paciência e pela amizade.
- ao Diogo, pelas lições de *Matlab*.
- à Alda e o Edson pelo suporte constante.
- a todos os meus amigos pelo apoio e amizade ao longo do percurso.
- ao engenheiro Filipe Silvestre da FabLab da FCT, pela disponibilização dos elementos referentes à preparação dos ensaios.

O autor agradece o apoio do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do acordo de parceria Portugal2020 - Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (COMPETE2020), no âmbito do projeto POCI-01-0247-FEDER-033948 STRAIN-VISION | Monitorização da extensão em laminados de CFRP pré-esforçados no reforço de elementos de betão através de visão por computador.



UNIÃO EUROPEIA
Fundos Europeus Estruturais
e de Investimento

RESUMO

A realização da medição de comprimentos, extensões e deslocamentos em estruturas de engenharia civil é uma tarefa fundamental durante a fase construtiva das mesmas por forma a assegurar a sua qualidade final, no que diz respeito à geometria e segurança. Durante a fase de exploração, estas medições são também muito relevantes nas tarefas de monitorização: como forma de garantir o desempenho das estruturas durante a sua vida útil; e que se comportam de acordo com as hipóteses de cálculo. Entende-se, portanto, que o desenvolvimento de novos métodos de medição e monitorização de estruturas de engenharia civil é uma área de investigação muito relevante.

As novas metodologias a desenvolver devem ter em consideração a precisão e exatidão dos resultados obtidos, mas também a rapidez e facilidade de execução, não esquecendo o custo associado. Neste âmbito, os métodos baseados em imagem são uma opção muito atrativa, pela sua versatilidade, rapidez e baixo custo, quando comparados com metodologias mais tradicionais. A maior desvantagem parece ser a relativa baixa exatidão. A maior parte dos estudos publicados sobre estes métodos baseiam-se em medições estruturais em fases avançadas do comportamento estrutural não linear, não apresentando na sua maioria medidas acerca da qualidade dos resultados alcançados. A efetividade destas técnicas em fase de comportamento elástico é ainda relativamente desconhecida.

Neste trabalho tem-se por objetivo avaliar a aplicação de métodos baseados em imagem na medição de extensões: (i) em fase elástica, para estimar o valor do Módulo de Elasticidade do material; (ii) em fase plástica, para permitir avaliar a relação constitutiva do material até à rotura. Para o efeito recorreu-se ao ensaio de tração de provetes de liga 5754 de alumínio com medição de extensões através das técnicas de Fotogrametria e Correlação Digital de Imagem (*Digital Image Correlation (DIC)*). Os resultados alcançados foram comparados com resultados de referência obtidos com recurso a extensometria tradicional baseada na variação da resistência elétrica.

Os resultados obtidos permitiram concluir sobre a precisão e exatidão de ambas as técnicas. Demonstrou-se que: (i) na determinação do Módulo de Elasticidade (E) do alumínio, é possível utilizar a Fotogrametria, prevendo uma possível diferença relativa do resultado de 10%, quando comparado com a medição do extensómetro, e a DIC com uma possível diferença relativa do resultado de 22%, quando comparado com a medição do extensómetro; (ii) na determinação da extensão do ensaio até à rotura, as técnicas com recurso a sistemas de visão garantem a medição de extensões em casos onde as técnicas clássicas falham, sendo possível obter diferenças relativas entre os 0.9% e os 13.7% em fase plástica, para a Fotogrametria, e entre os 2.3% e os 18.3% em fase plástica, para a DIC.

Palavras chave:

Medição, Extensão, Processamento, Digital, Fotogrametria, Imagem, Correlação, Precisão, Exatidão.

ABSTRACT

The measurement of lengths, extensions and displacements in civil engineering structures is a fundamental task during their construction phase to ensure their final quality, regarding geometry and safety. During the exploration phase, these measurements are also very relevant in the monitoring tasks: to guarantee the performance of the structures during their useful life; and that behave according to the calculation hypotheses. It is understood, therefore, that the development of new methods of measuring and monitoring civil engineering structures is a very relevant research area.

The new methodologies to be developed must consider the precision and accuracy of the results obtained, but also the speed and ease of execution, not forgetting the associated cost. In this context, image-based methods are a very attractive option, due to their versatility, speed, and low cost, when compared to more traditional methodologies. The biggest disadvantage seems to be the relatively low accuracy. Most of the studies published on these methods are based on structural measurements in advanced phases of non-linear structural behaviour, with most of them not presenting measures on the quality of the results achieved. The effectiveness of these techniques in the range of elastic behaviour is still relatively unknown.

This work aims to evaluate the application of image-based methods in the strain measurement: (i) in elastic phase, to estimate the value of the material's Elasticity Module; (ii) in the plastic phase, to allow the assessment of the constitutive relationship of the material up to rupture. For this purpose, we used the tensile test of 5754 aluminium alloy specimens with strain measurement using the techniques of Photogrammetry and Digital Image Correlation (DIC). The results achieved were compared with reference results obtained using traditional extensometry based on the variation of electrical resistance.

The results obtained allowed us to conclude about the precision and accuracy of both techniques. It was demonstrated that: (i) in determining the Elasticity Module (E) of aluminium, it is possible to use Photogrammetry, predicting a possible 10% relative result difference, when compared with the measurement of the strain gauge, and the DIC with a possible 22% relative result difference, when compared with the measurement of the strain gauge; (ii) in determining the extent of the test to failure, the techniques using vision systems guarantee the strain measurement in cases where the classic techniques fail, being possible to obtain relative differences between 0.9% and 13.7% in the plastic phase, for Photogrammetry, and between 2.3% and 18.3% in the plastic phase, for DIC.

Key words:

Measurement, Strain, Processing, Digital, Photogrammetry, Image, Correlation, Precision, Accuracy.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE GERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organização da dissertação	1
2. Estado da arte	3
2.1. Enquadramento.....	3
2.2. Lei constitutiva e comportamento reológico de materiais metálicos.....	3
2.3. Medição de extensões	4
2.4. Processamento de imagem: Conceitos básicos	5
2.4.1. Conceitos e elementos utilizados na medição digital de imagens.....	5
2.4.2. Fotogrametria	7
2.4.3. Digital Image Correlation (DIC)	9
2.5. Processamento de imagem: Aplicações	10
2.5.1. Enquadramento.....	10
2.5.2. Revisão Bibliográfica: Fotogrametria	11
2.5.3. Revisão Bibliográfica: Digital Image Correlation (DIC)	14
2.5.4. Comparação de resultados da revisão bibliográfica	18
3. Metodologia experimental	23

3.1. Enquadramento.....	23
3.2. Produção e preparação dos provetes.....	23
3.3. Procedimento experimental	26
3.4. Ensaios realizados	27
3.5. Análise e processamento de dados	28
3.5.1. Medição de extensões com Fotogrametria	28
3.5.2. Medição de extensões com Correlação Digital de Imagens (DIC)	32
3.5.3. A validação dos resultados - precisão, exatidão e variabilidade das medições. ...	35
4. Resultados	37
4.1. Enquadramento.....	37
4.2. Testes preliminares para aplicação da DIC	37
4.3. Determinação do Módulo de Elasticidade	42
4.3.1. Resultados obtidos com extensómetro	42
4.3.2. Resultados obtidos com Fotogrametria	45
4.3.3. Resultados obtidos com recurso à Correlação Digital de Imagens	49
4.3.4. Análise de resultados	54
4.4. Ensaios à rotura	55
4.4.1. Resultados obtidos com recurso ao alongamento do material (ΔLL)	55
4.4.2. Resultados obtidos com Fotogrametria	56
4.4.3. Resultados obtidos com recurso à Correlação Digital de Imagens	61
4.4.4. Análise dos resultados	66
5. Conclusões e desenvolvimentos futuros	69
5.1. Conclusões finais.....	69
5.2. Desenvolvimentos futuros.....	69
Referências bibliográficas	71
Anexos	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Fotogrametria e Correlação Digital de Imagens[3].....	3
Figura 2.2--Extensómetros elétricos[9].	5
Figura 2.3-Princípio da Fotogrametria[15].	7
Figura 2.4-Exemplo do padrão aleatório, para a análise com recurso ao DIC[4].....	10
Figura 2.5-Composição do hardware do sistema XJTUSM[21].....	11
Figura 2.6-Modelo ensaiado: Viga encastrada sujeita a lâmina compressora[15].	13
Figura 2.7-Dimensões dos provetes utilizados[23].	13
Figura 2.8-Provete antes e após deformação[24].	14
Figura 2.9-Dimensões do Provete de Aço (mm)[25].....	16
Figura 2.10-Dimensões do provete de Liga de Alumínio[26].	17
Figura 2.11-Preparação do ensaio, com detalhe do padrão aleatório do provete[28].	18
Figura 3.1-Dimensões dos provetes.	24
Figura 3.2-Zona de estudo do provete com os alvos pintadas.....	25
Figura 3.3-Zona de estudo do provete instrumentado com os alvos e as features.....	25
Figura 3.4-Set-up de ensaio.	27
Figura 3.5-Instante de captação das fotografias na fase elástica do ensaio (Ensaio A1).	28
Figura 3.6-Fluxograma para a identificação e obtenção de coordenadas dos alvos.	29
Figura 3.7-Ordenação e identificação dos alvos detetados com recurso ao Matlab.....	30
Figura 3.8-Fluxograma da rotina de Matlab desenvolvida para a análise com Fotogrametria.	31
Figura 3.9-Níveis de carga a considerar na análise com recurso à Fotogrametria.....	32
Figura 3.10-Abordagem de cálculo de extensões no GOM-Correlate por meio de um plano de corte.	33
Figura 3.11-Localização da Área de Pontos.	34

Figura 3.12-Fluxograma para a análise com recurso à Correlação Digital de Imagens.	35
Figura 4.1-Diagrama Força-Deslocamento obtido durante os ensaios dos provetes A2-A4.	37
Figura 4.2-Gráfico: Diferenças relativas obtidos pelos diferentes métodos abordados.	40
Figura 4.3- Área selecionada para o estudo do tamanho das facetas e a distância ao ponto no Gom Correlate: visão geral (esquerda); pormenor (à direita)	41
Figura 4.4- Extensões obtidas com diferentes tamanhos de faceta.....	41
Figura 4.5-Diferenças relativas obtidas com diferentes tamanhos de faceta.....	41
Figura 4.6-Gráfico «Extensão vs. Tempo». Ensaio para determinação do Módulo de Elasticidade	42
Figura 4.7-Gráfico «Tensão vs. ΔLL ». obtido com recurso ao extensómetro, provete A1.	43
Figura 4.8-Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso ao extensómetro (A1-A2).....	44
Figura 4.9-Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso ao extensómetro (A3-A4).....	44
Figura 4.10- Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso à Fotogrametria (A1-A2).....	48
Figura 4.11- Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso à Fotogrametria (A3-A4).....	49
Figura 4.12-Zona de estudos dos provetes com recurso ao GOM-Correlate.	50
Figura 4.13- Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso ao DIC (A1-A2).....	50
Figura 4.14- Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso ao DIC (A3-A4).....	51
Figura 4.15-Diferenças relativas obtidas com Fotogrametria e DIC.....	55
Figura 4.16-Instantes selecionados para a análise das extensões.....	56
Figura 4.17-Fotogrametria vs. Extensómetro, provete A2	57
Figura 4.18-Patamares de extensão, provete A2 (Fotogrametria).....	58
Figura 4.19-Fotogrametria vs. Extensómetro, provete A3	59

Figura 4.20-Patamares de extensão, provete A3 (Fotogrametria).....	59
Figura 4.21-Fotogrametria vs. Extensómetro, provete A4	60
Figura 4.22-Patamares de extensão, provete A4 (Fotogrametria).....	61
Figura 4.23-DIC vs. Extensómetro, provete A2	62
Figura 4.24-Patamares de extensão, provete A2 (DIC).....	62
Figura 4.25-DIC vs. Extensómetro, provete A3	64
Figura 4.26--Patamares de extensão, provete A3 (DIC).....	64
Figura 4.27-DIC vs. Extensómetro, provete A4	65
Figura 4.28-Patamares de extensão, provete A4 (DIC).....	66
Figura 4.29-Diferenças relativas das extensões medidas no provete A2	66
Figura 4.30-Diferenças relativas das extensões medidas no provete A3	67
Figura 4.31-Diferenças relativas das extensões medidas no provete A4	67
Figura 4.32-Descolamento da tinta aplicada à superfície do provete A4	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1-Comparação dos resultados de investigações prévias-Parte I.....	20
Tabela 2.2-Comparação dos resultados de investigações prévias-Parte II.....	21
Tabela 3.1-Propiedades mecânicas da liga de Alumínio 5754 [29].	23
Tabela 4.1-Média das extensões no plano de corte vs. Extensómetro.	38
Tabela 4.2-Médias das extensões obtidas com recurso a extensómetros virtuais [4] vs. Extensómetro.	38
Tabela 4.3-Médias das extensões obtidas pela abordagem de uma área de pontos vs. Extensómetro.	39
Tabela 4.4-Valores do Módulo de Elasticidade calculado para cada ensaio por via de extensómetros.	43
Tabela 4.5-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria – (Ensaio A1).....	46
Tabela 4.6-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria. (Ensaio A2).....	46
Tabela 4.7-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria. (Ensaio A3).....	47
Tabela 4.8-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria. (Ensaio A4).....	47
Tabela 4.9-Resultados obtidos com recurso à DIC. (Ensaio A1).	52
Tabela 4.10-Resultados obtidos com recurso à DIC. (Ensaio A2)	52
Tabela 4.11-Resultados obtidos com recurso à DIC. (Ensaio A3).....	53
Tabela 4.12-Resultados obtidos com recurso à DIC. (Ensaio A4)	53
Tabela 4.13-Comparação entre os resultados obtidos.	54
Tabela 4.14-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria no provete A2	57
Tabela 4.15-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria no provete A3	58
Tabela 4.16-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria no provete A4	60
Tabela 4.17-Resultados obtidos com recurso à DIC, provete A2	61

Tabela 4.18-Resultados obtidos com recurso à DIC, provete A3	63
Tabela 4.19-Resultados obtidos com recurso à DIC, provete A4	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ε Extensão

DIC *Digital Image Correlation*

E Módulo de Elasticidade

μ Média Aritmética

σ_v Desvio Padrão

Δ_r Diferenças relativas

C_v Coeficiente de Variação

RMS *Root Mean Square*

E_{ext} Módulo de Elasticidade calculado por via de extensómetros

$E_{\mu(ext)}$ Módulo de Elasticidade médio calculado por via de extensómetros

ε_{DIC} Extensões calculadas com recurso à DIC

ε_{ext} Extensões calculadas com por via de extensómetros.

ε_{fot} Variações de extensões calculadas com recurso à Fotogrametria

$\Delta\sigma$ Variações de tensões

$\Delta\varepsilon_{ext}$ Variações de extensões calculadas por via de extensómetros

$\Delta\varepsilon_{fot}$ Variações de extensões calculadas com recurso à Fotogrametria

E_{fot} Módulo de Elasticidade calculado com recurso à Fotogrametria

$E_{\mu(fot)}$ Módulo de Elasticidade médio calculado com recurso à Fotogrametria.

$\Delta\varepsilon_{DIC}$ Variações de extensões calculadas com recurso à DIC

E_{DIC} Módulo de Elasticidade calculado com recurso à DIC

$E_{\mu(DIC)}$ Módulo de Elasticidade médio calculado com recurso à DIC

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A indústria encontra-se em constante revolução e crescimento. Os projetos são cada vez mais exigentes e complexos, o que requer também soluções cada vez mais controladas e competitivas, para satisfazer o mercado sem deixar de garantir os parâmetros de qualidade e segurança. Muitas destas soluções são suportadas pela aplicação de novas tecnologias, ou seja, estão associadas à evolução tecnológica. Esta evolução tecnológica está também presente na indústria da construção, e nos seus vários sectores. Para garantir a qualidade duma obra, é necessário não só controlar os processos construtivos *in situ*, como também conhecer as propriedades e características dos materiais empregues. Neste âmbito, novas formas de controle destas características devem ser estudadas, a par da necessidade de reformular-se os métodos clássicos.

Existem, na bibliografia, diversos estudos publicados dedicados à caracterização mecânica de diferentes materiais utilizados na indústria da construção, com recurso a técnicas de processamento de imagem. No entanto, a maioria foca o estudo na fase plástica do comportamento, avaliando assim a capacidade máxima de deformação dos materiais. No que diz respeito à fase elástica, e em particular à avaliação de extensões de magnitude reduzida, o número de estudos publicados é ainda muito reduzido. Esta lacuna é ainda mais notória para as medições com recurso às técnicas óticas modernas. Sendo assim, resulta do maior interesse validar métodos óticos, não invasivos, para a medição de extensões e para o cálculo do Módulo de Elasticidade em materiais diversos, com especial atenção nos materiais de origem metálica e os polímeros, e com maior ênfase, na fase elástica dos mesmos.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal a validação e comparação da medição de extensões em ensaios laboratoriais através de Fotogrametria e a Correlação Digital de Imagens (DIC) em provetes de liga de alumínio 5754. Em particular, pretende-se avaliar os limites de validade destas técnicas considerando duas etapas dos ensaios: (i) fase elástica; (ii) fase plástica. Assim foram definidos os seguintes objetivos específicos.

- i) Determinação do Módulo de Elasticidade (E);
- ii) Determinação da extensão em vários instantes do ensaio até à rotura.

1.3. Organização da dissertação

No **Capítulo 1** é explicado em que contexto surge esta investigação, explicitando dados históricos e científicos. Posteriormente apresentam-se os objetivos da dissertação.

No **Capítulo 2** são explicados os conceitos de Extensometria, Fotogrametria, Correlação Digital de Imagem e os diferentes conceitos que facilitam o entendimento das técnicas de processamento referidas. Apresentam-se também algumas aplicações destes métodos, usando como base as investigações mais recentes na área da medição de extensões, que mais tarde são agrupadas e comparadas para assim demonstrar a relevância desta investigação.

No **Capítulo 3** é explicada a metodologia de ensaio de tração pura realizado no âmbito deste trabalho. São também detalhados os equipamentos utilizados, o material, obtenção e preparação dos provetes, os processos relacionados com a realização do ensaio; ainda, são apresentados os programas informáticos utilizados para o processamento de dados e a obtenção de resultados e os conceitos de precisão e exatidão, que serão fundamentais para a análise e manipulação dos dados obtidos.

No **Capítulo 4** são apresentados e comparados os resultados dos ensaios realizados por meio de gráficos e tabelas, chegando assim a conclusões parciais sobre o estudo realizado.

No **Capítulo 5** e final deste trabalho são apresentadas conclusões retiradas a partir da investigação desenvolvida. No final do capítulo são também abordadas as direções de estudo que viriam fortalecer a investigação nesta área.

2. Estado da arte

2.1. Enquadramento

Partindo da Fotogrametria, a maioria dos métodos óticos atuais (figura 2.1) foram desenvolvidos durante o século XX. Os autores Vinckier, Bossaert & Dechaene (Bossaert et al., 1968) e Rastogi (Rastogi, 2000) referem (respetivamente) que o Método de Moiré e a Interferometria Holográfica junto à Fotoelasticidade surgiram como os primeiros métodos óticos para estudar deformações nos materiais sem carácter invasivo. Porém a pouca viabilidade destes métodos na altura, estimulou o surgimento de novas investigações à procura de alternativas tecnológicas.

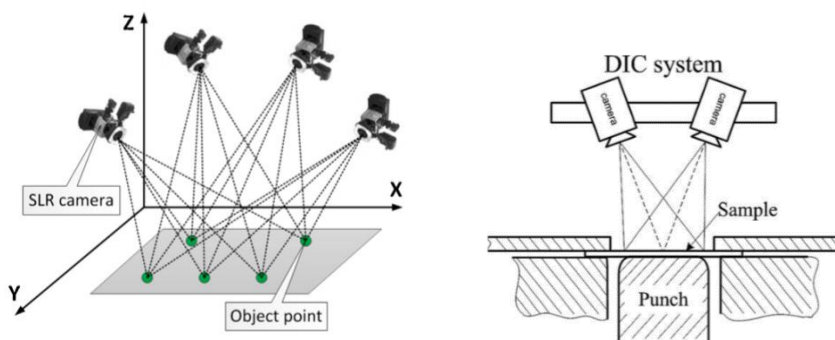


Figura 2.1-Fotogrametria e Correlação Digital de Imagens(L. G. Li et al., 2014).

Foi assim que na década de 80 do século passado, surge o método DIC (Gimenez, 2019), cujo constante desenvolvimento junto à emersão de *softwares* gratuitos de Correlação Digital de Imagens e Programação tem contribuído para que o método, hoje em dia, apresente um alto desempenho e seja empregue, inclusive, na monitorização estrutural.

2.2. Lei constitutiva e comportamento reológico de materiais metálicos.

A análise não linear de estruturas metálicas é habitualmente realizada através de modelos numéricos baseados na adoção de leis constitutivas simplificadas para a representação do comportamento dos aços. A representação do comportamento real dos aços pode ser melhorada através de leis constitutivas multilíneares ou não-lineares, as quais permitem uma melhor simulação das relações tensão-extensão realmente exibidas pelos aços, obtidas por via experimental. (Baptista et al., 2017)

A lei constitutiva é o último elo da cadeia que liga as forças aplicadas a um corpo aos movimentos que essas forças provocam no material que o constitui. É neste elo da cadeia que aparece o comportamento reológico do material, pois é necessário estabelecer-se as relações entre os esforços internos e as deformações, ou seja, num material contínuo, as relações entre as tensões e as extensões.(Silva, 2004)

Importa referir que o termo reologia deriva das palavras gregas *rheo*=fluxos e *logos*=estudo, e foi inicialmente introduzido por *Bingham* (1929), sendo a sua definição “a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria”. O principal objetivo da reologia é a descrição das relações existentes entre tensões e deformações (Brehm, 2014).

Para quantificar o comportamento dos materiais recorre-se geralmente, à via fenomenológica, que consiste na definição da lei constitutiva com base em resultados obtidos através de ensaios experimentais (Silva, 2004). Esta via permite também a observação das fases de deformação do material que pode ser principalmente:

- Elástica: que é referente à deformação recuperável que ocorre simultaneamente com a aplicação da carga e em que as relações entre a deformação e a força que lhe corresponde são as mesmas na fase de carga e na fase de descarga. Se essa relação for linear, diz-se que o material tem um comportamento elástico linear (Silva, 2004).
- Plástica: que é relativa à deformação não recuperável que ocorre simultaneamente com a aplicação da carga e que, de uma maneira geral, se manifesta apenas a partir de um determinado nível de tensões. Em muitos materiais, como por exemplo, no aço não endurecido, grande parte da deformação plástica dá-se bruscamente quando a tensão atinge um determinado valor, que se designa por tensão de cedência do material (Silva, 2004).

A modelação da lei constitutiva do material, e sobretudo da sua fase de endurecimento, pode influenciar significativamente o comportamento global de uma estrutura. Esta influência é particularmente importante no caso de, na estrutura, existirem elementos submetidos a importantes deformações plásticas (Baptista et al., 2017). É por este motivo, que é de relevante importância desenvolver metodologias de medição que permitam obter resultados com alto grau de precisão e exatidão.

2.3. Medição de extensões

A medição de extensões nos materiais utilizados em engenharia e em particular na indústria da construção, é já uma preocupação antiga; tanto na área de investigação, para caracterizar e comparar materiais; como na área de produção, para controlar a qualidade da produção na indústria.

Segundo (Portela & Silva, 1996), a extensometria é um conjunto de técnicas que permitem determinar o estado de deformação ao redor de um ponto de um corpo, a partir do conhecimento das extensões em várias direções nesse ponto.

Com este objetivo são realizados ensaios que podem ser de tipo destrutivos ou não destrutivos e cujo procedimento é normalizado tornando os resultados, para um mesmo material, reproduzíveis. Os ensaios podem ser de dobragem, fluência, fadiga entre outros, em função do tipo de material e das características do material que querem ser estudadas (Portela & Silva, 1996).

No caso dos materiais metálicos um dos ensaios mais comuns para a sua caracterização é o ensaio de tração. Num ensaio de tração o provete é solicitado a uma carga uniaxial crescente, sendo

contabilizados os patamares de carga e as extensões associadas a estes patamares; o extensómetro é o aparelho tradicional de medição destas extensões.

Os extensómetros são aparelhos utilizados experimentalmente, para avaliar as extensões ocorridas num dado ponto e numa dada direção numa peça ou provete (Portela & Silva, 1996), ou seja, é um artefacto, que a partir de uma base de medida consegue medir a variação de comprimento entre dois pontos lineares do provete.

Os extensómetros podem ser: mecânicos, acústicos ou de corda vibrante, elétricos de resistência (figura 2.2), ou óticos (Epsilon Tech, 2019).

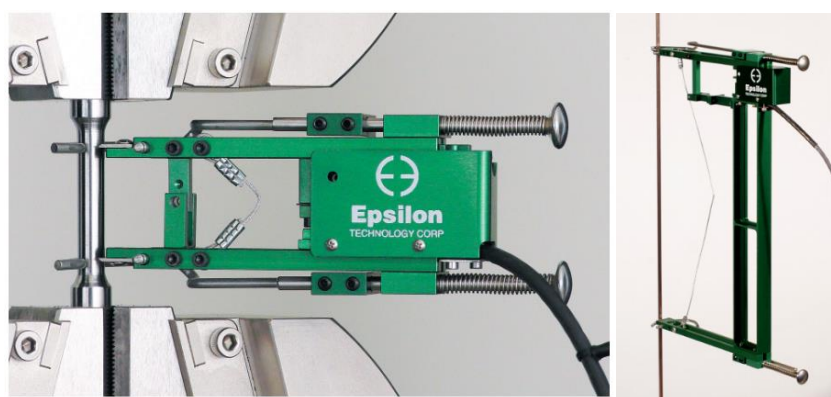


Figura 2.2--Extensómetros elétricos (Epsilon Tech, 2019).

Logo, como se vê, a medição de deformações pode ser feita recorrendo a métodos como a extensometria, mas a colocação e calibração dos extensómetros torna-o um processo moroso no que diz respeito à preparação dos provetes. Adicionalmente, e por ser um método de contacto com o provete, as condições do ensaio experimental devem ser cuidadosamente configuradas para que o risco de danificar o equipamento seja reduzido (Beleza, 2017).

Outro aspeto importante relativamente à extensometria é que as extensões são calculadas localmente segundo a direção em que se coloca o extensómetro (Beleza, 2017). Portanto, no estudo das propriedades de um material anisotrópico (um material cujas propriedades físicas variam com a direção em que são medidas), por exemplo, os resultados obtidos com recurso aos extensómetros, têm uma utilidade limitada.

É neste contexto que a comunidade científica tem procurado cada vez mais outros métodos mais versáteis de medição de extensões.

2.4. Processamento de imagem: Conceitos básicos

2.4.1. Conceitos e elementos utilizados na medição digital de imagens

Para compreender melhor as metodologias apresentadas no presente trabalho, é importante passar em revista alguns conceitos, tais como:

Pixel

O pixel constitui o menor elemento de uma imagem digital. A cada pixel vai ser então associada uma posição (x, y) e um valor de intensidade $f(x, y)$, considerando a imagem como se fosse uma função bidimensional(Hensley et al., 2017).

As intensidades de cada pixel são definidas com base numa escala. Por exemplo, considerando uma imagem monocromática, numa escala representada por 8 bits existem 256 combinações possíveis de cores. Ou seja, a escala varia em níveis de cor cinza (*gray level*) de 0 (preto) a 255 (branco), bastando por isso uma matriz para a definir. Já num formato de imagem *RGB* (*Red-Green-Blue*), são necessárias três matrizes para definir a intensidade de um único pixel, sendo que cada uma delas define cada uma das três cores: vermelho, verde e azul(Beleza, 2017).

A combinação das três matrizes corresponde a uma intensidade que define uma cor. Um algoritmo vai fazer a correlação entre o movimento de um bloco de uma imagem para a outra, com o deslocamento da superfície do provete e, sendo que a resolução de uma imagem é um pixel, o algoritmo só detetará movimentos de um número inteiro de pixels(GOM Company, 2015).

Features

No campo da inteligência artificial e mais em particular do *machine learning*, as *features* são as variáveis específicas usadas como entrada para um algoritmo. Os *features* podem ser seleções de valores brutos a partir de dados de entrada ou podem ser valores derivados desses dados. Na Correlação Digital de imagens (DIC), as *features* funcionam como uma unidade de agrupação de pixels; ou seja, para que a DIC funcione efetivamente, as *features* funcionam como blocos de pixels que precisam ser aleatórios e exclusivos, com variedade de níveis de contraste e intensidade.

Com os *features* certos, quase qualquer algoritmo de *machine learning* conseguirá analisar os parâmetros desejados. Sem uma boa qualidade de *features*, é quase impossível. É por isso que é especialmente necessário ter em conta a qualidade dos *features* em qualquer caso de estudo com recurso a algoritmos de *machine learning*. Já que geralmente os dados vêm com muito ruído e variações inerentes. (adaptado de (Feffer, 2017))

Para uma boa leitura das *features* a DIC nem sempre requer iluminação especial e, em muitos casos, a superfície natural da estrutura ou componente possui a textura de imagem suficiente para que a DIC funcione sem a necessidade de qualquer preparação especial da superfície(McCormick & Lord, 2010).

Componente de superfície

Corresponde à região de interesse de um objeto em estudo. Esta região deve ser selecionada tendo em conta que, após impostos os deslocamentos ao objeto, os pontos em estudo devem permanecer no interior desta região, para serem considerados na análise.

Facetas (Blocos)

As facetas ou blocos correspondem a unidades de agrupação de *features* e, portanto, de pixels que permitem o cálculo de deslocamentos pelo algoritmo DIC. Geralmente uma faceta deve conter pelo menos três grãos do padrão aleatório, contudo esta condição pode mudar, em função do software utilizado. De cada faceta calculada válida, resulta um ponto de medição, os pontos de medição são agrupados e comparados nas componentes de superfície(GOM Company, 2015).

Distância ao ponto

Corresponde à distância entre os centros de gravidade de duas facetas (blocos) adjacentes. Este elemento irá definir a densidade de pontos da malha conformada pelo conjunto de facetas na componente de superfície.(GOM Company, 2015)

2.4.2. Fotogrametria

Um método alternativo de aquisição de medidas de deformação é a Fotogrametria. A Fotogrametria é uma técnica na qual, a localização dos pontos, no espaço 3D, pode ser determinada através da análise geométrica de um par de imagens fotográficas 2D, separadas à uma distância conhecida, com um ângulo de câmara conhecido. Os pontos no espaço podem ser matematicamente relacionados entre si para criar um modelo 3D do objeto a partir das imagens 2D(Chinn, 2013), tal como se ilustra na figura 2.3.

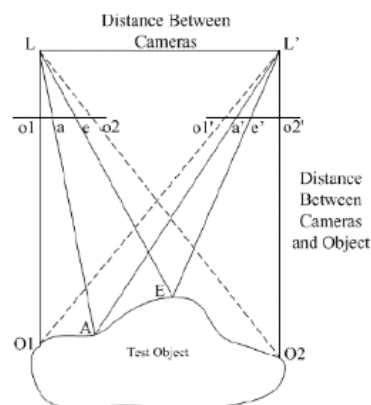


Figura 2.3-Princípio da Fotogrametria(Chinn, 2013).

Embora a fotogrametria se baseie nas fotografias para medição, o conceito foi desenvolvido muitos séculos antes da invenção da fotografia(J. Valença et al., 2012).

De facto, com a invenção e aperfeiçoamento dos métodos fotográficos, os desenvolvimentos no campo da fotogrametria são frequentemente separados em quatro fases. Essas fases são:

- fotogrametria plana (1850 a 1900).

- fotogrametria analógica (1900 a 1950).
- fotogrametria analítica (1950 a 1985).
- fotogrametria digital (1985 a atual).

Destas quatro fases, as contribuições mais duradouras estão nos desenvolvimentos matemáticos. É importante notar que o foco inicial da fotogrametria era extrair a forma 3D dos objetos através da comparação de vários pontos de vista dos registros fotográficos (Sutton et al., 2010).

A palavra fotogrametria tem sua origem em três palavras gregas, nomeadamente, *fotos*, *grama* e *metron*, que significam, respetivamente, luz, descrição e medição. De acordo com a International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS):

"A Fotogrametria e a tecnologia sensorial remota são a arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis de imagens sem contato e outros sistemas de sensores sobre a Terra e seu ambiente e outros objetos físicos. e processos através da gravação, medição, análise e representação" (J. Valença et al., 2012).

No caso da fotografia digital, é necessário estabelecer uma correspondência entre as unidades de comprimento e os pixels da imagem.

Se se estiver a analisar o deslocamento no plano, esta transformação pode ser efetuada através de uma matriz de transformação de coordenadas, designada 'matriz homografia', que corresponde a uma transformação linear, a qual permite estabelecer uma correspondência entre as coordenadas de pontos no mundo real, pertencentes a um plano, as suas projeções na imagem. Os planos dos pontos no mundo real e na imagem não têm de ser, obrigatoriamente, paralelos. O uso da técnica de fotogrametria terrestre apresenta, deste modo, várias vantagens relativamente aos métodos tradicionalmente utilizados nomeadamente (Gimenez, 2019) :

- Rapidez de execução;
- Precisão dos resultados;
- Quantidade e qualidade de informação obtida (podem ser considerados um número infinito de pontos de medição sendo a informação processada automaticamente);
- Custos reduzidos;
- O único hardware específico são as câmaras fotográficas;
- Inexistência de limitações como a não linearidade do material ou limite do curso dos LVDT's.

Para o cálculo dos deslocamentos, podem ser utilizados alvos naturais ou alvos artificiais. Os alvos naturais são objetos existentes nas imagens, como candeeiros ou sinais, enquanto os alvos artificiais são pintados nas estruturas a analisar. A precisão obtida com os alvos artificiais é maior pois estes são colocados em sítios estratégicos para que, ao longo do tempo, se mantenham visíveis nas imagens enquanto, por exemplo, os alvos naturais podem ser removidos ou tapados com vegetação (Marques, 2016).

2.4.3. Digital Image Correlation (DIC)

A DIC ou Correlação Digital de Imagens é uma técnica de captação ótica sem contato para medir deslocamentos e extensões. Em princípio, a DIC compara uma série de imagens de uma amostra em diferentes estágios de deformação, rastreia o movimento de pixels na região de interesse e calcula o deslocamento e a extensão usando o algoritmo de correlação.

Este sistema teve a sua origem na correlação de imagens. Alguns dos primeiros trabalhos na área de Correlação de Imagens foram realizados no início dos anos 50 por Gilbert Hobrough, que comparou representações analógicas de fotografias para registrar recursos de várias visões. Em 1961, Hobrough projetou e construiu um instrumento para “correlacionar fotografia de reconhecimento de alta resolução com fotografia de levantamento de alta precisão, a fim de permitir uma medição mais precisa das condições variáveis do solo”, sendo assim um dos primeiros investigadores a tentar uma forma de correlação de imagem digital para extrair informações posicionais do processo de correlação /correspondência de imagem. À medida que as imagens digitalizadas se tornaram disponíveis nas décadas de 60 e 70, os investigadores de inteligência e robótica artificiais começaram a desenvolver algoritmos baseados em visão e metodologias de visão estéreo em paralelo com as aplicações de metagrama do fotograma para o reconhecimento de características, fotografias aéreas, microscopia, e radiologia, com aplicações de engenharia para medições de forma e deformações inexistentes ou raras, (Sutton et al., 2010).

Enquanto os métodos de análise de imagens digitais estavam a passar por um crescimento muito significativo, grande parte do campo da mecânica dos sólidos experimental estava focada na aplicação da tecnologia laser desenvolvida recentemente.

Para implementar a técnica, devem ser aplicados nas superfícies dos objetos a monitorizar padrões estocásticos que permitam no final do processo a descrição de deslocamentos, extensões e movimento. Estes padrões correspondem a marcadores que vão permitir a definição das referidas *features* e facetas. São por isso de grande importância e podem ser obtidos por pulverização de tinta ou gravação da superfície dos objetos, tal como se mostra na figura 2.4. A própria rugosidade e textura das superfícies pode, em alguns casos ser suficiente para a definição de *features*. Durante o teste, fotos consecutivas são tiradas por uma ou mais câmaras enquanto os objetos ou provetes são submetidos a esforços mecânicos e conseqüentemente a deformações. O número de câmaras a utilizar depende da análise ser 2D ou 3D e da precisão que se deseja alcançar. As imagens são posteriormente transferidas para o PC e analisadas através do algoritmo de correlação utilizando um *software*(Lin et al., 2015).



Figura 2.4-Exemplo do padrão aleatório, para a análise com recurso ao DIC(Gimenez, 2019).

O método é capaz de fazer a medição de deformações no plano (DIC-2D) e fora do plano (DIC-3D), sendo que, como já foi referido, a três dimensões é necessária mais do que uma câmara e consequentemente uma configuração e calibração diferente. A realização do método de Correlação Digital de Imagem a três dimensões permite obter mais informações sobre o comportamento de uma estrutura, como por exemplo o deslocamento para fora do plano de uma parede de alvenaria até à sua rotura(Beleza, 2017).

2.5. Processamento de imagem: Aplicações

2.5.1. Enquadramento

Atualmente têm sido incorporados novos métodos para a medição da qualidade dos materiais utilizados na construção. E os métodos de medição baseados em imagem podem ter um contributo importante na aplicação da evolução tecnológica à Engenharia Civil. A aplicação destes métodos, poderá substituir ou auxiliar os métodos convencionais de medição de extensões, acelerando assim os processos de análise e reduzindo custos a longo prazo.

Contudo, os estudos realizados até o momento não parecem ser conclusivos no que diz respeito às medições de extensões e deslocamentos de magnitude reduzida em diversos materiais, sendo habitualmente desconhecida a fiabilidade nas mesmas, em particular a sua precisão e exatidão. Fica assim impossibilitada a caracterização da fase elástica e Módulo de Elasticidade de diversos materiais de elevada rigidez, muitas vezes empregues em obras de Engenharia Civil.

2.5.2. Revisão Bibliográfica: Fotogrametria

Como resultado da produção e utilização crescente de aços de elevada resistência, que permitem a produção de seções estruturais mais finas, surgiram complexidades adicionais nos modos de encurvadura e suas interações. É neste âmbito que os autores de (Bambach, 2009), referem que em trabalhos anteriores foi já demonstrado que o uso de reforços nas margens dos banzos pode resultar na interação dos modos de encurvadura, o que pode ser prejudicial à resistência da secção. No entanto, o comportamento exato dessas interações e como elas podem ser explicadas no design, ainda não se encontra totalmente esclarecido. O autor refere que de fato, uma razão para isso foi a falta de dados suficientemente detalhados sobre as deformações transversais da encurvadura, que podem envolver deslocamentos em diferentes modos de encurvadura e com diferentes magnitudes relativas (Bambach, 2009). É aqui que surge a mais-valia do uso da Fotogrametria 3D, para capturar com precisão as deformações transversais de encurvadura no sistema desenvolvido nesse estudo. Os resultados detalhados da encurvadura foram usados para descrever e explicar o comportamento fundamental de banzos e almas, particularmente com relação às interações dos modos de encurvadura.

É também muito comum a utilização de chapas metálicas na indústria da construção, porém é também vulgarmente conhecida a sua deformabilidade. Embora existam diversos métodos de controlo deste fenómeno durante à sua aplicação, o controlo durante a produção e/ou ensablagem de chapas pode ser uma medida mais eficiente na mitigação de efeitos negativos. É com atenção ao fenómeno em cima referido que foi desenvolvido um sistema de medição de deformações superficiais (XJTUSM), figura 2.5, para a construção de chapas com base na fotogrametria em (Shi & Liang, 2012). O método consiste na gravação eletroquímica de um padrão de malha circular na superfície da chapa plana antes da ensablagem. Na medida em que a chapa é pressionada, é criada a forma desejada, e os nós da malha circular são deformados em formas elípticas aproximadas.



Figura 2.5-Composição do hardware do sistema XJTUSM(Shi & Liang, 2012).

Com este método, os autores gravaram imagens originais em diferentes estações fotográficas usando uma única câmara. As coordenadas tridimensionais (3D) dos centros das elipses anteriormente

referidas, foram reconstruídas de acordo com a tecnologia de processamento de imagem, aplicando a redução de ruído, o limiar adaptável, a implementação de algoritmos sub-pixel, o ajuste de elipse com mínimos quadrados, a calibração da câmara, a correspondência rápida e reconstrução de nós da malha. Posteriormente, um procedimento de geração da malha 3D é executado para construir a topologia de nós de malha separados e o tensor do gradiente de deformação é calculado. No estudo foram derivadas do tensor do gradiente de deformação as deformações superficiais assim como o diagrama limite de formação (FLD em Inglês) e o material utilizado no ensaio foi o Aço Inox 304 de 0.7 mm de espessura (Shi & Liang, 2012). Para avaliar a precisão do sistema desenvolvido, os autores realizaram um ensaio de tração, utilizando o sistema de medição de deformação superficial de alta precisão XJTUDIC, para comparar os resultados. O sistema XJTUDIC é um instrumento comercial de medição de deformação superficial com alta precisão, baseado na correlação digital de imagens. O campo de visão do sistema XJTUDIC no ensaio realizado foi de 128×96 mm² e a precisão da medição da deformação foi de 0,01% (Shi & Liang, 2012). Os autores concluíram assim, que o sistema XJTUSM, pode ser usado para diagnosticar problemas de produção, identificação de áreas críticas e / ou verificar a precisão da modelagem numérica. Isto representa um avanço não só na produção de materiais, como no desenvolvimento das técnicas de processamento digital de imagens.

Outro exemplo de estudo conduzido à caracterização de chapas metálicas é (L. G. Li et al., 2014). Este artigo apresenta uma nova abordagem para a medição rápida de extensões com elevada precisão para chapas metálicas a grande escala. O método consiste na implementação de uma malha circular na superfície e a utilização da fotogrametria de alcance digital (denominação atribuída pelos autores do documento). É assim implementado, um sistema de medição de discretização para arquivar medições a grande escala. Os resultados obtidos apresentam um erro de menos de 0.2%, isto confirma a eficiência, robustez e confiabilidade do método em medições de grande escala.

Em (Carmo et al., 2015) os autores desenvolveram um método para estudar extensões em varões de aço, inseridos em estruturas de betão armado, a partir de medições à superfície do betão, com recurso à Fotogrametria. No artigo, foi estabelecida uma relação entre a espessura das fendas de rotura, o escorregamento entre o aço e o betão e a deformação no aço e para tal foram realizadas medições de extensão no intervalo [96;4588] µm/m. Os resultados mostraram que o método desenvolvido pode ser aplicado tanto para monitoramento como o diagnóstico do comportamento estrutural.

Foi também com o objetivo de validar a medição de extensões por meio da tecnologia de fotogrametria, mais em 3D, que (Chinn, 2013), desenvolveu uma investigação, executando a medição da deformação estática e a frequência dinâmica numa viga de alumínio, com o intuito de a comparar com a modelagem analítica e outras formas de medição de extensões tradicionais. Na parte inferior da figura 2.6 é possível observar a viga de alumínio submetida ao ensaio.

No artigo o deslocamento da carga estática e a deformação foram comparados tendo em conta cálculos analíticos, dados fotogramétricos, outros instrumentos de medição de deformações, medições experimentais e um modelo pelo Método de Elementos Finitos.



Figura 2.6-Modelo ensaiado: Viga encastrada sujeita a lâmina compressora(Chinn, 2013).

Os resultados produziram correlações positivas e repetíveis entre dados fotogramétricos e cálculos analíticos, com resultados considerados pelo autor como «mais confiáveis» para o deslocamento, o que representa um aspeto positivo, contudo, por ser um estudo dedicado à aeronáutica, foi feita uma análise muito mais detalhada na fase plástica do comportamento do material. É necessário referir que, segundo o autor, as medições da extensão realizadas para cargas muito baixas na extremidade livre da viga não apresentaram resultados válidos.

Para concluir esta secção, é necessário reforçar a ideia de que já foi provada a utilidade da fotogrametria no estudo do comportamento geral dos materiais. Em (Navarro-gregori et al., 2016) se teve como objetivo estudar a contribuição na resistência ao corte das fibras de aço no betão. Foram assim ensaiados dez provetes de betão armado (RC) e betão armado reforçado com fibra de aço (SFRC); sendo medidas as extensões normais e transversais médias nas proximidades do plano de corte, com recurso à fotogrametria (figura 2.7).

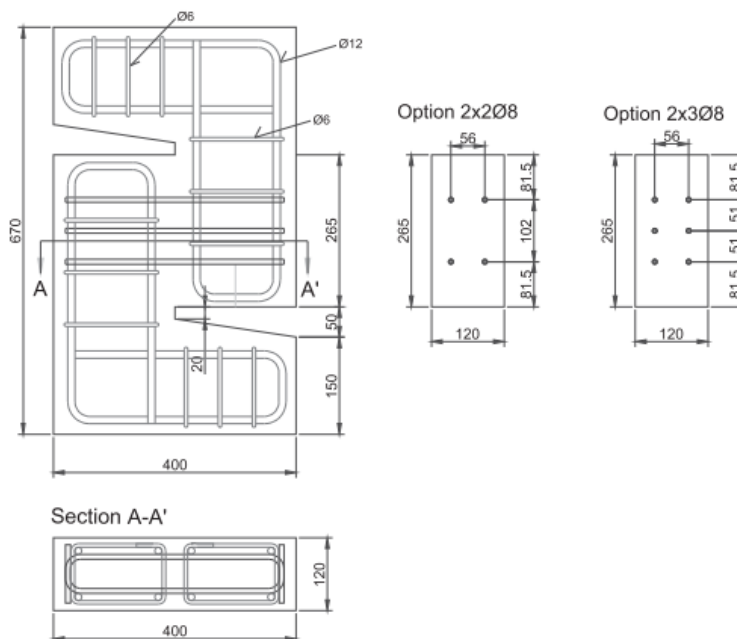


Figura 2.7-Dimensões dos provetes utilizados(Navarro-gregori et al., 2016).

As medições foram obtidas com boa precisão e os resultados experimentais revelaram que a suposição constante de fluxo de tensão de corte é adequada. Os autores chegaram assim a conclusão de que as amostras do SFRC exibiram maior rigidez ao corte em comparação com o RC, sendo que a modelação numérica de amostras push-off de RC e SFRC mostra um bom comportamento global. Contudo, o artigo atinge o estudo numa ampla gama de extensões, não ficando muito claro o que acontece na fase elástica do material.

2.5.3. Revisão Bibliográfica: Digital Image Correlation (DIC)

Tal como foi feito na secção anterior com a Fotogrametria, nesta secção far-se-á uma análise do estado de algumas das mais recentes investigações na área da Correlação Digital de Imagens (DIC). O objetivo desta revisão é conhecer o estado da investigação na comunidade científica no tema abordado nesta dissertação, e o de avaliar a necessidade de aprofundar o tópico.

A técnica de Correlação Digital de Imagem apresenta com frequência uma série de dificuldades associadas ao fenómeno de descorrelação entre a imagem de referência e a imagem deformada, isto ocorre maioritariamente devido às grandes deformações. Para atenuar este efeito pode utilizar-se um esquema de atualização da imagem de referência, no entanto, dito esquema introduzirá erros acumulados. É com, atenção ao problema referido que, (Tang et al., 2012), propõe um sistema de medição de extensões, combinando um método aprimorado de busca e um sistema de atualização da imagem de referência. Segundo o autor, o método, per se, permite medir deformações extremamente grandes com sucesso, controlando o erro acumulado. No estudo em questão foram ensaiados à tração provetes de um material polímero (figura 2.8) e à compressão provetes de espuma com o objetivo de verificar o método.

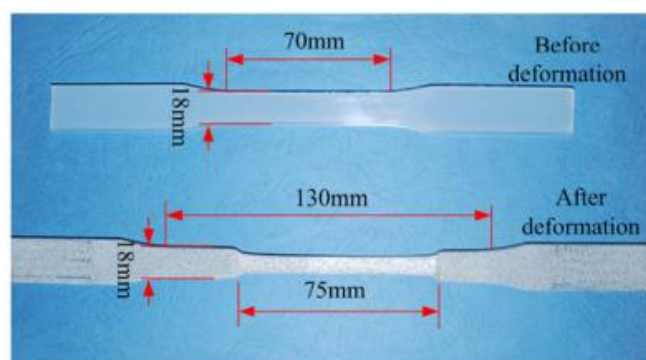


Figura 2.8-Provete antes e após deformação(Tang et al., 2012).

Os autores concluíram que até aproximadamente 4500 ‰ das extensões, provocada pelo ensaio à tração, e, 830 ‰ da deformação provocada pelo ensaio à compressão podem ser medidos pelo sistema proposto com sucesso.

Da mesma forma em que algumas investigações são motivadas com intuito de melhorar o método, outras aparecem com o objetivo de aplicá-lo em termos práticos, é o caso da procura de métodos para

caracterizar amostras policristalinas da *Swedish High-Energy Materials Science beamline, in situ*, registada em (Lin et al., 2015). Para o desenvolvimento desta investigação, era necessário realizar uma monitorização onde se garantisse o posicionamento preciso da amostra e o estudo das possíveis heterogeneidades do seu campo de deformações. Ainda, pelo seu uso final, era necessário obter com maior detalhe o comportamento do material durante a sua fase elástica. Com este objetivo foram ensaiados à tração provetes dos 4 materiais seguintes: Aço Inoxidável, Cobre Berílio, Cobre Berílio com tratamento térmico (HT) e a Liga de Titânio com tratamento térmico (HT), com recurso à DIC (Lin et al., 2015).

Com o ensaio, os autores concluíram que a iluminação é um fator determinante na técnica DIC, mas também a posição do provete com relação a lente, que deve ser paralelo à mesma, já que o mal posicionamento do provete pode provocar zonas de irregularidades (sombas ou escuros), que interferem na qualidade da imagem e, portanto, da medição de extensões. Esta questão do paralelismo da lente com relação ao provete não deve ser confundida com o referido anteriormente na secção 2.2.2, onde foi explicado que na modelação com recurso à Fotogrametria, o paralelismo entre a lente e todos os planos que conformam a superfície da estrutura, não era um fator necessariamente determinante.

Por outro lado, o autor afirma que a utilização dum padrão estocástico fino e uniforme na superfície dos provetes, ajudou na obtenção de medições mais precisas. Concluindo assim, que uma grelha fina (apertada), com uma grande zona de pesquisa e ainda com um tamanho pequeno de subconjunto (ou seja, com «facetas pequenas»), pode produzir ótimos resultados; no entanto, levará muito tempo para concluir uma análise, este aspeto será retomado mais a frente nesta dissertação.

É também nesta linha de investigação que é focado o estudo desenvolvido por (Denys et al., 2016), cujo objetivo principal é caracterizar o comportamento reológico do aço na sua fase plástica. Para isto os autores utilizaram duas configurações Stereo-DIC sincronizadas, conhecidas como configuração multi-DIC, que foram usadas para adquirir experimentalmente os campos de tensão e deslocamento tanto nas superfícies frontais como na espessura de um aço de alta resistência S690QL de 10 mm de espessura. Outros ensaios realizados anteriormente mostraram que o tipo de aço estudado no artigo pode atingir extensões plásticas verdadeiras superiores a 1000%, enquanto possui apenas uma extensão uniforme máxima de 50%. Os ensaios de tração padrão têm a limitação de conter informações valiosas apenas até o ponto do alongamento uniforme máximo, e na visão do autor parte daqui a importância deste estudo (Denys et al., 2016).

Um provete duplamente perfurado foi proposto, com uma perfuração na superfície frontal e outra na espessura, onde os centros de ambas perfurações não estavam alinhados, como se pode observar, na figura 2.9.

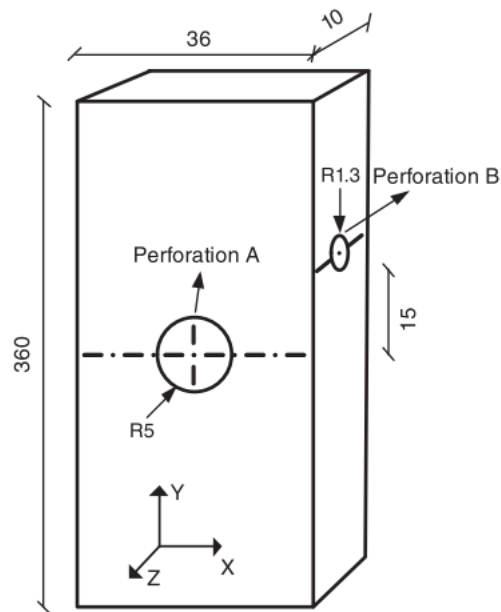


Figura 2.9-Dimensões do Provete de Aço (mm)(Denys et al., 2016).

No final do estudo os autores concluíram que o S690QL não possui anisotropia plástica substancial.

Existem ainda investigações encaminhadas para melhorar a precisão do método, estudando, por exemplo, a sua utilização seguindo os padrões de medição ISO, que lhe permite ficar mais automatizado, ajudando também a evitar erros de computação ou de operação, como é abordado no artigo referido(J. Li et al., 2016).

O supra objetivo do estudo em questão consistia na caracterização do Diagrama do Limite de Formação (FLD) duma liga de alumínio, por meio de uma modificação do método ISO, para ser aplicado com o método DIC, utilizando para isto provetes com o formato representado na imagem infra apresentada (figura 2.10). No artigo em questão o autor chegou à conclusão que o diagrama referido depende não só da qualidade do ensaio realizado, também depende da precisão do pós-processamento dos dados adquiridos no ensaio.

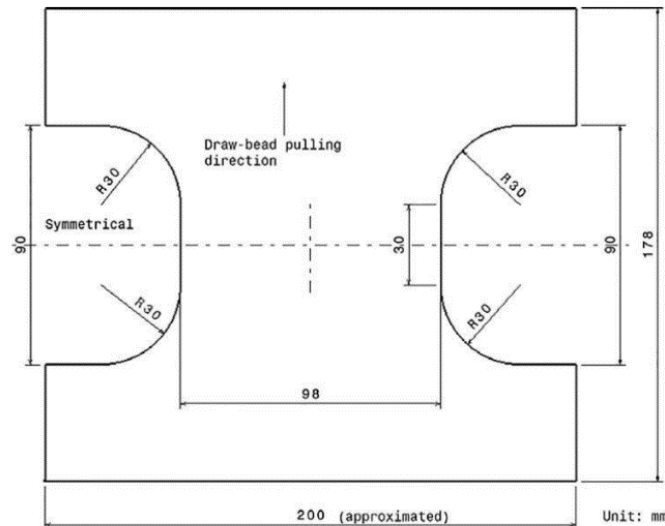


Figura 2.10-Dimensões do provete de Liga de Alumínio(J. Li et al., 2016).

Inclusive na área da Biomecânica tem se estudado a utilidade do método DIC para a deformabilidade do osso humano e a sua ligação com outros materiais; de facto a medição de extensões é uma ferramenta comum usada para avaliar o comportamento mecânico do osso in vitro. Como é o caso de (Hensley et al., 2017), onde foram comparadas as medições entre os extensómetros e o método DIC, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do seu uso na obtenção de dados de ensaios biomecânicos comuns.

Os diferentes provetes de liga de alumínio, espuma de poliuretano e espuma de poliuretano laminada, foram testados à compressão e à flexão. Os resultados do ensaio não mostraram diferenças significativas entre os dados do extensómetro e os obtidos pelo método DIC, concluindo assim que o método tem uma exatidão considerável com as vantagens ainda de reduzir o tempo de preparação do provete e de proporcionar o campo todo de tensões e extensões.

Apesar de no artigo foram medidas extensões na sua fase elástica, não foram explorados na sua totalidade os comportamentos dos campos das tensões e extensões dos materiais nesta fase, sendo maior o foco do artigo na comparação entre os resultados obtidos pelo método DIC e os extensómetros.

Outro problema, ainda pouco estudados e que pode ser resolvido, é a aquisição do campo de deslocamentos na direção da profundidade dum provete, para facilitar também a medição da tensão na direção da espessura. É neste aspeto que (J. Li et al., 2017) incide; onde um sistema DIC multi câmaras é implementado para medir a tensão na espessura do campo inteiro usando as informações obtidas de ambas as faces do provete. Os autores ensaiaram folhas metálicas (aço) de 1.26 mm de espessura, à tração, concluindo que, é possível medir, com bons resultados, as extensões na espessura das materiais com recurso à DIC 3D.

Por último pretende salientar que à Correlação Digital de Imagem, permite também estudar a interação entre materiais. Em (Mai et al., 2019), apresenta-se uma aplicação da técnica baseada em Correlação

de Imagem Digital (DIC) para investigar o modo de falha por corte em bloco de ligações aparafusadas feitas de chapa de aço G450 de alta resistência e endurecida a frio, cujo esquema pode ser observado na figura 2.11.

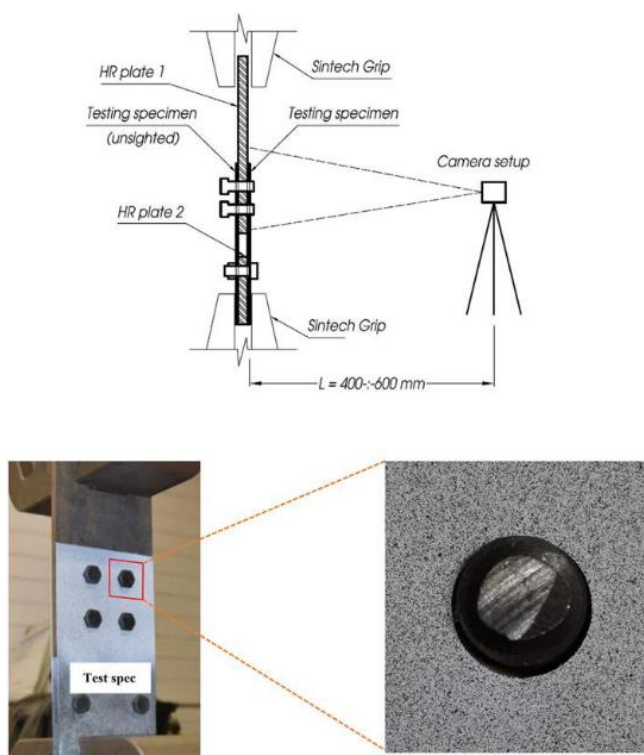


Figura 2.11-Preparação do ensaio, com detalhe do padrão aleatório do provete(Mai et al., 2019).

Em conjunto com uma abordagem de teste convencional, o DIC forneceu informações detalhadas sobre falhas no comportamento da conexão e sua correlação com testes de materiais macroscópicos. Os autores concluíram que o sistema DIC fornece medições de extensão (deformação) detalhadas e quantificáveis possibilitando inclusive a previsão do mecanismo de falha de corte em bloco das conexões aparafusadas numa escala macroscópica; e ainda afirmam que essa nova abordagem de medição também ajuda a fornecer uma melhor compreensão e correlação com os códigos de dimensionamento de estruturas atuais.

2.5.4. Comparação de resultados da revisão bibliográfica

De seguida sumarizam-se os resultados mais relevantes da bibliografia consultada (tabelas 2.1 e 2.2), onde é utilizada a Fotogrametria e/ou a Correlação Digital de Imagens para o estudo das deformações em diversos materiais. Importa salientar uma vez mais que, existem poucos estudos onde estas técnicas são utilizadas na avaliação do comportamento dos materiais em fase elástica e na medição de extensões de magnitudes reduzidas. Adicionalmente, também não são habitualmente referidos valores que permitam aferir sobre a qualidade e fiabilidade das medições realizadas, isto é, sobre a precisão e exatidão.

Tabela 2.1-Comparação dos resultados de investigações prévias-Parte I

Referência	Técnica	Limites de extensão medidos (%)	Dimensões dos provetes	Material	Precisão	Exatidão
Navarro-Gregori. J. et al 2016	Fotogrametria	[1-12]	670x400 mm ²	Betão armado	-	-
R.N.F. Carmo. et al. 2015	Fotogrametria	[0.096-4.588]	Comprimento: 800 mm	Betão armado	-	Erro: [0.036-0.076] %
Li. Lei G. et al. 2014	Fotogrametria	[0.13-117.73]	Espessura: 0.7 mm; 2000x1200 mm ²	Chapa de aço: S16	Erro<0.15 %	Erro: 0.2 %
Chinn. T. 2013	Fotogrametria	[-1.15-1.47]	(Comprimento x Largura x Espessura) ;(106.68 x 16.03x 1.27) in---Secção Transversal: 8.03 cm ²	Boro-Alumínio unidirecional A1 2024 T4	Desvio padrão: 0.399%	Erro: -0.416%
Valença. J. et al. 2012	Fotogrametria	-	L=20 m; Perfil I I: H=0.50 m; B=0.30 m	Betão armado	Ensaio à fluência (x.y.z) (Global) (0.0897; 0.4658; 0.1893)	Diferença média: 0.83%
					Ensaio à rotura (x.y.z) (Global) (0.1048; 0.5583; 0.1652)	Diferença média: 0.96%
Shi. Bao Q. et al. 2012	Fotogrametria/ DIC (XJTUSM)	[(-)220-710]	Espessura: 0.7 mm	Aço Inoxidável 304	Desvio padrão:0.196	Erro<0.6 %
Bambach. M. R. et al. 2009	Fotogrametria	[0-100]	Alma xBanzo x Comprimento (Nominal); 60x60x300; 120x60x300; 120x120x750; mm ³	Chapa metálica: G450	Índice de confiabilidade: 2.44	-

Tabela 2.2-Comparação dos resultados de investigações prévias-Parte II.

Referência	Técnica	Limites de extensão medidos (%)	Dimensões dos provetes	Material	Precisão	Exatidão
Mai Bac V., et al, 2019	DIC	[~10-600]	Chapas metálicas com orifícios para parafusos com diâmetros de 13 ou 17 mm; Largura: 120 ou 130 mm	Chapa de aço: G450 (Aço GALVSPAN) Classe dos parafusos: 8.8	-	-
Hensley. S. et al. 2017	DIC	$[(-287 \pm 14; 838 \pm 34) \times 10^{-3}]$	L1: 6.3 \pm 0.05 mm L2: 25.5 \pm 0.13 mm L3: 304.8 \pm 0.01 mm	Liga de alumínio 2024-T4	A diferença entre medições é de: 15.7%	Erro relativo: 14.8%
Li. J. et al. 2017	DIC	[0-700]	Largura: 12.7 mm; Espessura: 1.26 mm	Chapa metálica: DP 780 Aço	Estimado no domínio das centenas de micro-deformações	-
Li. J. et al. 2016	DIC	[0-180]	Aproximadamente: 178x200 mm	Liga de Alumínio AA5754	-	Erro relativo: 1.6%
Almeida G. et al. 2016	DIC (Algoritmos: SES. ARPS. RP-PSO)	$[(-)150-672]$	Gauge length: 50 mm; Parallel length: 57 mm; Largura: 29 mm; Comprimento total: 246 mm; Espessura: 6 mm	Plexiglas e PVC	12%	Erro médio [5-15] %
Denys. K. et al 2016	DIC	[0-60]	180x35 mm ² ; Espessura: 10mm	Aço S690QL	-	-
Lin. S. et al 2015	DIC	[0-10]	(Comprimento x Largura x Altura) -(30 x 6.95 x 0.1) mm	Aço Inox	-	Erro relativo: 12.5%
Tang. Z. et al. 2012	DIC	$[(-)528.3-4472.6]$: Gauge length: 70 mm; Largura: 18 mm; Espessura: 4mm	Polímero	0.02x(m+1) (pixels); m: número de atualizações de imagem	-

3. Metodologia experimental

3.1. Enquadramento

A campanha experimental desenvolvida tem os seguintes objetivos específicos:

- i) Determinação do Módulo de Elasticidade (E);
- ii) Determinação da relação constitutiva do material para diversos níveis de extensão após a cedência do material e até à sua rotura;
- iii) Aferir a qualidade dos resultados obtidos no que diz respeito à exatidão e precisão e por comparação com medições obtidas com recurso a extensometria tradicional.

Para atingir estes objetivos, foi definida uma metodologia experimental para a medição de extensões de provetes de alumínio, através de Fotogrametria e de DIC. Uma vez definida a metodologia, foi executado um ensaio de tração pura, com recurso a uma prensa hidráulica. Os resultados alcançados foram comparados com leituras obtidas com recurso a extensometria tradicional através de um extensómetro elétrico.

O ensaio de cada provete contemplou duas etapas: (i) carregamento cíclico em regime elástico; e (ii) carregamento até à rotura em regime pós-elástico. O procedimento de ensaio, assim como todos os processos relativos a este, que incluem: a definição e preparação dos provetes, a implementação do ensaio, os métodos computacionais utilizados para a obtenção de medições, a análise da qualidade dos métodos e das medições, são de seguida detalhados neste capítulo.

3.2. Produção e preparação dos provetes

Os provetes ensaiados foram produzidos a partir duma liga de Alumínio 5754, com tratamento H114 e 3 mm de espessura, cujas propriedades mecânicas relevantes, segundo o fornecedor **G. Leal S.A.**, são apresentadas na tabela 3.1:

Tabela 3.1-Propiedades mecânicas da liga de Alumínio 5754 (G. Leal S.A., n.d.).

Resistência à tração	190-260 MPa
Tensão de Limite Elástico	80 MPa min
Alongamento A50 mm	10-12% min

A geometria dos provetes foi obtida segundo a **EN 10002-1** (CEN, 2001), que normaliza o ensaio de tração em materiais metálicos, à temperatura ambiente. Assim sendo, e tendo em conta o material disponível, foram produzidos provetes com as seguintes dimensões:

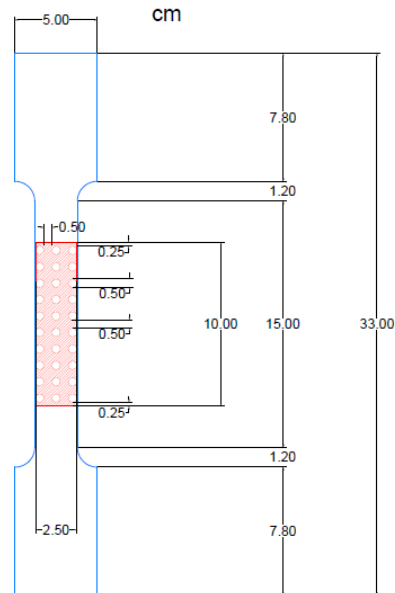


Figura 3.1-Dimensões dos provetes.

Com o objetivo de efetuar a medição das extensões através da fotogrametria foi necessário pintar alvos na superfície dos provetes ensaiados para proceder ao *tracking* dos mesmos (figura 3.1). Ou seja, aplicou-se à face dos provetes uma malha de alvos circulares, pintada com tinta acrílica verde de secagem rápida. É importante referir que a malha em questão será aplicada apenas na zona de estudo do provete (figura 3.2). Neste caso, foram pintadas três colunas de alvos circulares de 5 mm de diâmetro e centros afastados de 10 mm, resultando numa malha retangular de 100 mm de comprimento e 26 mm de largura.

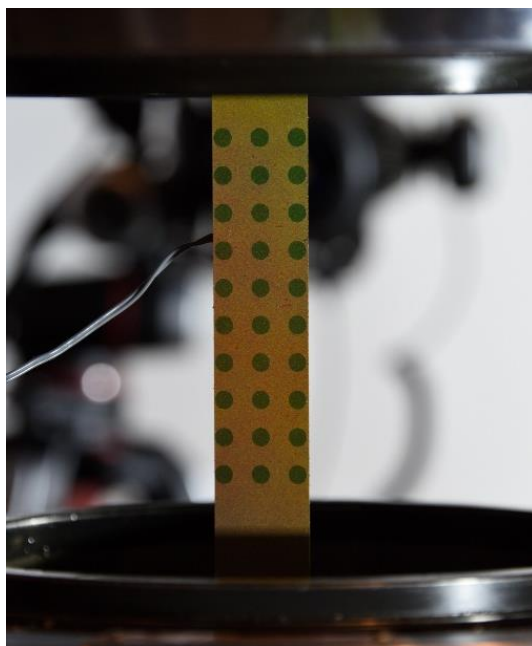


Figura 3.2-Zona de estudo do provete com os alvos pintados

Para aplicar a técnica DIC são necessárias as já referidas *features*, ou seja características/ detalhes intrínsecos do objeto de estudo detetáveis nas fotografias (Gimenez, 2019). Estas ganham maior relevância quando a superfície do provete em análise não apresenta características naturais que possam ser reconhecidas pelo *software* (textura, grãos, nós ou manchas), como no caso em estudo. Assim, foi necessária a aplicação de características artificiais. Estas foram produzidas com tinta acrílica vermelha aplicada a *spray*. Na figura 3.3 é possível observar, com maior grau de pormenorização as *features* aplicadas ao provete. Foram assim preparados quatro provetes.

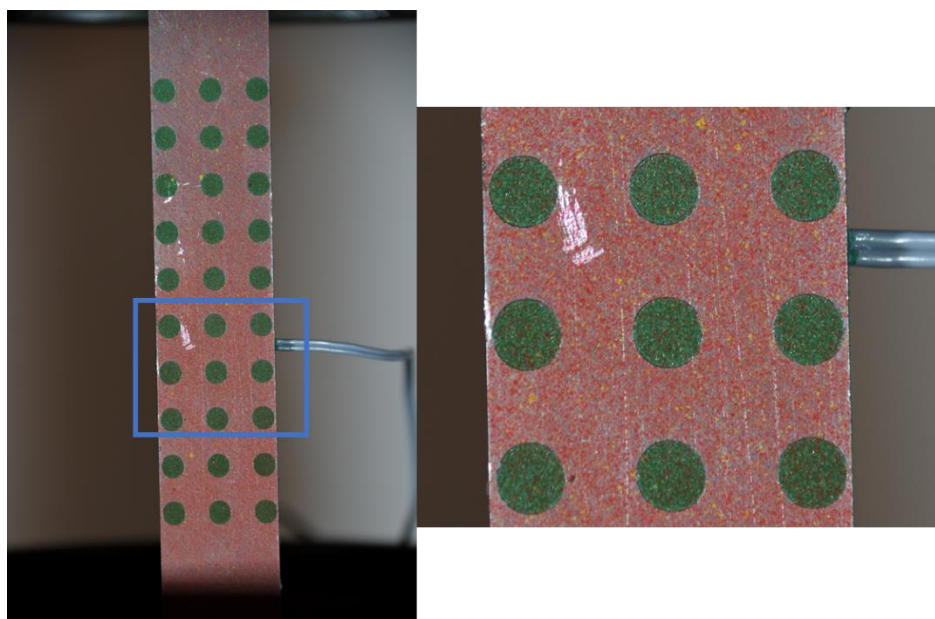


Figura 3.3-Zona de estudo do provete instrumentado com os alvos e as *features*.

3.3. Procedimento experimental

O trabalho experimental desenvolvido nesta dissertação foi realizado no “Laboratório de Estruturas e Materiais” do “Instituto Superior Técnico de Lisboa”. Executou-se um ensaio de tração pura com recurso a uma prensa hidráulica, máquina Instron, modelo 8800RH2379. Para impedir o escorregamento do provete foi aplicando uma pressão, por intermédios de garras, de 120 bar (figura 3.4). Além dos métodos baseados em imagem os provetes foram monitorizados com extensómetros da *Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co. (TML)*, para comparação de resultados entre as várias técnicas.

O ensaio foi realizado com controlo de deslocamento e consiste na imposição do deslocamento vertical da garra inferior no sentido descendente, sendo que a garra superior se mantém imóvel. O extensómetro foi colado no centro dos provetes, sendo registada e visualizada a extensão a medida em tempo real. Em simultâneo, o *software* da máquina Instron fornece também os dados relativos ao afastamento entre as garras, com uma distância inicial entre garras (L_0) de 200mm. Estes dados permitem também estimar o valor da extensão imposta pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

A **ASTM E111** (ASTM International, 2010) define as regras para a obtenção do Módulo de Elasticidade. Contudo, diversos autores coincidem em que a determinação do Módulo de Elasticidade, quando são medidas extensões até o limite de elasticidade, fornece bons resultados nas condições do ensaio à tração apresentadas na norma **EN 10002-1** (CEN, 2001). Apresenta-se de seguida a expressão analítica para o cálculo de E :

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (2)$$

Assim sendo para a determinação do Módulo de Elasticidade foram executados quatro ciclos de carga entre os patamares de extensão de 0.2‰ e 1.4‰, inferior ao limite elástico do material, com uma velocidade de 0.002 mm/s, é de salientar que em todos os casos foi realizado um primeiro ciclo de carga com o objetivo de acomodar possíveis ajustes do provete, e que não é utilizado no cálculo; posteriormente os provetes foram descarregados e recarregados até à rotura, segundo as condições apresentadas na **EN 10002-1** (CEN, 2001).

Para aplicar os métodos baseados em imagem, foi colocada uma câmara, marca Nikon, modelo D810, num tripé e em posição fronto-paralela com a superfície a avaliar. Inicialmente foi realizado o ensaio do Módulo de Elasticidade num provete considerando duas distâncias focais, 50 mm e 300 mm. Nos restantes ensaios foi utilizada a distância focal de 300 mm. Em todos os casos a câmara estava equipada com um disparador remoto controlado por radiofrequência, e o horário da câmara foi

sincronizado com o do computador que regista os dados da prensa e do extensómetro, como forma de registar os instantes de cada fotografia adquirida.



Figura 3.4-Set-up de ensaio.

Foi utilizada iluminação artificial, constituída por dois focos LED colocados a cerca de 45° em relação ao provete e a 90° entre si. Esta configuração permitiu obter uma iluminação homogénea e difusa, eliminando as sombras provocadas pela prensa de ensaio e outros equipamentos do laboratório.

3.4. Ensaios realizados

Para o cálculo do Módulo de Elasticidade e definição da relação constitutiva do material, foram utilizados quatro provetes idênticos, sendo que o primeiro provete foi ensaiado sob duas condições de ensaio diferentes. Decidiu-se, para fins da apresentação de resultados, tratar deste primeiro como se fossem dois provetes diferentes, em função das condições de ensaios aplicadas. Os provetes foram nomeados **A0**, **A1**, **A2**, **A3** e **A4**, sendo que na realidade, **A0** e **A1** são o mesmo provete. Todos os ensaios foram realizados sob as mesmas condições experimentais, com exceção do provete **A0**, onde a lente utilizada e a velocidade de ensaio foram diferentes. Os restantes parâmetros foram idênticos, incluindo a utilização de iluminação, a carga, a velocidade de ensaio, e a frequência de captura de imagem.

Foi realizado um ensaio de tração prévio, executado no já referido provete **A0**, e que foi utilizado como meio de calibração do sistema. No dito ensaio o provete foi submetido às seguintes condições: velocidade - no início foi de 0.001 mm/s e, posteriormente, foi aumentada para 0.002mm/s durante o ensaio; lente utilizada para a captação das imagens: 50 mm. De seguida foi repetido o ensaio no provete **A1** com uma velocidade constante de 0.002mm/s e utilizando uma lente de 300mm. Após a análise dos resultados dos ensaios **A0** e **A1**, concluiu-se, como era expectável, que tanto para a Fotogrametria como para o sistema DIC, obtém-se melhores resultados com a lente de 300 mm, logo este foi o

equipamento utilizado para os ensaios - **A1, A2, A3 e A4**, sendo que o ensaio **A0** não foi considerado para o resto da análise.

Para a determinação do Módulo de Elasticidade, utilizando as técnicas de Fotogrametria e DIC, foram escolhidas as fotografias captadas nos instantes tão próximos quanto possível dos instantes de início e fim de ciclo, calculada a variação de extensão ($\Delta\varepsilon$) no troço correspondente, como se pode observar na figura 3.5.

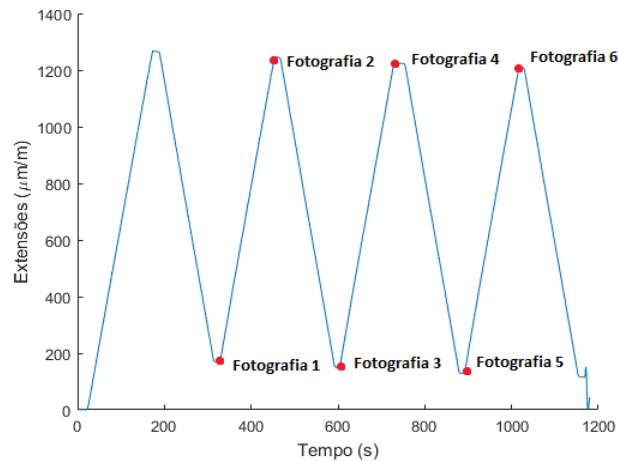


Figura 3.5-Instante de captação das fotografias na fase elástica do ensaio (Ensaio A1).

3.5. Análise e processamento de dados

Em relação ao processamento das imagens, é de salientar que, no caso da Fotogrametria foram utilizadas rotinas em Matlab (MathWorks, 2017), enquanto no caso da DIC foi utilizado o programa comercial GOM (Company, 2019). Para ambos os casos foram desenvolvidas e implementadas, em Matlab, rotinas para pós-processamento e análise dos dados.

3.5.1. Medição de extensões com Fotogrametria

Como referido, no caso da Fotogrametria foram utilizadas rotinas desenvolvida em (Valença, J. ; Carmo, 2020) e (Valença, J. ; Carmo, 2017) e cujo fluxograma é de seguida apresentado (figura 3.6). Este procedimento identifica os centros dos alvos e regista as suas coordenadas em cada imagem analisada. Isto permite calcular os deslocamentos de cada alvo entre imagens.

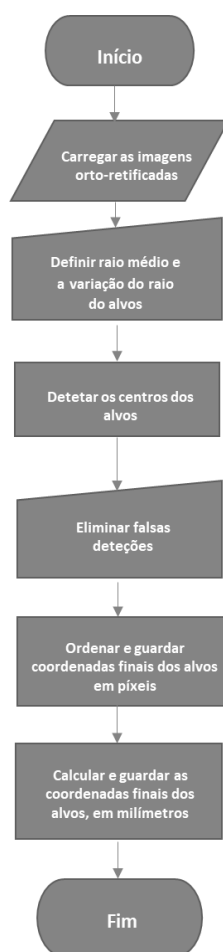


Figura 3.6-Fluxograma para a identificação e obtenção de coordenadas dos alvos.

O primeiro passo deste processo é a orto-retificação das imagens adquiridas (J. Valença et al., 2013), isto é, a correção da escala, da translação e da rotação da imagem, com o objetivo de corrigir o efeito de distorção própria da fotografia e permitir medições em unidades métricas, neste caso em milímetros. Após orto-retificadas, as imagens são carregadas por indicação do utilizador que, de seguida, procede à medição do diâmetro dos alvos diretamente na imagem, insere o valor do raio correspondente a esse diâmetro, e indica um valor para possíveis variações desse valor entre diferentes alvos. Feito isto, o programa deteta os centros dos alvos, gerando as coordenadas dos mesmos, em píxeis. Contudo, pode-se dar o caso de que o programa identifique centros falsos, ou seja, pontos não associados a nenhum dos alvos; estes podem ser eliminados no passo seguinte. Uma vez detetados todos os centros de alvos do provete, as coordenadas correspondentes são convertidas a milímetros e guardadas pelo programa de forma ordenada como na figura 3.7. Esta informação permite calcular os deslocamentos de cada alvo entre cada fotografia consecutiva e calcular também, por esta via, as extensões.

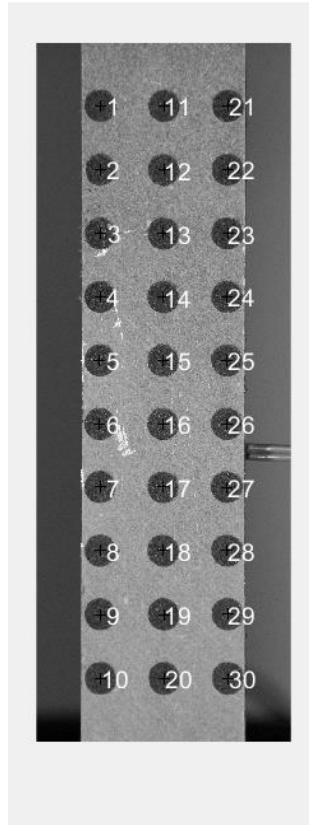


Figura 3.7-Ordenação e identificação dos alvos detetados com recurso ao Matlab.

Para a análise das posições dos centros dos alvos foi desenvolvida e implementada, no âmbito desta tese, uma nova rotina de *Matlab*. Esta, tem a premissa, não só de facilitar a manipulação dos dados adquiridos das fotografias, como também de permitir a mudança de alguns parâmetros de estudo. Para o melhor entendimento da rotina criada, apresenta-se um fluxograma (figura 3.8) que discretiza o funcionamento das suas principais funções: o cálculo de extensões no provete e as diferenças relativas correspondentes; e o cálculo do Módulo de Elasticidade. Encontra-se disponível nos Anexos a rotina desenvolvida por extenso.

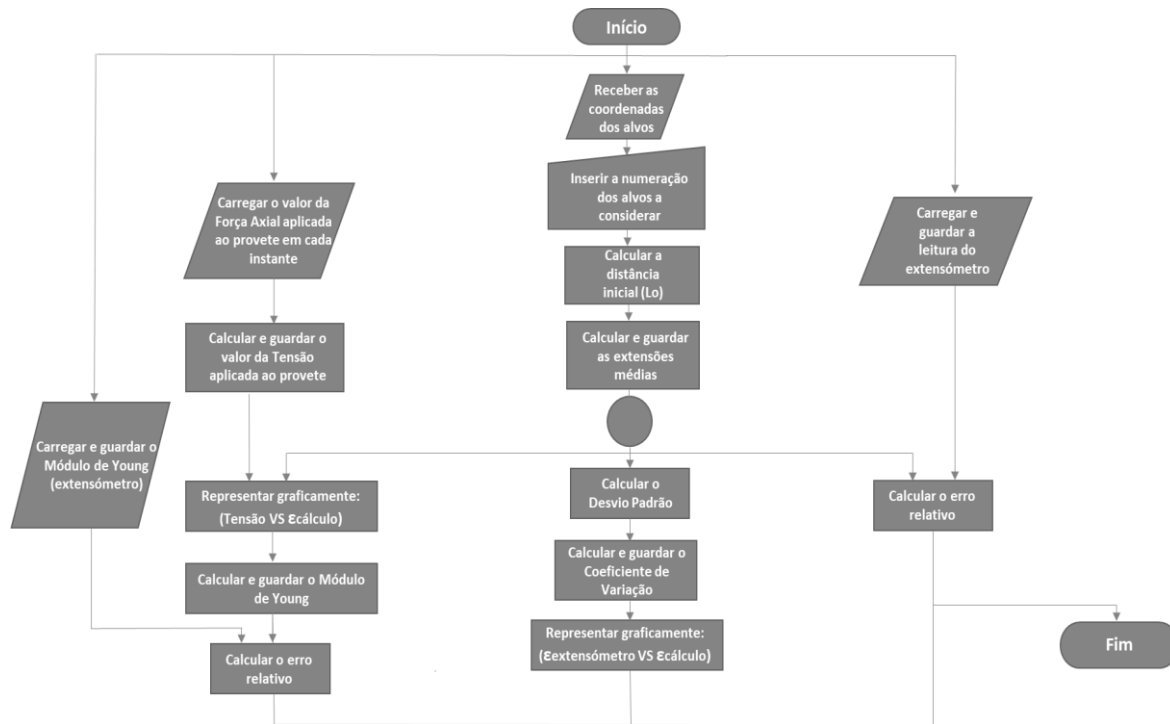


Figura 3.8-Fluxograma da rotina de Matlab desenvolvida para a análise com Fotogrametria.

O processo descrito na figura 3.8 é dividido em três partes principais: (i) cálculo das extensões médias; (ii) cálculo do Módulo de Elasticidade e (iii) confronto com os valores de controlo.

Para o cálculo das extensões médias o programa carrega as coordenadas previamente indicadas pelo utilizador. De seguida devem ser também indicados os alvos a considerar na análise. Com esta informação são calculadas e guardados os valores das extensões médias. Adicionalmente, são calculados os parâmetros de controlo destas extensões e é produzido um gráfico com o confronto entre a extensões calculadas e as leituras do extensómetro. Em paralelo, para efetuar o cálculo do Módulo de Elasticidade, o programa carrega o valor da força axial aplicada ao provete, registada pela máquina Instron, e calcula o valor das tensões correspondentes aplicando a equação 3.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Onde F é o valor da força axial aplicada ao provete, na área A . Utilizando os valores das extensões médias já calculadas, a rotina executa os gráficos «Tensão vs. Extensão», e por fim calcula o Módulo de Elasticidade. De seguida o programa carrega os valores do « E », calculados a partir dos valores do extensómetro com recurso a outra rotina desenvolvida no *Matlab*, que realiza uma interpolação entre os dados do extensómetro correspondentes à zona de carga, criando uma curva «Tensão vs. Extensão», e calcula o declive dessa reta, que corresponde ao Módulo de Elasticidade.

Para o cálculo dos parâmetros de controlo referentes as extensões médias (diferenças relativas, desvio padrão e coeficiente de variação) o programa carrega em paralelo as leituras do extensómetro. As expressões matemáticas para o cálculo destes parâmetros são apresentadas mais a frente (3.5.3).

É necessário explicitar uma consideração fundamental na análise, os níveis e alvos a considerar no cálculo das extensões no provete. Na figura 3.9, são apresentados os possíveis níveis de cálculo considerados.

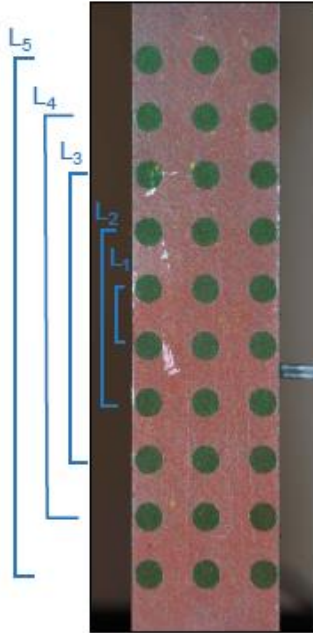


Figura 3.9-Níveis de carga a considerar na análise com recurso à Fotogrametria.

É expectável que o nível L_5 , ofereça melhores resultados por apresentar maior afastamento entre os alvos. Contudo, a «melhoria do resultado» não é tão linear, também depende diretamente da qualidade da aquisição de dados no geral, isto é: da luminosidade (zonas de sombras) e da própria resolução da imagem em toda a zona de estudo do provete. Sendo assim, e porque podem existir diferenças, provocadas pelo manuseamento dos provetes, ou da câmara, não foi possível concluir qual a melhor opção para todos os provetes, e, portanto, serão apresentados os melhores resultados para cada caso.

3.5.2. Medição de extensões com Correlação Digital de Imagens (DIC)

A análise e obtenção de dados através de Correlação Digital de Imagens foi feita utilizando a versão livre do *software* comercial *GOM Correlate 2019*. O programa é produzido pela *GOM*, empresa de origem alemã que desenvolve, produz e distribui programas, máquinas e sistemas de tecnologia industrial e automatizada para medição de coordenadas 3D. A empresa encontra-se ativa desde 1990, data em que começou na sua sede em Braunschweig o desenvolvimento da tecnologia de medição (Company, 2019). O *GOM Correlate* permite avaliação geométrica 2D e 3D independentemente do sistema de captação de imagens utilizado, usando a correlação digital como princípio para medição a partir de imagens. Desta maneira podem obter-se extensões, deslocamentos, deformações, assim

como a velocidade e aceleração. No *software* os deslocamentos são calculados em pixels, posteriormente o utilizador define uma escala no programa para que este faça a correlação entre pixels e milímetros. O programa calcula a partir dos deslocamentos o alongamento relativo, a extensão nominal, a extensão logarítmica e a extensão de Lagrange (Beleza, 2017). Neste trabalho o programa será utilizado para cálculo de extensões.

Em trabalhos prévios foi já abordada a possibilidade de medir extensões com recurso a extensómetros virtuais (Gimenez, 2019). Desta vez explora-se a capacidade do programa de analisar as imagens utilizando outras funcionalidades. Desenvolveu-se assim, um estudo das abordagens de cálculo tendo como base as fotografias da campanha de ensaios desenvolvida em (Gimenez, 2019), onde foram medidas as extensões em 5 patamares (entre 483.02 e 2674.4 $\mu\text{m}/\text{m}$) como forma de calibrar o procedimento a aplicar no presente trabalho. Foram assim realizadas as medições do mesmo parâmetro (ϵ_y) utilizando diferentes abordagens, que foram comparadas com as leituras do extensómetro obtidas por (Gimenez, 2019). De seguida são apresentadas as três abordagens avaliadas.

Abordagem com um plano de corte

Consiste na colocação de um plano de corte no provete, na direcção do “eixo x”. No caso em análise decidiu-se colocá-lo 11.5 mm acima do centro de provete, de forma a coincidir com a posição dos alvos nos ensaios realizados em (Gimenez, 2019), figura 3.10. O programa garante que os pontos analisados sejam os mesmos em todas as fases do ensaio, isto é, em todos os patamares de carga.

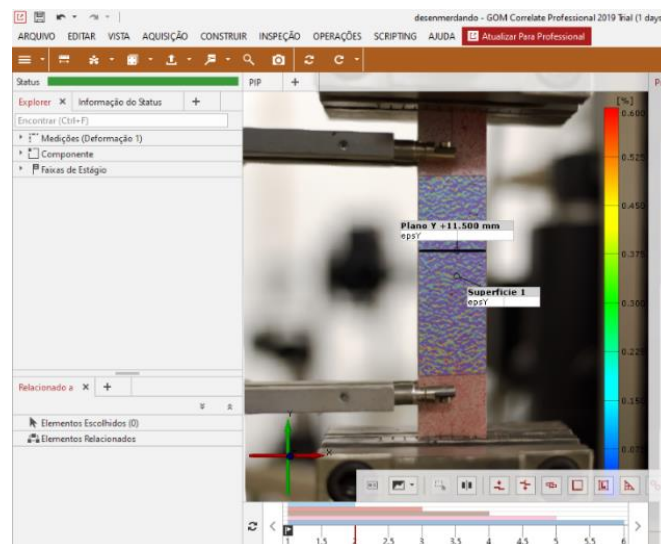


Figura 3.10-Abordagem de cálculo de extensões no GOM-Correlate por meio de um plano de corte.

Abordagem com extensómetros virtuais.

Para a análise desta abordagem, foram utilizados diretamente os resultados obtidos em (Gimenez, 2019), e que serão apresentados mais à frente, onde foram criados extensómetros virtuais para estudar as extensões longitudinais do provete.

Abordagem com uma área de pontos.

Nesta abordagem é possível decidir a posição dos pontos de interesse para o estudo, podendo ainda seleccionar uma área restrita de pontos, ou todos os pontos de uma superfície. Esta abordagem permite ainda discriminar a seleção daqueles pontos que realmente resultam representativos para a análise, isto é, podem ser seleccionados os pontos a analisar para evitar, por exemplo, pontos em zonas de sombra, ou no limite duma zona de sombra, cuja medição terá à partida menor qualidade. No caso em análise foram seleccionados 37 pontos, todos com boa leitura, ou seja, fora de zona de sombras e de zonas de falha do padrão estocástico, e localizados numa área próxima ao plano de corte aplicado na primeira abordagem, como padrão de comparação. De seguida foi calculada a média das extensões longitudinais (ϵ_y) dos mesmos. Na figura 3.11 pode observar-se o modelo de análise no ambiente de trabalho do *GOM-Correlate*.

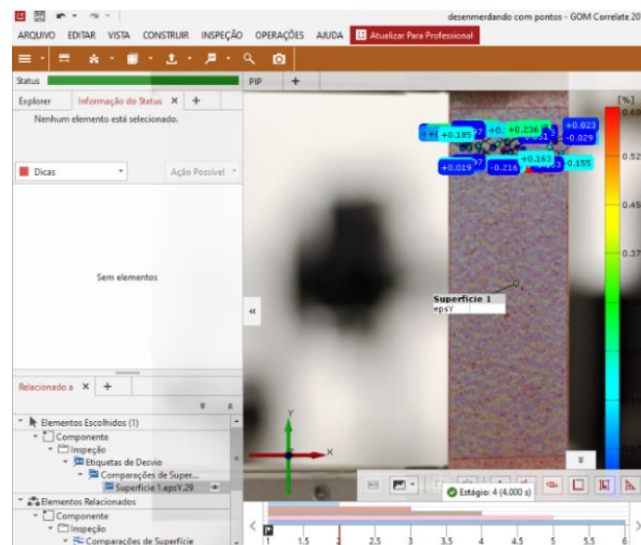


Figura 3.11-Localização da Área de Pontos.

Foi desenvolvida e implementada uma rotina para a manipulação dos dados obtidos. O objetivo principal foi comparar as extensões obtidas a partir do extensómetro, com as obtidas por Correlação Digital de Imagens, e é os seus passos principais estão resumidos no fluxograma da figura 3.12.

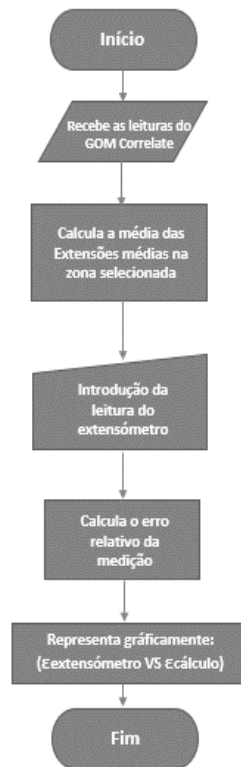


Figura 3.12-Fluxograma para a análise com recurso à Correlação Digital de Imagens.

O programa carrega os dados (extensões) extraídos da nuvem de pontos do *GOM Correlate*, e calcula as médias das extensões médias. De seguida, carrega os dados obtidos a partir do extensómetro e calcula as diferenças relativas das extensões. No final, os resultados desta rotina são analisados pela rotina desenvolvida para a análise dos dados obtidos com recurso a Fotogrametria, com o objetivo de calcular o Módulo de Elasticidade e os parâmetros de controlo.

3.5.3. A validação dos resultados - precisão, exatidão e variabilidade das medições.

Os resultados obtidos foram comparados com a extensometria tradicional, neste caso com o extensómetro colocado no centro do provete. Para a análise da precisão do método foram capturadas 10 fotografias do provete, já instalado na prensa, antes de serem impostas cargas, isto é, quando o deslocamento relativo entre garras era nulo. O objetivo deste procedimento é o de estimar a precisão (repetibilidade) com recurso ao cálculo do erro quadrático médio (RMS) (*Root Mean Square*), cuja expressão de matemática é apresentada de seguida:

$$\text{erro RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i^2} = \sqrt{\frac{\Delta\delta_1^2 + \Delta\delta_2^2 + \dots + \Delta\delta_N^2}{N}} \quad (4)$$

Onde N representa o número de fotografias analisadas, e $\Delta\delta_i^2$ a variação das coordenadas dos centros das alvos dessas mesmas fotografias relativamente ao valor médio (J. M. de A. Valença, 2006). Este valor RMS é calculado em *pixels* e, ao ser multiplicado pela resolução espacial (em mm/pixel), pode ser avaliado em mm, para medição de variações de coordenadas. Assim, para estimar a precisão do método para medições de extensões, basta dividir a precisão das variações de comprimento pelo comprimento inicial, obtendo um valor adimensional (mm/mm), tal como a própria extensão (Gimenez, 2019). Quanto menor o valor do RMS, mais preciso é o método.

Para a determinação da exatidão do método, foram calculadas as diferenças relativas (Δ_r) experimentalmente. Para isto foram comparadas as medições realizadas em termos de extensão, com os dados obtidos com recurso ao extensómetro, e calculada a diferença relativa entre valores em percentagem. Quanto menor este valor, maior a exatidão do método. De seguida é apresentada a expressão matemática para o cálculo das diferenças relativas:

$$\Delta_r = \frac{|Valor_{medido} - Valor_{controle}|}{Valor_{controle}} * 100 \quad (5)$$

Com o objetivo de determinar a variabilidade das medições, foi calculado o coeficiente de variação, C_v . Este valor é calculado a partir do desvio padrão (σ_v), e a média aritmética (μ) das extensões. Quanto maior o valor do coeficiente de variação, pior a precisão do método, já que este resultado estaria a indicar um alto grau de dispersão das medições. De seguida apresenta-se a expressão matemática:

$$Coeficiente\ de\ Variação = C_v = \frac{\sigma_v}{\mu} \quad (6)$$

4. Resultados

4.1. Enquadramento

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios, monitorizados com recurso à Fotogrametria e à DIC. Adicionalmente, são apresentadas as análises e considerações acerca dos mesmos, tendo em conta as diferentes variáveis de ensaio e os objetivos propostos.

Antes de passar ao cálculo e análise de resultados, apresentam-se na figura 4.1, as curvas «Força Axial-Deslocamento», obtidas diretamente a partir dos dados da máquina de ensaios Instron, referida na Secção 3.3.3.

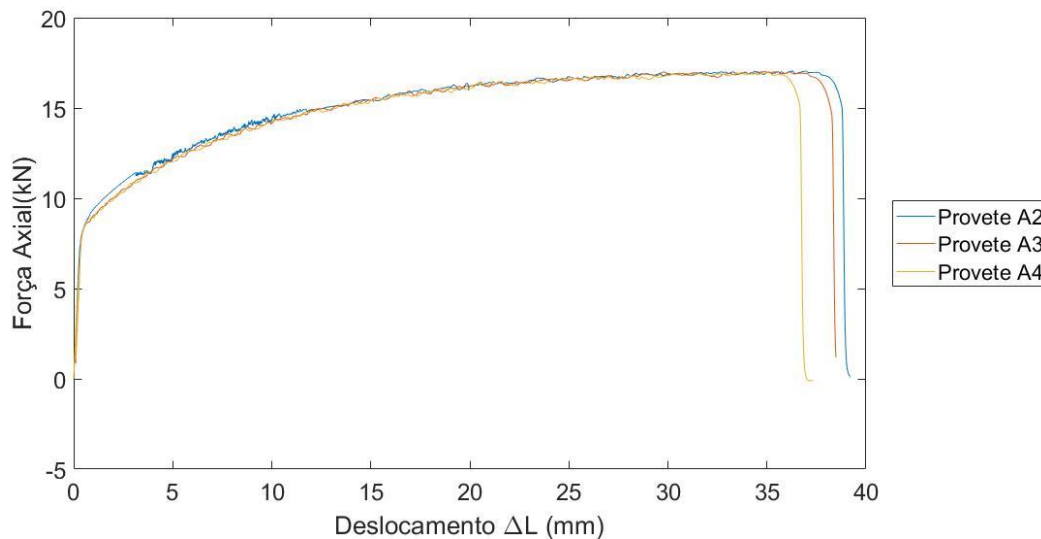


Figura 4.1-Diagrama Força-Deslocamento obtido durante os ensaios dos provetes A2-A4.

No gráfico apresentado na figura 4.1 não foram representados os ensaios realizados nos provetes **A0** e **A1**, já que estes foram ensaiados realizados apenas em fase elástica, com os limites de extensão referidos na Secção 3.3.3.

4.2. Testes preliminares para aplicação da DIC

As possíveis abordagens de cálculo do *GOM-Correlate*, referidas na Secção 3.5.2, foram testadas e comparadas com os valores medidos pelo extensómetro elétrico considerando os ensaios de (Gimenez, 2019).

Abordagem com um plano de corte

Foram obtidos 101 pontos no plano de corte, presentes nos 5 patamares da carga considerados, e de seguida calculou-se a média das extensões para cada um desses patamares de ensaio, obtendo-se os seguintes valores (tabela 4.1):

Tabela 4.1-Média das extensões no plano de corte vs. Extensómetro.

Patamar de medição	Extensões médias ($\mu\text{m/m}$)		Diferença relativa Δ_r (%)	Coeficiente de variação C_v
	DIC	Extensómetro		
	ϵ_{DIC}	ϵ_{ext}		
P1	660	483	36.7	1.883
P2	827	975	15.2	1.511
P3	1239	1532	19.1	1.087
P4	1637	2146	23.7	0.896
P5	2451	2764	11.3	0.587

Como foi possível observar, o patamar de medição **P1** foi o que ofereceu piores resultados tanto em termos de exatidão (36.7%) como em termos de variabilidade dos resultados (1.883), de facto a variabilidade dos resultados foi melhorando conforme foi avançando o teste. O melhor resultado foi observado para o patamar **P5**, que apresenta diferenças relativas de 11.3% e um coeficiente de variação de 0.587.

Abordagem com extensómetros virtuais.

De seguida, na tabela 4.2, apresentam-se os resultados obtidos através da definição de extensómetros virtuais por (Gimenez, 2019):

Tabela 4.2-Médias das extensões obtidas com recurso a extensómetros virtuais [4] vs. Extensómetro.

Patamar de medição	Extensões médias ($\mu\text{m/m}$)		Diferença relativa Δ_r (%)	Coeficiente de variação C_v
	DIC	Extensómetro		
	ϵ_{DIC}	ϵ_{ext}		
P1	370	483	23.8	0.278
P2	830	975	15.1	0.175
P3	1240	1532	18.9	0.112
P4	1720	2146	20.0	0.064
P5	2250	2764	18.6	0.064

Mais é uma vez é o patamar de medição **P1** quem oferece os piores de resultados desde o ponto de vista da exatidão (23.8%) e da variabilidade dos resultados (0.278). O melhor resultado nesta abordagem foi observado para o patamar de medição **P2**, onde foi obtida uma diferença relativa em

relação ao extensómetro de 15.1%. Em relação ao primeiro método apresentado, a abordagem com recurso a extensómetros virtuais não fornece melhores resultados que a seleção da zona de corte.

Abordagem com uma área de pontos

De seguida apresentam-se os resultados obtidos através da seleção de uma área de pontos (tabela 4.3)

Tabela 4.3-Médias das extensões obtidas pela abordagem de uma área de pontos vs. Extensómetro.

Patamar de medição	Extensões médias ($\mu\text{m}/\text{m}$)		Diferença relativa Δ_r (%)	Coeficiente de variação C_v
	DIC	Extensómetro		
	ϵ_{DIC}	ϵ_{ext}		
P1	590	483	22.4	3.719
P2	790	975	19.2	2.687
P3	1340	1532	12.4	1.504
P4	2040	2146	5.0	1.150
P5	2470	2764	10.6	1.013

Esta última abordagem tem um comportamento aparentemente melhor relativamente às duas abordagens anteriores. Foram obtidas diferenças relativas entre os 5.0% e os 22.4%, sendo que o melhor resultado foi observado para o patamar de medição **P4**.

Avaliação das abordagens

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos com cada uma das abordagens, compararam-se as diferenças relativas, apresentadas no gráfico seguinte (figura 4.2):

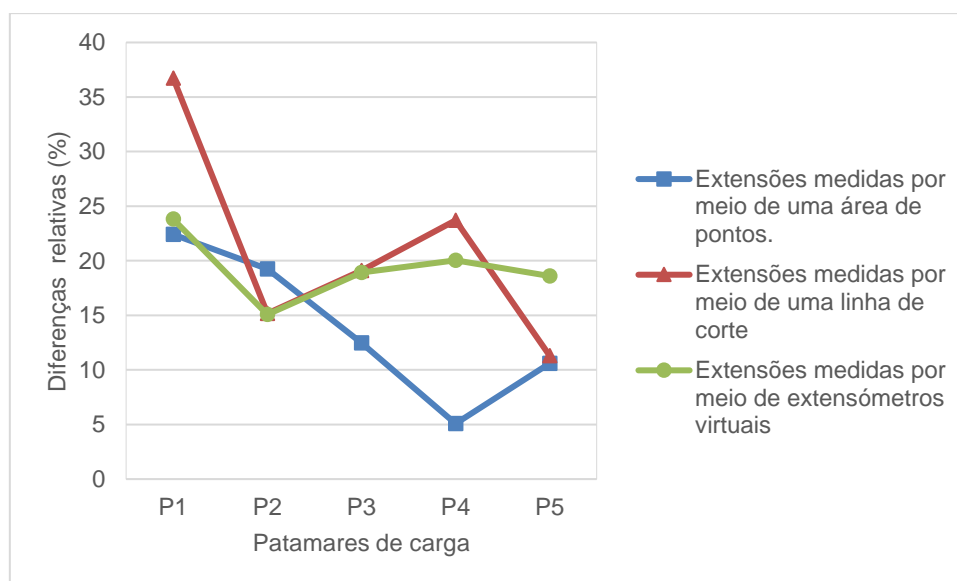


Figura 4.2-Gráfico: Diferenças relativas obtidos pelos diferentes métodos abordados.

A análise do gráfico acima apresentado permite concluir que a terceira abordagem de cálculo considerada, através da seleção de uma área de pontos, apresenta os melhores resultados. Contudo resta saber se a análise é suficientemente boa nas condições pré-definidas pelo programa, isto é, se a variação dos parâmetros - tamanho das facetas (blocos) e distância ao ponto - previamente definidos, têm alguma influência nos resultados da análise.

No subcapítulo 2.4, fez-se menção ao tamanho do bloco, que está associado ao tamanho das *features* empregues: um bloco de tamanho superior ao utilizado pelo programa, por defeito, provoca um maior tempo de computação e piora a aquisição dos efeitos locais do bloco. Entretanto a distância ao ponto é definida pela distância entre o centro de dois blocos consecutivos, sendo que uma distância inferior à definida automaticamente, provoca uma maior densidade de pontos mensuráveis e um maior tempo de computação (GOM Company, 2015).

Para isso desenvolveu-se uma pequena experiência que tem como base os resultados observados em (Beleza, 2017), onde as facetas são consideradas como pequenas (19×19 pixels), médias (23×23 pixels) ou grandes (33×33 pixels). Tendo em atenção o tamanho das *features* do padrão estocástico aplicado, decidi desconsiderar-se as facetas pequenas e realizar a análise das extensões do provete nos 5 patamares de carga definidos por (Gimenez, 2019). Tanto no caso das facetas médias como no caso das grandes, a distância ao ponto foi definida garantido uma sobreposição entre 20% e 50% de facetas adjacentes, como é recomendado em (GOM Company, 2015). A área selecionada para a análise em ambos casos pode ser observada na figura 4.3:

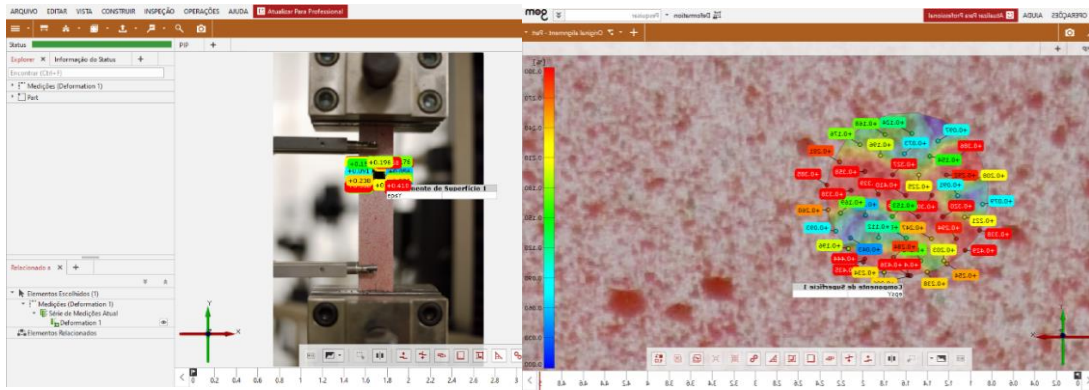


Figura 4.3- Área selecionada para o estudo do tamanho das facetas e a distância ao ponto no Gom Correlate: visão geral (esquerda); pormenor (à direita) .

De seguida apresentam-se os resultados obtidos nas figuras 4.4 e 4.5:

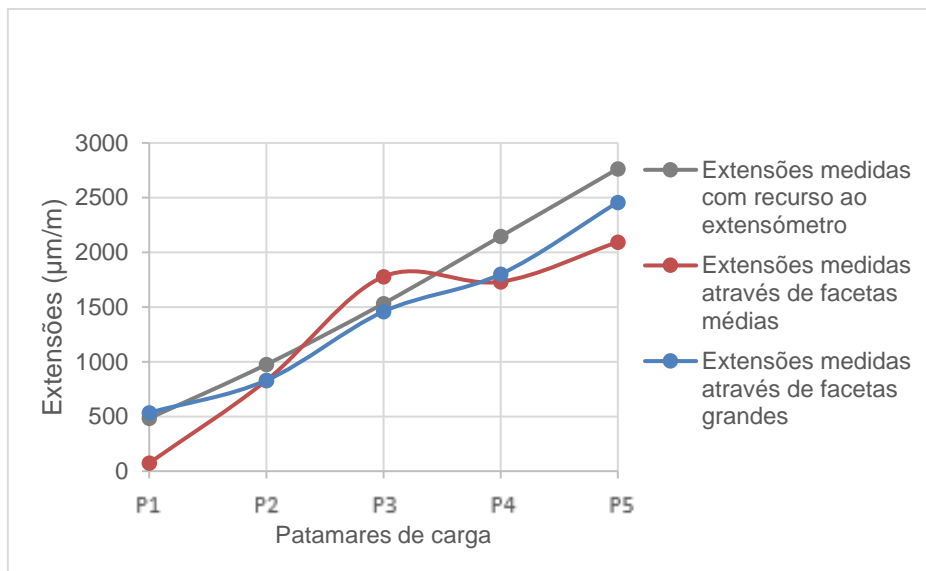


Figura 4.4- Extensões obtidas com diferentes tamanhos de faceta.

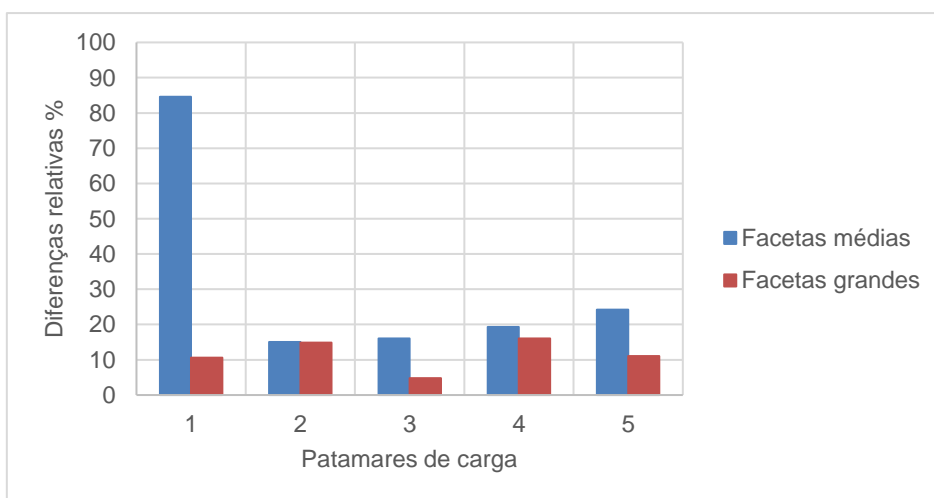


Figura 4.5-Diferenças relativas obtidas com diferentes tamanhos de faceta.

É visível que para o estudo em questão as facetas grandes apresentam melhores resultados. Contudo, verificou-se que para facetas de 31×31 pixels e a mesma distância ao ponto, obtém-se resultados idênticos num menor tempo de computação. Sendo que o padrão estocástico a utilizar tem as mesmas características gerais que o padrão estocástico estudado, decidiu-se utilizar a abordagem com área de pontos no *GOM Correlate* na análise dos restantes ensaios. Isto possibilita o estudo de uma ou várias zonas específicas do provete. A análise será realizada utilizando facetas de 31×31 pixels com uma distância ao ponto de 21 pixels.

Importa ainda frisar que em todos os ensaios realizados, após os ciclos de cargas relativos à determinação do Módulo de Elasticidade, o provete foi ensaiado à rotura. No entanto, o *Gom Correlate* revelou algumas dificuldades em gerar mapas de extensões homogêneos, fundamentalmente para extensões pequenas, isto é, na fase elástica do carregamento os mapas de extensão gerados pelo programa apresentam grande heterogeneidade, esta questão pode introduzir erros nas medições das extensões na ordem dos 20% (Company, 2019). Vários estudos apresentam as mesmas dificuldades no que toca à obtenção das extensões através de programas de Correlação Digital de Imagem, não conseguindo por vezes calcular com precisão extensões acima dos 2% (Beleza, 2017).

4.3. Determinação do Módulo de Elasticidade

4.3.1. Resultados obtidos com extensómetro

Foram processados os resultados dos ensaios adquiridos pelo extensómetro, com o objetivo de compará-los aos obtidos por meio das técnicas de processamento digital de imagens. De seguida é apresentado o comportamento durante os ciclos de carga e descarga para o provete **A1** (figura 4.6):

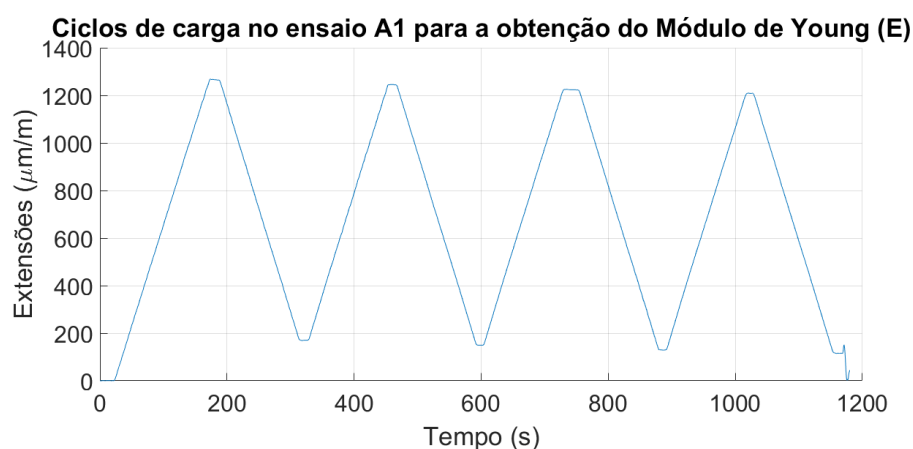


Figura 4.6-Gráfico «Extensão vs. Tempo». Ensaio para determinação do Módulo de Elasticidade

De seguida apresenta-se o gráfico «*Tensão vs Extensão*» (figura 4.7), obtido para o provete **A1** que, como já foi referido anteriormente, não foi levado à rotura. Portanto, é possível visualizar a zona elástica da curva do material e os ciclos de carga aos quais foi submetido:

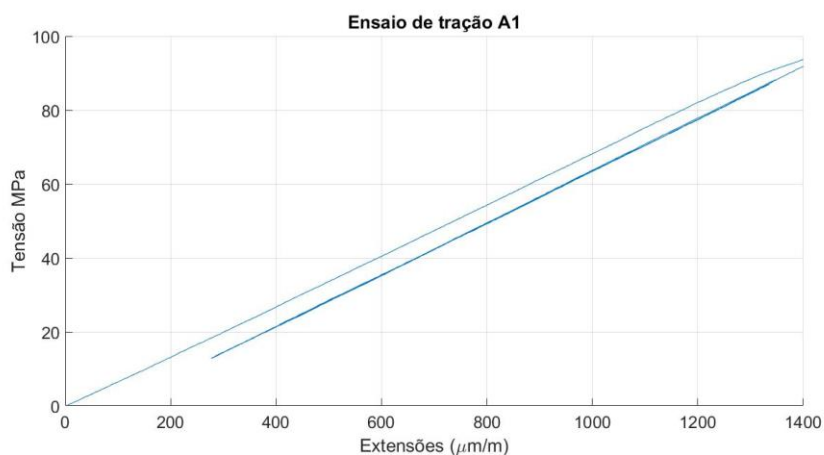


Figura 4.7-Gráfico «Tensão vs. Extensão ». obtido com recurso ao extensómetro, provete A1.

O paralelismo entre as curvas, que representam os ciclos de carga e descarga do ensaio, atesta a qualidade da aquisição de dados através do extensómetro. Foram detalhados os ciclos efetuados para a determinação do Módulo de Elasticidade em todos ensaios, e cujo valor de calculo é apresentado na tabela 4.4:

Tabela 4.4-Valores do Módulo de Elasticidade calculado para cada ensaio por via de extensómetros.

Ensaio	E_{ext} (GPa)	σ_v	$E_{\mu(ext)}$ (GPa)	σ_v	Cv
A1	68.9	0.08	69.8	0.71	0.01
A2	69.5	1.37			
A3	70.3	0.23			
A4	70.4	0.14			

Os gráficos a partir dos quais foi calculado o Módulo de Elasticidade encontram-se nas figuras 4.8 e 4.9. É de salientar que em todos os casos foi realizado um primeiro ciclo de carga que não é considerado no cálculo.

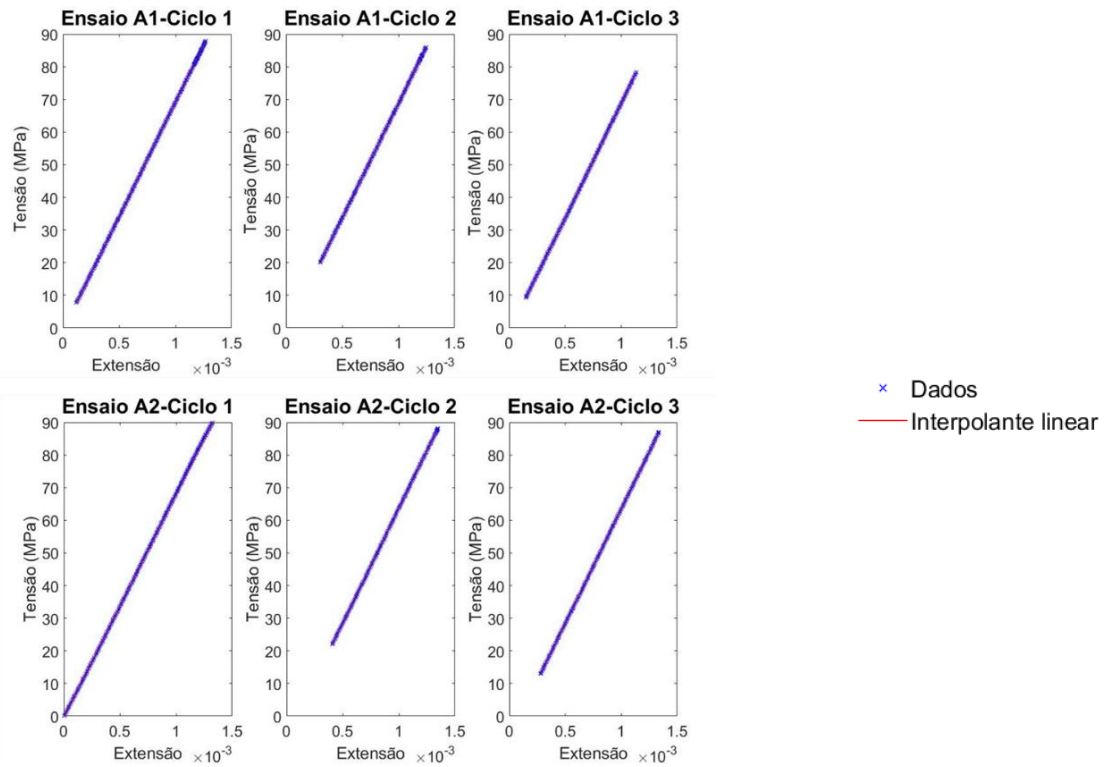


Figura 4.8-Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso ao extensômetro (A1-A2).

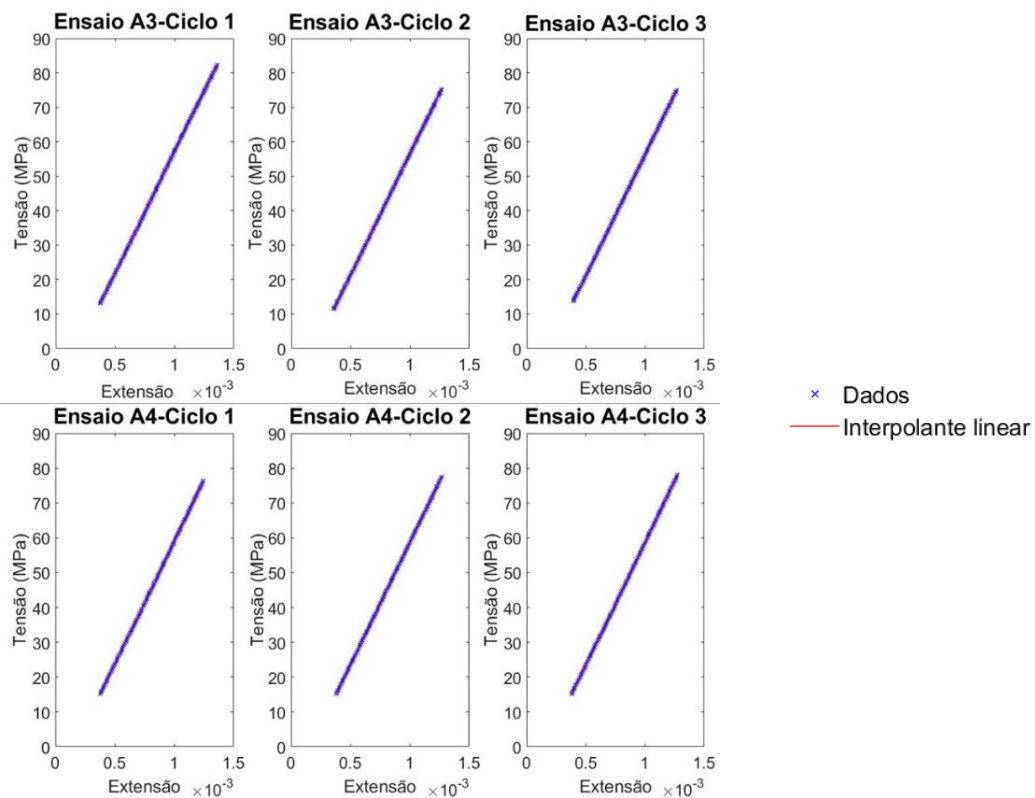


Figura 4.9-Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso ao extensômetro (A3-A4).

Segundo os dados do fornecedor, o Módulo de Elasticidade do material em estudo é de aproximadamente **70 GPa**, ou seja, está de acordo com os resultados obtidos a partir das leituras do extensómetro.

4.3.2. Resultados obtidos com Fotogrametria

Uma vez decididos os níveis de alvos a considerar (Secção 3.51), procedeu-se ao cálculo das variações extensões médias nos provetes nos instantes seleccionados, e das diferenças relativas destas variações de extensões quando comparadas com as leituras do extensómetro. Nas tabelas 4.5 a 4.8, apresentam-se os valores das extensões calculados e o respetivo Módulo de Elasticidade, obtidos para todos os provetes. Estes são também comparados com os valores obtidos através do extensómetro, calculando as a diferenças relativas entre os dois métodos.

Tabela 4.5-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria – (Ensaio **A1**)

Ensaio A1									
Ciclo de carga.	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon_{ext}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\Delta\varepsilon_{fot}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Δr (%)	E_{fot} (GPa)	$E_{\mu(fot)}$ (GPa)	Δr (%)	σ_v	Cv
Ciclo 1	67.3	963.6	968.7	0.52	69.5				
Ciclo 2	74.5	1065.1	909.4	17.12	81.9	76.2	10.6	5.13	0.07
Ciclo 3	74.7	1068.7	966.5	10.57	77.3				

Tabela 4.6-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria. (Ensaio **A2**)

Ensaio A2									
Ciclo de carga.	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon_{ext}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\Delta\varepsilon_{fot}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Δr (%)	E_{fot} (GPa)	$E_{\mu(fot)}$ (GPa)	Δr (%)	σ_v	Cv
Ciclo 1	93.8	1422.8	1200	18.57	77.3				
Ciclo 2	64.5	920.2	800	15.02	77.2	79.4	14.3	3.06	0.04
Ciclo 3	71.7	1023.4	900	13.71	83.8				

RESULTADOS

Tabela 4.7-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria. (Ensaio **A3**)

Ensaio A3									
Ciclo de carga.	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon_{ext}$ ($\mu\text{m/m}$)	$\Delta\varepsilon_{fot}$ ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)	E_{fot} (GPa)	$E_{\mu(fot)}$ (GPa)	Δ_r (%)	σ_v	Cv
Ciclo 1	69.2	987.2	900	9.69	74.3				
Ciclo 2	63.7	910.2	-	-	-	73.6	4.7	-	-
Ciclo 3	61.0	873.1	800	9.13	73.0				

Nota: As extensões calculadas no segundo ciclo de carga do **Ensaio A3** exibiram valores negativos, o que indicia problemas na captação de dados deste ciclo, logo não foi considerado.

Tabela 4.8-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria. (Ensaio **A4**)

Ensaio A4									
Ciclo de carga.	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon_{ext}$ ($\mu\text{m/m}$)	$\Delta\varepsilon_{fot}$ ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)	E_{fot} (GPa)	$E_{\mu(fot)}$ (GPa)	Δ_r (%)	σ_v	Cv
Ciclo 1	61.3	870.3	1200	27.47	50.9				
Ciclo 2	62.4	891.2	800	11.40	78.3	75.6	7.4	19.14	0.25
Ciclo 3	62.9	897.5	600	49.58	97.6				

As diferenças relativas nas análises realizadas situam-se entre os 4.7% e os 14.3%. A menor diferença, 4.7%, na foi registado no ensaio do provete **A3**, o coeficiente de variação, por terem sido analisadas apenas duas leituras.

A partir dos valores e cálculo da variação da tensão e da extensão, foram construídos os gráficos «Tensão vs. Extensão», por ciclos de carga, obtidos com recurso à Fotogrametria, os quais se apresentam nas figuras 4.10 e 4.11. Estes gráficos foram obtidos através de uma interpolação linear simples.

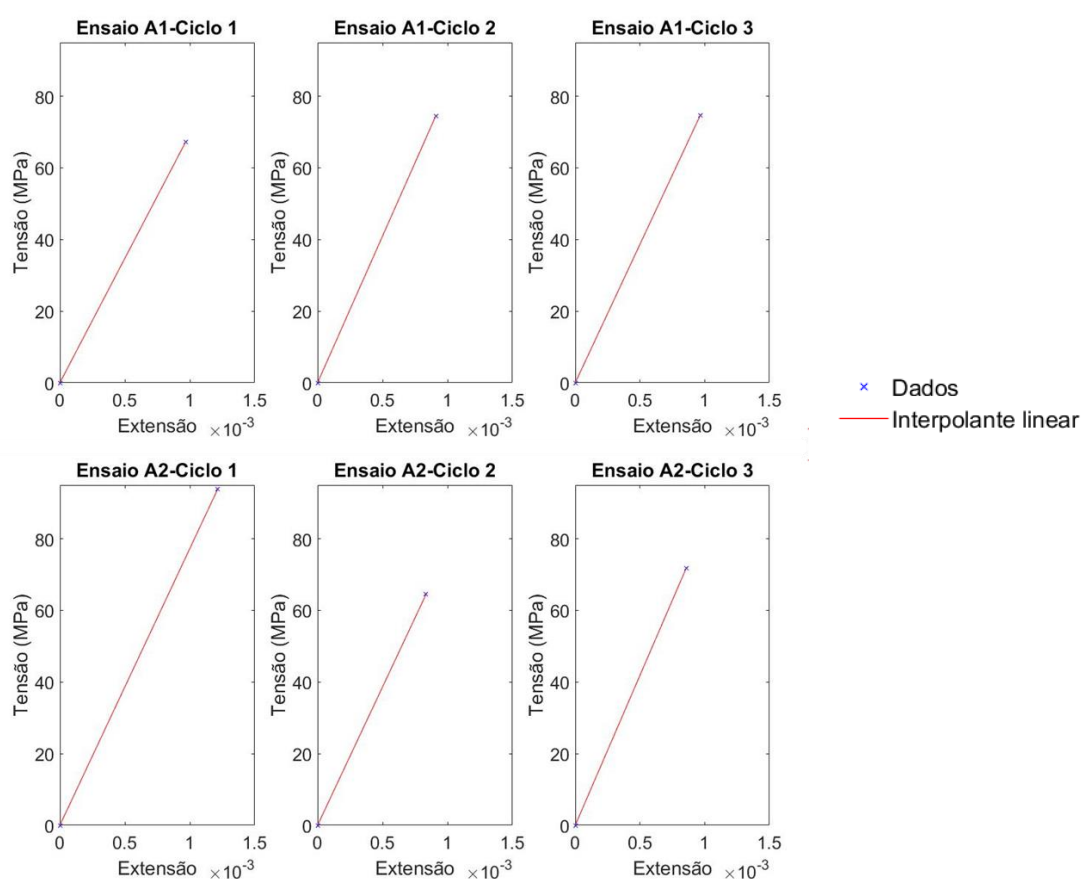


Figura 4.10- Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso à Fotogrametria (A1-A2).

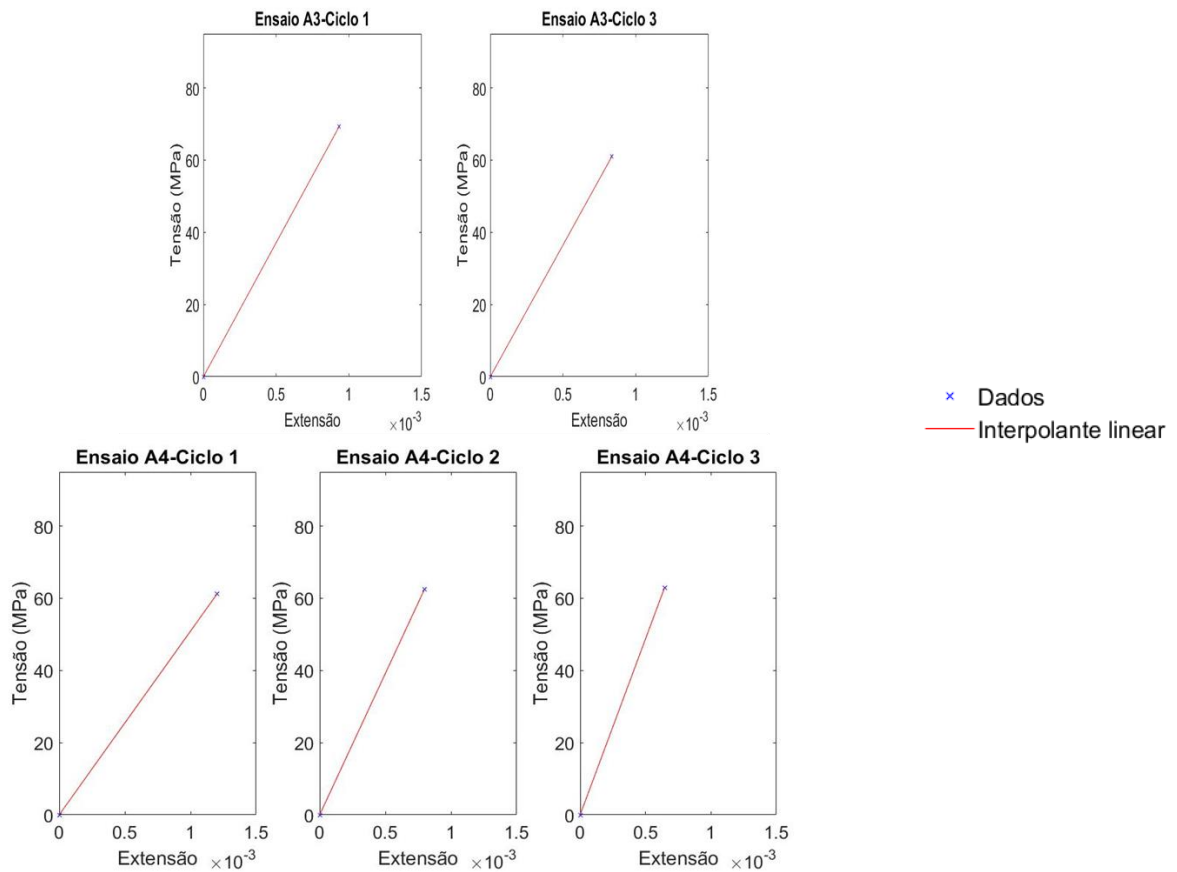


Figura 4.11- Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso à Fotogrametria (A3-A4).

4.3.3. Resultados obtidos com recurso à Correlação Digital de Imagens

As principais considerações ponderadas no cálculo das extensões por meio da Correlação Digital de Imagens (DICⁱ) e com recurso ao *GOM Correlate* foram explanadas na Secção 3.6.2. Importa salientar que o programa teve dificuldades em detetar os *features* acima da terceira e abaixo de sétima linhas de alvos. Presume-se que esta dificuldade está associada à resolução da imagem, à capacidade de foco da lente de 300 mm em toda a área de estudo do provete e/ou à adesão da tinta à superfície do provete. Tendo em conta estes fatores, apresenta-se, na figura 4.12, a zona de estudo dos provetes seleccionada para o cálculo da extensão com recurso ao *GOM Correlate*.



Figura 4.12-Zona de estudos dos provetes com recurso ao GOM-Correlate.

A partir dos valores e cálculo da variação da tensão e a extensão, foram construídos os gráficos «Tensão vs. Extensão», por ciclos de carga, obtidos com recurso à Fotogrametria e que se encontram apresentados nas figuras 4.13 e 4.14. Estes gráficos foram obtidos através de uma interpolação linear simples e neles é possível conferir a informação previamente apresentada.

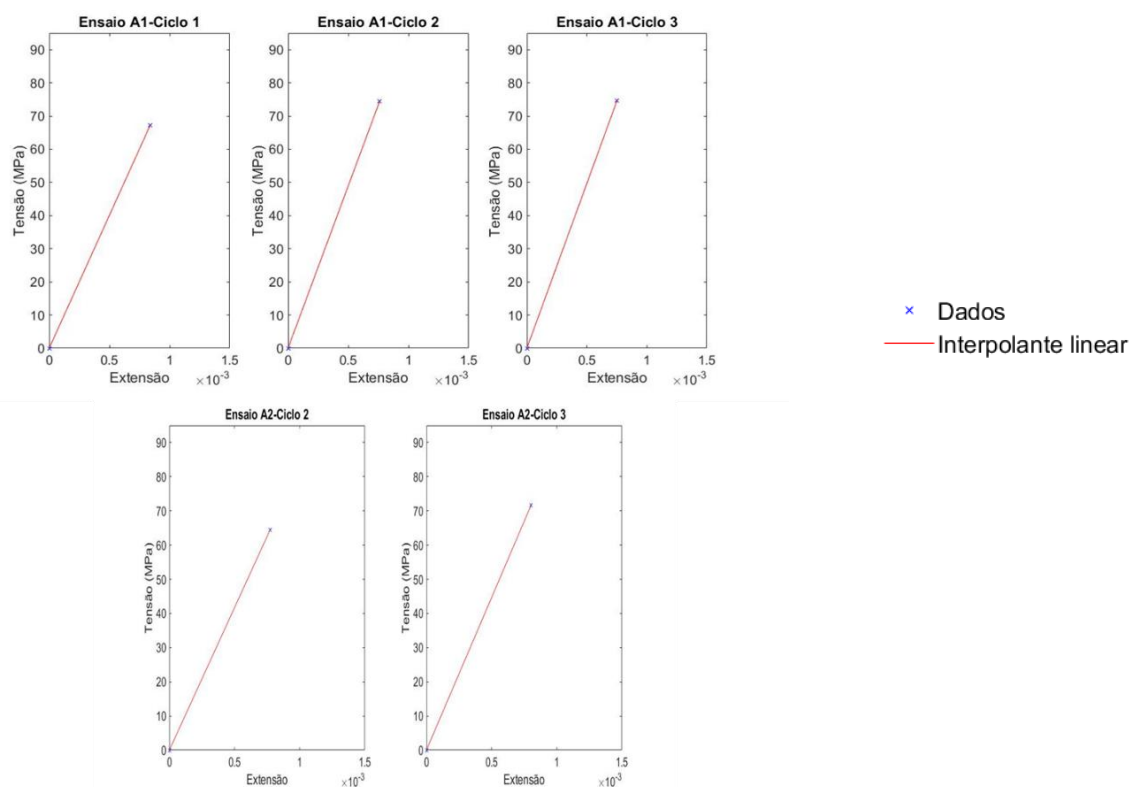


Figura 4.13- Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso ao DIC (A1-A2).

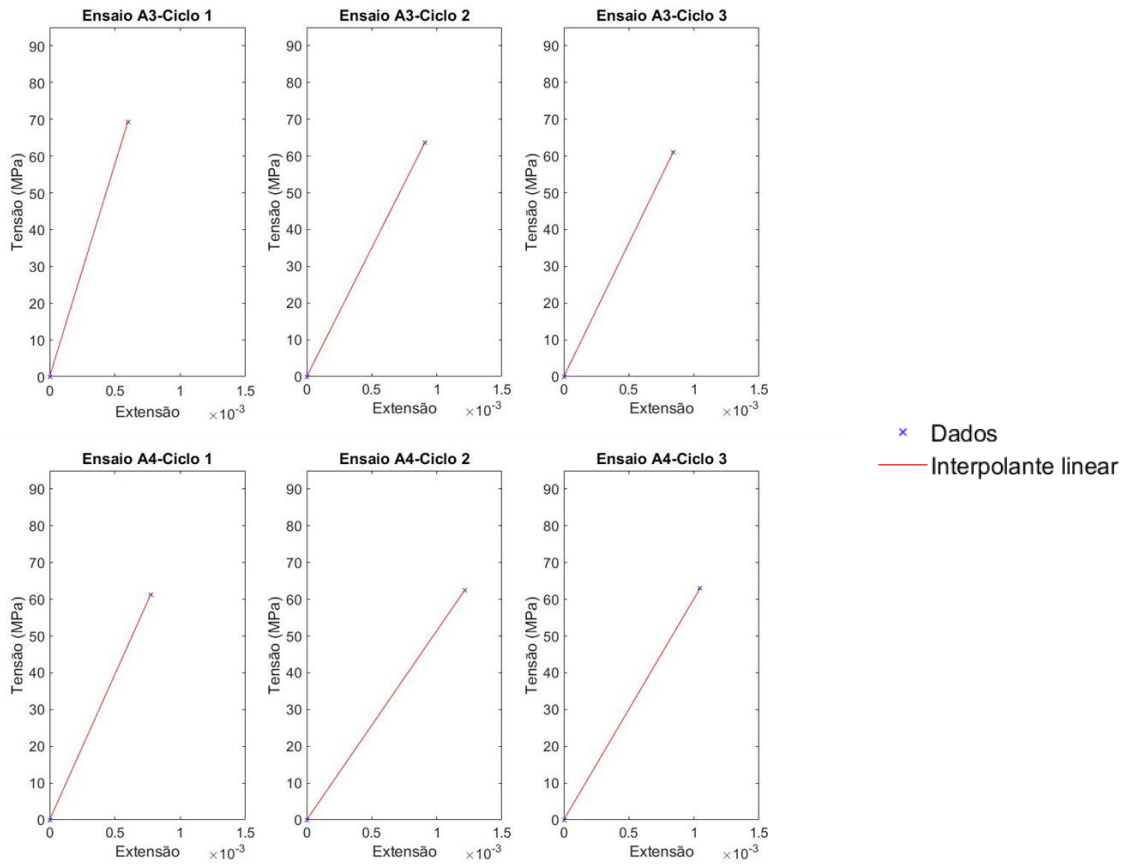


Figura 4.14- Ciclos de carga para a obtenção do Módulo de Elasticidade, obtidos com recurso ao DIC (**A3-A4**).

De seguida se apresentam os valores de Módulo de Elasticidade obtido com recurso à DIC, bem como as diferenças relativas com relação ao extensómetro, considerando exatamente as mesmas imagens analisadas com recurso à Fotogrametria (tabelas 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12). Os resultados apresentados permitem observar que no provete **A4** se registaram as menores diferenças relativas. Contudo, apresenta uma elevada maior dispersão de resultados, o que deixa a desejar em termos de fiabilidade. Na foi registado no ensaio do provete **A2**, o coeficiente de variação de 0.01, por terem sido analisadas apenas duas leituras

Tabela 4.9-Resultados obtidos com recurso à DIC. (Ensaio **A1**).

Ensaio A1									
Ciclo de carga.	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon_{ext}$ ($\mu\text{m/m}$)	$\Delta\varepsilon_{DIC}$ ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)	E_{DIC} (GPa)	$E_{\mu(DIC)}$ (GPa)	Δ_r (%)	σ_v	Cv
Ciclo 1	67.3	963.6	839.7	14.76	80.2				
Ciclo 2	74.5	1065.1	760.9	39.99	97.9	92.5	34.2	8.73	0.09
Ciclo 3	74.7	1068.7	752.0	42.11	99.4				

Tabela 4.10-Resultados obtidos com recurso à DIC. (Ensaio **A2**)

Ensaio A2									
Ciclo de carga.	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon_{ext}$ ($\mu\text{m/m}$)	$\Delta\varepsilon_{DIC}$ ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)	E_{DIC} (GPa)	$E_{\mu(DIC)}$ (GPa)	Δ_r (%)	σ_v	Cv
Ciclo 1	93.8	1422.8	-	-	-				
Ciclo 2	64.5	920.2	773.5	18.96	83.4	86.3	24.2	-	-
Ciclo 3	71.7	1023.4	803.0	27.44	89.2				

Nota: O GOM Correlate apresentou dificuldades na deteção de *features* neste ensaio no primeiro ciclo, e por tanto, o valor das extensões encontra-se influenciado por este fator, assim sendo, não foi considerado o ciclo, na análise.

RESULTADOS

Tabela 4.11-Resultados obtidos com recurso à DIC. (Ensaio **A3**)

Ensaio A3									
Ciclo de carga.	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon_{ext}$ ($\mu\text{m/m}$)	$\Delta\varepsilon_{DIC}$ ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)	E_{DIC} (GPa)	$E_{\mu(DIC)}$ (GPa)	Δ_r (%)	σ_v	Cv
Ciclo 1	69.2	987.2	598.4	64.96	115.7				
Ciclo 2	63.7	910.2	909.2	0.11	70.1	86.1	22.2	20.92	0.24
Ciclo 3	61.0	873.1	840.0	3.94	72.7				

Tabela 4.12-Resultados obtidos com recurso à DIC. (Ensaio **A4**)

Ensaio A4									
Ciclo de carga.	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon_{ext}$ ($\mu\text{m/m}$)	$\Delta\varepsilon_{DIC}$ ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)	E_{DIC} (GPa)	$E_{\mu(DIC)}$ (GPa)	Δ_r (%)	σ_v	Cv
Ciclo 1	61.3	870.3	773.7	12.49	79.2				
Ciclo 2	62.4	891.2	1212.4	26.50	51.5	63.6	9.6	11.57	0.18
Ciclo 3	62.9	897.5	1046.2	14.21	60.2				

As diferenças relativas nas análises realizadas situam-se entre os 9.6 e os 34.2%, ligeiramente superior as diferenças relativas obtidas com recurso à Fotogrametria. A menor diferença, 9.6%, foi registada no ensaio do provete **A4**, com um coeficiente de variação de 0.18, ou seja, o segundo pior do conjunto, isto quer dizer que o resultado é bom em termos médios, mas é maior a dispersão dos dados, em termos estatísticos.

4.3.4. Análise de resultados

Nesta secção é feita uma comparação entre os dois métodos baseados em imagem utilizados, com o objetivo de perceber a fiabilidade dos mesmos e avaliar a possibilidade da sua utilização em trabalhos futuros. A comparação que se apresenta na tabela 4.13 é feita com base na determinação do Módulo de Elasticidade, calculado com cada um dos métodos.

Tabela 4.13-Comparação entre os resultados obtidos.

Técnica de Processamento de Imagem	Provete	Módulo de Elasticidade (GPa)	Diferenças relativas em relação ao extensómetro (%)	Coefficiente de variação
Fotogrametria	A1	76.2	10.6	0.07
	A2	79.4	14.3	0.04
	A3	73.6	4.7	0.01
	A4	75.6	7.4	0.25
DIC	A1	92.5	34.2	0.09
	A2	86.3	24.2	0.03
	A3	86.1	22.2	0.24
	A4	63.6	9.6	0.18

Os resultados obtidos indicam que a Fotogrametria apresenta melhores resultados, tanto em termos de diferenças relativas como em termos de coeficiente de variação dos valores médios, tal como expresso graficamente na figura 4.15, sendo que as diferenças relativas oscilam entre 4.7% e 14.3%. Pode assim afirmar-se que a Fotogrametria permite estimar o Módulo de Elasticidade do material como uma diferença relativa média de 10% e sempre inferior a 15%. No caso da DIC, as diferenças relativas oscilaram entre 9.6% e 34.2%, com uma diferença relativa de aproximada de 22%, sempre inferior a 35%, mas nunca menor do que 10%.

Não existem na bibliografia consultada muitos registos de estudos do cálculo do Modulo de Elasticidade do Alumínio com recurso a sistemas de visão de forma direta. Neste âmbito importa referir (Almeida et al., 2016), onde o cálculo do Módulo de Elasticidade do PLEXIGLAS e o PVC, foi conseguido através de DIC, com uma exatidão que oscilou aproximadamente entre 5% e 35%. Assim pode concluir-se que, em termos de exatidão do método, foram obtidos valores coerentes com os da bibliografia consultada, para o cálculo do Módulo de Elasticidade, com recurso a sistemas de visão.

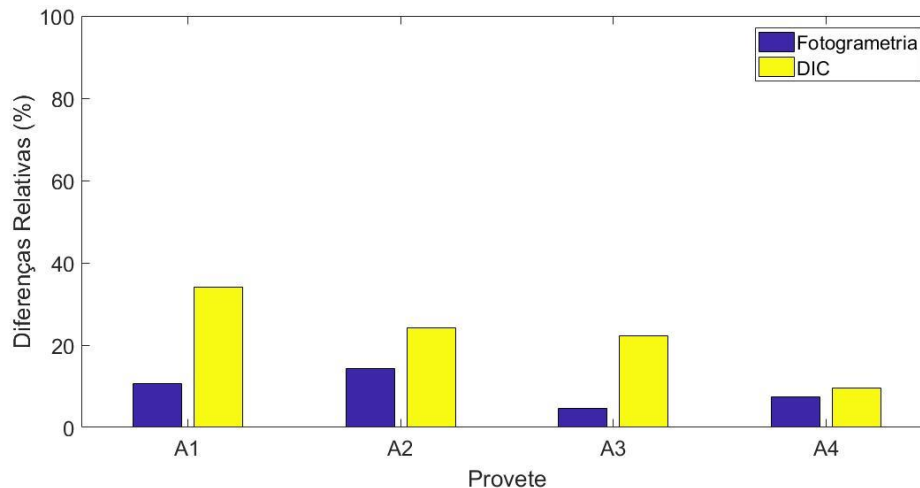


Figura 4.15-Diferenças relativas obtidas com Fotogrametria e DIC.

4.4. Ensaios à rotura

Após a determinação do Modulo de Elasticidade, na fase elástica do ensaio, os provetes **A2**, **A3** e **A4** foram ensaiados até à rotura. Nesta secção são apresentados os resultados obtidos.

4.4.1. Resultados obtidos com recurso ao alongamento do material ($\frac{\Delta L}{L}$)

Foram calculadas as curvas correspondentes aos provetes **A2**, **A3** e **A4**, cuja rotura ocorreu em todos os casos para valores de tensão de aproximadamente 215 MPa. Verificou-se que em todos os casos ocorreu um descolamento do extensómetro antes do provete atingir a rotura, entre os 10 e $19 \times 10^3 \mu \frac{m}{m}$, pelo que as curvas completas de caracterização do material serão apresentadas em função do $\frac{\Delta L}{L}$, a modo representativo, medido a partir dos dados da máquina Instron. Na figura 4.16 são apresentados os gráficos “Tensão vs. $\frac{\Delta L}{L}$ ”, correspondentes a cada um dos três provetes referidos. Estes permitem verificar a consistência dos resultados obtidos ao nível do comportamento dos provetes. Para a análise do comportamento das extensões do material em estudo, com recurso a sistemas de visão, foi necessário escolher algumas das imagens adquiridas de forma a estudar as extensões na fase plástica do carregamento. Na figura 4.16, são também apresentados os instantes seleccionados para cada provete ensaiado à rotura.

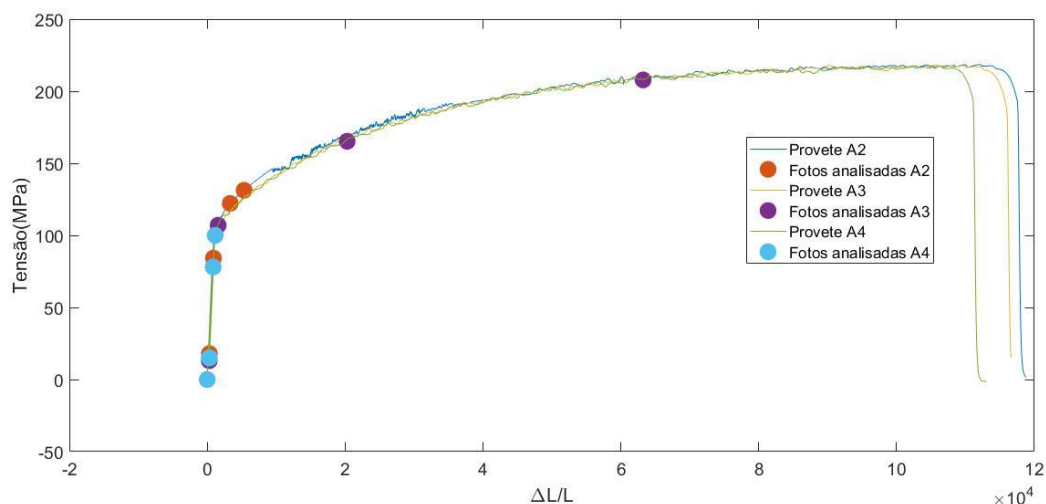


Figura 4.16-Instantes selecionados para a análise das extensões.

4.4.2. Resultados obtidos com Fotogrametria

De seguida apresenta-se uma comparação feita entre os resultados obtidos com recurso à Fotogrametria e por meio do extensómetro. É de salientar que, em todos os casos, a partir determinado instante do ensaio (extensão a partir dos ~10‰) o extensómetro descolou do provete, assim sendo não foi possível estabelecer uma comparação na totalidade do ensaio. Nas figuras seguintes são apresentados dois tipos de gráficos para cada um dos ensaios: um primeiro onde se representam os instantes escolhidos para a análise com recurso a sistemas de visão, incluindo o instante próximo à descolagem do extensómetro; um segundo que onde é possível observar a comparação entre as extensões medidas pelo extensómetro e com fotogrametria.

Na tabela 4.14 apresentam-se os valores obtidos das extensões para o provete **A2** medidos com recurso à Fotogrametria, também são apresentadas as extensões calculadas com recurso aos extensómetros e as diferenças relativas entre ambas técnicas. Nos gráficos da figura 4.17 é possível conferir os patamares de ensaio analisados e o confronto entre os valores das extensões medidos no provete **A2**.

Tabela 4.14-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria no provete **A2**.

Ensaio A2				
Patamar de carga	σ (MPa)	ϵ_{ext} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ϵ_{fot} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Δ_r (%)
P1	17.9	354	567	60.2
P2	84.2	1 298	1242	4.3
P3	122.2	6 504	6361	2.2
P4	131.3	10 190	10526	3.3

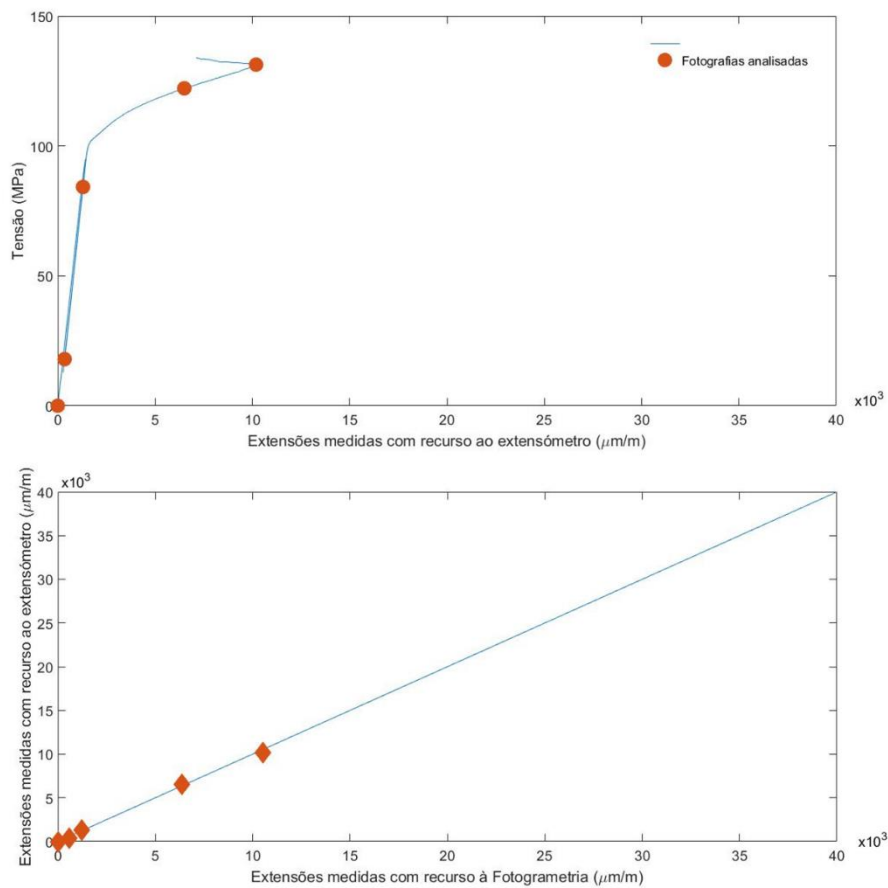


Figura 4.17-Fotogrametria vs. Extensómetro, provete **A2**.

Na figura 4.18 encontram-se as imagens correspondentes aos patamares de ensaio analisados.

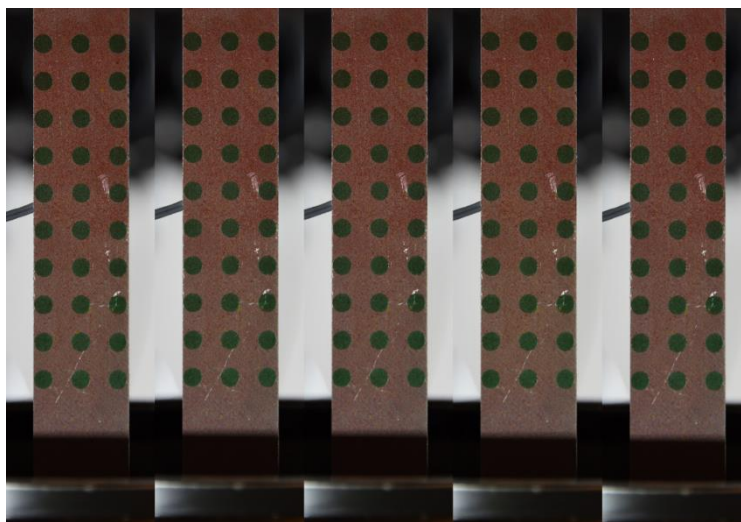


Figura 4.18-Patamares de extensão, provete **A2** (Fotogrametria).

Na tabela 4.15 apresentam-se os valores obtidos das extensões para o provete **A3** medidos com recurso à Fotogrametria, também são apresentadas as extensões calculadas com recurso ao extensómetro e as diferenças relativas entre ambas técnicas. Nos gráficos da figura 4.19 é possível conferir os patamares de ensaio analisados e o confronto entre os valores das extensões medidos no provete **A3**.

Tabela 4.15-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria no provete **A3**.

Ensaio A3				
Patamar de carga	σ (MPa)	ϵ_{ext} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ϵ_{fot} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	\square_r (%)
P1	16.4	432.9	487.6	12.6
P2	107.0	2523.0	2178.2	13.7
P3	122.3	8445.3	9085.6	7.6
P4	124.7	10041.0	9440.6	5.9
P5	157.7	19290.0	34195.0	*

***Valores onde o extensómetro já se encontrava em descolagem**

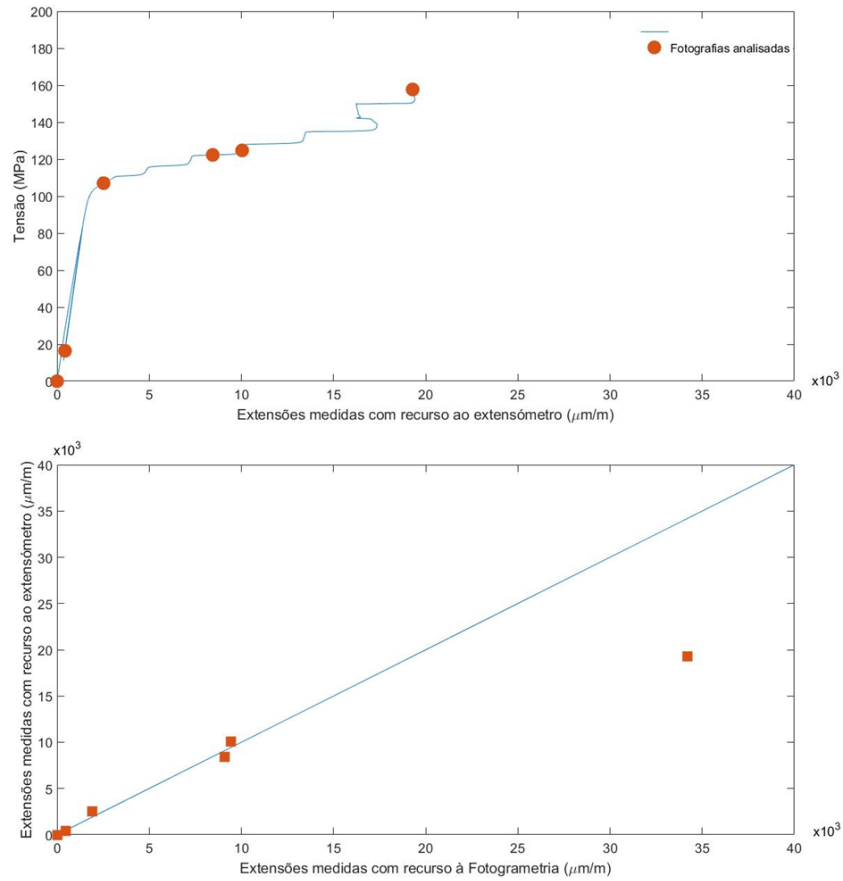


Figura 4.19-Fotogrametria vs. Extensómetro, provete **A3**.

Na figura 4.20 encontram-se as imagens correspondentes aos patamares de ensaio analisados.

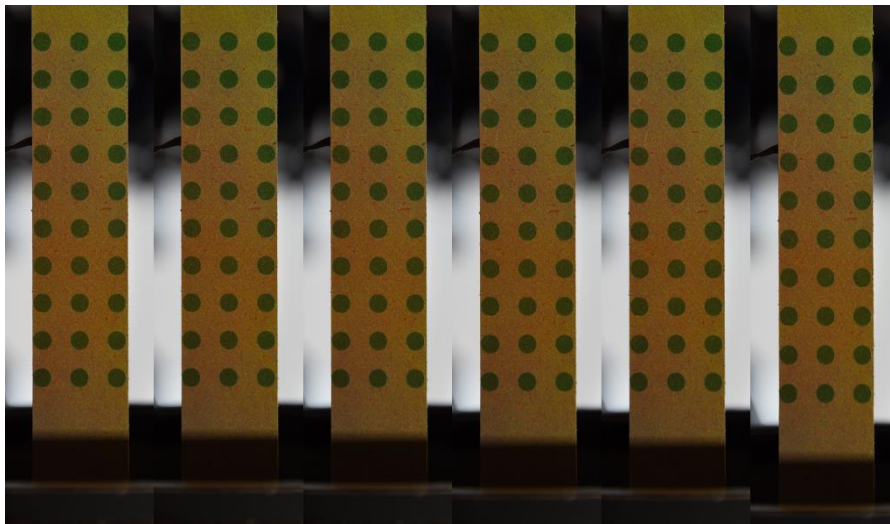


Figura 4.20-Patamares de extensão, provete **A3** (Fotogrametria).

Na tabela 4.16 apresentam-se os valores obtidos das extensões para o provete **A3** medidos com recurso à Fotogrametria, também são apresentadas extensões calculadas com recurso aos extensómetros e as diferenças relativas entre ambas técnicas.

Tabela 4.16-Resultados obtidos com recurso à Fotogrametria no provete **A4**.

Ensaio A4				
Patamar de carga	σ (MPa)	ϵ_{ext} ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_{fot} ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)
P1	14.9	372.2	560.8	50.7
P2	100.0	1714.4	1730.8	0.9
P3	119.7	7624.8	8159.5	7.0
P4	125.6	10479.0	10109.0	3.5
P5	153.8	17928.0	28153.0	*

* Valores onde o extensómetro já se encontrava em descolagem

Por último apresentam-se os gráficos relativos à comparação entre a Fotogrametria e a medição de extensões com recuso a extensómetro, para o provete **A4** (figura 4.21) e as fotografias dos instantes de leitura da extensão (figura 4.22). Note-se que no caso do patamar de carga P5 o extensómetro já se encontrava em descolagem, e, portanto, a leitura do extensómetro neste patamar não foi considerada.

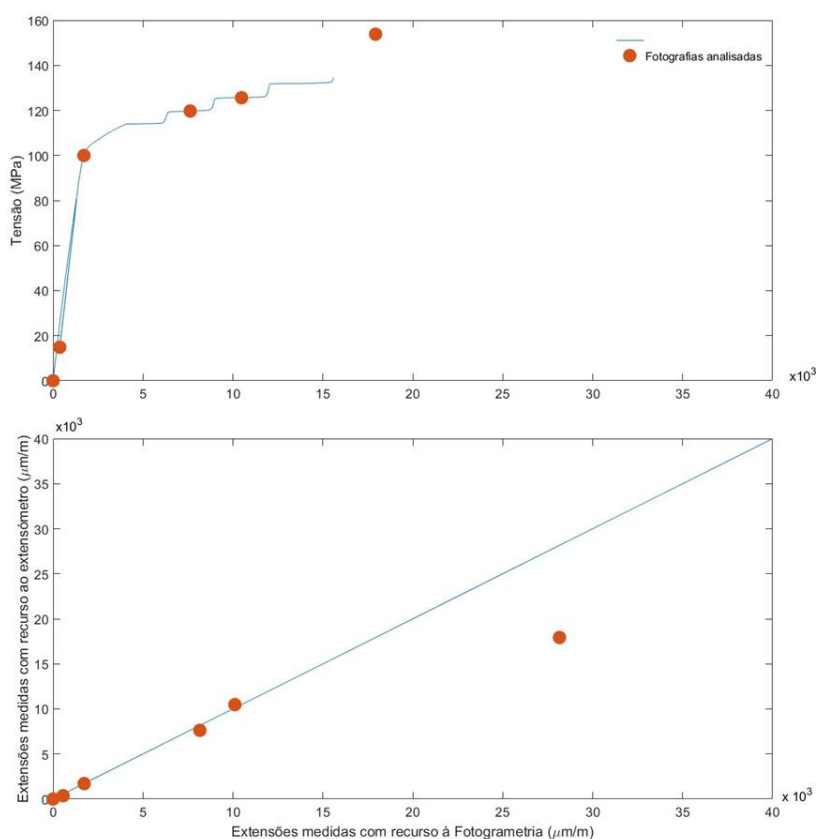


Figura 4.21-Fotogrametria vs. Extensómetro, provete **A4**.

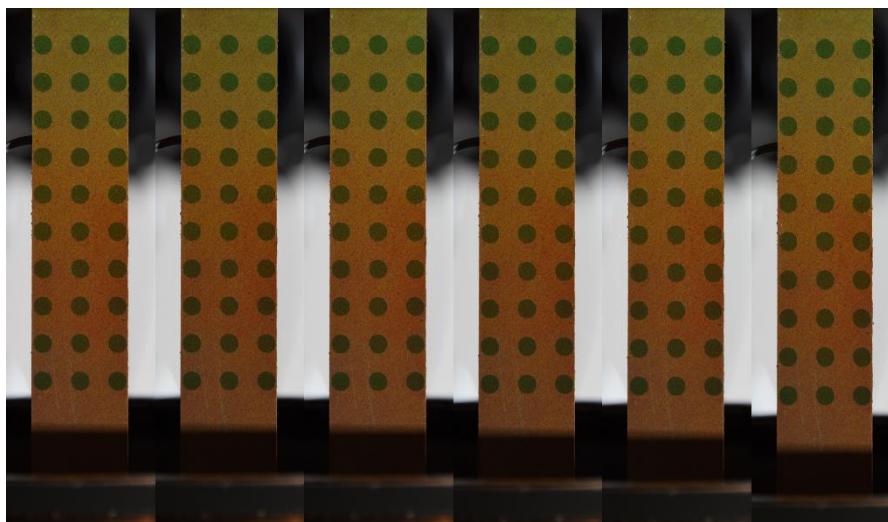


Figura 4.22-Patamares de extensão, provete **A4**(Fotogrametria).

. Após a análise dos resultados apresentados, conclui-se que o provete **A4** apresenta os melhores resultados, com diferenças relativas entre 0.9% e 50.7%.

4.4.3. Resultados obtidos com recurso à Correlação Digital de Imagens

No caso do método DIC, foi realizada uma análise idêntica à da Fotogrametria, trabalhando assim com as mesmas imagens, ou seja, com os mesmos patamares de ensaio. Na tabela 4.17, e no gráfico da figura 4.23, que de seguida se apresentam, podem observar-se os valores obtidos no cálculo das extensões, para o provete **A2**, com recurso à DIC, assim como as extensões obtidas a partir do extensómetro e as diferenças relativas entre ambas.

Tabela 4.17-Resultados obtidos com recurso à DIC, provete **A2**.

Ensaio A2				
Patamar de carga	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_{ext} ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_{DIC} ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)
P1	17.9	354	266	24.9
P2	84.2	1 298	1 215	6.4
P3	122.2	6 504	5 993	7.9
P4	131.3	10 190	10 425	2.3

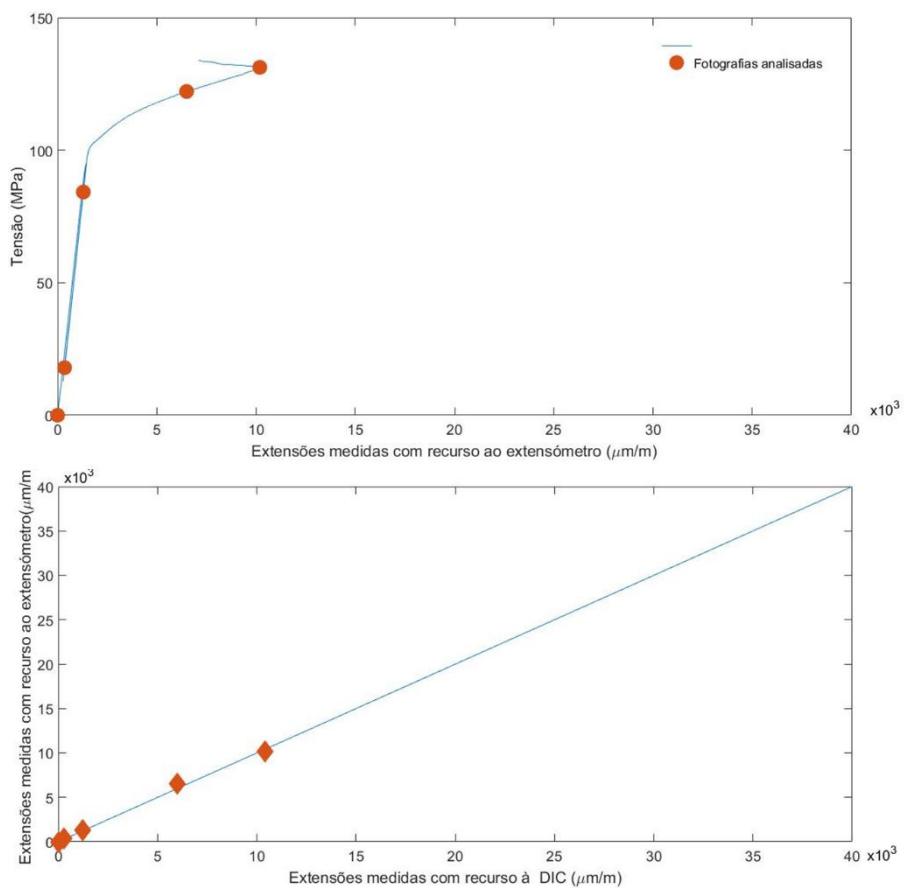


Figura 4.23-DIC vs. Extensómetro, provete **A2**.

Na figura 4.24 encontram-se as imagens correspondentes aos patamares de ensaio analisados.

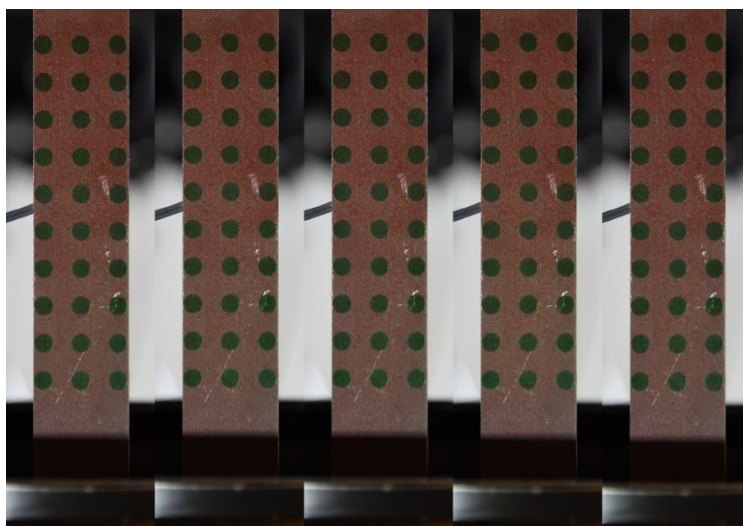


Figura 4.24-Patamares de extensão, provete **A2** (DIC).

Apresenta-se de seguida a tabela 4.18, que contém os resultados obtidos com recurso à DIC, no ensaio, e uma comparação com os dados obtidos com recurso ao extensómetro para o provete **A3**. Note-se que no caso do patamar de carga P5 o extensómetro já se encontrava em descolagem, e, portanto, a leitura do extensómetro neste patamar não foi considerada.

Tabela 4.18-Resultados obtidos com recurso à DIC, provete **A3**.

Ensaio A3				
Patamar de carga	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_{ext} ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_{DIC} ($\mu\text{m/m}$)	Δ_r (%)
P1	16.4	432.9	260.5	39.8
P2	107.0	2523.0	2344.8	7.1
P3	122.3	8445.3	9990.9	18.3
P4	124.7	10041.0	10423.0	3.8
P5	157.7	19290.0	35296.0	*

* Valores onde o extensómetro já se encontrava em descolagem

Como é possível observar, a descolagem do extensómetro numa fase precoce, já na zona de comportamento plástico do provete, impossibilita o desenvolvimento de uma análise mais precisa, contudo, na figura 4.25, são apresentados os gráficos comparativos para o provete **A3**.

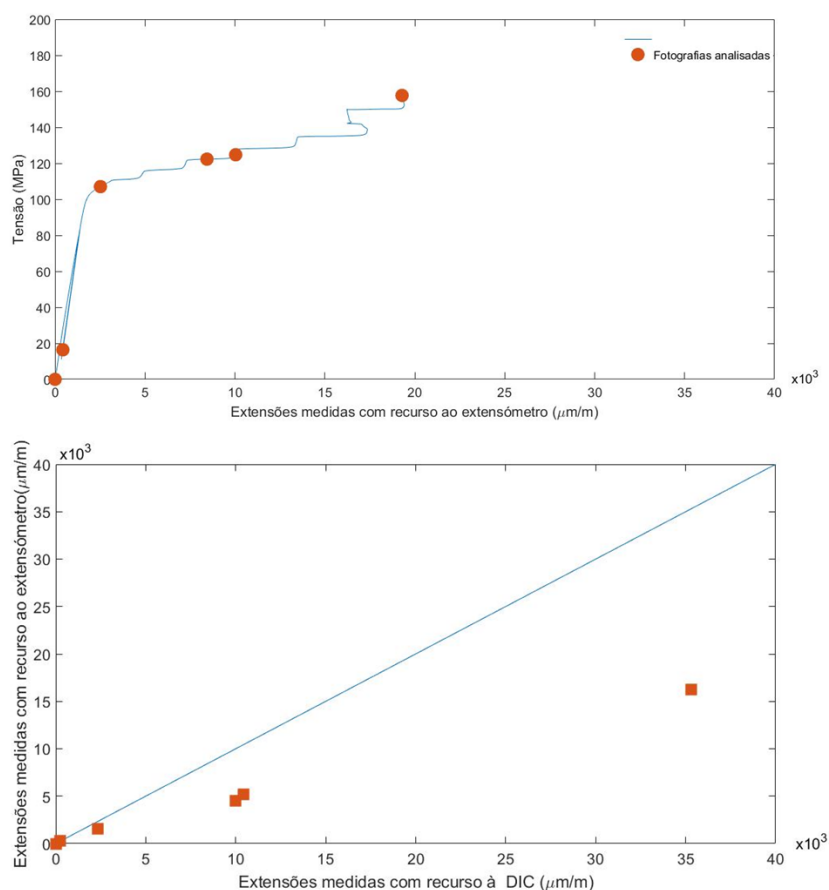


Figura 4.25-DIC vs. Extensómetro, provete **A3**

Na figura 4.26 encontram-se as imagens correspondentes aos patamares de ensaio analisados.

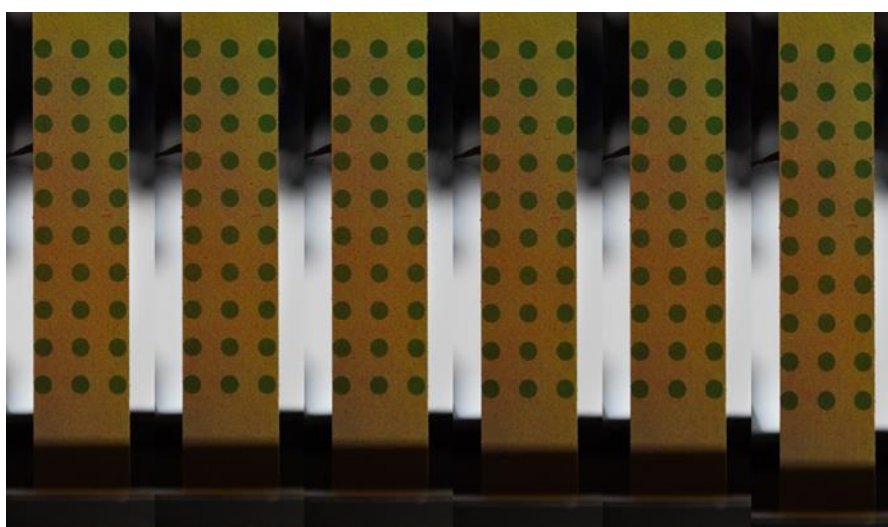


Figura 4.26--Patamares de extensão, provete **A3** (DIC).

Na tabela 4.19, e o gráfico da figura 4.27, que de seguida se apresentam, podem observar-se valores obtidos, no cálculo das extensões, para o provete **A4**, com recurso à DIC, assim como as extensões obtidas por meio do extensómetro e as diferenças relativas entre ambas. Note-se que no caso do

patamar de carga P5 o extensômetro já se encontrava em descolagem, e, portanto, a leitura do extensômetro neste patamar não foi considerada.

Tabela 4.19-Resultados obtidos com recurso à DIC, provete **A4**.

Ensaio A4				
Patamar de carga	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_{ext} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ϵ_{DIC} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Δr (%)
P1	14.9	372.2	21.2	94.3
P2	100.0	1714.4	1513.9	11.7
P3	119.7	7624.8	7235.2	5.1
P4	125.6	10479.0	11888.0	13.4
P5	153.8	17928.0	31401.0	*

* Valores onde o extensômetro já se encontrava em descolagem

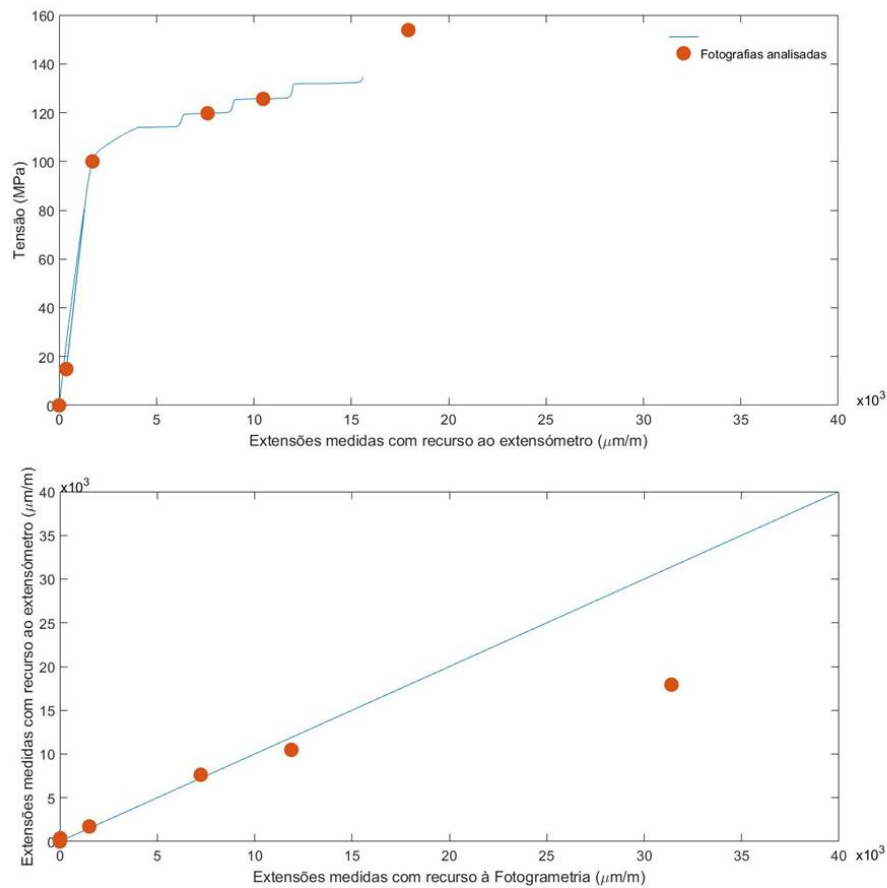


Figura 4.27-DIC vs. Extensómetro, provete **A4**.

Na figura 4.28 encontram-se as imagens correspondentes aos patamares de ensaio analisados.

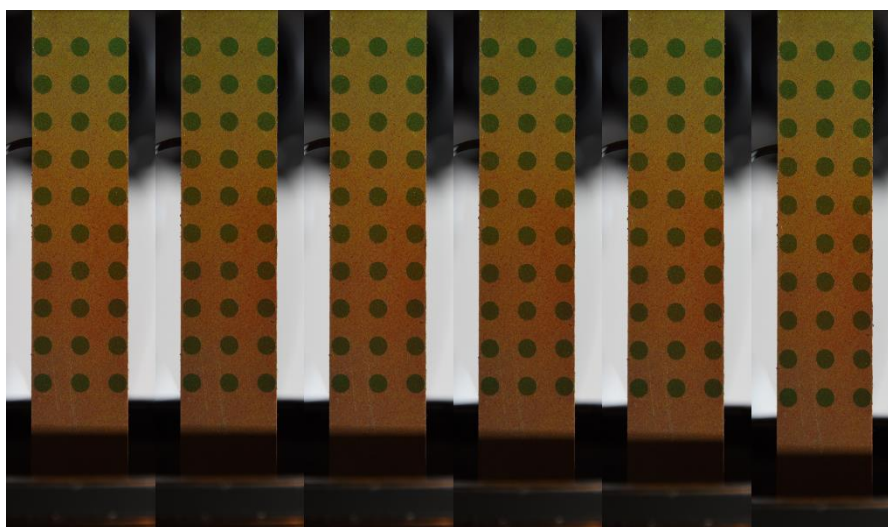


Figura 4.28-Patamares de extensão, provete **A4** (DIC).

4.4.4. Análise dos resultados

As diferenças relativas nas análises realizadas situam-se entre os 0.9% e os 60.2% para a Fotogrametria e entre os 2.3% e 94.3% para a DIC. As menores diferenças se apresentaram no provete **A4** no caso da Fotogrametria, e no provete **A2** para a DIC. Na figura 4.29, encontra-se uma comparação entre as diferenças relativas obtidas por ambos métodos no provete **A2** com relação ao extensómetro.

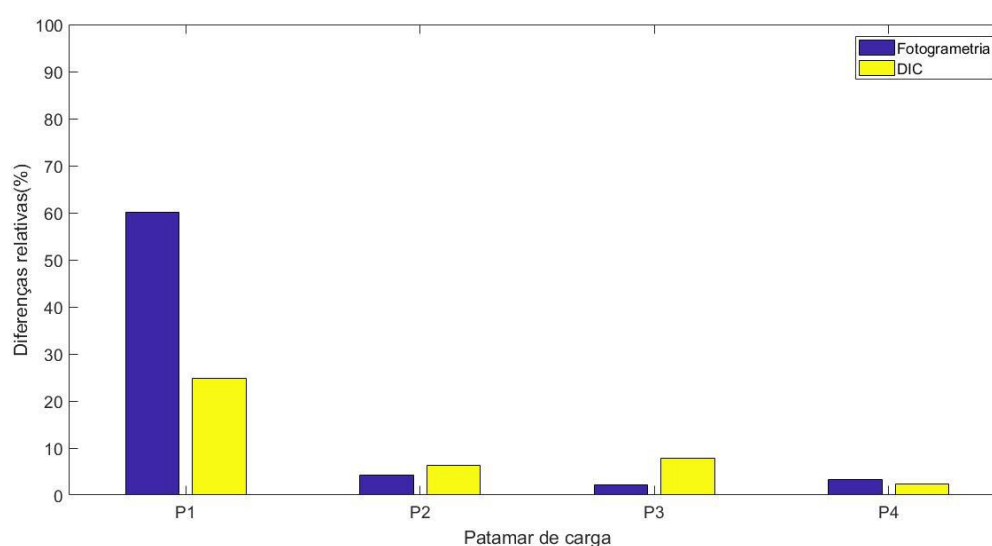


Figura 4.29-Diferenças relativas das extensões medidas no provete **A2**.

Como pode ser observado no gráfico da figura 4.29, as diferenças relativas diminuíam consideravelmente após o patamar de carga P1. No caso dos provetes **A3** e **A4**, também é apresentada

uma comparação entre os métodos utilizados com base nas diferenças relativas com as medições do extensómetro (figuras 4.30 e 4.31), sendo que em ambos casos foi desconsiderado o patamar de carga P5 pois para ambos provetes este patamar representa o último valor medido pelo extensómetro antes de descolar completamente, pelo que a medição do extensómetro já se encontrava comprometida neste ponto.

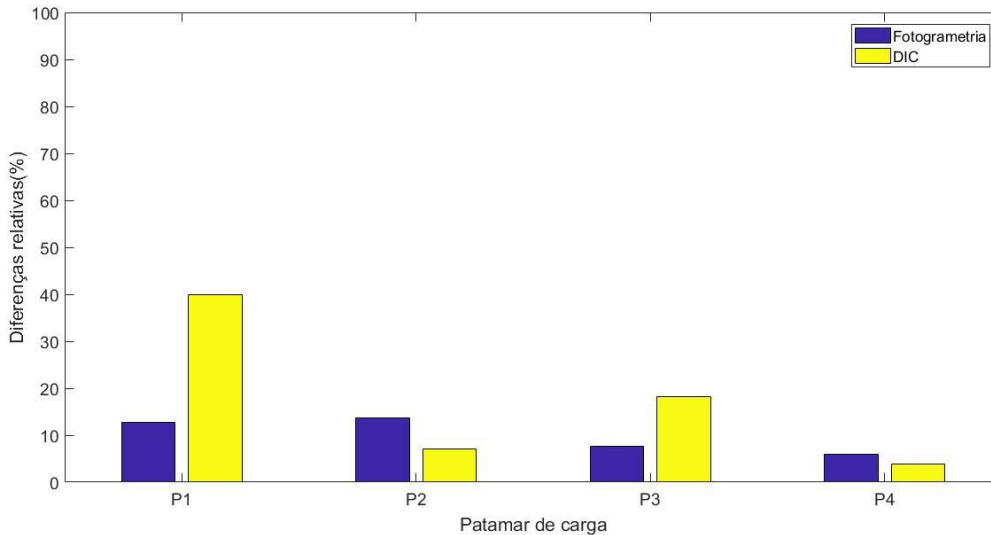


Figura 4.30-Diferenças relativas das extensões medidas no provete **A3**.

No caso do provete **A3**, para a Fotogrametria os patamares P1 e o P2 se encontram muito próximos em termos de diferenças relativas, sendo que apresentam valores de 12.6% e 13.7%, respetivamente. Para a DIC, no provete **A3** o patamar P1 apresenta as diferenças relativas mais elevadas. A continuação se apresenta a mesma comparação para o provete **A4** na figura 4.31.

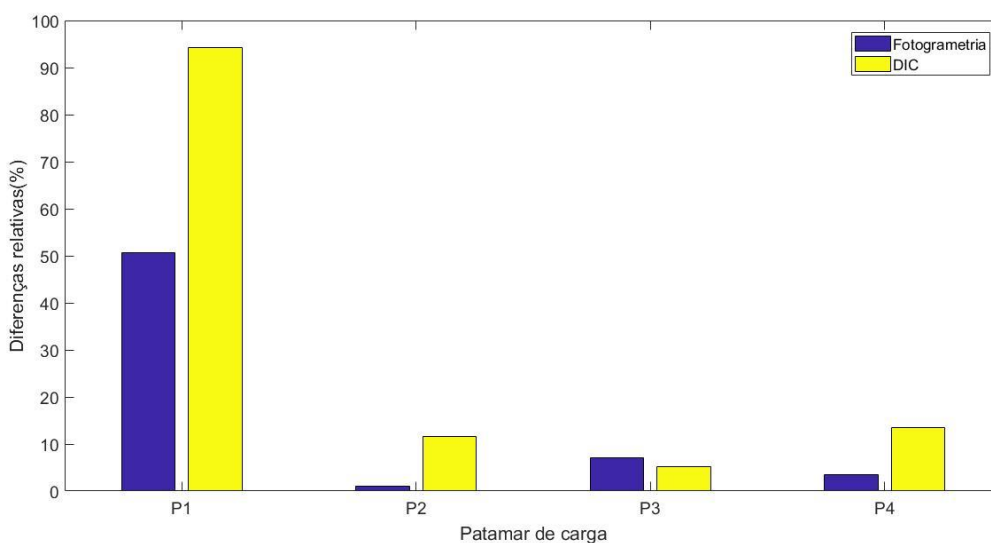


Figura 4.31-Diferenças relativas das extensões medidas no provete **A4**.

Como pode ser observado no gráfico da figura 4.31 o patamar de carga P1, que corresponde à fase elástica do carregamento, apresenta os piores resultados tanto para Fotogrametria como para a DIC, ora este comportamento é observado quase na totalidade dos ensaios, e coincide com os resultados disponíveis na bibliografia apresentada. Ao serem observados e analisados minuciosamente todos os resultados apresentados, não resulta trivial o chegar a uma conclusão definitiva, com relação a que método oferece os melhores resultados para o estudo do ensaio à rotura do material. Contudo, ambas técnicas revelaram ser úteis para a determinação para monitorizar o ensaio até à rotura do provete.

Após efetuados os ensaios, verificou-se também o destacamento da tinta aplicada em todos os provetes, como pode ser observado na figura 4.32. Este efeito é causado principalmente pela superfície lisa do provete. As consequências deste efeito manifestaram-se nos resultados do estudo desenvolvido, já que existiram grandes dificuldades na deteção dos alvos cuja pintura ficou danificada, no caso da Fotogrametria, ou das *features*, no caso da DIC. Importa realçar que estes problemas ocorrem para instantes avançados do ensaio, próximos da rotura do material, quando o extensómetro já encontrava totalmente descolado.

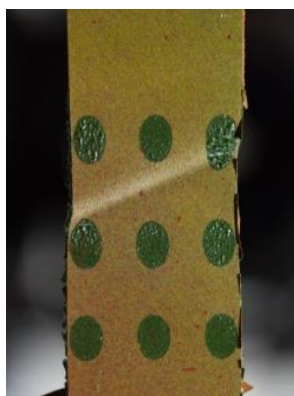


Figura 4.32-Descolamento da tinta aplicada à superfície do provete **A4**.

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusões finais.

Os resultados obtidos nos ensaios descritos nesta dissertação mostram capacidade e a utilidade dos métodos baseados em imagem para o cálculo de Módulo de Elasticidade do alumínio. Os métodos aplicados permitiram o cálculo do Módulo de Elasticidade do material; assim como a determinação da extensão em vários instantes do ensaio até à rotura, tanto na fase elástica, como na fase plástica do alumínio.

Com a realização deste trabalho fica também demonstrado que:

- i) Na determinação do Módulo de Elasticidade (E) do alumínio, é possível utilizar a Fotogrametria, prevendo uma possível diferença relativa do resultado de 10%, quando comparado com a medição do extensómetro, e a DIC com uma possível diferença relativa do resultado de 22%, quando comparado com a medição do extensómetro.

- ii) Na determinação da extensão do ensaio até à rotura, as técnicas com recuso a sistemas de visão garantem a medição de extensões em casos onde as técnicas clássicas falham, sendo possível obter diferenças relativas entre os 0.9% e os 13.7% em fase plástica para a Fotogrametria e entre os 2.3% e os 18.3% em fase plástica para a DIC.

Importa referir, no caso da monitorização do ensaio à rotura, a necessidade de garantir boas condições de aderência tanto da tinta, como do extensómetro ao provete, para garantir a correta monitorização do mesmo, principalmente durante a fase plástica do carregamento. No entanto, no caso dos métodos baseados em imagem a redundância de resultados permite realizar as medições mesmo com a perda de vários alvos ou *features*, consoante se aplica a fotogrametria ou a DIC, respetivamente.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Os resultados obtidos são promissores, porém existe a possibilidade de melhorá-los. Um estudo aprofundado deverá realizar-se a partir dos fatores apresentados neste trabalho, com intuito não só de avaliar a possibilidade de substituir completamente o uso dos extensómetros no futuro, como também de fazê-lo com o mínimo de recursos técnicos possíveis.

Também será de interesse, com relação a Fotogrametria, estudar outras formas de aquisição de dados, a partir de elementos diferentes dos alvos, com o objetivo de aumentar a flexibilidade do método. Assim como aumentar a quantidade de ciclos de carga no ensaio para a determinação do Módulo de Elasticidade.

Referências bibliográficas

- Almeida, G., Melício, F., Biscaia, H., Chastre, C., & Fonseca, J. M. (2016). In-Plane Displacement and Strain Image Analysis. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(4), 292–304. <https://doi.org/10.1111/mice.12127>
- ASTM International. (2010). *ASTM-E111: Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus*. <https://doi.org/10.1520/E0111-17>
- Bambach, M. R. (2009). Photogrammetry measurements of buckling modes and interactions in channels with edge-stiffened flanges. *Thin-Walled Structures*, 47(5), 485–504. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.020>
- Baptista, A. M., Camotim, D., & Muzeau, J.-P. (2017). *Influência da modelação da lei constitutiva dos aços na análise elasto-plástica de estruturas metálicas*. November 1999.
- Beleza, C. A. (2017). *Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem*. Faculdade de Ciências e Tecnologia-Universidade Nova de Lisboa.
- Bossaert, W., Dechaene, R., & Vinckier, A. (1968). Computation of finite strains from moire displacement patterns. *Journal of Strain Analysis*, 3(1), 65–75. <https://doi.org/10.1243/03093247v03i01065>
- Brehm, T. M. (2014). *Reologia de Materiais Compósitos-Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Materiais*. Faculdade de Ciências e Tecnologia-Universidade Nova de Lisboa.
- Carmo, R. N. F., Valença, J., Silva, D., & Dias-Da-Costa, D. (2015). Assessing steel strains on reinforced concrete members from surface cracking patterns. *Construction and Building Materials*, 98, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.079>
- CEN. (2001). *EN 10002-1: Metallic materials-Tensile testing- Part 1: Method of test at ambient temperature*.
- Chinn, T. (2013). *Strain Measurement Validation Using 3D Photogrammetry Techniques*.
- Company, G. (2019). *GOM*. <https://www.gom.com/company/company-profile.html>
- Denys, K., Coppieters, S., Seefeldt, M., & Debruyne, D. (2016). *Mechanics of Materials Multi-DIC setup for the identification of a 3D anisotropic yield surface of thick high strength steel using a double perforated specimen*. 100, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.06.011>
- Epsilon Tech. (2019). *Axial Extensometers*.
- Feffer, S. (2017). *It's all about the features*.

- G. Leal S.A. (n.d.). *Alumínio 5754*. Retrieved March 23, 2020, from <https://www.gleal.pt/pt/produtos/5754>
- Gimenez, F. S. M. de R. (2019). *Medição de extensões com técnicas de processamento de imagem-Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil*. Faculdade de Ciências e Tecnologia-Universidade Nova de Lisboa.
- GOM Company. (2015). *GOM Correlate Professional V8 SR1 Manual Basic – Inspection – 3D Testing*. 49(0), 1–127.
- Hensley, S., Christensen, M., Small, S., Archer, D., Lakes, E., & Rogge, R. (2017). Digital image correlation techniques for strain measurement in a variety of biomechanical test models. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 19(3), 187–195. <https://doi.org/10.5277/ABB-00785-2016-04>
- Li, J., Xie, X., Yang, G., Zhang, B., Siebert, T., & Yang, L. (2017). Whole-field thickness strain measurement using multiple camera digital image correlation system. *Optics and Lasers in Engineering*, 90(September 2016), 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.09.012>
- Li, J., Xu, W., Xie, X., Siebert, T., & Yang, L. (2016). Experimental study of FLD0 for aluminum alloy using digital image correlation with modified ISO method. *International Journal of Materials Research*, 107(3), 245–253. <https://doi.org/10.3139/146.111340>
- Li, L. G., Liang, J., Shi, B. Q., Guo, C., & Hu, H. (2014). Grid-based photogrammetry system for large scale sheet metal strain measurement. *Optik*, 125(19), 5508–5514. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.06.069>
- Lin, S., -Royal, K., Lienert, U., Haas, S., & Gutschmidt, S. (2015). *Strain Measurement by Digital Image Correlation. Dic*, 1–15. <http://www.desy.de/2011summerstudents/2015/reports/SenLin.pdf.gz>
- Mai, B. V., Pham, C. H., Hancock, G. J., & Nguyen, G. D. (2019). Block shear strength and behaviour of cold-reduced G450 steel bolted connections using DIC. *Journal of Constructional Steel Research*, 157, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.025>
- Marques, F. B. (2016). *Monitorização de Pórticos de Betão Armado com Alvenaria de Tijolo através de Fotogrametria*. 70.
- MathWorks. (2017). *MATLAB*. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- McCormick, N., & Lord, J. (2010). Digital image correlation. *Materials Today*, 13(12), 52–54. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70235-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70235-2)
- Navarro-gregori, J., Mezquida-alcaraz, E. J., Serna-ros, P., & Echeagaray-oviedo, J. (2016). Experimental study on the steel-fibre contribution to concrete shear behaviour. *Construction and Building Materials*, 112, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.157>

- Portela, A., & Silva, A. (1996). *Mecânica dos Materiais* (Plátano-Edições Técnicas (ed.); Plátano-Ed).
- Rastogi, P. K. (2000). *Digital Speckle Pattern Interferometry & Related Techniques*.
- Shi, B. Q., & Liang, J. (2012). Circular grid pattern based surface strain measurement system for sheet metal forming. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(9), 1186–1195. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.04.007>
- Silva, V. D. da. (2004). *Mecânica e Resistência dos Materiais* (Zuari (ed.); 3rd ed.).
- Sutton, M. A., Schreier, H., & Orteu, J.-J. (2010). *Image Correlation For Shape, Motion And Deformation Measurements Basic Concepts, Theory And Applications* (SPRINGER-VERLAG NEW YORK INC. (ed.); SPRINGER-V).
- Tang, Z., Liang, J., Xiao, Z., & Guo, C. (2012). Large deformation measurement scheme for 3D digital image correlation method. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(2), 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.09.018>
- Valença, J. ; Carmo, R. N. . (2020). Evaluation of the shear transfer mechanisms in RC beams using photogrammetric computer vision. *Structural Concrete, Fib Journal, Wiley* 21, 333–348. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/suco.201800279>
- Valença, J. ; Carmo, R. N. F. (2017). Method for assessing beam-column joints in RC structures using photogrammetric computer vision. *Structural Control and Health Monitoring*, , Wiley, 24 (11).
- Valença, J., ; Dias-da-Costa, D., ; Júlio, E. A., & ; Costa, H. (2013). Automatic Crack Monitoring using Photogrammetry and Image Processing. Measurement,. *Elsevier* 46(1), 433–441.
- Valença, J., Júlio, E. N. B. S., & Araújo, H. J. (2012). Applications of photogrammetry to structural assessment. *Experimental Techniques*, 36(5), 71–81. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00731.x>
- Valença, J. M. de A. (2006). *Aplicações de Fotogrametria à Engenharia de Estruturas*.

Anexos

Anexo A: Código de *Matlab* (*Dados do extensómetro*)

Este código recebe a informação os dados do extensómetro, e calcula as variações de extensão entre os instantes do ensaio introduzidos; com estes dados calcula o Módulo de Elasticidade. O programa também os gráficos correspondentes, calcula as diferenças relativas e o desvio padrão dos dados.

```
clear all

load('Maisrecente_E_2.mat')

Tempo_1=abs(Dados(:,1));
F_kN=Dados(:,3);
A_frontal=124.4761*10^-4 %m^2
A=2.6*0.3*10^-4 %m^2 (Área da secção transversal do provete)
A_tot=A %m^2
T=(F_kN/A_tot)*10^-3; %MPa
u_mm=Dados(:,2);
Ex_um_m=abs(Dados(:,4))*10^-6;
L_0=330 %mm zona de estudo
Ex=abs(u_mm/L_0);

X1=Tempo_1;
YMatrix1=Ex_um_m*10^6;

% Create figure
figure1 = figure;
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1,'on');
% Create multiple lines using matrix input to plot
plot1 = plot(X1,YMatrix1);
lim_x = [0 1200];
lim_y = [0 1400];
xlim(lim_x)
ylim(lim_y)
% Create xlabel
xlabel('Tempo (s)');
% Create title
title('Ciclos de carga no ensaio A1 para a obtenção do Módulo de Young (E)');
% Create ylabel
ylabel('Extensões (\mum/m)');

% Set the remaining axes properties
set(axes1,'XGrid','on','YGrid','on');

%Ciclos de carga

%Primeiro ciclo
%Força
A=T(130-55:456-55,1);
%Deslocamentto
```

```

B=Ex_um_m(130-55:456-55,1);
%Interpolando
Vp=fitlm(B,A);
subplot(1,3,1)
plot(Vp)
p=polyfit(B,A,1);
xlabel('Extensão')
title('Ensaio A1-Ciclo 1')
ylabel('Tensão (Mpa)')

lim_x = [0 15*10^-4];
lim_y = [0 90];
xlim(lim_x)
ylim(lim_y)

E_1=p(1,1) ;

%Segundo ciclo
%Força
C=T(743-55:1006-55,1);

%Deslocamentto
D=Ex_um_m(743-55:1006-55,1);
%Declive
q=polyfit(D,C,1);
E_2=q(1,1);
Vq=fitlm(D,C);
subplot(1,3,2)
plot(Vq)
xlabel('Extensão')
title('Ensaio A1-Ciclo 2')
ylabel('Tensão (Mpa)')

lim_x = [0 15*10^-4];
lim_y = [0 90];
xlim(lim_x)
ylim(lim_y)

%Teceiro ciclo
%Força
F=T(1241-55:1493-55,1);
%Deslocamentto
G=Ex_um_m(1241-55:1493-55,1);
%Declive
j=polyfit(G,F,1);
E_3=j(1,1);
Vj=fitlm(G,F);
subplot(1,3,3)
plot(Vj)
xlabel('Extensão')
title('Ensaio A1-Ciclo 3')
ylabel('Tensão (Mpa)')

lim_x = [0 15*10^-4];
lim_y = [0 90];
xlim(lim_x)
ylim(lim_y)

%Módulo de Young A1

```

```
E_cycles=[E_1 E_2 E_3]
E=mean(E_cycles)*10^-3 %GPa
A=[E_1 E_2 E_3]*10^-3
d=std(A)
```

Anexo B: Código de Matlab (Fotogrametria)

Este código recebe a informação da posição dos alvos dos provetes. e os dados do extensómetro, e calcula as variações de extensão entre os instantes do ensaio introduzidos; com estes dados calcula o Módulo de Elasticidade. O programa também gera os gráficos correspondentes e calcula as diferenças relativas.

```
clear all

load('Vmm_DSC_4901.mat')
Vmm_0=Vmm;

load('Vmm_DSC_4939.mat')

Vmm_1=Vmm;

load('Vmm_DSC_4950.mat')
Vmm_2=Vmm;

load('Vmm_DSC_4959.mat')
Vmm_3=Vmm;

load('Vmm_DSC_4960.mat')
Vmm_4=Vmm;

load('Vmm_DSC_4968.mat')
Vmm_5=Vmm;

%Miras da primeira fila (1-10)
a = input('prompt')
b = input('prompt')
%Miras da segunda fila (11-20)
c = input('prompt')
d = input('prompt')
%Miras da terceira fila (21-30)
e = input('prompt')
f = input('prompt')

L0_1= abs(Vmm_0 (a,2)- Vmm_0 (b,2));
L0_2= abs(Vmm_0 (c,2)- Vmm_0 (d,2));%Real medido
L0_3= abs(Vmm_0 (e,2)- Vmm_0 (f,2));

%En_1
En_11 = (abs(Vmm_1 (a,2)- Vmm_1 (b,2))-L0_1)/L0_1;
En_12 = (abs(Vmm_1 (c,2)- Vmm_1 (d,2))-L0_2)/L0_2;
En_13 = (abs(Vmm_1 (e,2)- Vmm_1 (f,2))-L0_3)/L0_3;

En_1t=[En_11 En_12 En_13];
En_1=mean(En_1t);

%En_2
En_21 = (abs(Vmm_2 (a,2)- Vmm_2 (b,2))-L0_1)/L0_1;
En_22 = (abs(Vmm_2 (c,2)- Vmm_2 (d,2))-L0_2)/L0_2;
En_23 = (abs(Vmm_2 (e,2)- Vmm_2 (f,2))-L0_3)/L0_3;
```

```

En_2t=[En_22 En_23];
En_2=mean(En_2t);

%En_3
En_31 = (abs(Vmm_3 (a,2)- Vmm_3 (b,2))-L0_1)/L0_1;
En_32 = (abs(Vmm_3 (c,2)- Vmm_3 (d,2))-L0_2)/L0_2;
En_33 = (abs(Vmm_3 (e,2)- Vmm_3 (f,2))-L0_3)/L0_3;

En_3t=[En_31 En_32 En_33];
En_3=mean(En_3t);

%En_4
En_41 = (abs(Vmm_4 (a,2)- Vmm_4 (b,2))-L0_1)/L0_1;
En_42 = (abs(Vmm_4 (c,2)- Vmm_4 (d,2))-L0_2)/L0_2;
En_43 = (abs(Vmm_4 (e,2)- Vmm_4 (f,2))-L0_3)/L0_3;

En_4t=[En_41 En_42 En_43];
En_4=mean(En_4t);

%En_5
En_51 = (abs(Vmm_5 (a,2)- Vmm_5 (b,2))-L0_1)/L0_1;
En_52 = (abs(Vmm_5 (c,2)- Vmm_5 (d,2))-L0_2)/L0_2;
En_53 = (abs(Vmm_5 (e,2)- Vmm_5 (f,2))-L0_3)/L0_3;

En_5t=[En_51 En_52 En_53];
En_5=mean(En_5t);

En=[0 En_1 En_2 En_3 En_4 En_5];

load('Ensaio_2_15_07.mat')

F_kN=Da(:,3);
A=2.6*0.3*10^-4 %m^2 (Área da secção transversal do provete)
A_tot=A %m^2
T=(F_kN/A_tot)*10^-3; %MPa
Ex_um=Da(:,4);

%Zona elasto-plástica

Tet_1=[0 T(2158-52,1) T(2573-52,1) T(2694-52,1) T(2703-52,1) T(2850-52,1)];

Eet_1=En;

Ex=[ 0 Ex_um(2158-52,1) Ex_um(2573-52,1) Ex_um(2694-52,1) Ex_um(2703-52,1)
Ex_um(2850-52,1)];

Err=[ (abs(En(2)*10^6-Ex(2))/Ex(2))*100 (abs(En(3)*10^6-Ex(3))/Ex(3))*100
(abs(En(4)*10^6-Ex(4))/Ex(4))*100 (abs(En(5)*10^6-Ex(5))/Ex(5))*100
(abs(En(6)*10^6-Ex(6))/Ex(6))*100]

%Curva comparação
%Força
F=Tet_1;
%Deslocamentto

```

```

G=Eet_1;
plot(G*10^6,F,'b:s',Ex,F,'rv--')
;
legend('Fotogrametria','Extensómetro')
xlabel('Extensão (\mum/m)')
title('Fotogrametria vs Extensómetro (A3)')
ylabel('Tensão (MPa)')
lim_x = [0 2.5*10^5];
lim_y = [0 250];
xlim(lim_x)
ylim(lim_y)

%Curva
%Força
F=Tet_1;
%Deslocamentto
G=Eet_1;
plot(G*10^6,F,'b:s')
;
legend('Fotogrametria','Extensómetro')
xlabel('Extensão (\mu m/m)')
title('Aproximação da curva do material obtida com recurso à Fotogrametria-
A3')
ylabel('Tensão (MPa)')
lim_x = [0 2.5*10^5];
lim_y = [0 250];
xlim(lim_x)
ylim(lim_y)

lim_x = [0 2.5*10^5];
lim_y = [0 2.5*10^5];
xlim(lim_x)
ylim(lim_y)

x=0:100000:200000;
y=0:100000:200000;

plot(x,y,G*10^6,Ex(:,1:3))

G=Eet_1

plot(Ex_um(1:2795)*10^-3,T(1:2795))
lim_y = [0 200]
lim_x = [0 40]
xlim(lim_x)
ylim(lim_y)
ylabel('Tensão (MPa)')
xlabel('Extensões medidas com recurso ao extensómetro (\mum/m)')

hold on

```

```
plot(Ex*10^-3,Tet_1,'o')  
legend('', 'Fotografias analisadas')  
hold off
```

Anexo C: Código de *Matlab* (DIC)

Este código recebe as extensões calculadas pelo *software GOM Correlate*. com estes dados calcula o Módulo de Elasticidade. O programa também executa. os gráficos correspondentes e calcula as diferenças relativas.

```
1 - clear all
2
3 - load('Gom1_troços_noortho.mat')
4 - En_1=mean(troco1)
5
6 - load('Gom2_troços_noortho.mat')
7 - En_2=mean(troco2)
8
9 - load('Gom3_troços_noortho.mat')
10 - En_3=mean(troco3)
11
12 - En_r=[En_1 En_2 En_3]*10^-2
13
14 - Ext_r=[En_1 En_2 En_3]*10^-2
15 - Ext_f=[En_1 En_2 En_3]*10^4 %Micro m/m
16 - Ext_ext=[1027.018923 1065.056661 1068.679303]
17
18 - for d=1:3
19 -     Err_r(d)=abs(Ext_f(d)-Ext_ext(d))/Ext_ext(d) * 100;
20 - end
21
22 - load('Maisrecente_E_2.mat')
23
24 - F_kN=Dados(:,3);
25 - A=2.6*0.3*10^-4 %m^2 (Área da secção transversal do provete)
26 - A_tot=A %m^2
27 - T=(F_kN/A_tot)*10^-3; %MPa
28
29 - Ex_um=Dados(:,4)
30
31 - %Zona elástica
32 - Tet_1=[0 T(933-49,1)-T(709-49,1)]
33 - Eet_1=[0 En_r(1,1)]
34 - Tet_2=[0 T(1533-49,1)-T(1260-49,1)]
35 - Eet_2=[0 En_r(1,2)]
36 - Tet_3=[0 T(2087-49,1)-T(1836-49,1)]
37 - Eet_3=[0 En_r(1,3)]
38
39
40 - %l curva
41 - %Força
42 - F=Tet_1;
43 - %Deslocamentto
44 - G=Eet_1;
45 - %Declive
46 - j=polyfit(G,F,1);
47 - E_l=j(1,1)
48 - Vj=fitlm(G,F);
49 - subplot(1,3,1)
50 - plot(Vj)
51 - xlabel('Extensão')
```

```

52 - title('Ensaio Al-Ciclo 1')
53 - ylabel('Tensão (Mpa)')
54 - lim_x = [0 15*10^-4];
55 - lim_y = [0 95];
56 - xlim(lim_x)
57 - ylim(lim_y)
58
59 %2 curva
60 %Força
61 - F=Tet_2;
62 %Deslocamentto
63 - G=Eet_2;
64 %Declive
65 - j=polyfit(G,F,1);
66 - E_2=j(1,1)
67 - Vj=fitlm(G,F);
68 - subplot(1,3,2)
69 - plot(Vj)
70 - xlabel('Extensão')
71 - title('Ensaio Al-Ciclo 2')
72 - ylabel('Tensão (Mpa)')
73 - lim_x = [0 15*10^-4];
74 - lim_y = [0 95];
75 - xlim(lim_x)
76 - ylim(lim_y)
77
78 %3 curva
79
80 %Força
81 - F=Tet_3;
82 %Deslocamentto
83 - G=Eet_3;
84 %Declive
85 - j=polyfit(G,F,1);
86 - E_3=j(1,1)
87 - Vj=fitlm(G,F);
88 - subplot(1,3,3)
89 - plot(Vj)
90 - xlabel('Extensão')
91 - title('Ensaio Al-Ciclo 3')
92 - ylabel('Tensão (Mpa)')
93 - lim_x = [0 15*10^-4];
94 - lim_y = [0 95];
95 - xlim(lim_x)
96 - ylim(lim_y)
97
98 %Módulo de Young Al
99 - E_cycles=[E_1 E_2 E_3]
100 - E=mean(E_cycles)*10^-3 %GPa
101
102 - Err_e=(abs(E- 68.9330)/68.9330)*100

```