



Sílvia Cristiana Almeida Beleza
Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: João Mário Burguete Botelho Cardoso,
Prof. Aux., FCT-UNL
Co-orientador: António Paulo Vale Urgueira
Prof. Associado, FCT-UNL

Júri:
Presidente: Prof. Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva
Arguente: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia
Vogal: Prof. Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2017

Medição de deformações através da técnica da Correlação Digital de Imagem

Copyright © Sílvia Cristiana Almeida Beleza, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem 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 várias as pessoas às quais eu gostaria de expressar a minha gratidão e que, direta ou indiretamente, ajudaram a concluir esta etapa.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor João Cardoso, por toda a atenção e tempo despendidos no decorrer deste projeto. Muito obrigada pelos conselhos e soluções sempre no momento oportuno. Gostaria também de agradecer ao Professor António Urgueira pela sua valiosa opinião e pelas sugestões dadas para melhorar esta dissertação.

Aos meus colegas de curso que se tornaram grandes amigos. Obrigada pelas excelentes memórias e por tornarem este percurso mais fácil. Sei que vos vou levar para a vida.

Às grandes amizades que fiz na TunaMaria. Obrigada pelas aventuras, pelos momentos e por preencherem alegremente grande parte da minha vida.

Ao Pedro Catarino pela infinita paciência, pelo carinho e pela força que transmitiu sempre que era preciso.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família. Aos meus pais pelo apoio e palavras sábias nesta etapa, e ao longo da minha vida. Aquilo que eu sou hoje, devo ao infindável carinho e compreensão que eles me deram. À minha irmã pelo apoio, companheirismo e por preencher este meu percurso científico com a sua arte e criatividade.

Resumo

O método de Correlação Digital de Imagem (DIC – *Digital Image Correlation*) é uma técnica largamente utilizada para a medição de deformações que apresenta, em relação a métodos mais tradicionais, uma maior flexibilidade, simplicidade e um baixo custo de implementação. Várias empresas comercializam pacotes para a aplicação deste método mas a elevado custo, sendo por isso necessário procurar alternativas para a execução do mesmo.

A presente dissertação tem como objetivo equipar o Laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa com um dispositivo de medição de deformações com recurso a esta técnica. Graças ao desenvolvimento de *softwares* DIC de utilização livre cada vez mais completos e à existência de câmaras fotográficas com excelente qualidade a preços acessíveis, é possível cumprir este objetivo. Como tal, seis diferentes programas de Correlação Digital de Imagem foram analisados com o propósito de selecionar aqueles que oferecem as melhores vantagens.

Posteriormente, foi elaborado um protocolo experimental para a realização de ensaios de tração uniaxiais a provetes de alumínio, que subsequentemente foram analisados com recurso aos *softwares* escolhidos. Os resultados dos ensaios foram atestados através de um método de validação certificado, e foi examinado como estes eram influenciados face à modificação de parâmetros inerentes ao método DIC e às diferentes condições experimentais dos ensaios.

Palavras-chave: Deformação; Correlação Digital de Imagem; Mapas de deslocamento e de extensão; *Softwares* DIC

Abstract

Digital Image Correlation (DIC) is a widely used technique for strain measurements that presents a better flexibility, simplicity and a low cost implementation, regarding more traditional methods. Several companies sell expensive packages designed for the application of this method, thus making it inevitable to seek for more affordable alternatives.

This thesis's purpose is to equip the Structural Mechanics Laboratory of the Mechanical and Industrial Engineering Department of the Faculdade de Ciências e Tecnologia of Universidade Nova de Lisboa, with a strain measurement tool based on this technique. Thanks to the development of more thorough and free DIC softwares and the existence of high resolution cameras sold at low prices, it is possible to fulfill this goal. As such, six different Digital Image Correlation softwares were evaluated, aiming for the selection of those offering the best advantages.

Further, an experimental protocol was then elaborated for the realization of tensile tests on aluminum specimens that were later analyzed using the chosen softwares. The tests results were verified through a certified validation method, and the influence of parameters specific to the DIC procedure as well as the experimental conditions were also evaluated.

Keywords: Strain; Digital Image Correlation; Displacement and strain maps; DIC softwares.

Índice de Conteúdos

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE DE CONTEÚDOS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Contextualização.....</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Objetivos</i>	<i>3</i>
1.3 <i>Estrutura da Dissertação</i>	<i>3</i>
2 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM	7
2.1 <i>Introdução.....</i>	<i>7</i>
2.2 <i>Conceitos fundamentais</i>	<i>8</i>
2.3 <i>Correspondência de blocos.....</i>	<i>10</i>
2.4 <i>Algoritmos Sub-Pixel.....</i>	<i>12</i>
2.4.1 <i>Método de Newton-Raphson</i>	<i>12</i>
2.4.2 <i>Método dos gradientes</i>	<i>14</i>
2.5 <i>Pârametros.....</i>	<i>15</i>
2.5.1 <i>Parâmetros Internos.....</i>	<i>15</i>
2.5.2 <i>Parâmetros externos:</i>	<i>17</i>
3 AVALIAÇÃO DE SOFTWARE.....	19
3.1 <i>Gom Correlate</i>	<i>20</i>
3.2 <i>NCorr.....</i>	<i>22</i>
3.3 <i>OpenCV.....</i>	<i>24</i>
3.4 <i>Opticist – Moiré Software.....</i>	<i>24</i>
3.5 <i>CIAS</i>	<i>27</i>
3.6 <i>Algoritmo Matlab.....</i>	<i>27</i>
3.7 <i>Comparação e escolha dos softwares</i>	<i>29</i>

4	MÉTODO EXPERIMENTAL	33
4.1	<i>Equipamento</i>	33
4.2	<i>Preparação dos provetes</i>	34
4.3	<i>Protocolo Experimental</i>	36
4.4	<i>Método de validação</i>	39
4.5	<i>Sincronização de dados</i>	42
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	47
5.1	<i>Parâmetros Internos.....</i>	48
5.2	<i>Parâmetros Externos</i>	53
5.3	<i>Resultados Globais</i>	59
6	CONCLUSÕES.....	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	ANEXOS	75
	<i>Anexo A: Manual de instruções Gom Correlate.....</i>	75
	<i>Anexo B: Manual de instruções NCorr.....</i>	79
	<i>Anexo C: Código Matlab.....</i>	81

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Montagem experimental do método DIC. Adaptado de [8].....	2
Figura 1.2 – Fluxograma da estrutura da dissertação.....	5
Figura 2.1 – Exemplo de discretização das posições e das intensidades dos pixels. Adaptado de [20].....	8
Figura 2.2 – Representação 3D dos valores de intensidade de um bloco (a); representação das intensidades com interpolação bilinear (b); representação das intensidades com interpolação spline cúbica (c). Adaptado de [20].....	9
Figura 2.3 – Exemplo de três padrões estocásticos diferentes. Adaptado de [25].....	10
Figura 2.4 – Exemplo do deslocamento de um bloco durante a deformação [21].....	11
Figura 2.5 – Exemplificação de um bloco deformado [21].....	13
Figura 3.1 – Ambiente de trabalho do <i>software</i> Gom Correlate	21
Figura 3.2 – Modificação de parâmetros no programa NCorr	23
Figura 3.3 – Ambiente de trabalho do <i>software</i> Moiré	25
Figura 3.4 – Comparação de duas imagens aéreas no programa CIAS.....	27
Figura 3.5 – Fotografias “W_NSM_Lb125_01” da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio 1 [34] [35]	30
Figura 3.6 – Fotografias “W_NSM_Lb230_01” da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio 2 [34] [35]	30
Figura 3.7 – Comparação dos gráficos deslocamento (t) dos ensaios 1 (a) e 2 (b) obtidos pelo Gom Correlate e NCorr.....	31
Figura 4.1 – Prensa MTS.....	33
Figura 4.2 – Montagem experimental.....	34
Figura 4.3 – Secção retangular dos provetes	34
Figura 4.4 – Gráfico tensão-deformação do alumínio	35
Figura 4.5 - Exemplo de dois diferentes tipos de padrões superficiais obtidos experimentalmente	36
Figura 4.6 – Fixação do extensómetro MTS no provete de alumínio	39
Figura 4.7 – Extensão de Lagrange no Gom Correlate [%] a); e no NCorr b) na mesma fase num dado ensaio.....	40
Figura 4.8 – Gráficos da extensão de Lagrange por tempo em dois ensaios a) e b) com utilização do extensómetro	41
Figura 4.9 – Exemplo de registo de dados da prensa MTS.....	42
Figura 4.10 – Fluxograma sobre o funcionamento do código Matlab sincronizacao.m.....	43
Figura 4.11 – Gráfico do ERM por iteração do Gom Correlate e do NCorr	44

Figura 4.12 – Gráfico do deslocamento-tempo da prensa MTS e dos programas e gráfico do erro relativo-tempo dos programas	44
Figura 5.1 – Influência do tamanho do bloco no ERM dos ensaios A1 e A7	49
Figura 5.2 – Comparação das dimensões de blocos iguais em duas imagens com resoluções diferentes.....	50
Figura 5.3 – Gráficos deslocamento-tempo e erro relativo-tempo dos ensaios A1 (bloco grande) e A7 (bloco pequeno)	51
Figura 5.4 – Diferentes dimensões da Região de Interesse no provete B1.....	52
Figura 5.5 – Padrões estocásticos dos provetes A3 e A4.....	54
Figura 5.6 – Influência do tamanho de bloco com diferentes padrões superficiais	55
Figura 5.7 – Provette não iluminado (a); provete iluminado (b).....	56
Figura 5.8 – Influência da utilização de iluminação no ERM obtido nos ensaios experimentais	57
Figura 5.9 – Comparação dos três modos de análise do Gom Correlate	59
Figura 5.10 – ERM obtido em cada um dos ensaios experimentais realizados	60
Figura 5.11 - Gráficos deslocamento (t) e erro relativo (t) do ensaio B3 com bloco de 15x15 (GC) e R65 (NC) pixels	61
Figura 5.12 – Gráficos deslocamento (t) e erro relativo (t) do ensaio A5 com bloco de 19x19 (GC) e R15 (NC) pixels	62
Figura 5.13 – Erros relativos obtidos em cada ponto dos 10 ensaios nos intervalos de deslocamento [0,0; 1,0[, [1,0; 4,0[e [4,0;14,0] mm para ambos os <i>softwares</i>	63
Figura 5.14 - Fratura no provete A1 a); Deformação de Lagrange do provete A1 no Gom Correlate b); e no NCorr c)	64
Figura 5.15 –Gráficos deslocamento (t) e erro relativo (t) do ensaio A1 com bloco de 19x19 (GC) e R33 (NC) pixels	65
Figura 5.16 – Gráfico do ERM por iteração do ensaio A2	65
Figura 5.17 – Setup de captura de imagem a); Enquadramento de fotografia desadequado b) ...	66

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Comparação qualitativa dos seis programas avaliados.....	29
Tabela 4.1 – Dimensões das secções dos provetes	34
Tabela 4.2 – Tensão de cedência e tensão de rotura do material ensaiado.....	35
Tabela 5.1 – Condições experimentais dos ensaios	47
Tabela 5.2 – Parâmetros internos e externos a analisar experimentalmente	48
Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados nas análises dos ensaios A1 e A7	49
Tabela 5.4 – Influência das dimensões da Região de Interesse no ERM	52
Tabela 5.5 – Dimensões de bloco aconselhadas consoante o diâmetro de grão do padrão superficial [8]	53
Tabela 5.6 – Condições de análise para testar a influência do padrão estocástico	54
Tabela 5.7 – Dimensões do bloco em cada ensaio.....	57
Tabela 5.8 – ERM obtido nos ensaios A3 e A5.....	58
Tabela 5.9 – Dimensões de bloco em cada <i>software</i> para todos os ensaios experimentais realizados	60
Tabela 5.10 – ERM calculado nos 452 pontos dos 10 ensaios segundo as intervalos de deslocamento [0,0; 1,0[, [1,0;4,0[e [4,0;14,0] mm	63

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

A_0	– Área da secção
b	– largura
d_i	– Deslocamento medido pelo LVDT
\hat{d}_i	– Deslocamento medido pelos <i>softwares</i>
DIC	– <i>Digital Image Correlation</i>
e	– Extensão verdadeira ou logarítmica
E	– Extensão de Lagrange
E^*	– Extensão de Euler
ERM	– Erro Relativo Médio
f	– Imagem de referência
g	– Imagem deformada
GC	– Gom Correlate
H	– Matriz Hessiana
LVDT	– <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
l	– Comprimento final
l_0	– Comprimento inicial
Δl	– Variação de comprimento
n	– Número de medições
N	– Número de pixels por aresta do bloco
NC	– NCorr
NCC	– <i>Normalized Cross Correlation</i>
NSSD	– <i>Normalized Sum of Squared Differences</i>
P	– Carga
RDI	– Região de Interesse

- RGB – Formato de imagem “*Red-Green-Blue*”
- SSD – *Sum of Squared Differences*
- t – espessura
- T – Primeiro Tensor de Piola Kirchhoff
- ZSSD – *Zero-Mean Sum of Squared Differences*
- u – Deslocamento segundo xx
- v – Deslocamento segundo yy
- x – Coordenada horizontal
- x' – Coordenada horizontal após deformação
- y – Coordenada vertical
- y' – Coordenada vertical após deformação
- γ – Deformação angular
- ε – Extensão nominal
- σ – Tensão

1 Introdução

1.1 Contextualização

Desde que a captura de imagem se tornou possível que o ser humano a tem utilizado para seu benefício, desenvolvendo com ela vários métodos e tecnologias que facilitam o seu dia-a-dia e ajudam a aprofundar e perpetuar o conhecimento científico. A fotografia permitiu grandes avanços a nível artístico, científico e tecnológico, com uma aplicabilidade extremamente vasta, nomeadamente nos mais variados problemas da Engenharia. Uma imagem pode conter muitas informações quando analisada de uma forma correta, por isso, técnicas de processamento de imagem foram fortemente desenvolvidas no século XX.

Um dos avanços que a fotografia e as técnicas de processamento de imagem, aliadas ao uso de computadores, possibilitou, foi o aparecimento de vários métodos óticos que estudam e quantificam a deformação de um objeto. Técnicas experimentais como o Método de Moiré [1], a Interferometria Holográfica [2] e a Fotoelasticidade [3] surgiram como alternativas não invasivas aos métodos mais tradicionais. No entanto devido à especificidade e elevado custo dos equipamentos necessários, à preparação exaustiva dos provetes e a limitações na aplicabilidade destes métodos, tornou-se vantajoso desenvolver alternativas.

Na década de 80, surge um outro método ótico desenvolvido por investigadores da University of North Carolina [4] [5] [6] [7], a Correlação Digital de Imagem (DIC – *Digital Image Correlation*). Este método permite fazer a análise de deformações de um objeto, a duas e três dimensões, sem necessitar de contacto físico com o mesmo, de uma forma flexível e com uma boa adaptabilidade a diferentes tipos de materiais e situações. A base deste método assenta na análise de vários pontos na superfície de um provete através da captura de imagem, em que, através de um algoritmo de correlação, é feita a correspondência dos mesmos entre duas imagens consecutivas, antes e após da deformação. Ainda de acordo com estes autores, para que essa correspondência seja feita de maneira mais precisa, um padrão estocástico é uniformemente aplicado sobre a superfície do material em estudo.

O procedimento experimental para implementação desta técnica divide-se essencialmente em três tarefas principais: a preparação do provete, a aquisição de dados e a análise de dados. Como tal o método pode ser implementado utilizando, de uma forma genérica, uma câmara fotográfica, um computador equipado com um *software* de correlação digital de imagem e um

provetes para a realização dos testes experimentais, como ilustra a fig. 1.1. Estas características tornam-no um método de fácil utilização e de relativamente baixo custo, utilizado em várias áreas da Engenharia.

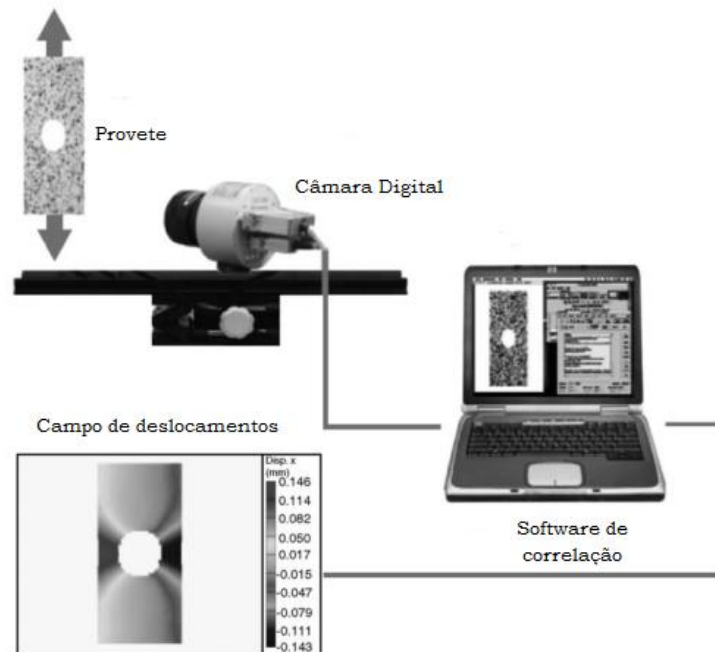


Figura 1.1 – Montagem experimental do método DIC. Adaptado de [8]

Por exemplo, na Engenharia é amplamente utilizado na monitorização do desempenho de uma estrutura quando sujeita a cargas momentâneas como atividades sísmicas ou a um conjunto de cargas cíclicas, ajudando assim, a construir uma previsão do tempo de vida da estrutura antes da sua rotura. Também analisa o modo como se dá essa rotura estudando a iniciação e propagação de fissuras, facilitando a elaboração de um mapa de fendas [9].

Também é possível implementar esta técnica a muitas outras áreas de estudo, como por exemplo, na determinação do coeficiente de amortecimento para uma dada frequência natural de um material [10], na caracterização do dano por fadiga de uma ligação soldada [11], na determinação das propriedades de materiais compósitos [12] [13], na avaliação da concentração de tensões em tubos fissurados sob pressão [14], na caracterização dos critérios de fratura dúctil [15], entre outras inúmeras aplicações.

Atualmente, com a evolução tecnológica das câmaras fotográficas e dos computadores (as imagens têm cada vez melhor resolução e os computadores processam cada vez mais

rapidamente grandes quantidades de informação), os resultados obtidos através deste método são cada vez mais precisos, fiáveis e obtidos em menor tempo. Também cada vez mais existem múltiplos *softwares* de Correlação Digital de Imagem disponíveis com diferentes características, ainda que nem todos sejam de utilização gratuita. Todas estas particularidades contribuem para que o desenvolvimento da técnica da Correlação Digital de Imagem seja de grande importância para a comunidade científica.

1.2 Objetivos

A presente dissertação é realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, e tem como objetivo fundamental equipar o Laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial com um dispositivo de medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem a duas dimensões.

Existem, nos dias que correm, várias empresas dedicadas à comercialização desta técnica, no entanto, os pacotes de processamento de imagem que disponibilizam têm um custo muito elevado. Como tal, para a implementação do método DIC-2D são necessárias alternativas de baixo custo, mas que garantam resultados com boa precisão.

Por isso, um dos objetivos é obter vários *softwares* de processamento de imagem de utilização gratuita e testá-los, analisando as suas propriedades e funcionalidades, para determinar qual é o mais adequado para a utilização do método DIC. Outro objetivo é demonstrar que é possível obter resultados fiáveis e precisos utilizando uma máquina fotográfica comum e um *software* gratuito, validando-os através de métodos tradicionais de medição de deformações, como a extensometria.

Para testar as capacidades destes equipamentos, utiliza-se uma prensa MTS de 100 kN de carga máxima, existente no Laboratório de Mecânica Estrutural, para realizar ensaios de tração uniaxiais a provetes de secção retangular de alumínio.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos, seguidos das referências bibliográficas e dos anexos.

No capítulo atual, Capítulo 1, é descrito o contexto em que esta dissertação se insere e os objetivos que se pretende cumprir. É ainda apresentado um fluxograma (fig. 1.2) que consolida a informação contida nos capítulos.

No capítulo 2 é feita uma apresentação dos conceitos e do princípio de funcionamento da

Correlação Digital de Imagem, assim como aplicações de Engenharia que utilizam esta técnica.

No capítulo 3 são analisados e comparados os diferentes *softwares* de processamento de imagem segundo vários parâmetros como a sua instalação, carregamento de imagens, rapidez da análise entre outras funcionalidades. O objetivo deste capítulo é selecionar o ou os *softwares* que vão ser utilizados e que conduzem a melhores resultados no procedimento experimental.

O capítulo 4 refere os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais assim como o protocolo experimental seguido. Refere também o método de validação inicialmente escolhido para comparação de resultados, a extensometria, e a função em Matlab desenvolvida para análise e tratamento dos resultados.

No capítulo 5 os resultados dos ensaios são apresentados e é discutida a forma como a modificação de certos parâmetros internos e externos do método DIC, como as dimensões do bloco, o padrão estocástico, a utilização de iluminação, entre outros, influencia a precisão dos mesmos. Faz-se ainda uma análise global dos resultados obtidos em todos os ensaios experimentais.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões mais importantes retiradas acerca do trabalho desenvolvido, e fazem-se algumas sugestões de melhorias e pesquisas futuras acerca deste método.

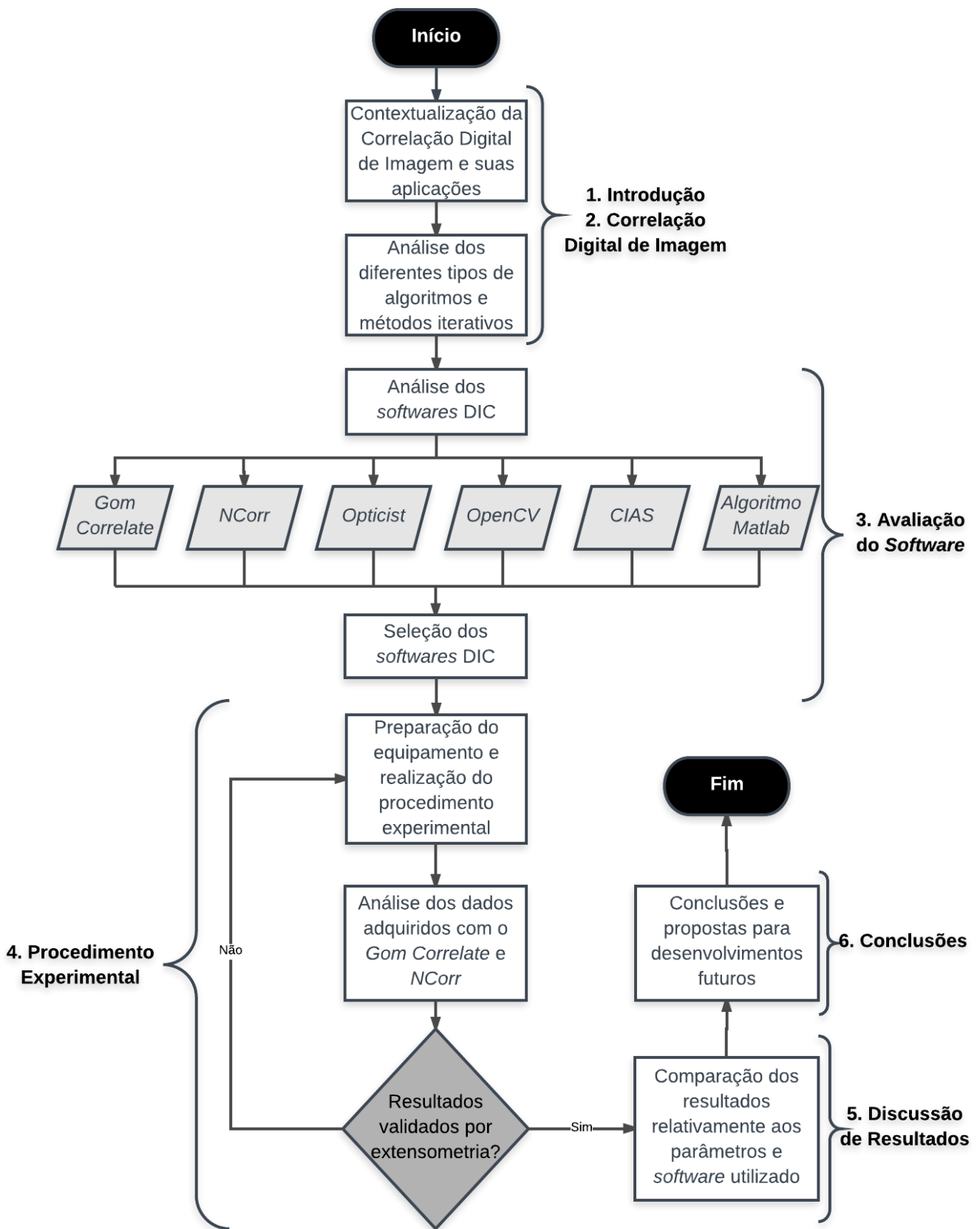


Figura 1.2 – Fluxograma da estrutura da dissertação

2 Correlação Digital de Imagem

2.1 Introdução

As deformações que as cargas aplicadas num objeto provocam são um aspeto importante para dar a conhecer as propriedades do material de que é feito. Para o projeto e dimensionamento de estruturas é fundamental quantificar a deformação que estas podem suportar para que não atinjam a cedência ou rotura e cumpram os objetivos para os quais foram concebidas [16]. As deformações que ocorrem num corpo permitem ainda determinar a distribuição de tensões, e através das relações tensão-extensão determinar propriedades que são muito relevantes no estudo da Mecânica dos Materiais.

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, por ser um método de contacto com o provete, as condições do ensaio experimental devem ser cuidadosamente configuradas para que não se ponha em risco a integridade física do extensómetro.

Outro aspeto importante relativamente à extensometria é o de que as extensões são calculadas localmente segundo a direção em que se coloca o extensómetro. Por exemplo, no estudo das propriedades de um material anisotrópico (um material cujas propriedades físicas variam com a direção em que são medidas), a Correlação Digital de Imagem torna-se uma alternativa mais vantajosa, uma vez que analisa globalmente a deformação na superfície do provete, sem necessitar de contacto e com procedimentos mais acessíveis [17].

Como referido anteriormente, este método assenta na análise de imagens consecutivas (obtidas antes e após a deformação de um objeto) através de um algoritmo de correlação. A imagem inicial é dividida em várias secções denominadas blocos ou *subsets* e esses blocos são procurados na imagem seguinte. Cada bloco é um conjunto de pixels e o objetivo do algoritmo é determinar a sua nova posição, procurando os valores de intensidades desses pixels. O algoritmo calcula o movimento que o bloco realizou de uma configuração para outra, dentro de uma área (que é a zona de procura do algoritmo) denominada Região de Interesse, obtendo assim os deslocamentos e, através destes, calcula posteriormente as extensões.

Para que não exista mais do que uma correspondência para um bloco, a superfície do objeto a analisar é preparada convenientemente ao aplicar sobre ela um padrão aleatório, *speckle*,

de alto contraste. Este padrão pode ser facilmente aplicado com tinta, o que torna a preparação do procedimento experimental relativamente simples. Além do mais, em alguns casos, poderá não ser necessária uma preparação da superfície do provete se este já exibir estas propriedades, como por exemplo num material poroso.

A aquisição de imagens pode ser feita com uma câmara digital relativamente comum, uma vez que com a tecnologia atual é possível obter uma câmara fotográfica com boa qualidade a um preço razoável. Também é utilizada iluminação do provete durante a aquisição de imagens para garantir uma melhor precisão.

Este método é capaz de fazer a medição de deformações no plano (DIC-2D) e fora do plano (DIC-3D), sendo que, a três dimensões é necessária mais do que uma câmara e conseqüente configuração e calibração [18]. 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 [19]. Neste capítulo, os princípios de funcionamento do método vão incidir principalmente sobre o DIC-2D uma vez que vai ser a vertente aplicada no procedimento experimental.

2.2 Conceitos fundamentais

As imagens digitais são a base do funcionamento do método DIC e para poderem ser utilizadas pelo algoritmo tem de haver uma discretização dos seus elementos unitários – os pixels (fig.2.1). 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. A ideia fundamental deste método é extrair de cada imagem a matriz de intensidade de um bloco de $N \times N$ pixels e procurar essas intensidades na imagem seguinte.

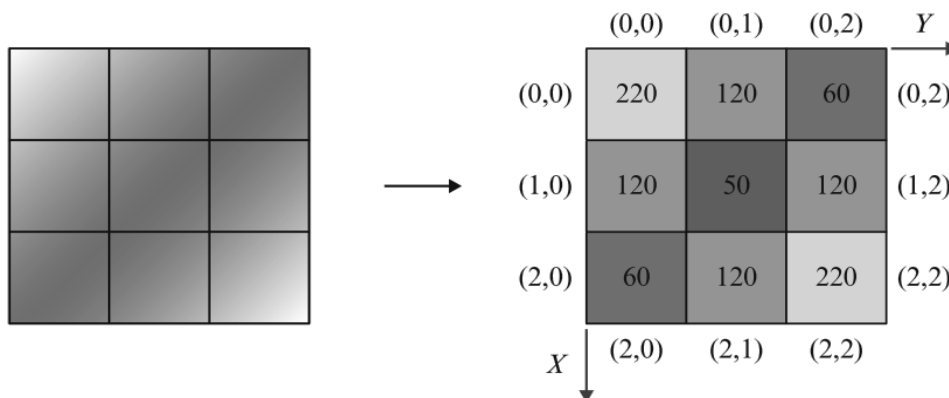


Figura 2.1 – Exemplo de discretização das posições e das intensidades dos pixels.
Adaptado de [20]

As intensidades de cada pixel são definidas com base numa escala. Por exemplo, considerando uma imagem monocromática, numa escala representada por 8 bits existem 2^8 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. A combinação das três matrizes corresponde a uma intensidade que define uma cor [21]. A nível computacional é mais prático a utilização de imagens monocromáticas por exigir cálculos menos extensos. Por esta razão alguns *softwares* só aceitam como *input* imagens monocromáticas, sendo que outros fazem a conversão antes de iniciar a análise da imagem.

Como já se pôde depreender acerca do método DIC, 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 vai detetar movimentos de um número inteiro de pixels. Ou seja, a forma de representação discreta das intensidades dos pixels não é a mais correta para o grau de precisão que este método exige [7] [20] [22]. Por forma a resolver o problema, é feita uma interpolação dessas intensidades como exemplifica a fig. 2.2 em que se apresenta uma representação discreta a três dimensões das intensidades dos pixels de um dado bloco (a), seguida de uma representação dessas mesmas intensidades após uma interpolação bilinear (b), e após uma interpolação de *spline* cúbica (c). Como se poderá compreender mais para a frente, a interpolação das intensidades de uma imagem é uma das bases dos algoritmos sub-pixel, que, como o próprio nome indica permite obter resoluções inferiores a um pixel melhorando a precisão do cálculo do movimento dos blocos [23].

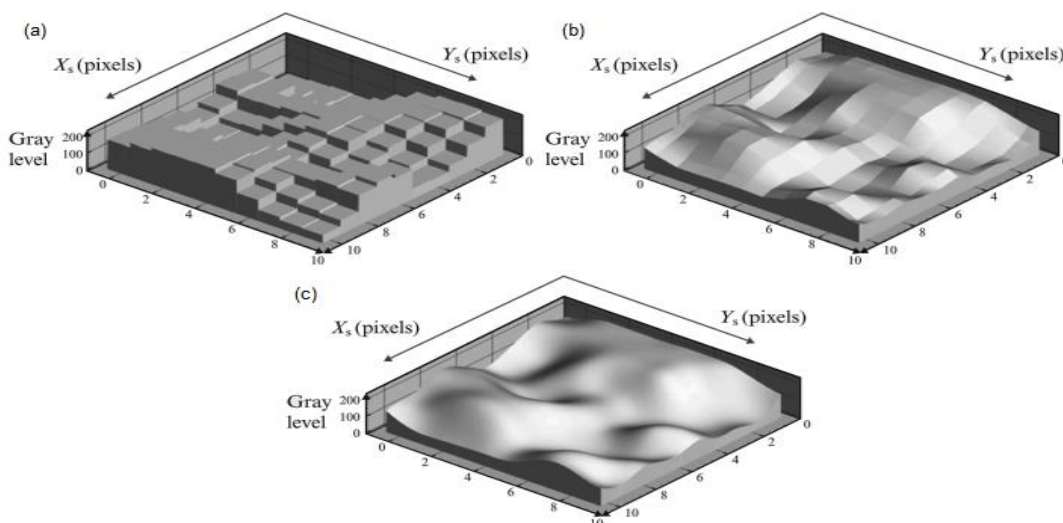


Figura 2.2 – Representação 3D dos valores de intensidade de um bloco (a); representação das intensidades com interpolação bilinear (b); representação das intensidades com interpolação *spline* cúbica (c). Adaptado de [20]

Resolvido o problema da resolução, surge uma outra dificuldade que é denominada pelo Problema de Correspondência [24]. É perceptível o porquê de ao invés de se tentar corresponder um único ponto de uma imagem para outra, se tente corresponder um conjunto de pontos. Não é possível garantir a singularidade de um único ponto (pois podem haver várias correspondências para a mesma intensidade), mas, o mesmo pode acontecer ao se tentar corresponder um bloco de pontos. Se a superfície do provete contiver um padrão repetitivo, pode haver mais do que uma correspondência para o bloco que se quer encontrar, o que significa que ocorre um fenômeno de decorrelação em que os deslocamentos medidos não são fiáveis.

Percebe-se assim, a importância da aplicação de um padrão estocástico na superfície do provete (fig. 2.3). E não só o padrão deve ser o mais aleatório possível e com alto contraste, como deve possuir muitas outras características para assegurar a precisão do método como por exemplo o tamanho de grão do padrão e a escolha de parâmetros inerentes aos *softwares* [8]. O padrão pode ser facilmente aplicado com tinta de spray preta sob um fundo branco, tentando que os grãos do padrão tenham um diâmetro semelhante.

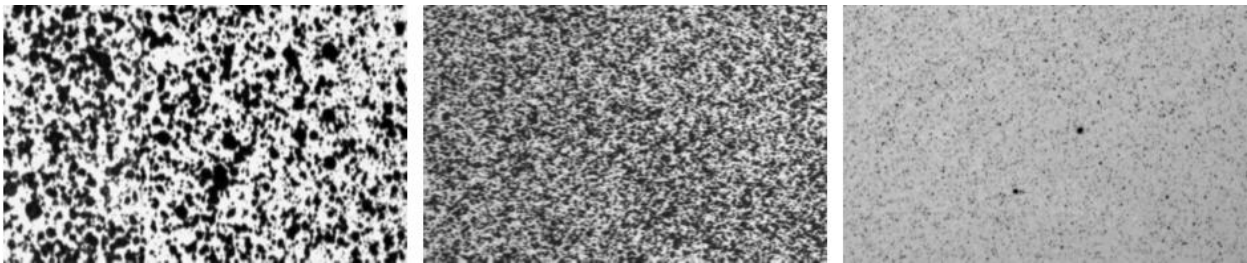


Figura 2.3 – Exemplo de três padrões estocásticos diferentes. Adaptado de [25]

2.3 Correspondência de blocos

Tendo estes conceitos em mente, é possível entender como é que o algoritmo faz a correspondência de blocos na Região de Interesse assinalada. Obtendo a matriz de intensidades do bloco selecionado, o algoritmo vai analisar outras matrizes de intensidade na imagem seguinte até encontrar uma semelhança entre elas (fig. 2.4). A comparação entre matrizes de intensidades faz-se com recurso a uma dada função custo que se pretende minimizar.

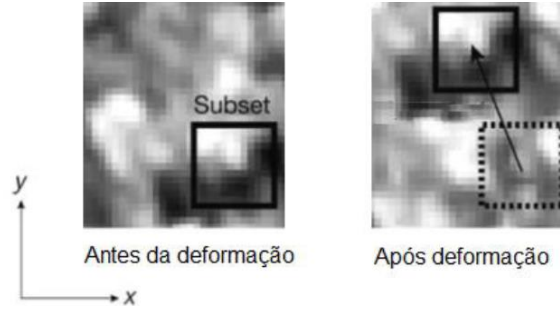


Figura 2.4 – Exemplo do deslocamento de um bloco durante a deformação [21]

São várias as funções custo existentes que se podem aplicar no algoritmo de correlação, sendo que as mais utilizadas são: a *Normalized Cross Correlation* (NCC), a *Sum of Squared Differences* (SSD) e *Normalized Sum of Squared Differences* (NSSD) [24]:

$$NCC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} g_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{ij}^2}}, \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$SSD = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g_{ij} - f_{ij})^2, \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$NSSD = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} g_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{ij}^2} g_{ij} - f_{ij} \right)^2. \quad (\text{Eq. 2.3})$$

em que f_{ij} e g_{ij} representam as intensidades nos blocos inicial e atual. A melhor correspondência encontra-se na região que minimiza uma destas funções custo.

Encontrado o bloco correspondente, o algoritmo calcula o vetor deslocamento do bloco de uma imagem para a outra obtendo assim o campo de deslocamentos. O campo de deformações é posteriormente obtido por derivação do campo de deslocamentos

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Através do campo dos deslocamentos é possível determinar o alongamento relativo (λ) do objeto:

$$\lambda = \frac{l}{l_0} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

onde l e l_0 são o comprimento final e o comprimento inicial, respetivamente. A partir do alongamento relativo, é possível obter vários tipos de deformação linear ou extensão como a extensão nominal (ϵ), a extensão verdadeira ou logarítmica (e), a extensão de Lagrange (E) e a extensão de Euler (E^*) que são dadas pelas seguintes equações:

$$\epsilon = \lambda - 1, \quad (\text{Eq. 2.8})$$

$$e = \ln(\lambda), \quad (\text{Eq. 2.9})$$

$$E = \frac{1}{2}(\lambda^2 - 1), \quad (\text{Eq. 2.10})$$

$$E^* = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right). \quad (\text{Eq. 2.11})$$

O método de correspondência de blocos até agora referido, apenas admite translações do bloco de uma imagem para a outra. No entanto, um corpo pode sofrer tração, compressão, corte ou rotação, o que significa que um bloco inicialmente quadrado pode assumir uma outra forma depois da deformação. Isto quer dizer que pode existir descorrelação, não sendo obtida uma correta correspondência. Aliás, estudos revelam que a descorrelação é bastante significativa mesmo para rotações pequenas [24]. De modo a ultrapassar estas dificuldades, foram desenvolvidos vários algoritmos como veremos a seguir.

2.4 Algoritmos Sub-Pixel

Como se observou anteriormente, existem diversas dificuldades encontradas pelo método primordial DIC como é o caso de resoluções no algoritmo de um pixel e descorrelações devido a deformações na forma inicial do bloco. Por essa razão foram desenvolvidos vários algoritmos sub-pixel, como por exemplo, métodos de interpolação de intensidades, transformações de Fourier e métodos diferenciais [21] [23] [24] [26].

Estes algoritmos diferem entre si pela sua metodologia, precisão e esforço computacional, por isso cabe ao utilizador escolher aquele que melhor se enquadra no seu objeto de estudo. Entre os algoritmos mais utilizados, destacam-se agora dois deles: Método de Newton-Raphson e método dos gradientes.

2.4.1 Método de Newton-Raphson

Este método tem em conta a deformação do bloco entre as duas imagens [21] [23]. Assume que cada um dos pontos (x, y) na imagem de referência são correspondidos para (x', y') através das seguintes equações:

$$x' = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y, \quad (\text{Eq. 2.12})$$

$$y' = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y. \quad (\text{Eq. 2.13})$$

em que u e v representam os deslocamentos horizontal e vertical do centro do bloco e Δx e Δy as distâncias de (x, y) ao centro do bloco como se pode observar na fig. 2.5, $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$ e $\frac{\partial v}{\partial y}$, representam u_x , u_y , v_x , v_y , respetivamente.

O algoritmo vai determinar os seis parâmetros que minimizam uma determinada função custo:

$$T = \left(u \quad v \quad \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (\text{Eq. 2.14})$$

O processo iterativo inicia-se com uma estimativa T_0 que vai sendo atualizada segundo um fator de correção Δp :

$$\nabla T_i = -H^{-1}(T_i) \cdot \nabla(T_i), \quad (\text{Eq. 2.15})$$

em que $H(T_i)$ representa a matriz Hessiana com as derivadas de segunda ordem e $\nabla(T_i)$ representa a matriz Jacobiana com as derivadas de primeira ordem da função custo. Posteriormente, a estimativa T é atualizada até convergir:

$$T_{i+1} = T_i + \Delta T_i. \quad (\text{Eq. 2.16})$$

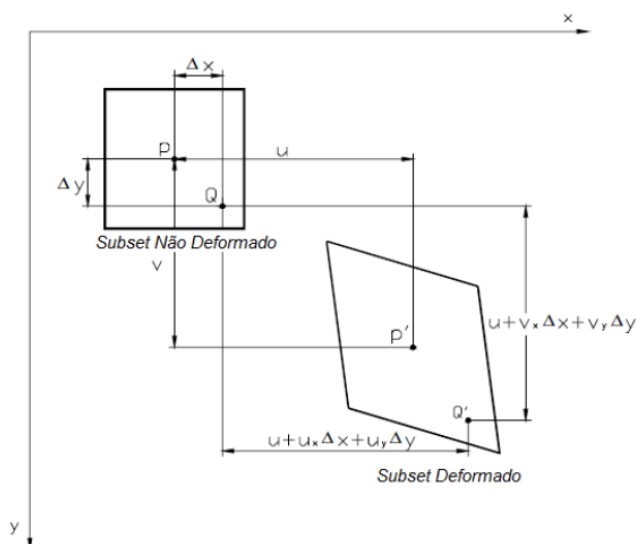


Figura 2.5 – Exemplificação de um bloco deformado [21]

2.4.2 Método dos gradientes

Este algoritmo foi desenvolvido por Davis e Freeman em 1997 [27]. Suponhamos que $A(x, y)$ e $B(x, y)$ representam imagens desalinhadas do mesmo bloco, assumindo que o desalinhamento é translacional, temos que:

$$A\left(x - \frac{d_x}{2}, y - \frac{d_y}{2}\right) = B\left(x + \frac{d_x}{2}, y + \frac{d_y}{2}\right), \quad (\text{Eq. 2.17})$$

em que d_x e d_y representam a distância entre as duas imagens. Se a distância for pequena, é possível representar o desalinhamento numa série de Taylor e reter apenas os termos lineares em que:

$$A(x, y) - \frac{d_x}{2} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{d_y}{2} \frac{\partial A}{\partial y} = B(x, y) + \frac{d_x}{2} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{d_y}{2} \frac{\partial B}{\partial y}. \quad (\text{Eq. 2.18})$$

Obtendo duas matrizes $A[i, j]$ e $B[i, j]$ com as intensidades das imagens A e B , aproximam-se as imagens e as suas derivadas parciais em pontos entre pixels. Por exemplo:

$$A\left[\left(i + \frac{1}{2}\right)\Delta, \left(j + \frac{1}{2}\right)\Delta\right] \approx \bar{A}[i, j] \quad (\text{Eq. 2.19})$$

donde,

$$\bar{A}[i, j] = \frac{A[i, j] + A[i+1, j] + A[i, j+1] + A[i+1, j+1]}{4}. \quad (\text{Eq. 2.20})$$

em que Δ representa o espaçamento entre pixels. Então as derivadas parciais são aproximadas por:

$$\bar{A}_x[i, j] = \frac{A[i+1, j] - A[i, j] + A[i+1, j+1] - A[i, j+1]}{2\Delta}, \quad (\text{Eq. 2.21})$$

$$\bar{A}_y[i, j] = \frac{A[i, j+1] - A[i, j] + A[i+1, j+1] - A[i+1, j]}{2\Delta}. \quad (\text{Eq. 2.22})$$

Substituindo estas aproximações na expansão de Taylor:

$$\bar{A}[i, j] - \bar{B}[i, j] = \frac{d_x(\bar{A}_x[i, j] + \bar{B}_x[i, j])}{2} + \frac{d_y(\bar{A}_y[i, j] + \bar{B}_y[i, j])}{2}, \quad (\text{Eq. 2.23})$$

que pode ser considerada como uma matriz $[i, j]$ de equações de duas incógnitas d_x e d_y , sendo que a solução é:

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_x \\ \hat{d}_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum \sum G_x G_x & \sum \sum G_x G_y \\ \sum \sum G_x G_y & \sum \sum G_y G_y \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \sum \sum G_x G_t \\ \sum \sum G_y G_t \end{bmatrix}, \quad (\text{Eq. 2.24})$$

em que

$$G_x[i, j] = \frac{(\bar{A}_x[i, j] + \bar{B}_x[i, j])}{2}, \quad (\text{Eq. 2.25})$$

$$G_y[i, j] = \frac{(\bar{A}_y[i, j] + \bar{B}_y[i, j])}{2}, \quad (\text{Eq. 2.26})$$

$$G_t[i, j] = \bar{B}[i, j] - \bar{A}[i, j], \quad (\text{Eq. 2.27})$$

onde \hat{d}_x e \hat{d}_y são uma estimativa dos deslocamentos.

Os dois algoritmos aqui apresentados e outros existentes vão sendo modificados e reinventados para servir outras utilizações e aplicações, existindo por isso, atualmente, uma gama muito variada de algoritmos disponíveis, inclusive alguns que se baseiam em comportamentos da Natureza para indicar onde procurar o bloco de uma imagem para outra [28].

2.5 Parâmetros

Tendo em vista todos estes conceitos aqui apresentados, percebe-se que existem muitos parâmetros que influenciam o método DIC, condicionando os resultados obtidos.

Podemos dividir os principais parâmetros em internos e externos, tendo em conta se são variáveis que intervêm no desempenho do algoritmo ou se se originam de determinadas condições do procedimento experimental, respetivamente.

2.5.1 Parâmetros Internos

São vários os parâmetros que podem influenciar o processo iterativo de correspondência. No entanto tendo em conta que o objetivo é implementar *softwares* com algoritmos já concebidos, nem sempre é possível modificar certos parâmetros por forma a obter melhores resultados.

Dos parâmetros principais destacam-se a função custo, as dimensões do bloco, as dimensões da Região de Interesse e a função interpoladora.

- Função Custo:

Como se pôde perceber pela secção 2.3, são várias as funções custo que se podem utilizar para fazer corresponder o bloco selecionado. No entanto nem todos os *softwares* permitem uma modificação deste parâmetro. A influência da função custo prende-se maioritariamente com o tempo computacional para realizar o seu cálculo em cada iteração e a rapidez com que o resultado converge.

Em estudos realizados durante o desenvolvimento de um algoritmo para a avaliação de

grandes deformações em objetos [21], foram analisadas quatro funções custo (sendo que três delas já foram mencionadas): *SSD*, *NCC*, *NSSD* e *ZSSD* (*Zero-Mean Sum of Squared Differences*), em que se concluiu que as funções *NSSD* e *ZSSD* apresentavam melhores resultados para o objetivo a cumprir. No entanto, estes resultados nem sempre se verificam, por isso, cabe ao utilizador escolher a função custo em conformidade com o que pretende analisar,

- Dimensões do bloco:

Este parâmetro está intrinsecamente ligado ao padrão aleatório que o provete apresenta, à resolução da imagem e à deformação a que o objeto está sujeito.

O tamanho do bloco e o padrão estocástico são duas propriedades que têm de ser pensadas no seu conjunto, contudo, como a preparação do provete é dos primeiros passos a realizar, o tamanho do bloco deve ser escolhido consoante a densidade e o tamanho de grão apresentados. Existem estudos nesta área que determinam que para grãos de pequeno diâmetro devem ser escolhidos blocos de pequenas dimensões e para grãos de maior diâmetro, blocos de maiores dimensões [8].

Em relação às dimensões do bloco, vários estudos afirmam que quanto maior o tamanho do bloco, menores são as incertezas dos deslocamentos e melhores os resultados [8] [29], pois se o bloco contiver poucos pixels e caso o padrão da superfície não seja o mais adequado, poderá haver mais do que uma correspondência para esse mesmo bloco. No entanto, se o bloco for demasiado grande em relação à Região de Interesse pode não ser possível obter uma correspondência.

- Dimensões da Região de Interesse:

A influência deste parâmetro prende-se essencialmente com o facto de que de uma imagem para a outra um ponto pode deslocar-se para fora da Região de Interesse, caso em que o processo de correspondência será perdido. Por esta razão, este parâmetro deve ser de dimensões suficientes para que tal não aconteça.

- Função Interpoladora:

A função interpoladora tem influência nos resultados, pois através dela é possível medir os deslocamentos com uma precisão menor do que 1 pixel. Bonnert et al. [29] inferiram sobre a importância deste parâmetro e concluíram que funções interpoladoras de maior grau, reduzem a propagação sistemática dos erros, melhorando a precisão no cálculo dos deslocamentos.

2.5.2 Parâmetros externos:

Estes parâmetros são aqueles que permitem tirar mais conclusões acerca do sucesso da implementação deste método por serem influenciados pela forma como é realizado o procedimento experimental. Os principais parâmetros externos são: a resolução da câmara, o padrão aplicado no provete, a iluminação, a frequência de aquisição das imagens e a distorção das lentes da câmara fotográfica.

- Resolução da câmara:

A resolução da câmara deve ser tida em conta com a área que se pretende analisar e a distância entre a câmara e o objeto. Deve haver um compromisso entre estes parâmetros, e se o objeto a analisar for de grandes dimensões deve ser considerada a utilização de mais do que uma câmara para não comprometer os resultados obtidos.

- Padrão estocástico:

Este parâmetro é fulcral neste método, pois é ele que vai garantir que cada zona da superfície a analisar é única, garantindo assim o processo de correspondência.

Os padrões podem assumir várias formas e vários diâmetros de grão e, por isso o tamanho de bloco deve ser considerado em conjunto com as dimensões do bloco, como referido anteriormente. Por exemplo se o padrão não estiver regularmente distribuído e o bloco for demasiado pequeno, poderão haver várias correspondências para esse mesmo bloco originando um fenómeno de descorrelação.

- Iluminação:

A utilização de iluminação artificial torna-se um fator importante porque as mudanças de brilho de uma imagem vão afetar as intensidades dos pixels, e, se essas alterações forem significativas poderão influenciar os resultados obtidos. Existem funções custo que contabilizam essas mudanças através de transformações fotométricas [24]. No entanto é aconselhável utilizar iluminação artificial para garantir maior estabilidade nas condições experimentais.

- Frequência de aquisição:

Este é um parâmetro que deve ser analisado juntamente com as condições do ensaio. Dependendo da velocidade do ensaio e da deformação que o objeto sofre, a frequência de aquisição de fotografias deve ser analisada para que se obtenham os dados suficientes do ensaio, mas não seja analisada, desnecessariamente, uma grande quantidade de fotografias, que conseqüentemente

poderá aumentar excessivamente o tempo de análise computacional.

- Distorção das lentes:

É praticamente inevitável que as lentes de uma câmara digital não induzam algum tipo de distorção nas fotografias [22]. Por essa razão, alguns algoritmos possibilitam a colocação do coeficiente de distorção, coeficiente esse que pode ser calculado através da calibração da câmara digital com alguns padrões [30], ou através de um processo iterativo [31]. A principal contribuição para a distorção das lentes é a distorção radial que pode ser descrita como uma deformação geométrica da imagem desde o seu centro até às suas extremidades. Estudos indicam que os erros de medição de deslocamentos e de extensões são linearmente proporcionais ao coeficiente de distorção da lente utilizada [32].

A distorção radial afeta negativamente o cálculo dos deslocamentos numa imagem uma vez que um bloco, ao deslocar-se radialmente, pode sofrer uma deformação geométrica da sua forma. Contudo a distorção radial pode ser útil e existem estudos que exploram a utilização de lentes “olho-de-peixe” com elevada distorção para alargar o campo de visão de forma a cobrir uma grande área da superfície do objeto [33]. As imagens obtidas são neste caso hemisféricas e têm posteriormente que ser convertidas em imagens panorâmicas para poderem ser utilizadas em DIC.

3 Avaliação de *Software*

Neste capítulo pretende-se realizar uma avaliação dos programas de utilização livre existentes. Foram selecionados seis *softwares* principais de utilização gratuita e de origem fidedigna para serem testados e classificados por forma a escolher os que possuem uma maior utilidade para serem utilizados no Laboratório de Mecânica Estrutural. Os *softwares* a analisar são os seguintes:

- Gom Correlate;
- NCorr;
- OpenCV;
- Opticist – *Moire Software*;
- CIAS;
- Algoritmo Matlab.

Estes programas vão ser examinados desde a sua instalação até à sua utilização. É importante escolher um programa de processamento de imagem que permita obter resultados precisos e fiáveis de forma simples, rápida e sem necessitar de muito conhecimento técnico por parte do utilizador.

Para poder testar os programas foram utilizadas fotografias de estudos realizados no Departamento de Engenharia Cívica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Os estudos consistiam em avaliar as técnicas de ligação entre dois materiais: Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (CFRP) e madeira [34] [35]. As técnicas de ligação *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) e *Near Surface Mounted* (NSM), foram avaliadas em ensaios de corte. Uma vez que os resultados experimentais deste estudo não estavam disponíveis realizou-se apenas a análise das imagens dos ensaios, o que permitiu comparar o desempenho dos programas de correlação aqui analisados.

Os seis programas aqui apresentados foram analisados de acordo com 7 parâmetros principais: instalação, carregamento de imagens, funcionamento, modificação da análise, rapidez da análise¹, apresentação de resultados e outras funcionalidades. Esta análise foi realizada previamente aos ensaios experimentais e por essa razão foram considerados os parâmetros

¹ Estas análises foram realizadas num computador com um processador Intel Core i3 de 1,4 GHz, pelo que estes tempos podem variar utilizando outros equipamentos.

inerentes à técnica DIC.

3.1 Gom Correlate

A GOM é uma empresa alemã que desenvolve, produz e distribui *softwares*, máquinas e sistemas dedicados à tecnologia de medição de coordenadas a três dimensões. Com mais de mil especialistas em metrologia a GOM garante aconselhamento, suporte técnico e ainda promove a partilha de conhecimento através dos seus *softwares* de utilização gratuita.

É o caso do programa Gom Correlate (<http://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html> - versão 2.0.1) que é um *software* utilizado para a Correlação Digital de Imagem e análise de movimento a três dimensões que ajuda a aprofundar a compreensão das propriedades de certos materiais e a realizar testes estáticos e/ou dinâmicos em diversos componentes.

- Instalação:

A instalação deste programa é bastante fácil e padronizada. É apenas necessário o preenchimento de alguns dados do utilizador, descarregar a aplicação do programa e executá-la. Depois basta seguir os passos indicados pelo programa e este fica pronto a utilizar.

- Carregamento de imagens:

Em relação a este parâmetro, o Gom Correlate não apresenta quaisquer dificuldades. É possível importar imagens a cores, sem necessitar de qualquer tipo de tratamento de imagem *a priori* com a exceção de os nomes das imagens terem de ser sequenciais.

- Funcionamento:

A este nível, este programa também apresenta ser bastante simples. Apesar de à primeira instância não serem tão intuitivos os comandos de como realizar a análise, existe muita ajuda e suporte técnico disponível. Não apresenta falhas no seu funcionamento e tem uma interface bastante agradável para o utilizador (fig. 3.1). Também não é um programa muito exigente para o computador, facilitando a sua execução.

- Modificação da análise:

Na análise é possível escolher o tamanho do bloco, a distância entre blocos – o passo, e o tipo de cálculo a realizar, que neste *software* está categorizado como: padrão, mais pontos e alta precisão. O Gom Correlate também dá uma orientação nos efeitos das alterações destes parâmetros na “Ajuda Direta”. Por exemplo, se o tamanho do bloco for aumentado, o tempo computacional aumenta e a aquisição dos efeitos locais no bloco piora. A análise “Padrão” é o modo aconselhado

pelo Gom Correlate. A análise “Mais Pontos” utiliza, como o próprio nome indica, mais pontos no algoritmo e neste modo o *software* aceita uma qualidade de padrão mais reduzida. É recomendada a utilização deste modo se a qualidade do componente é suficiente para a computação. A análise “alta precisão” o *software* utiliza apenas os blocos com boa qualidade superficial.

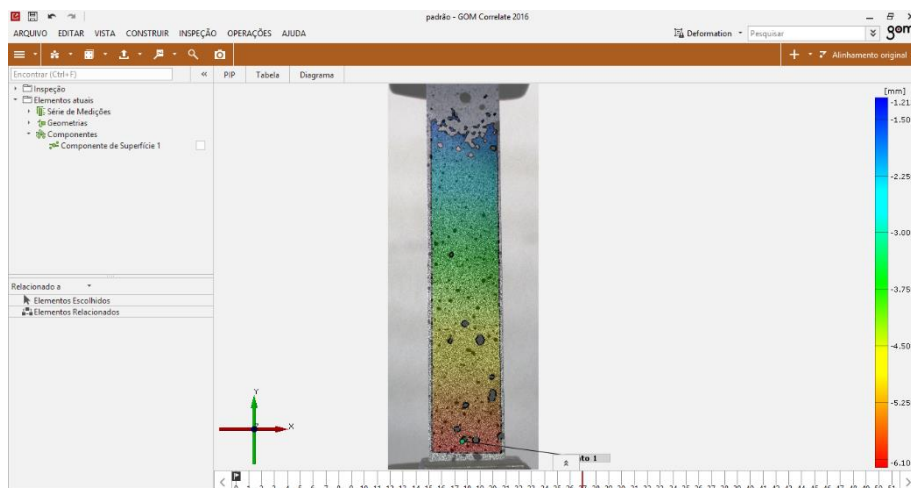


Figura 3.1 – Ambiente de trabalho do *software* Gom Correlate

- Rapidez da análise:

Este programa demora cerca de 3 minutos e meio a realizar uma análise padrão a cerca de 40 fotografias de 5172x1554 pixels.

- Apresentação de Resultados:

Este programa apresenta uma qualidade excepcional no que diz respeito à apresentação de resultados. É possível criar páginas de relatórios com os resultados a três dimensões, com diagramas entre outras formas de representação em formato de imagem, vídeo ou em *flipbook*.

- Outras funcionalidades:

O Gom Correlate possui muitas outras ferramentas, como a utilização de formas geométricas para, por exemplo, fazer a medição do afastamento de uma fenda sob cargas cíclicas, ver a trajetória que um ponto na superfície do corpo realizou, entre outras medições.

Os deslocamentos são calculados em pixels e posteriormente o utilizador define uma escala no programa para que este faça a correlação entre pixels e milímetros. Calcula a partir dos deslocamentos o alongamento relativo, a extensão nominal, a extensão logarítmica e a extensão de Lagrange.

3.2 NCorr

O NCorr (<http://www.ncorr.com/> - versão 1.2.2) é um *software* de correlação digital de imagem a duas dimensões desenvolvido no Matlab. Tem uma interface muito intuitiva e acessível e contém vários códigos de algoritmos DIC e ferramentas para criação e modificação de gráficos e figuras.

No *site* do NCorr é possível encontrar muitos documentos e vídeos de ajuda à utilização deste programa DIC, sendo uma plataforma bastante útil e completa.

- Instalação:

Para realizar a instalação do NCorr é necessária a versão de 2009 (pelo menos) do Matlab e de um compilador (um programa de computador que traduz um código de uma linguagem para outra) compatível com o sistema operativo do computador. Assim que o compilador for reconhecido a instalação automática é relativamente fácil e pode ser acompanhada no manual de instalação que pode ser encontrado no *site* do NCorr. Caso o compilador não seja reconhecido pelo Matlab, os ficheiros têm de ser compilados manualmente. Este tipo de instalação também se encontra detalhada no manual.

- Carregamento de Imagens:

Este programa aceita vários tipos de formatos de imagem e podem ser a cores. O programa pede primeiro para carregar a imagem de referência e posteriormente para carregar as restantes imagens, tantas quanto o utilizador queira.

- Funcionamento:

Uma das qualidades deste *software* é a clareza e simplicidade com que as etapas se apresentam. No canto superior esquerdo da interface do programa, está a ordem dos diferentes processos a realizar de acordo com as suas precedências e com a ordem de execução das etapas deste método.

Para iniciar o programa é apenas necessário escrever na linha de comandos do Matlab: “handles_ncorr=ncorr” e imediatamente o NCorr é iniciado. Posteriormente ao carregamento de imagens que foi descrito no parâmetro anterior, deve definir-se a Região de Interesse, que é desenhada sobre a imagem de uma maneira muito simples. De seguida escolhem-se os parâmetros da análise e realiza-se a análise.

Este programa utiliza o algoritmo de Newton-Raphson modificado e utiliza as funções de custo *Normalized Cross Correlation* e *Normalized Least Squares*.

Todo o procedimento é feito de forma simples e sem complicações e o programa desempenha as suas funções de maneira excelente. Também todo o procedimento para realizar uma análise vem devidamente explicado no manual de instalação.

- Modificação da análise:

Na análise é possível modificar o raio do bloco (que neste programa apresenta uma forma circular), o passo (que é a distância em pixels entre blocos), definir se é uma análise de grande deformação e se é uma análise descontínua (fig. 3.2).

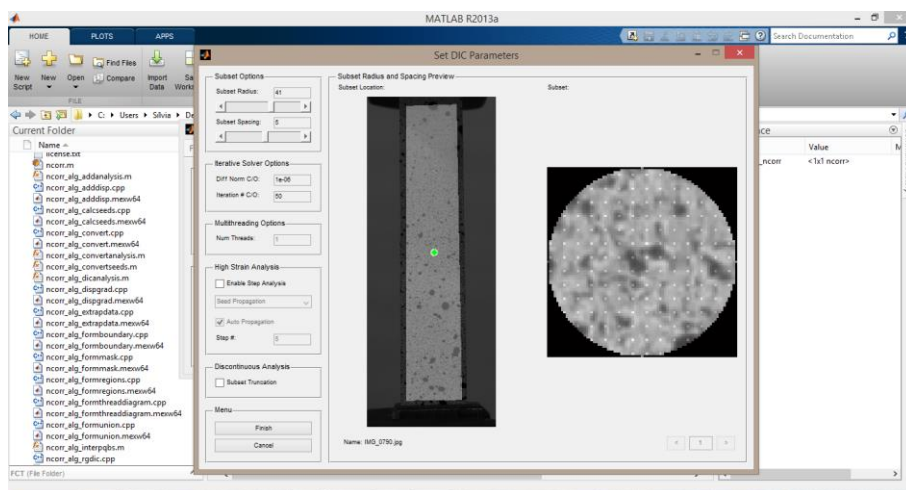


Figura 3.2 – Modificação de parâmetros no programa NCorr

- Rapidez da análise:

O algoritmo processa sensivelmente 40 imagens de 5172x1554 pixels em aproximadamente 5 horas.

- Apresentação de resultados:

O mapa de deslocamentos e de extensões é apresentado sob cada uma das imagens utilizando uma escala de cores. Cada um desses resultados pode ser guardado sob a forma de imagem. O algoritmo calcula os deslocamentos e depois é possível calcular a extensão de Lagrange e a extensão de Euler.

- Outras funcionalidades:

Este programa permite colocar um coeficiente de distorção das lentes da câmara na análise de forma a melhorar a precisão dos resultados.

De uma forma geral este programa apresenta uma fluidez muito boa apesar do tempo computacional longo. Possui uma interface muito simples e fácil de compreender, e disponibiliza manuais muito detalhados sobre como utilizar este programa e sobre os métodos e algoritmos em que este programa assenta.

Também o facto de ser em linguagem do Matlab e de os códigos serem partilhados poderá ajudar no desenvolvimento futuro de outros algoritmos de Correlação Digital de Imagem com o objetivo de satisfazer outras necessidades.

3.3 OpenCV

O OpenCV (<https://opencv.org/>) é uma biblioteca de algoritmos e técnicas de processamento de imagem de utilização livre e que permite aceder e modificar os seus códigos. É possível utilizar esta biblioteca de algoritmos em vários tipos de interfaces como C ++, Python, Java e Matlab.

Contém mais de 2500 algoritmos que servem dezenas de aplicações como:

- deteção de rostos;
- identificação de objetos;
- deteção e classificação de movimentos humanos;
- tratamentos de imagem;
- localização de movimento em objetos;
- extração de modelos 3D de objetos;
- entre outras.

Apesar da quantidade de informação a que o utilizador tem acesso e da existência de algoritmos de correspondência de *templates*, o OpenCV não disponibiliza ainda nenhum conjunto de algoritmos ou funções que permitam a implementação do método DIC. Mas, como projeto futuro seria interessante desenvolver um programa de Correlação Digital de Imagem utilizando as ferramentas que o OpenCV disponibiliza.

3.4 Opticist – Moiré *Software*

O Opticist é um *site* que fornece *softwares* disponibilizando tutoriais de como utilizá-los. Este *site* é gerido por Zhaoyang Wang e Hieu Nguyen, ambos doutorados em Engenharia Mecânica da

Universidade Católica da América.

Um dos programas desenvolvidos por Zhaoyang Wang e Hieu Nguyen é o *Moiré Software* (fig.3.3). Este programa contém muitas funções de análise e processamento de imagem e de medições de deformação, forma e movimento.

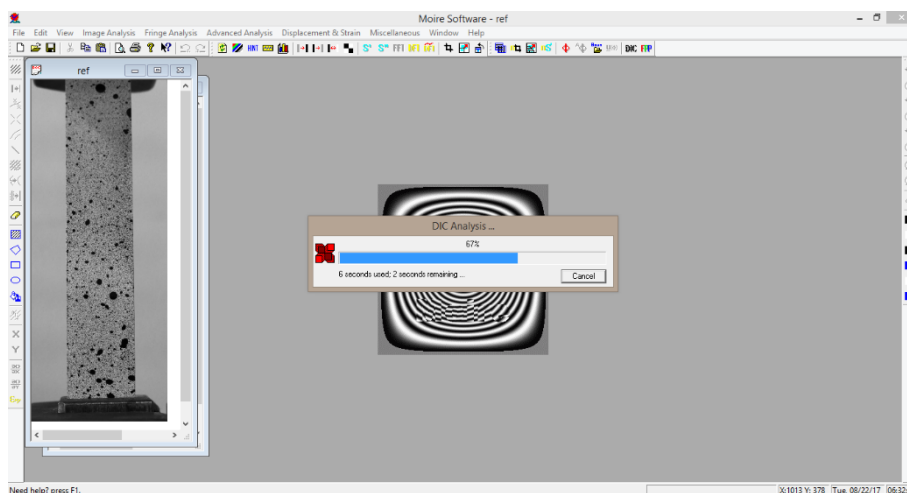


Figura 3.3 – Ambiente de trabalho do *software* Moiré

- Instalação:

Para fazer a instalação deste programa é necessário realizar o registo no *site* <http://optacist.org/node/73>, e descarregar o ficheiro (versão 0.960). Para conseguir instalar este programa é necessário instalar o Visual Studio C++ 2015 ou o Visual C++ 2015 Redistributable Package. Depois basta executar o ficheiro “Moiré”.

- Carregamento de imagens:

Este programa só aceita imagens a preto e branco de 8 bits para fazer a sua análise. Felizmente, é possível fazer a sua conversão diretamente no *software*. No entanto, este programa só analisa duas imagens: a imagem de referência e a imagem da deformação.

- Funcionamento:

Antes de iniciar a análise é necessário determinar a correspondência entre pixels e milímetros, que deve ser indicada nas configurações do programa. Depois é preciso criar uma fronteira das imagens a examinar. Ou seja, é necessário carregar uma das fotografias, apagar o conteúdo da fotografia, desenhar a forma correspondente à Região de Interesse que se pretende realizar, no sítio correspondente e guardar essa imagem como a região fronteira. De seguida define-se os parâmetros da análise, faz-se a seleção do ponto inicial de busca e posteriormente é iniciado o

processo de análise. No final da análise, o programa apresenta as duas imagens inseridas com uma escala de cores para representar os deslocamentos.

O programa frequentemente deixa de funcionar quando se tenta carregar imagens muito grandes ou mais do que duas imagens, sendo um *software* muito limitado e muito pouco intuitivo neste aspeto.

- Modificação da análise:

Este programa permite modificar muitos parâmetros da análise a realizar, como por exemplo: o tamanho dos blocos, o passo dos blocos, o critério de convergência, o tipo de algoritmo de interpolação e o tipo de algoritmo DIC. No entanto, a maioria dos parâmetros não devem ser alterados pois são opções de teste utilizadas pelos criadores.

O programa não oferece muita ajuda relativamente aos parâmetros a escolher e muitos algoritmos e opções estão designados de uma forma abreviada, sendo difícil escolher os mais adequados. Também não disponibiliza nenhum tipo de ajuda sobre o seu funcionamento e as suas opções de análise.

- Rapidez da análise:

O *software* demora cerca de 15 segundos a analisar as duas imagens de 5172x1554 pixels, este tempo pode variar conforme o tamanho da Região de Interesse.

- Apresentação de Resultados:

O *software* Moiré apresenta os resultados, utilizando a imagem de referência para indicar os deslocamentos na direção horizontal, e a imagem de deformação para indicar os deslocamentos na direção vertical. De seguida obtém-se as extensões diferenciando o campo de deslocamentos.

- Outras funcionalidades:

Este programa ainda permite realizar tratamento das imagens a analisar e avaliar o padrão da superfície do objeto e o tamanho do bloco. Fornece ainda um pequeno manual de como realizar o método DIC.

De uma forma geral este programa apresenta muitas limitações na sua implementação do método DIC e é necessário realizar um tratamento das imagens dos ensaios previamente podendo só comparar duas delas por cada análise.

3.5 CIAS

Outro dos *softwares* analisados foi o CIAS (<http://www.mn.uio.no/geo/english/research/projects/icemass/cias/> - versão de 2013), que é um programa que foi desenvolvido por Andreas Kääb no departamento de Geociências da Faculdade de Matemática e Ciências Naturais na Noruega. Apesar de ser descrito como um programa de correlação de utilização livre para calcular deslocamentos entre duas imagens, não é possível aplicá-lo ao tipo de estudo que se pretende realizar.

Esta aplicação é escrita em IDL (*Interactive Data Language*) e mede os deslocamentos entre imagens aéreas, espaciais ou outro tipo de imagens geográficas e regista as diferenças de terreno entre elas como mudanças climáticas. A figura 3.4 é um exemplo disso. Trata-se da comparação de duas imagens capturadas sobre um glaciar no ano de 2000 e no ano de 2001. O *input* são duas imagens de formato geotiff e tiff-world e por isso as imagens têm de ser convertidas antes de serem utilizadas.

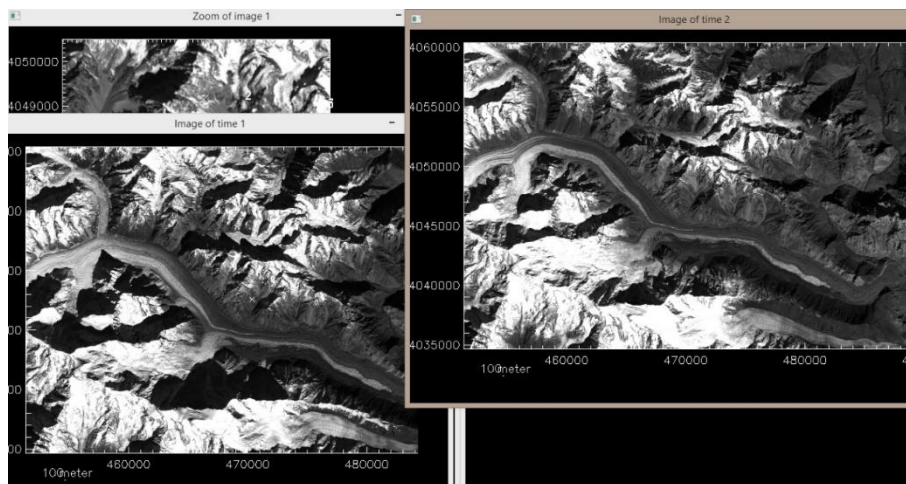


Figura 3.4 – Comparação de duas imagens aéreas no programa CIAS

O CIAS utiliza funções de custo como a NCC e NCC-O (*Normalized Cross Correlation – Optimized*) e, apesar de não ser possível implementar este *software*, este é um exemplo de aplicação dos fundamentos principais da Correlação Digital de Imagem.

3.6 Algoritmo Matlab

Este é um algoritmo desenvolvido por três utilizadores do Matlab na universidade Johns Hopkins. Através deste programa é possível ter acesso ao código dos algoritmos e por essa razão, este programa torna-se interessante do mesmo ponto de vista que o NCorr.

No entanto, este programa é mais incompleto que o NCorr e é mais direcionado para o cálculo das extensões, sendo que a representação dos resultados dos deslocamentos é bastante incompleta.

- Instalação:

Este programa pode ser encontrado e descarregado no *site*: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12413-digital-image-correlation-and-tracking>. Para a instalação é necessário pelo menos o Matlab 7. Assim que os ficheiros são descarregados recorre-se a um processo de instalação que está pormenorizadamente descrito numa página de internet que vem juntamente com os ficheiros de instalação. É uma instalação um pouco demorada, mas fácil de completar através da lista de instruções.

- Carregamento de imagens:

O carregamento de imagens também se torna um processo um pouco moroso. Os nomes das imagens têm de estar sequenciais, e estas devem ser no formato TIFF. Os criadores aconselham que seja este o formato, porque outros formatos não fornecem a resolução sub-pixel necessária para que o espaço ocupado seja o menor possível. Ou seja, para recorrer a este *software*, é ainda necessário arranjar um programa ou uma outra alternativa para converter as imagens para o formato desejável.

- Funcionamento:

A nível do seu funcionamento, este programa tem poucos passos, mas bastantes específicos, por isso é necessário ler o manual com a devida atenção e utilizar 4 comandos principais no Matlab: “filelist_generator”, “grid_generator”, “automate_image” e “displacement”, que representa respetivamente: o carregamento de imagens, a definição da Região de Interesse, a análise e a apresentação de resultados.

A nível computacional este programa não é muito exigente, mas não é muito completo e não oferece muitas vantagens em relação a outros programas.

- Modificação da análise:

Neste parâmetro, o *software* não apresenta nenhuma opção de modificação.

- Rapidez da análise:

Em termos de análise, esta é feita de forma bastante rápida, demorando cerca de 3 minutos a processar 4 imagens de 5172x1554 pixels.

- Apresentação de resultados:

Neste aspeto, este programa tem algumas opções de apresentação de resultados, como um gráfico a três dimensões dos deslocamentos, representação das extensões, medição e representação das extensões entre dois pontos pretendidos e gráficos das extensões médias em cada imagem. Permite realizar vídeos deste tipo de resultados no entanto, não permite fazer muitas modificações na apresentação dos resultados apresentados nem obter uma visualização mais concreta dos mesmos.

- Outras funcionalidades:

Não existem aspetos a referir acerca deste programa.

3.7 Comparação e escolha dos *softwares*

De acordo com as caracterizações feitas dos 6 programas em relação aos parâmetros acima mencionados, foi feita uma tabela resumo (tab. 3.1) para ajudar a perceber os programas cuja utilização seria mais vantajosa.

Tabela 3.1 – Comparação qualitativa dos seis programas avaliados

		Parâmetros							
		Instalação	Carregamento de imagens	Funcionamento	Modificação da análise	Rapidez da análise	Apresentação de resultados	Outras funcionalidades	Classificação Geral
Softwares	<i>Gom Correlate</i>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>NCorr</i>	....	.....	.....	....	.	....	...	....
	<i>OpenCV</i>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Moiré Software</i>	....	..	..	...	.....	...	.....	...
	<i>CIAS</i>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Algoritmo Matlab</i>	..	...	...	.	.....	...	NA	..
NA – Não Aplicável . - Mau .. - Insuficiente - Razoável - Bom - Excelente									

Pela tabela 3.1 é possível perceber que o *software* mais bem classificado é o Gom Correlate, seguido do NCorr. Por essa razão foram escolhidos os dois, o Gom Correlate pela sua simplicidade e facilidade de interação e o NCorr porque, para além das mesmas características, disponibiliza as funções Matlab, sendo por isso uma boa ferramenta para a melhor compreensão deste método e para ajudar a desenvolver novos e melhores algoritmos como trabalho futuro.

Utilizando as imagens de dois ensaios de corte entre madeira e CRFP obtidas em [34] e [35], compararam-se os resultados obtidos pelo Gom Correlate e pelo NCorr. Se estes apresentassem resultados semelhantes, isto poderia ser uma forte indicação de que os programas estariam a implementar o método corretamente, sendo, no entanto, necessário um método de validação para o método experimental.

Nas figuras 3.5 e 3.6 estão representadas as imagens inicial e final dos provetes analisados nos ensaios 1 e 2 cujas imagens se designavam por “W_NSM_Lb125_01” e “W_NSM_Lb230_01”, respetivamente. Foram analisadas 26 fotografias no ensaio 1 e 34 fotografias no ensaio 2 de modo a obter o deslocamento segundo a direção horizontal.

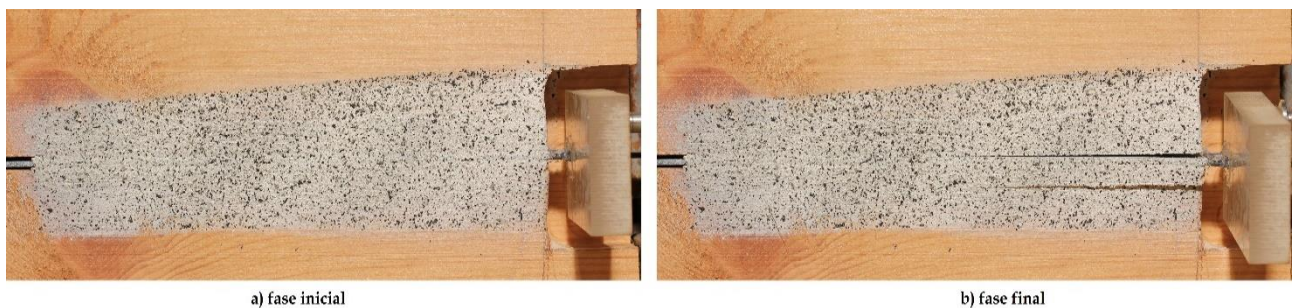
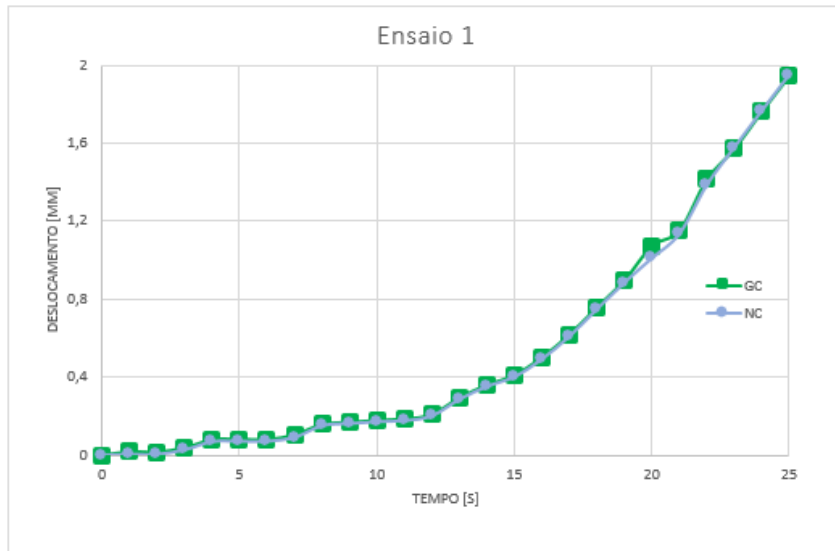


Figura 3.5 – Fotografias “W_NSM_Lb125_01” da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio 1 [34] [35]

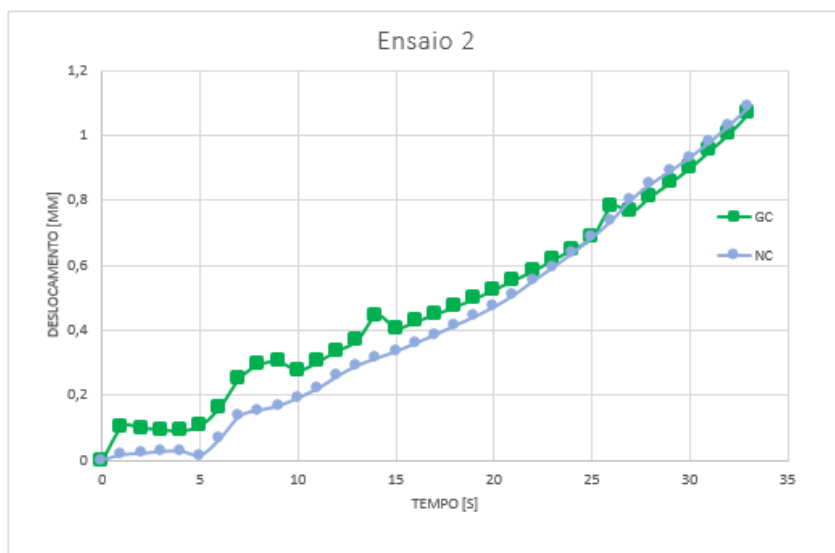


Figura 3.6 – Fotografias “W_NSM_Lb230_01” da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio 2 [34] [35]

Assumiu-se que cada imagem foi fotografada de segundo a segundo como simplificação para realizar a comparação e, analisando com os dois programas, obtiveram-se os dois gráficos deslocamento-tempo da figura 3.7. O ensaio 1 foi o que obteve melhores resultados, sendo por isso um bom indício de fiabilidade dos programas. No ensaio 2 nota-se um afastamento dos pontos iniciais entre os programas, mas posteriormente estes convergem, sendo por isso também uma boa indicação.



(a)



(b)

Figura 3.7 – Comparação dos gráficos deslocamento (t) dos ensaios 1 (a) e 2 (b) obtidos pelo Gom Correlate e NCorr

4 Método experimental

O objetivo deste capítulo é descrever o procedimento utilizado para implementar o método de Correlação Digital de Imagem, utilizando equipamento relativamente simples, de baixo custo e recorrendo a *softwares* de utilização livre. Também é descrito o método de aplicação do padrão estocástico e o método de validação dos ensaios experimentais.

4.1 Equipamento

Realizaram-se ensaios de tração uniaxial de provetes de alumínio numa prensa MTS (fig. 4.1) de 100 kN. A prensa utiliza duas garras para fixar o provete e apenas a garra inferior se desloca num movimento vertical. A força e o deslocamento da garra inferior são medidos com precisão através de uma célula de carga e de um LVDT (*linear variable displacement transformer*), respetivamente.

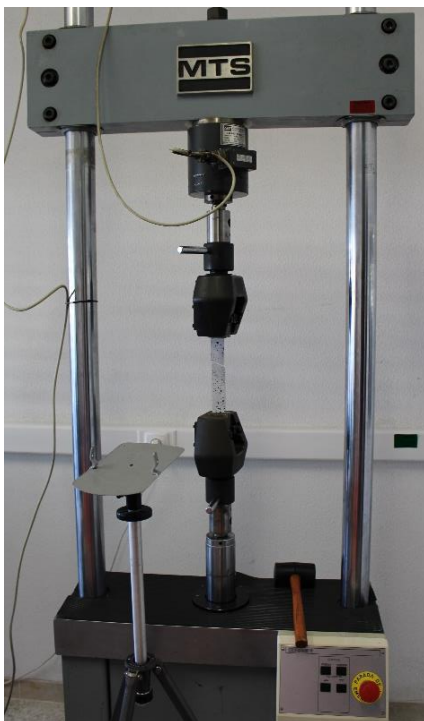


Figura 4.1 – Prensa MTS

Os sistemas da prensa são controlados através de um *software* instalado no computador existente no laboratório.

Os ensaios foram fotografados ou filmados por uma câmara fotográfica Canon EOS 100D de 18 Megapixels (5184x3456 pixels) com uma lente de 18-55 mm. A resolução máxima de vídeo é de 1920x1080 pixels e, as fotografias no modo contínuo podem ser obtidas de 5 em 5 segundos. Para obter as fotografias em modo contínuo de 5 em 5 segundos, foi utilizado um programa próprio fornecido pela Canon, instalado num computador de processador Intel Core i3 de 1,40 GHz. Neste mesmo computador foram também realizadas as análises às imagens dos ensaios experimentais no Gom Correlate e no NCorr.

Nos ensaios que foram filmados, foi necessário um tratamento do vídeo obtido para extrair as *frames* numa frequência pré-selecionada. As imagens dos ensaios foram previamente recortadas através de um programa de tratamento de imagem chamado *ImageJ* (<https://imagej.net/Welcome>) antes de serem analisadas, para que exigissem menos memória do computador.

Foi ainda utilizado um tripé, como se pode observar na fig. 4.2, de modo a ajustar a altura e a distância da câmara do provete, e também duas lâmpadas de cor amarela para iluminar a superfície do mesmo.

Reunido todo o equipamento, era necessário dispô-lo de uma maneira organizada e eficaz. A fig 4.2 mostra a montagem experimental que foi utilizada durante os ensaios dos provetes de alumínio. O computador mais à esquerda na imagem (fig. 4.2: indicado pelo nº2) contém o *software* para controlar e programar os ensaios experimentais, e o computador à direita (fig. 4.2: indicado pelo nº3) contém o *software* de controlo de disparo da máquina fotográfica.

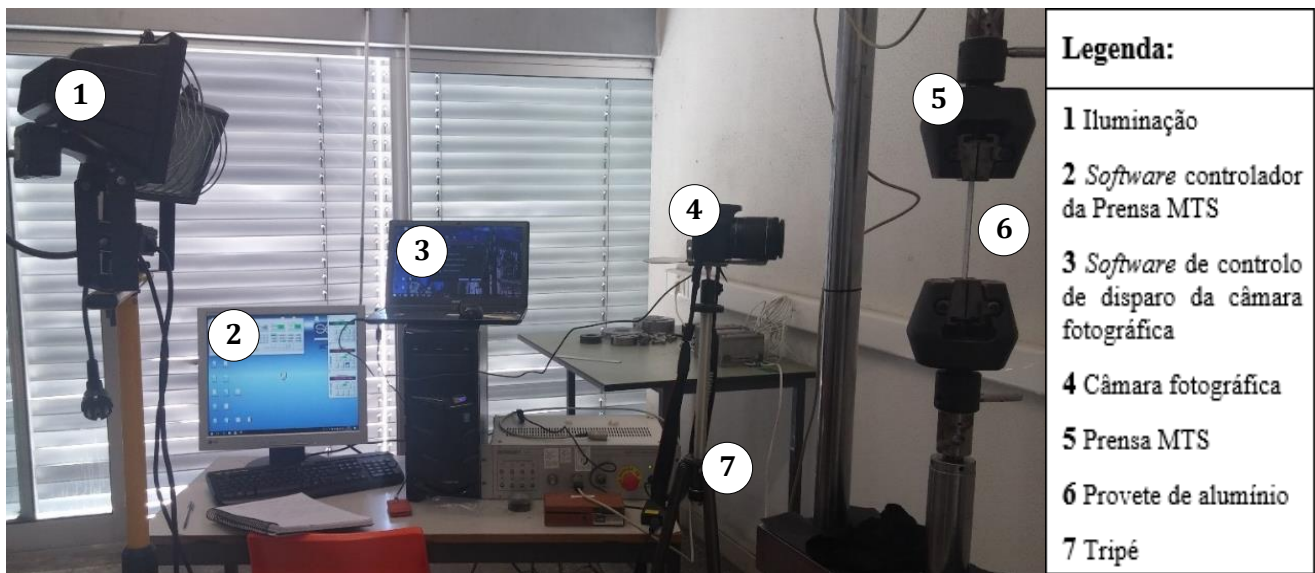


Figura 4.2 – Montagem experimental

4.2 Preparação dos provetes

Para facilitar a fabricação dos provetes a ensaiar, não se utilizaram formatos normalizados. Foram cortadas várias barras de alumínio, em vários comprimentos, com as seguintes secções retangulares (fig. 4.3 e tab. 4.1):

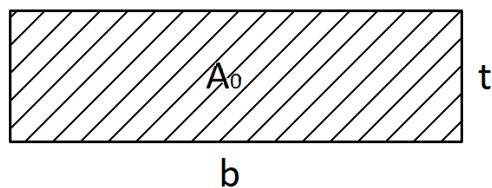


Figura 4.3 – Secção retangular dos provetes

Tabela 4.1 – Dimensões das secções dos provetes

Provete	b [mm]	t [mm]	A_0 [mm ²]
A	30	2	60
B	25	2	50

A tabela 4.1 faz a separação entre os provetes de alumínio existentes através da designação por provete A ou B que representa os provetes de secção 30x2 e 25x2 mm, respetivamente. Esta designação vai ser utilizada no capítulo seguinte para caracterizar os ensaios experimentais.

Num dos vários provetes de alumínio ensaiados, obteve-se os seguintes valores de tensão de cedência e de rotura (tab. 4.2):

Tabela 4.2 – Tensão de cedência e tensão de rotura do material ensaiado

σ_c [MPa]	σ_r [MPa]
125	163

Utilizando os valores de deslocamento e de carga da prensa MTS nas seguintes equações:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

que representam a tensão nominal e a extensão nominal, respetivamente, obteve-se o seguinte diagrama tensão-deformação (fig. 4.4):

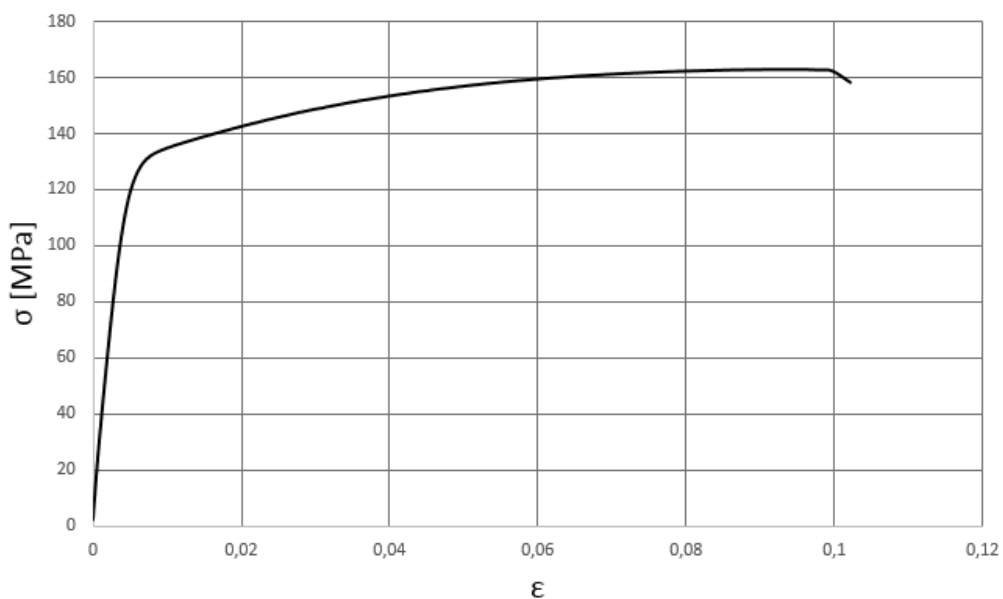


Figura 4.4 – Gráfico tensão-deformação do alumínio

No gráfico tensão-deformação da fig. 4.4, calculou-se, no intervalo de tensão de 3 a 6 MPa um declive médio de 68 GPa (que representa o módulo de elasticidade do material), observando-se uma diminuição progressiva desse declive com o aumento do valor da tensão, o que poderá ser devido ao escorregamento do provete na garra. Nos ensaios realizados verificou-se ainda que vários provetes partiam no interior de uma das garras da prensa, indicando que esta não fixava corretamente o provete, o que poderá ser associado à existência de escorregamento.

Depois de cortados e limados, os provetes devem ser devidamente limpos e desengordurados antes de passar à fase da pintura. Para obter um padrão aleatório, aplica-se primeiro uma base branca na superfície do provete através de tinta de spray e, após secagem, são aplicados os salpicos de tinta preta. É recomendada a utilização de tintas em *spray*, por serem de fácil aplicação e rápida secagem. A tinta também deve ser o menos brilhante possível para que não haja reflexões de luz que induzam distorções na imagem.

Como se observou em capítulos anteriores, o padrão superficial do provete tem um papel importante na obtenção de resultados, e, para alcançar melhores resultados, deve ser conjugado o tamanho do bloco com o raio dos salpicos do padrão. Como se podem conseguir padrões diferentes utilizando o mesmo procedimento de pintura (fig. 4.5), no capítulo seguinte são analisados os resultados utilizando diferentes tamanhos de blocos e relacionando-os com o tamanho dos grãos do padrão.

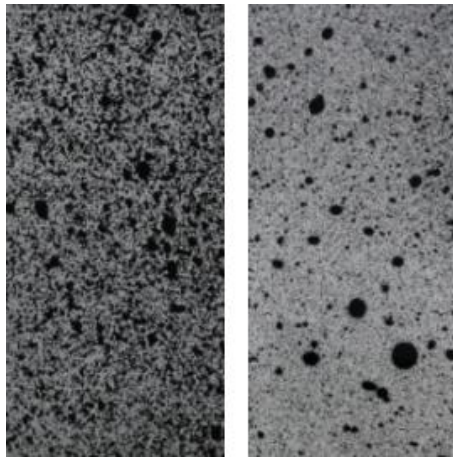


Figura 4.5 - Exemplo de dois diferentes tipos de padrões superficiais obtidos experimentalmente

4.3 Protocolo Experimental

As etapas descritas a seguir são uma síntese do procedimento efetuado durante os ensaios de tração uniaxial dos provetes de alumínio. Este protocolo tem em vista a utilização da prensa MTS,

a câmara fotográfica Canon EOS 100D e os *softwares* de correlação de imagem: Gom Correlate e NCorr. Caso seja utilizado para implementar o método de Correlação Digital de Imagem, deve ser adaptado de acordo com as condições experimentais e com o equipamento utilizado.

A – Preparação dos provetes:

1. Limpeza e desengorduramento dos provetes a testar;
2. Aplicação da tinta de *spray* branca na superfície a analisar, e deixar secar por alguns instantes;
3. Aplicação dos salpicos de tinta de *spray* preta por forma a criar um padrão aleatório, mas uniformemente aplicado na superfície do provete.

B – Montagem experimental:

1. Fixação do provete na prensa MTS;
2. Posicionamento da câmara fotográfica no tripé e ajuste da sua altura e distância em relação do provete. Verificar com um nível se a linha de visão da câmara se encontra perpendicular ao plano da superfície do provete a analisar e se a imagem se encontra corretamente enquadrada;
3. Colocar a iluminação de forma a não causar reflexos de luz nem sombras. Se não for utilizado qualquer tipo de iluminação, ignorar este passo;
4. Se for utilizado o extensómetro da prensa, conectá-lo à prensa, fixá-lo ao provete através de elásticos próprios e retirar o pino de segurança antes de iniciar o ensaio;
5. Verificar o foco da câmara e tirar algumas fotografias de teste para verificar se a fotografia se encontra focada, sem reflexos, alinhada e perpendicular ao provete;
6. Conectar a câmara ao computador que contém o *software* de captura de imagem remota e ajustar os parâmetros de armazenamento e de frequência de captura de imagens. No caso de o ensaio ser filmado não é necessário ajustar estes parâmetros sendo apenas necessário iniciar a gravação.

Nota: É importante colocar algum tipo de indicador no plano de análise ou utilizar as dimensões do provete como medida de referência, para que, mais tarde no pós-processamento de imagem, seja possível fazer a correlação entre pixels e milímetros.

C – Iniciação e gravação do ensaio:

1. No controlador da prensa definir os parâmetros do ensaio. Neste caso específico foi parametrizada uma função rampa (para corresponder a um ensaio de tração), em que era controlada a velocidade e o destino do ensaio em termos de força ou de posição.
2. Definir também no controlador da prensa os dados a monitorizar e a gravar, definir os eixos do traçador de gráficos.
3. Iniciar simultaneamente o ensaio experimental e a captura de imagens ou de vídeo;
4. Assim que o ensaio terminar, parar a captura de imagens ou de vídeo assim como a gravação de dados do ensaio;
5. Retirar o extensómetro e colocar o pino de segurança;
6. Guardar os dados obtidos pela prensa. No caso da prensa MTS eram guardados: a tabela excel e o ficheiro de texto com os dados do ensaio, o ficheiro de programação do ensaio e o gráfico do ensaio.

D – Pós-processamento dos dados:

1. Fazer o tratamento das imagens ou vídeo capturados. No caso das imagens, se for possível, recortar a imagem mantendo apenas a secção necessária à análise. Este recorte de imagem diminui o tempo e memória necessária de carregamento de imagem. No caso da gravação de vídeo, extrair as *frames* pretendidas e realizar o processo de recorte. Todas as imagens devem ser recortadas no mesmo sítio e da mesma maneira para não induzir fenómenos de des correlação na análise dos programas, algo que pode ser feito de forma simples através do programa *ImageJ*;
2. Analisar as imagens nos *softwares* e obter os deslocamentos e extensões;
3. Comparar os resultados obtidos com os obtidos pela prensa e pelo extensómetro de modo a validar todo o processo.

Tendo em conta que nem todos os ensaios foram realizados segundo as mesmas condições, no capítulo seguinte foram avaliados os resultados de cada ensaio conforme os diferentes parâmetros.

4.4 Método de validação

O método de validação inicialmente escolhido para a certificação dos resultados obtidos nos ensaios foi a extensometria (fig. 4.6). Foi utilizado um extensómetro elétrico axial da MTS e, como indicado no protocolo experimental, são necessários alguns cuidados na sua colocação e utilização de modo a evitar a sua danificação com a rotura do provete.



Figura 4.6 – Fixação do extensómetro MTS no provete de alumínio

Este extensómetro possui duas lâminas em contacto com o provete a uma determinada distância uma da outra (que é a distância quando o pino de segurança está colocado), e sempre que há um afastamento ou aproximação dessas lâminas, o controlador da prensa MTS regista essa diferença. O utilizador divide essa diferença pelo distância inicial entre as lâminas (25 mm) obtendo assim o valor da extensão.

Nos ensaios realizados, o provete está sujeito a uma deformação homogénea até chegar à sua tensão máxima, no entanto, tanto o Gom Correlate como o NCorr apresentam algumas dificuldades em confirmar esta afirmação e em obter corretamente as extensões. Isto acontece porque ao diferenciar os deslocamentos para se obterem as extensões, o ruído da câmara e a função de interpolação sub-pixel das imagens têm um papel significativo na propagação de erros [24], sendo que estas questões podem introduzir erros nas medições das extensões na ordem dos 20%. 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% [19] [36].

Como se pode observar através da figura 4.7, é possível obter vários e diferentes valores da extensão de Lagrange em toda a Região de Interesse numa situação de deformação homogénea e, devido à colocação do extensómetro no provete, não é possível obter a extensão no ponto exato onde o extensómetro está em contacto com o provete.

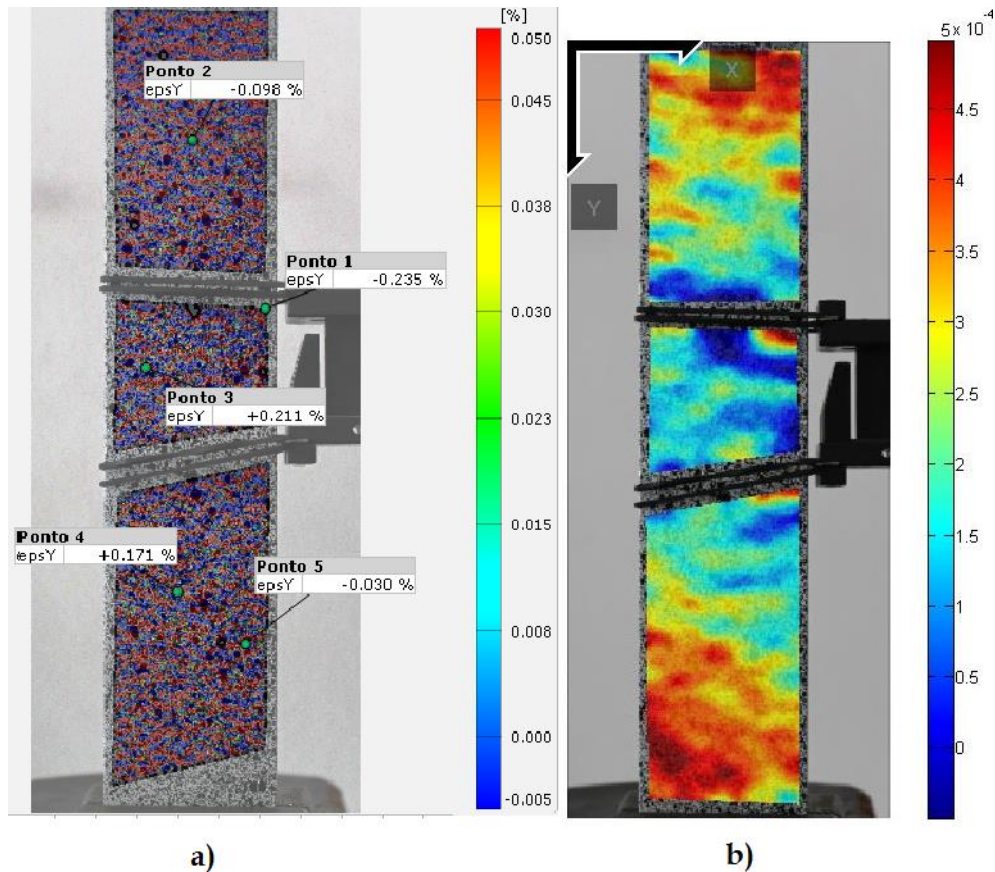
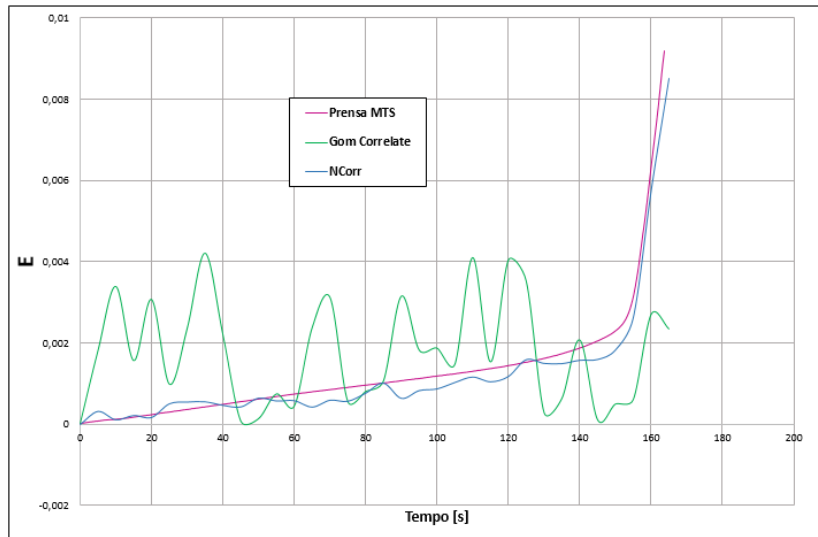


Figura 4.7 – Extensão de Lagrange no Gom Correlate [%] a); e no NCorr b) na mesma fase num dado ensaio

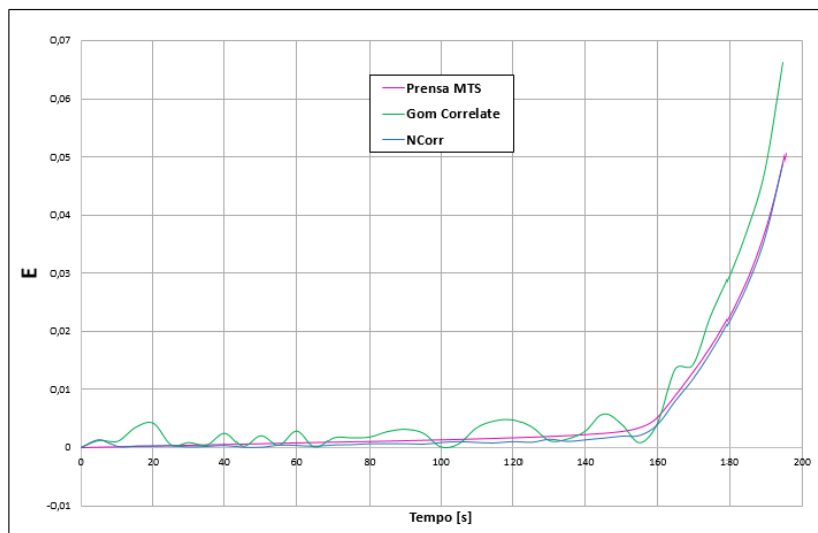
Veja-se agora o exemplo de dois ensaios em que foi utilizado o extensómetro da prensa MTS. Após o cálculo das extensões de Lagrange de todas as imagens do ensaio em ambos os *softwares*, obtiveram-se os valores dessa deformação no ponto mais próximo de uma das lâminas do extensómetro. No Gom Correlate é uma tarefa bastante simples pois é possível definir e fixar um ponto e saber o seu valor de extensão ao longo do ensaio, já no NCorr não é possível fixar um ponto sendo por isso um pouco difícil obter a extensão no mesmo ponto de imagem para imagem.

Após a realização de cálculos com os dados da prensa MTS para obter a extensão de Lagrange, obtiveram-se os seguintes gráficos $E(t)$ da prensa e dos dois programas para os dois ensaios (fig. 4.8). Como se pode observar pelos dois gráficos, o Gom Correlate apresenta severas dificuldades no cálculo de extensões, apresentando amplas flutuações de valores de E ao longo do ensaio, sendo que no ensaio b) essas flutuações foram menos exageradas. Já o NCorr obteve uma melhor aproximação da curva $E(t)$ em relação à curva da prensa MTS, com flutuações de valores muito mais ligeiras do que as do Gom Correlate. Na totalidade dos 5 ensaios realizados com utilização de extensómetro verificou-se que o NCorr é o *software* com melhor precisão para o cálculo de extensões.

Ao calcular o erro relativo entre os dados obtidos pelo extensómetro e os dados dos *softwares*, observou-se ainda nos pontos iniciais dos ensaios erros bastante elevados na ordem dos 2000% para o GC e de 400% para o NC. Ignorando os 5 pontos iniciais de cada ensaio, obteve-se para o ensaio da fig. 4.8 a) um erro de 149,5% para o GC e de 22,5% para o NC, e para o ensaio da fig. 4.8 b) um erro de 87,5% para o GC e de 39,6% para o NC.



a)



b)

Figura 4.8 – Gráficos da extensão de Lagrange por tempo em dois ensaios a) e b) com utilização do extensómetro

Porque ambos os programas apresentam valores muito díspares de um ponto da superfície do provete para outro e erros muito elevados na comparação de valores da deformação de Lagrange, e porque a prensa MTS possui um LVDT para medir com precisão os deslocamentos, tornou-se mais fiável e mais preciso, comparar os resultados através dos deslocamentos, sendo este também um método de certificação dos resultados válido.

Também se parte do princípio que a estrutura da prensa é de tal forma rígida que sofre quase nenhuma ou um valor insignificante de deformação ao tracionar um provete de alumínio com as dimensões utilizadas nestes ensaios.

4.5 Sincronização de dados

Durante os ensaios, a prensa MTS regista sensivelmente 4 entradas por segundo de parâmetros como: tempo, força, posição da garra, extensómetro e data (fig. 4.9). Para um ensaio de aproximadamente 5 minutos, a prensa regista cerca de 1200 dados por cada parâmetro, ao passo que através da análise das imagens capturadas, se obtêm no mínimo cerca de 60 dados (no caso de captura de imagem de 5 em 5 segundos), e no máximo 300 dados (no caso de captura de vídeo com extração de 1 *frame* por segundo).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Samples	1024					
2	Tiempo (s)	262,9752					
3	Tiempo	Fuerza	Posición	Extensóm	Auxiliar2M	Día	Hora
4	s	kN	mm	mm	v		
5	0	0,113818	0,002718	-0,13257	3,018891	#####	18:20:52
6	0,1501	0,117892	0,002917	-0,13253	3,028657	#####	18:20:53
7	0,4503	0,120521	0,002719	-0,13251	3,027131	#####	18:20:53
8	0,7505	0,125787	0,002706	-0,13253	3,026826	#####	18:20:53
9	0,9006	0,120897	0,002414	-0,13257	3,022858	#####	18:20:53

Figura 4.9 – Exemplo de registo de dados da prensa MTS

Apesar de no protocolo experimental ser indicado que a gravação de dados do ensaio e a captura de imagens devem ser iniciadas ao mesmo tempo, tal poderá não acontecer, e mesmo acontecendo existe normalmente um atraso entre o iniciar da ação e a escrita de dados pelo computador. Também para facilitar o tratamento e a compreensão dos dados obtidos criou-se uma função em Matlab que sincronizasse os dados obtidos pelos *softwares* DIC com os dados da prensa MTS e que simultaneamente calculasse o Erro Relativo Médio (ERM) entre vetores de deslocamento para avaliar os resultados obtidos pelos dois programas.

Esta função denomina-se “sincronizacao.m” (Anexo C) e recebe como *inputs* os ficheiros excel da prensa e dos dados dos deslocamentos obtidos pelos programas. Este último é preenchido pelo utilizador com os deslocamentos dos dois programas segundo um modelo pré-definido que também segue anexado.

Primeiramente, esta função extrai os dados da prensa MTS e interpola os valores de deslocamento da garra num vetor tempo estipulado pelo utilizador. Neste caso em particular, é criado um vetor tempo que inicia nos zero segundos e incrementa de 0,05 em 0,05 segundos até

à duração final do ensaio. Parte-se do princípio que o atraso entre o iniciar da ação e a escrita de dados não excede os 5 segundos e, por isso, a função compara vários alinhamentos de vetores de deslocamentos interpolados da prensa com os vetores de deslocamentos obtidos pelos *softwares*, durante $\frac{5}{0,05}$ iterações. Essa comparação é feita calculando o Erro Relativo Médio entre cada alinhamento de vetores de deslocamentos que é dado pela equação:

$$ERM = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - \hat{d}_i}{d_i} \right|}{n} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4.3})$$

em que d_i representa o deslocamento indicado pelo LVDT, \hat{d}_i representa o deslocamento medido pelos programas DIC (segundo a direção vertical) e n o número de medições. Caso o modelo seja alterado (como o incremento da interpolação, a frequência de aquisição de imagem entre outros parâmetros), o código deve ser modificado em conformidade.

Posteriormente, é feito um gráfico dos ERM em cada alinhamento, selecionando-se o erro mínimo e obtendo-se o tempo de sincronização que indica o melhor alinhamento entre os dados da prensa e os *softwares*.

Por fim, obtêm-se os gráficos deslocamento-tempo e erro relativo-tempo da prensa e de cada um dos *softwares* com o alinhamento de dados ótimo calculado anteriormente, sendo indicado o erro relativo médio mínimo e o tempo de sincronização de cada programa. As principais tarefas desta função estão sintetizadas no fluxograma da figura 4.10.

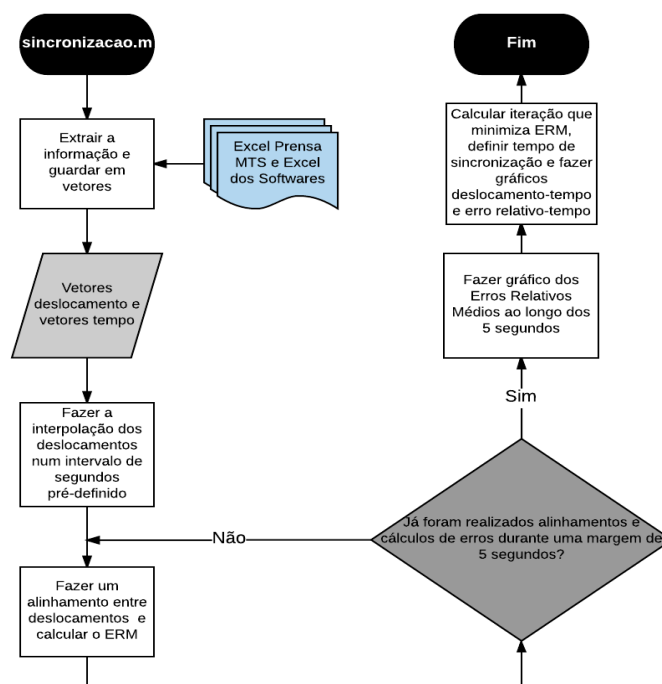


Figura 4.10 – Fluxograma sobre o funcionamento do código Matlab *sincronizacao.m*

Com esta função, pretende-se facilitar o procedimento experimental e o tratamento de resultados, obtendo a melhor aproximação possível. Os *outputs* desta função são os exemplificados nas figuras 4.11 e 4.12.

O gráfico da figura 4.11 representa o ERM de 100 alinhamentos de vetores de deslocamentos da prensa MTS com os dos programas. Permite determinar o alinhamento ideal e calcular o tempo de desfasamento entre o início da gravação de dados do ensaio e a captura de imagem – tempo de sincronização.

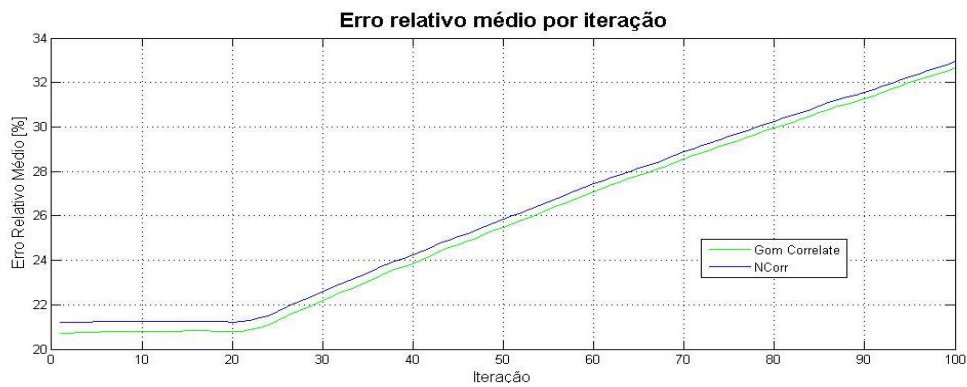


Figura 4.11 – Gráfico do ERM por iteração do Gom Correlate e do NCorr

Posteriormente, a função desenha o gráfico deslocamento-tempo da prensa MTS e dos dois programas e o gráfico erro relativo-tempo do Gom Correlate e do NCorr (fig. 4.12) que permite ver o erro relativo cometido em cada ponto do ensaio no alinhamento ótimo anteriormente calculado.

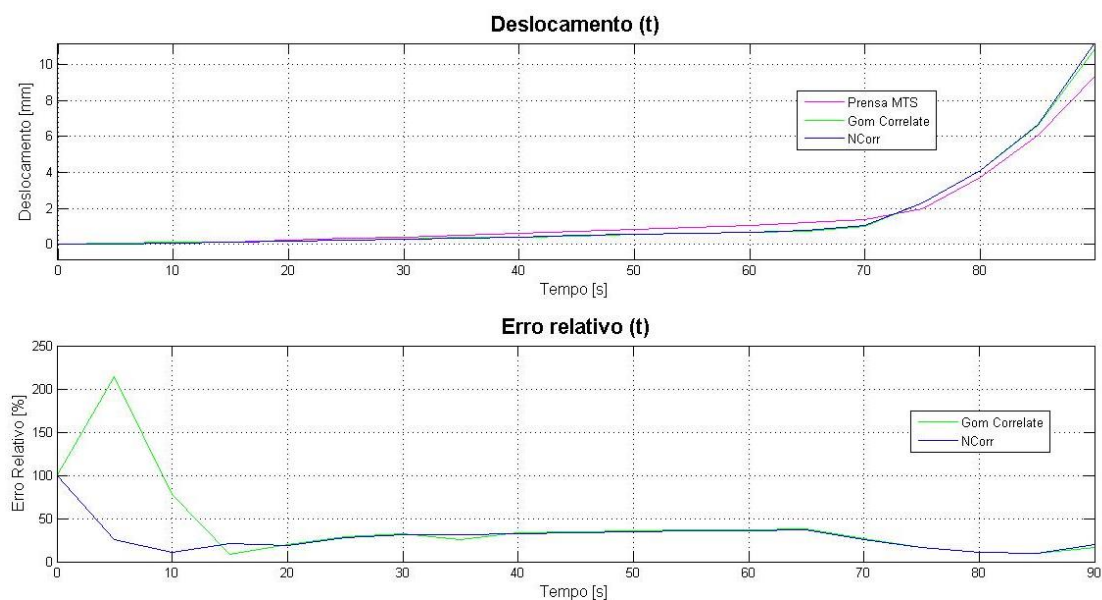


Figura 4.12 – Gráfico do deslocamento-tempo da prensa MTS e dos programas e gráfico do erro relativo-tempo dos programas

Quando os programas fazem a análise das imagens capturadas durante o ensaio, a primeira imagem é definida como sendo a imagem de referência, ou seja, cujo deslocamento é zero. No entanto, apesar de no ensaio experimental a posição inicial da garra da prensa MTS ser definida como zero, o valor registado na folha de cálculo é residual pelo que o erro cometido entre a prensa e os *softwares* será de 100%. Por essa razão e porque os programas de Correlação Digital de Imagem têm dificuldade em medir deslocamentos muito pequenos, os primeiros 3 pontos do ensaio são ignorados no cálculo do ERM de cada ensaio.

Apesar de estes 3 pontos iniciais não entrarem no cálculo do erro mínimo, são apresentados no gráfico do erro relativo (t) para mostrar a evolução do erro ao longo do ensaio. Como se pode observar pela figura 4.12, o erro relativo inicial é habitualmente bastante elevado, decrescendo progressivamente e estabilizando com ligeiras flutuações entre valores.

5 Discussão de Resultados

Neste capítulo faz-se a apresentação dos resultados obtidos na realização dos ensaios. Cada ensaio foi realizado sob diferentes condições experimentais como a utilização ou não de iluminação, a utilização de diferentes parâmetros dos ensaios como a carga e a velocidade de ensaio, a diferente frequência de captura de imagem, entre outros. Na tabela 5.1, encontram-se os parâmetros dos ensaios experimentais realizados. Como referido na secção 4.2, os ensaios são designados por uma letra, que indica se é um provete de secção 30x2 ou 25x2 mm, e por um número que indica a ordem pela qual o ensaio foi realizado. Alguns ensaios foram realizados com a utilização do extensómetro MTS, no entanto, por razões já indicadas na secção 4.4, os seus dados não foram utilizados neste estudo.

Tabela 5.1 – Condições experimentais dos ensaios

Ensaio	Duração do ensaio [s]	Velocidade do ensaio [kN/s]	Nº de imagens	Iluminação	Frequência de imagens [imagem/s]	P_{rotura} [kN]
A1	262	0,1	51	Não	1/5 (fotos)	12,72
A2	143	0,1	29	Sim	1/5 (fotos)	13,10
A3	163	0,05	45	Não	1/5 (fotos)	8,28
A4	196	0,05	43	Não	1/5 (fotos)	9,77
A5	193	0,05	97	Não	1/2 (filme)	9,63
A6	201	0,05	101	Sim	1/2 (filme)	9,95
A7	201	0,05	40	Sim	1/5 (fotos)	9,90
B1	106	0,1	22	Sim	1/5 (fotos)	8,96
B2	188	0,05	37	Sim	1/5 (fotos)	9,22
B3	195	0,05	38	Não	1/5 (fotos)	9,45

A tabela 5.2 resume todos os parâmetros mencionados no Capítulo 2, mas, apenas foi testada a influência sobre os resultados experimentais dos parâmetros que não se encontram rasurados.

Tabela 5.2 – Parâmetros internos e externos a analisar experimentalmente

<i>Parâmetro Internos</i>		<i>Parâmetros Externos</i>		
Função custo	Dimensões do Bloco	Resolução	Padrão estocástico	Iluminação
Dimensões da Região de Interesse	Função Interpoladora	Frequência de aquisição	Distorção das lentes	

5.1 Parâmetros Internos

Sendo que o objetivo desta dissertação não consistia no desenvolvimento de um algoritmo DIC, existem certos parâmetros que não podem ser avaliados, como é o caso da Função Custo e da Função Interpoladora.

- Dimensões do bloco:

Para avaliar este parâmetro foram escolhidos os ensaios A1 e A7, que foram os ensaios com melhores e piores resultados observados, respetivamente. O objetivo é determinar como a mudança do tamanho do bloco influencia o Erro Relativo Médio.

As imagens deste ensaio foram avaliadas nos dois programas com diferentes tamanhos de bloco. Os tamanhos de blocos testados não são iguais entre ensaios e entre programas. Entre ensaios não correspondem porque a distância entre a câmara e o provete não foi sempre a mesma e por isso as resoluções das superfícies do provete são diferentes. Em relação aos *softwares* não correspondem porque no Gom Correlate, o bloco é um quadrado em que é definida a sua aresta e, por outro lado, no Ncorr, o bloco é definido como sendo um círculo em que é definido o raio.

Para que a representação dos resultados seja feita de forma o mais clara possível, os tamanhos dos blocos para cada ensaio e *software* estão representados na tabela 5.3 em que estas dimensões vão ser denominadas por bloco pequeno, médio e grande.

Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados nas análises dos ensaios A1 e A7

		Ensaio A1		Ensaio A7	
		GC	NC	GC	NC
Tamanho de bloco [pixels]	Pequeno	9x9	R13	9x9	R20
	Médio	13x13	R23	13x13	R23
	Grande	19x19	R33	23x23	R45

No gráfico da figura 5.1 podemos observar as variações do erro relativo médio quando se varia o tamanho do bloco.

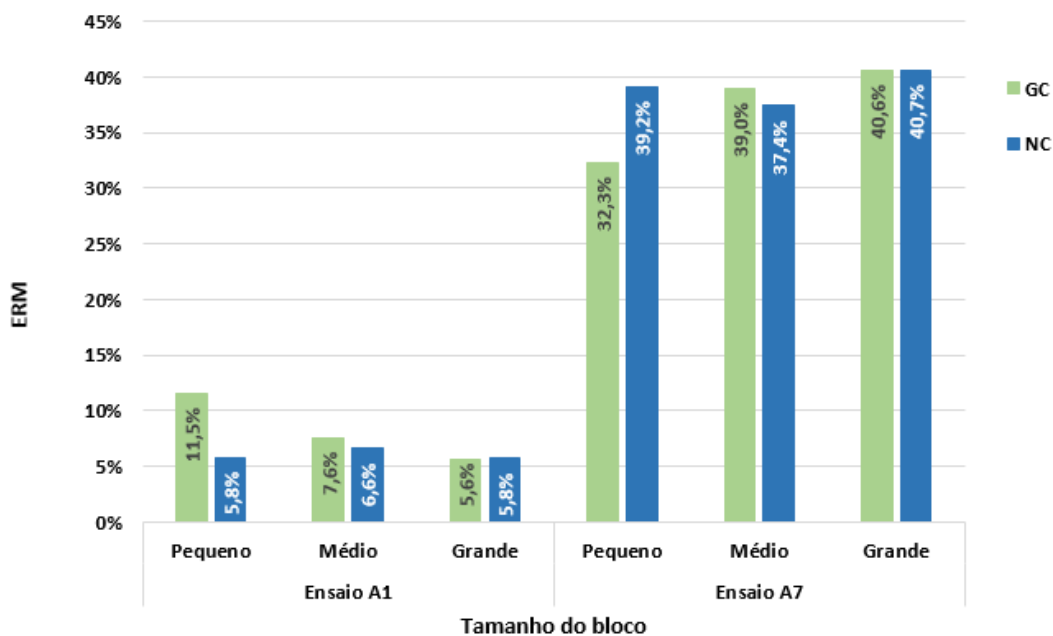


Figura 5.1 – Influência do tamanho do bloco no ERM dos ensaios A1 e A7

Como referido anteriormente, o aumento das dimensões do bloco conduz a melhores resultados, e, analisando os resultados obtidos para o ensaio A1 podemos concluir que as melhores dimensões para o bloco são 19x19 e R33 pixels para o Gom Correlate e NCorr respectivamente, corroborando esta afirmação.

No entanto, esta afirmação nem sempre se verifica, até porque se o tamanho do bloco for excessivamente grande, a Região de Interesse poderá ser demasiado pequena para seguir o seu deslocamento, e, se for excessivamente pequeno a sua matriz de intensidades poderá ser

facilmente confundida. No caso do ensaio A7 os melhores resultados foram obtidos para 9x9 e R23 pixels, tamanhos pequeno e médio do Gom Correlate e NCorr, respectivamente.

Por exemplo, no ensaio A7, o ERM do NCorr decresce de 39,1% para 37,4% quando o raio do bloco passa de 20 para 23 pixels, e, no Gom Correlate sobe de 32,3% para 39,0% aumentando apenas 4 pixels de aresta do bloco, e sobe apenas 1,7% quando a aresta do bloco aumenta 10 pixels. Portanto a escolha deste parâmetro é muito importante e influencia bastante o resultado dos ensaios, mas também é um aspecto bastante relativo pois o tamanho ideal vai depender também da resolução utilizada e/ou do padrão do provete (aspecto que irá ser analisado mais à frente).

Neste aspecto, o NCorr é muito mais intuitivo na escolha do raio do bloco, como se pode observar na figura 5.2. É mais fácil perceber se o tamanho do bloco, ainda que seja o mesmo em duas imagens distintas, é o indicado para a imagem a analisar, não sendo nem excessivamente pequeno ou excessivamente grande. O NCorr também sugere sempre um tamanho de bloco que julgue que seja o indicado e avisa se o bloco for demasiado grande para a Região de Interesse.

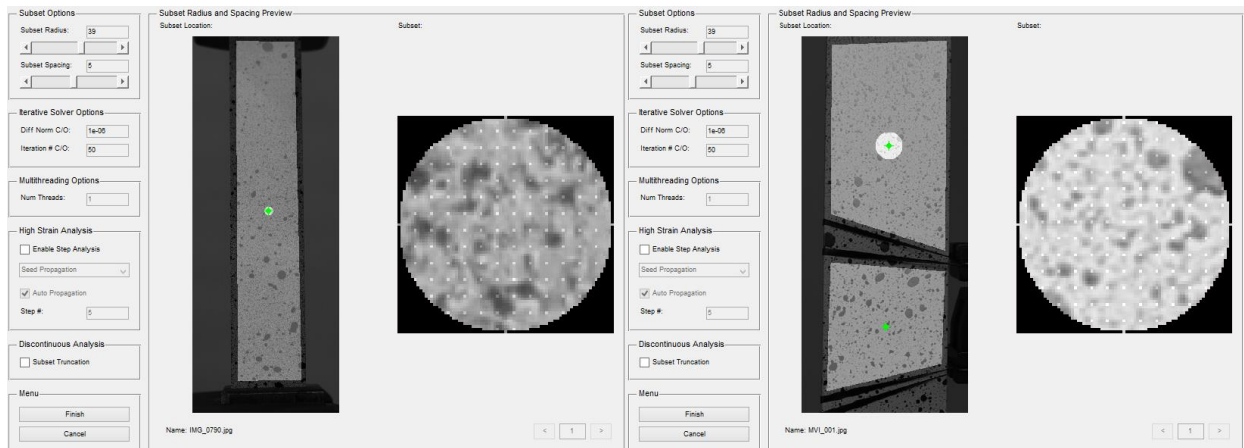


Figura 5.2 – Comparação das dimensões de blocos iguais em duas imagens com resoluções diferentes

Observando a figura 5.3, que representa os gráficos deslocamento-tempo e erro relativo-tempo de cada um dos ensaios nas condições ótimas aqui analisadas, podemos ver que o máximo dos deslocamentos medidos no ensaio A1 foi cerca de 12 mm, enquanto que no ensaio A7 não ultrapassou os 2,5 mm. Transpondo estes valores para pixels, temos 266 e 79 pixels respetivamente, pelo que não será muito lógico utilizar um bloco de 9x9 pixels para analisar deformações da ordem dos 266 pixels assim como blocos de 23x23 pixels para analisar deformações de 79 pixels, o que significa que o grau de deformação envolvido também tem influência na escolha deste parâmetro. Também é possível observar que o erro relativo é

extremamente elevado nos pontos iniciais do ensaio, diminuindo e estabilizando posteriormente, mostrando a dificuldade que estes *softwares* têm em medir com precisão deslocamentos demasiado pequenos.

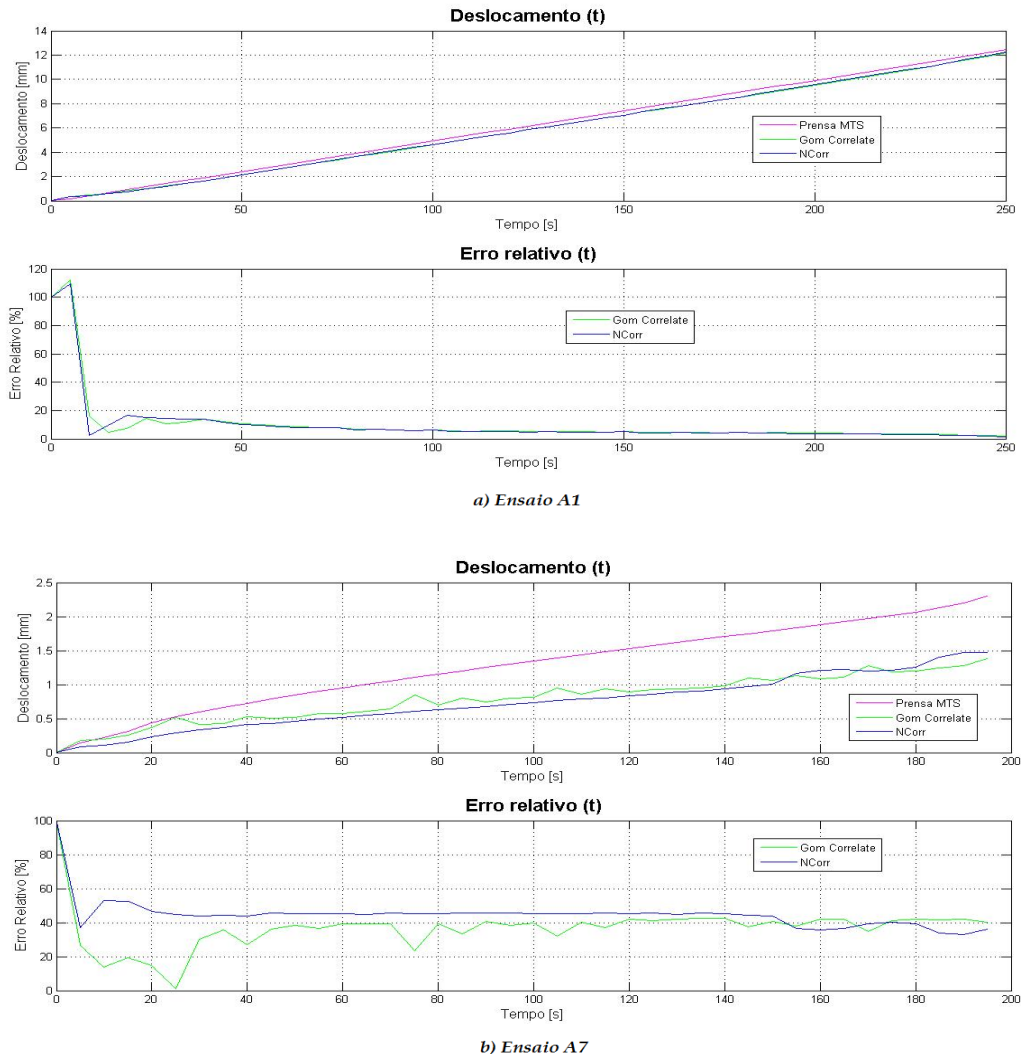


Figura 5.3 – Gráficos deslocamento-tempo e erro relativo-tempo dos ensaios A1 (bloco grande) e A7 (bloco pequeno)

Em relação ao padrão não existem diferenças significativas a registar entre os dois provetes, pelo que este parâmetro será analisado mais à frente.

- Região de Interesse:

Este parâmetro, como referido anteriormente, é importante porque se a Região de Interesse for muito pequena, o algoritmo poderá não conseguir localizar o seu deslocamento para a imagem seguinte por já não estar contido dentro desta.

Para testar este parâmetro, e porque ambos os programas não permitem definir as

dimensões da Região de Interesse, mas sim desenhá-la, o provete B1 vai ser analisado desenhando duas Regiões de Interesse aproximadamente iguais. A primeira Região de Interesse será sensivelmente do tamanho da superfície do provete capturada pela câmara, e a segunda Região de Interesse será exageradamente mais pequena para se poderem verificar as diferenças no cálculo do ERM. As Regiões de Interesse utilizadas, encontram-se representadas na figura 5.4.

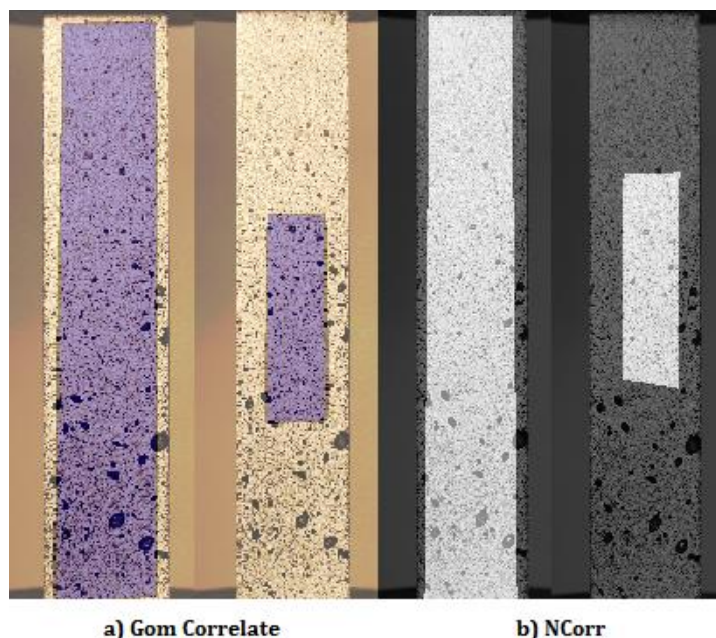


Figura 5.4 – Diferentes dimensões da Região de Interesse no provete B1

Como é possível observar pela tabela, ao diminuir cerca de 20% da largura da RDI e 65% da sua altura, os erros aumentam cerca de 10%, um valor considerável para a diminuição da precisão no método. Os tempos de sincronização em ambos os *softwares* permaneceram inalterados com a diminuição da RDI com o valor de 0,05 segundos.

Tabela 5.4 – Influência das dimensões da Região de Interesse no ERM

	Dimensões da Região de Interesse ² [pixels]	ERM [%]	
		Gom Correlate	NCorr
RDI de grandes dimensões	77x551	21,3	21.0
RDI de pequenas dimensões	57x195	31.4	32.9

² Estas dimensões foram obtidas pelo Gom Correlate, as dimensões obtidas pelo NCorr são sensivelmente semelhantes e não foram calculadas porque o NCorr coloca as imagens noutra escala durante a simulação.

5.2 Parâmetros Externos

Da mesma forma que nos parâmetros internos, alguns parâmetros externos não podem ser testados de modo a perceber como estes influenciam os resultados. A resolução da câmara não foi um parâmetro avaliado porque, pelo provete ser de pequenas dimensões, tanto as imagens capturadas, como os vídeos gravados foram obtidos com a máxima resolução. E também devido à facilidade do *setup* do ensaio de tração, foi possível ter a câmara a uma boa distância do provete. No entanto, a perda de qualidade de uma fotografia para uma *frame* de um vídeo, é um assunto que vai ser discutido relativamente ao parâmetro de frequência de aquisição. A distorção de imagem também é um parâmetro que não será aqui discutido, por não se ter determinado o valor de distorção radial das lentes da câmara utilizada.

- Padrão estocástico:

Já se inferiu que esta é uma propriedade muito importante na preparação dos provetes, e está intimamente ligada ao tamanho do bloco conforme analisado por Lecompte et al. [8]. Uma das conclusões retiradas neste trabalho [8], embora não deva ser levada de forma absoluta, relaciona o tamanho do bloco com o diâmetro médio do grão do padrão aleatório como demonstra a tabela 5.5:

Tabela 5.5 – Dimensões de bloco aconselhadas consoante o diâmetro de grão do padrão superficial [8]

Tamanho do bloco [pixels]	Diâmetro médio do grão [pixels]
Pequeno – 13x13	3
Médio – 23x23	10
Grande – 33x33	> 10

Como se observou na análise dos parâmetros internos, nem sempre estes valores correspondem ao tamanho ideal do bloco e concluiu-se de uma forma bastante geral, que os tamanhos devem ser considerados analisando outras propriedades como a deformação a que o provete está sujeito, a resolução da imagem, o tamanho da Região de Interesse e o padrão estocástico.

Tentou-se então isolar todos estes parâmetros e comparar os ensaios A3 e A4. Por terem sido realizados consecutivamente apresentam resoluções e condições semelhantes. Pretende-se agora testar os mesmos valores de tamanho de bloco entre ensaios, mas combinando-os com padrões estocásticos diferentes. Embora essa diferença não seja muito acentuada, pode observar-

se pela figura 5.5 que o provete A3 tem um padrão mais denso e com menores diâmetros de grão, embora os diâmetros não tenham sido medidos com exatidão.

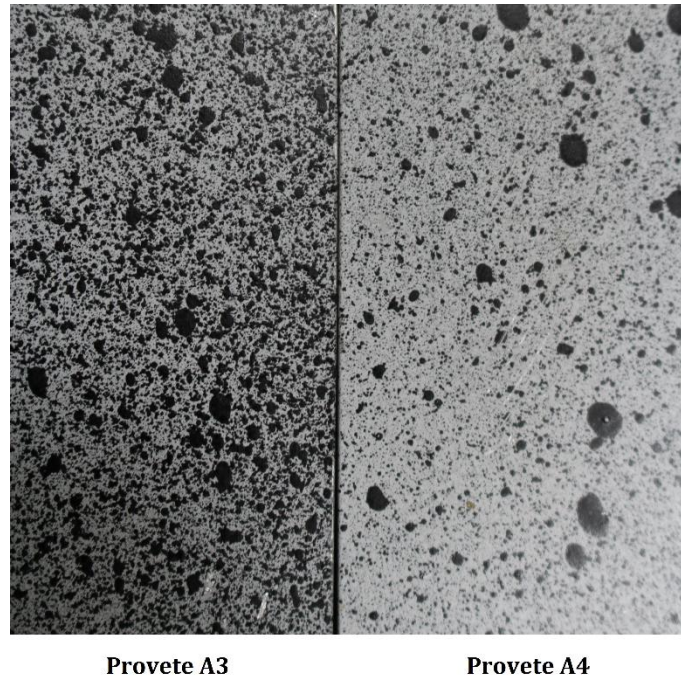


Figura 5.5 – Padrões estocásticos dos provetes A3 e A4

Os tamanhos de blocos analisados em cada um dos ensaios foram os que estão tabelados em 5.6. Mais uma vez, os tamanhos dos blocos foram denominados por pequeno, médio e grande por não serem tamanhos idênticos entre *softwares*.

Tabela 5.6 – Condições de análise para testar a influência do padrão estocástico

	Dimensões do bloco [pixels]	
	GC	NC
Pequeno	19x19	R23
Médio	23x23	R31
Grande	33x33	R45

Os resultados obtidos podem ser observados na figura 5.6. Analisando esta figura, os erros obtidos pelo NCorr parecem comprovar o estudo realizado por Lecompte et al. [8], uma vez que para padrões com menor diâmetro de grão (A3), o melhor tamanho de bloco foi o tamanho médio, e para o padrão de maior diâmetro de grão (A4) foi o tamanho grande. Já o Gom Correlate, indica o oposto, mas com uma diferença entre erros muito pequena no ensaio do provete A4, o que pode ser uma indicação de que o tamanho ideal da aresta do bloco se encontra entre os 23x23 e os 33x33 pixels.

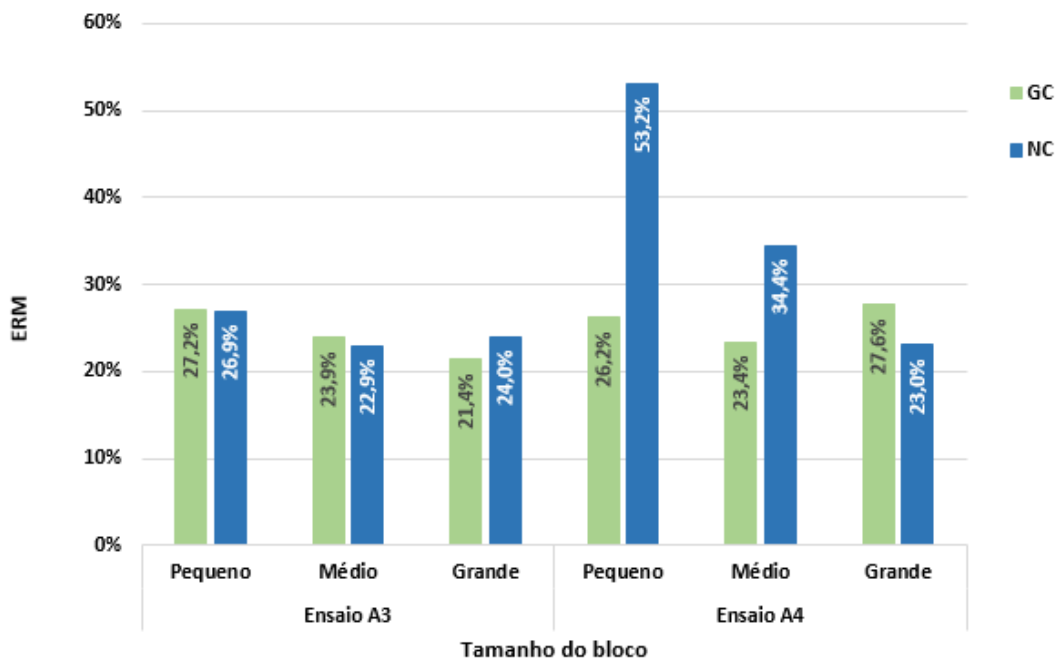


Figura 5.6 – Influência do tamanho de bloco com diferentes padrões superficiais

Também se observa que poderá ter ocorrido um fenômeno de desconexão na análise do NCorr com o tamanho de bloco pequeno (R23 pixels), sendo mais uma indicação de que o raio do bloco é demasiado pequeno.

Contudo, como se determinou na análise do tamanho de bloco, este parâmetro é altamente influenciado por outros fatores tal como a deformação a que o provete está sujeito e, por isso, torna-se difícil isolar todas as outras propriedades.

- Iluminação:

A iluminação interfere nos resultados dos métodos de Correlação Digital de Imagem na medida em que, devido à sensibilidade do sensor da câmara, os níveis de intensidade dos pixels podem alterar-se e por essa razão a iluminação natural não é aconselhada.

Nos ensaios realizados, foram utilizados dois focos de luz de cor amarelada para iluminar os provetes, e as diferenças entre um provete iluminado e um provete não iluminado podem ser observadas na figura 5.7. Como se pode observar pela figura, a utilização deste tipo de iluminação altera fortemente a tonalidade da imagem por ser uma luz bastante forte de cor amarela. O contraste da imagem também sofreu modificações, pelo que é preferível a utilização de uma luz de cor branca para que ilumine de forma mais natural possível o provete, evitando distorções na imagem.

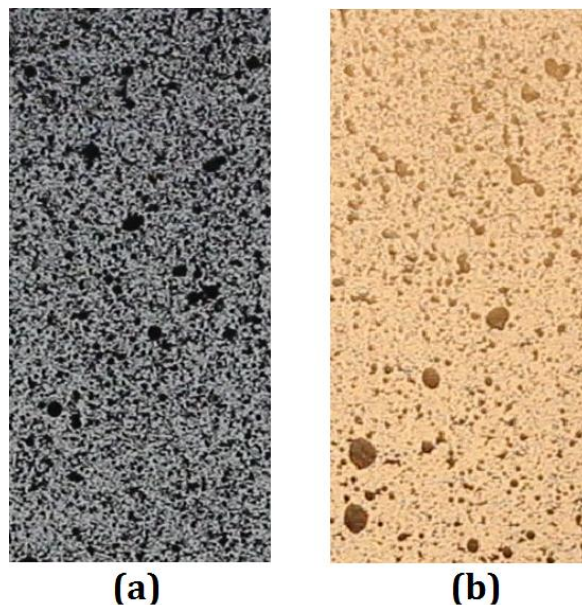


Figura 5.7 – Provete não iluminado (a); provete iluminado (b)

Para testar este parâmetro são comparados os provetes: A1 com B1; A3 com B2; A5 com A6 (tab. 5.7). Estas três combinações foram escolhidas, porque em cada combinação, as condições do ensaio são semelhantes, à exceção da utilização de iluminação.

Na tabela 5.7 estão os tamanhos de blocos usados para cada ensaio e, como se pode verificar, estes nem sempre são iguais entre combinações. Ora, estas condições de análise não parecem ser muito corretas, uma vez que o parâmetro que agora se pretende avaliar é a utilização de iluminação no ensaio experimental. No entanto, isto deve-se ao facto das resoluções das imagens não serem todas iguais, e por essa razão foi necessário adaptar o tamanho do bloco da análise ao tipo de imagem. Mas também por essa razão, não se garante a total independência destes resultados relativamente à utilização de iluminação.

Tabela 5.7 – Dimensões do bloco em cada ensaio

		Iluminação					
		Não A1	Sim B1	Não A3	Sim B2	Não A5	Sim A6
Tamanho do bloco [pixels]	GC	19x19	19x19	41x41	19x19	19x19	19x19
	NC	R41	R60	R50	R40	R15	R10

Como se pode interpretar pela figura 5.8, em todas as combinações de ensaios com condições experimentais semelhantes, os resultados pioram com a utilização deste tipo de iluminação. Embora os erros das medições tenham muitas origens, como a colocação da câmara e a sua estabilidade, a perpendicularidade da linha de visão da câmara com o plano a observar, os parâmetros introduzidos durante a análise, entre outros, é possível verificar, de uma forma geral, que a utilização deste tipo de iluminação não favoreceu o método experimental.

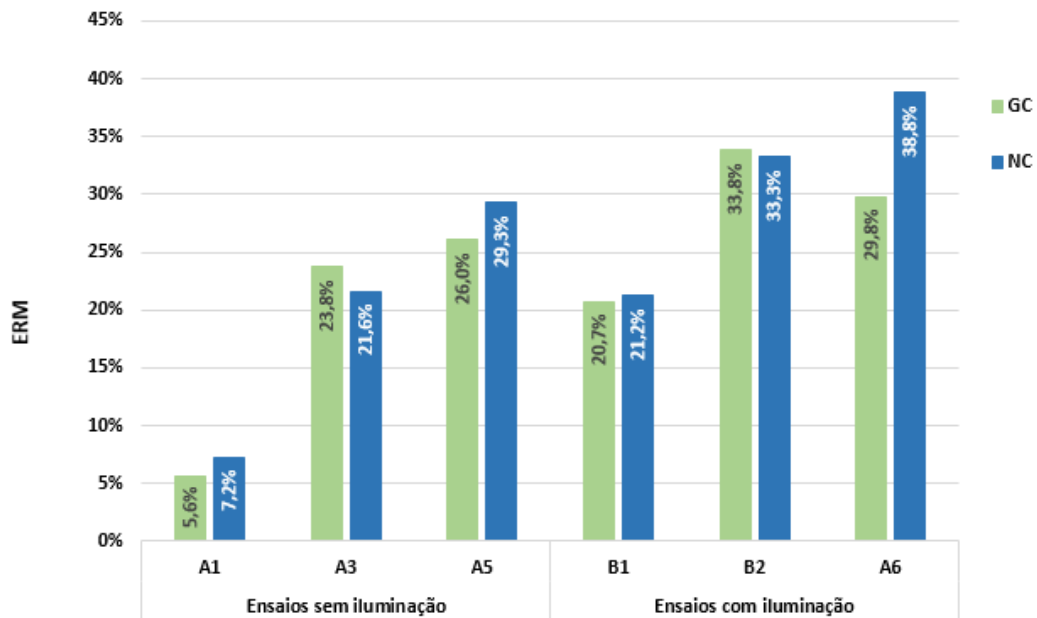


Figura 5.8 – Influência da utilização de iluminação no ERM obtido nos ensaios experimentais

- Frequência de aquisição:

A máquina fotográfica utilizada nestes ensaios só permite tirar fotografias no mínimo de 5 em 5 segundos, mas, se por algum motivo se quiser obter imagens com uma maior frequência, é possível gravar o ensaio e depois extrair as *frames* com um determinado intervalo entre imagens

com uma conseqüente perda de resolução.

Nos ensaios experimentais realizados, recorreu-se a estas duas vertentes, alguns ensaios foram fotografados de 5 em 5 segundos e outros foram filmados extraindo-se posteriormente *frames* de 2 em 2 segundos recorrendo ao *software* gratuito *DVDVideoSoft Free Studio*.

A avaliação deste parâmetro incide principalmente em determinar se o erro é necessariamente afetado pela perda de resolução da imagem e pelo aumento do número de imagens a analisar. No entanto, à semelhança da análise de outros parâmetros, não é possível isolar perfeitamente este parâmetro, pois este é afetado indiretamente pelas condições experimentais e pelas análises efetuadas pelos *softwares*.

Assim sendo, podemos analisar dois ensaios gravados de formas diferentes, mas com condições experimentais semelhantes apenas para provar que o erro não vai necessariamente aumentar por se diminuir a qualidade da imagem. Também é interessante perceber como é afetado o tempo de análise com o aumento do número de imagens. Tenha-se como exemplo os ensaios A3 e A6.

Na tabela 5.8 encontram-se os erros obtidos pelas análises às fotografias dos ensaios. Como se pode perceber pela tabela, os erros aumentam cerca de 5% de um ensaio para outro quando se utiliza captura de vídeo em vez da captura de imagem. Isto poderá dever-se à perda de qualidade de imagem, no entanto também poderá estar relacionado com o facto da frequência de aquisição de imagens ser demasiado elevada para o tipo de ensaio realizado. Isto é, para o tipo de deformação a que o provete de alumínio está sujeito, a análise de *frames* de 2 em 2 segundos poderá originar problemas de descorrelação, uma vez que o movimento de blocos entre frames poderá ser tão reduzido que os *softwares* têm dificuldades em medi-los.

Tabela 5.8 – ERM obtido nos ensaios A3 e A5

	Ensaio A3 [Fotografias]		Ensaio A5 [Filmagem]	
	GC	NC	GC	NC
ERM [%]	21,4	22,9	26,0	29,3

Em relação ao tempo de análise, no *software* Gom Correlate não existem alterações significativas, mas no NCorr, a análise de 45 fotografias demorou cerca de três horas ao passo que para analisar 97 *frames* demorou 25 minutos. Esta diferença significativa deve-se à diferença

de resolução, as fotografias tinham uma resolução de 5184x3456 pixels e as *frames* uma resolução de 1920x1080 pixels. Por isso, para um utilizador do NCorr que vá realizar ensaios a provetes de dimensões e condições semelhantes, poderá ser preferível a filmagem do ensaio.

5.3 Resultados Globais

Foi feita também uma breve comparação entre os três modos de análise do Gom Correlate: padrão, mais pontos e alta precisão. Nesta comparação utilizaram-se os ensaios B2, A6 e A7 e manteve-se sempre o mesmo tamanho de bloco: 19x19 pixels.

Como se pode observar pela fig. 5.9, o modo de análise que obtém menor erro é o de alta precisão seguido do de mais pontos e do padrão. No entanto, excetuando o ensaio A7 onde houve uma diminuição de erro de 1,6% entre o modo padrão e o modo de alta precisão, a diminuição dos erros entre modos é insignificante, não existindo assim uma grande influência nem preferência no modo de análise do Gom Correlate.

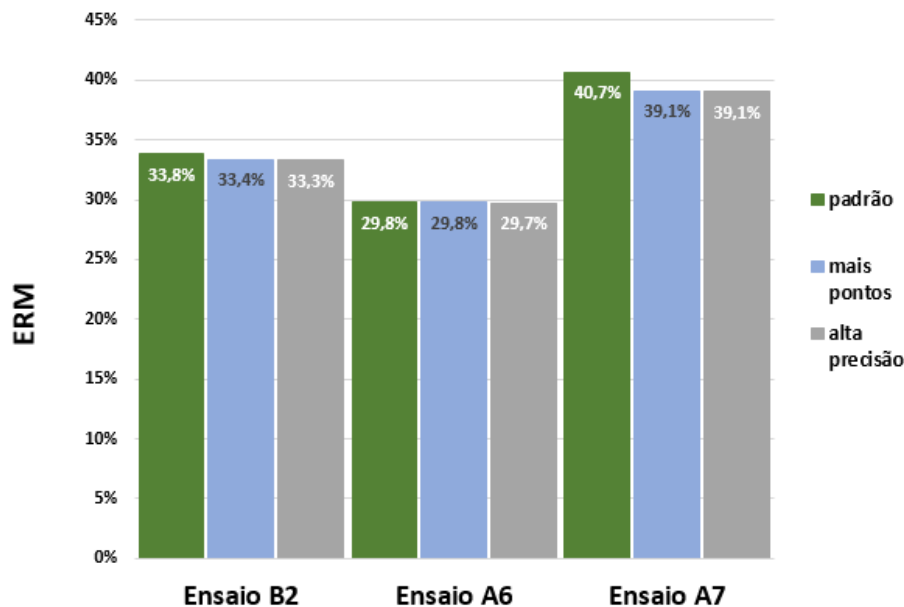


Figura 5.9 – Comparação dos três modos de análise do Gom Correlate

Apresentam-se agora os resultados globais obtidos em todos os ensaios realizados. Na tabela 5.9 encontram-se as dimensões dos blocos usados nos dois *softwares* para os resultados obtidos com menor erro em todos os ensaios, e na figura 5.10 a representação desses mesmos erros.

Tabela 5.9 – Dimensões de bloco em cada *software* para todos os ensaios experimentais realizados

Dimensões dos blocos [pixels]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3
	GC	19x19	19x19	33x33	23x23	19x19	19x19	9x9	19x19	19x19	15x15
NC	R33	R60	R31	R45	R15	R10	R23	R41	R40	R65

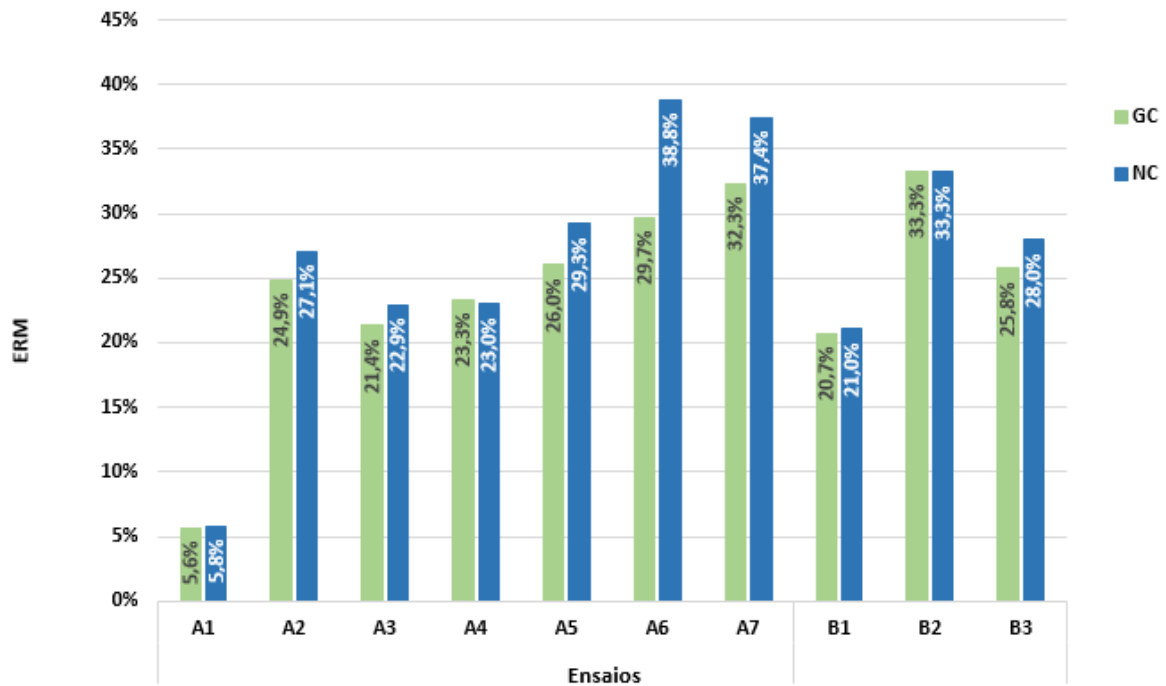


Figura 5.10 – ERM obtido em cada um dos ensaios experimentais realizados

De forma geral, as curvas de deslocamento-tempo obtidas pelos *softwares* oferecem uma boa aproximação às obtidas pela prensa MTS. No entanto, tanto os pontos iniciais como os finais destas curvas contribuem significativamente para o erro obtido. Para valores de deslocamento muito pequenos, os programas têm alguma dificuldade em medi-los com precisão e, por essa razão podem ocorrer fenômenos de descorrelação. Veja-se agora o exemplo dos ensaios B3 e A5 que tiveram um ERM de 26,9% e 27,7% entre os dois programas, respetivamente. Como se pode observar pelos gráficos deslocamento tempo e erro relativo-tempo (figs. 5.11 e 5.12), os pontos iniciais contribuem significativamente para o erro cometido ainda que, se ignorem os 3 primeiros pontos no cálculo do erro.

Nos gráficos do ensaio B3 (fig. 5.11) podemos observar que a partir dos 40 segundos de ensaio o erro relativo estabiliza nos 40%, um valor elevado, mas que decresce cerca de 20%

quando o deslocamento ultrapassa os 2 mm, assinalando a dificuldade que estes programas apresentam em medir deslocamentos de pequena grandeza. Apesar das causas acima mencionadas que dão origem ao ERM de 26,9%, os dois *softwares* apresentam uma curva deslocamento-tempo com uma boa aproximação à curva da prensa MTS.

Nos gráficos do ensaio A5 (fig. 5.12), tanto na análise do Gom Correlate como na do NCorr aparenta ter ocorrido um fenómeno de decorrelação nos pontos iniciais (no caso do Gom Correlate) e nos pontos finais (no caso do NCorr). Estas flutuações nos valores do deslocamento contribuiram para o aumento do ERM, como se pode verificar no gráfico do erro relativo, e podem ser explicadas mais uma vez pela dificuldade em medir pequenos deslocamentos no caso dos pontos iniciais. No caso dos pontos finais, em que é possível observar um afastamento da curva do Gom Correlate em relação à curva da prensa e um afastamento da curva do NCorr que possivelmente resultou numa perda de correspondência, pode dever-se a alguma fonte externa de instabilidade no procedimento experimental como por exemplo o escorregamento entre o provete e a garra da prensa.

Como foi referido anteriormente, uma das garras da prensa MTS não fixa corretamente os provetes durante o procedimento experimental causando vários episódios de escorregamento. Exemplo disso são também os provetes B3 e A5 que partiram ambos na mesma garra.

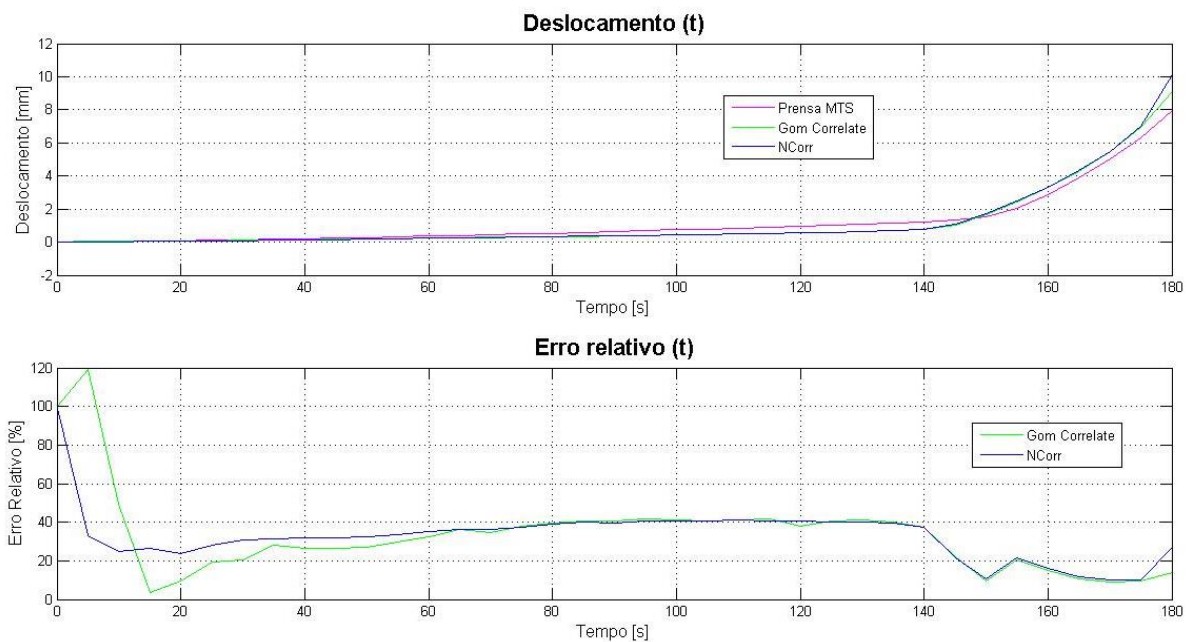


Figura 5.11 - Gráficos deslocamento (t) e erro relativo (t) do ensaio B3 com bloco de 15x15 (GC) e R65 (NC) pixels

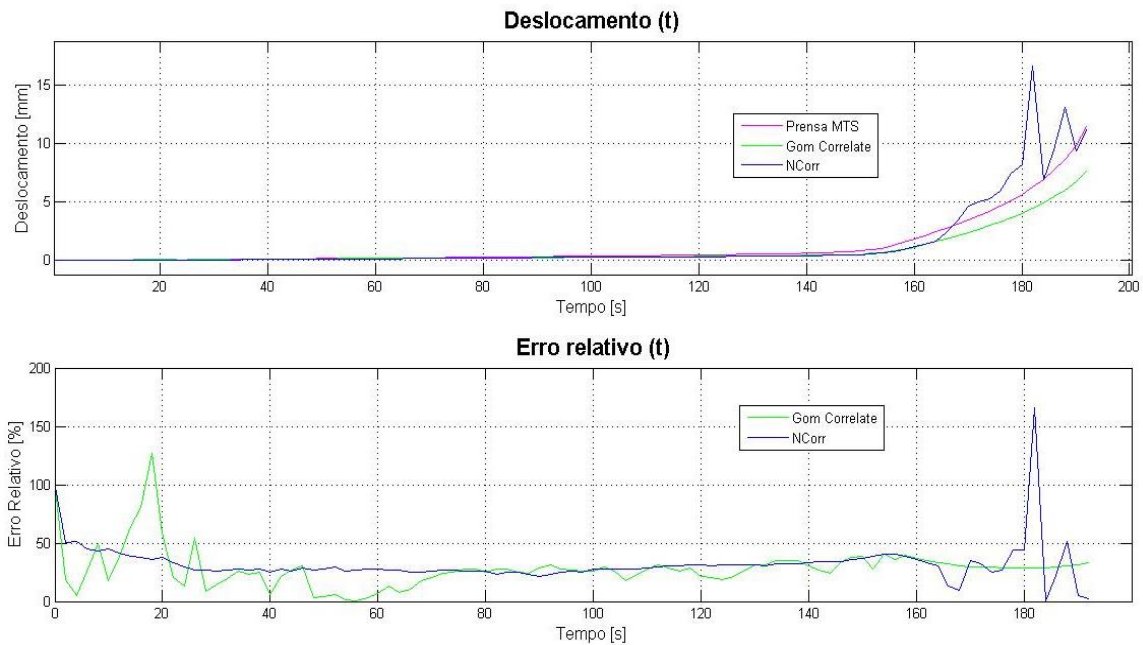


Figura 5.12 – Gráficos deslocamento (t) e erro relativo (t) do ensaio A5 com bloco de 19x19 (GC) e R15 (NC) pixels

Para perceber a forma como a grandeza dos deslocamentos influencia os resultados obtidos, avaliaram-se todos os pontos dos 10 ensaios de acordo com os seguintes três intervalos de deslocamentos: $[0,0; 1,0[$, $[1,0; 4,0[$ e $[4,0; 14,0]$ mm. Nos gráficos da figura 5.13 é possível observar o erro relativo dos pontos de deslocamento medidos pelo LVDT da prensa MTS.

Tal como no cálculo do ERM final de cada ensaio, os três primeiros pontos de deslocamento também foram ignorados e não figuram nos gráficos dos erros relativos no intervalo de deslocamentos $[0,0; 1,0[$ mm. Neste intervalo de deslocamentos e também no intervalo de $[1,0; 4,0[$ mm é possível verificar que as flutuações dos valores dos erros relativos ocorrem com maior frequência e com maior amplitude do que no intervalo de $[4,0; 14,0]$ mm (excetuando o fenómeno de descorrelação ocorrido no NCorr no ensaio A5), confirmando assim, a dificuldade que estes programas têm na medição de deslocamentos pequenos nomeadamente até aos 2,5 mm.

Os Erros Relativos Médios resultantes da avaliação dos 452 pontos de deslocamento dos 10 ensaios segundo cada intervalo de deslocamentos encontram-se tabelados em 5.10. Os erros observados nos dois primeiros intervalos decrescem para cerca de metade no terceiro intervalo quando se aumenta a grandeza dos deslocamentos e, em geral, o Gom Correlate calcula os deslocamentos em todos os intervalos com melhor precisão do que o NCorr.

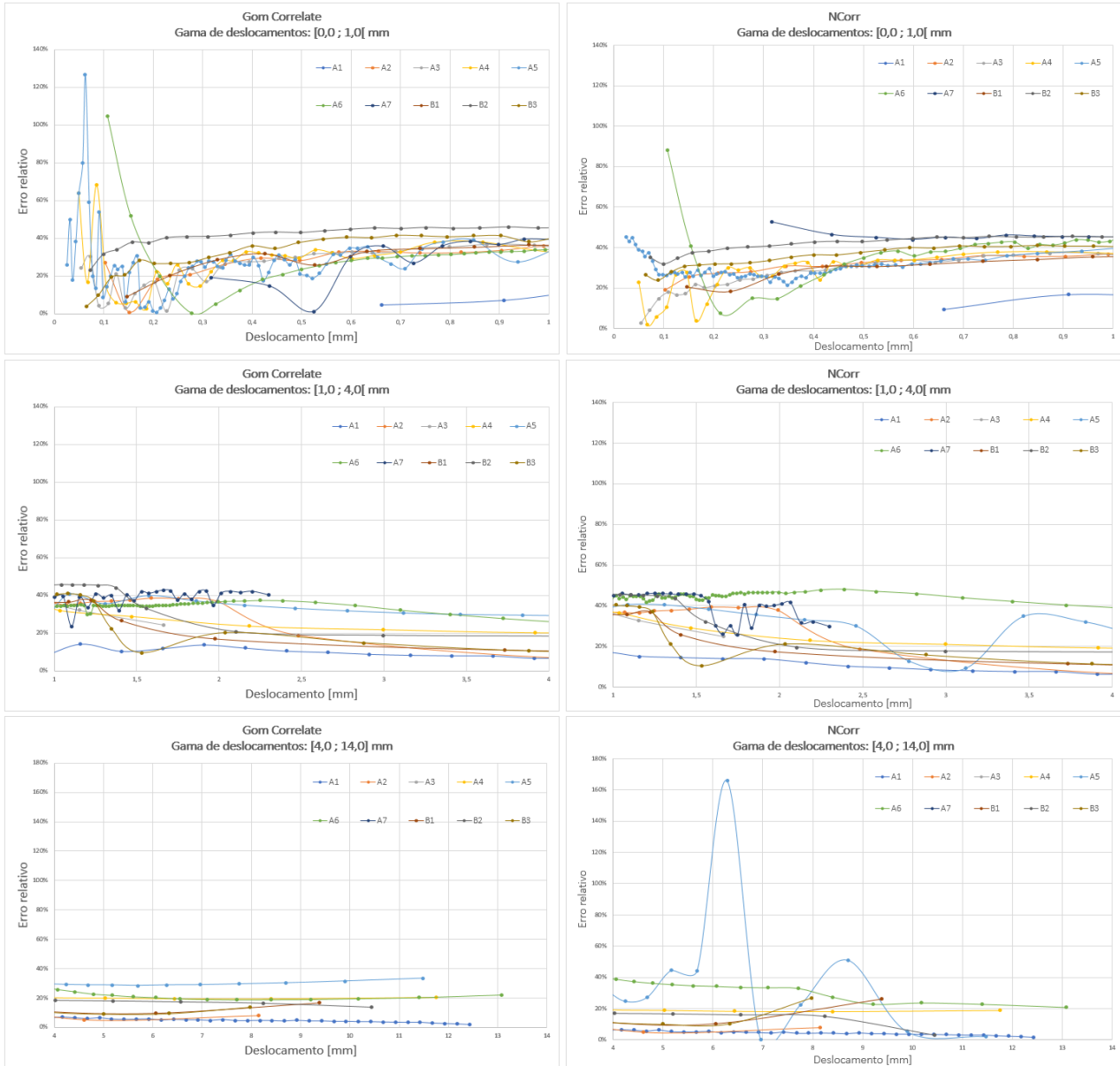


Figura 5.13 – Erros relativos obtidos em cada ponto dos 10 ensaios nos intervalos de deslocamento [0,0; 1,0[, [1,0; 4,0[e [4,0;14,0] mm para ambos os *softwares*.

Tabela 5.10 – ERM calculado nos 452 pontos dos 10 ensaios segundo as intervalos de deslocamento [0,0; 1,0[, [1,0;4,0[e [4,0;14,0] mm

		Erro Relativo Médio [%]		Nº de pontos observados
		GC	NC	
Intervalos de deslocamentos	[0,0; 1,0[mm	28,5	32,0	234
	[1,0; 4,0[mm	32,4	36,3	144
	[4,0; 14,0] mm	13,2	16,3	74

Apesar do Gom Correlate ser um programa mais preciso no cálculo de deslocamentos, ambos os *softwares* obtêm resultados semelhantes, sendo que em alguns ensaios os erros são mais elevados talvez devido a uma escolha desadequada de parâmetros como o tamanho de bloco. Ambos os programas possuem bastantes funcionalidades e obtiveram, entre eles, curvas deslocamento-tempo semelhantes ao longo dos ensaios, contudo o tempo de análise do NCorr é uma grande desvantagem deste programa, sendo por várias vezes preferível a utilização do Gom Correlate.

O ensaio que obteve os melhores resultados, distanciando-se largamente dos restantes foi o ensaio A1. Na figura 5.14 pode ser observada a fratura do provete A1 (fig. 5.14a) e a deformação de Lagrange segundo a direção vertical em ambos os programas de correlação (fig. 5.14b e fig. 5.14c). Os gráficos do ERM obtidos pelo Gom Correlate e pelo NCorr e o gráfico deslocamento-tempo deste ensaio podem ser observados na figura 5.15.

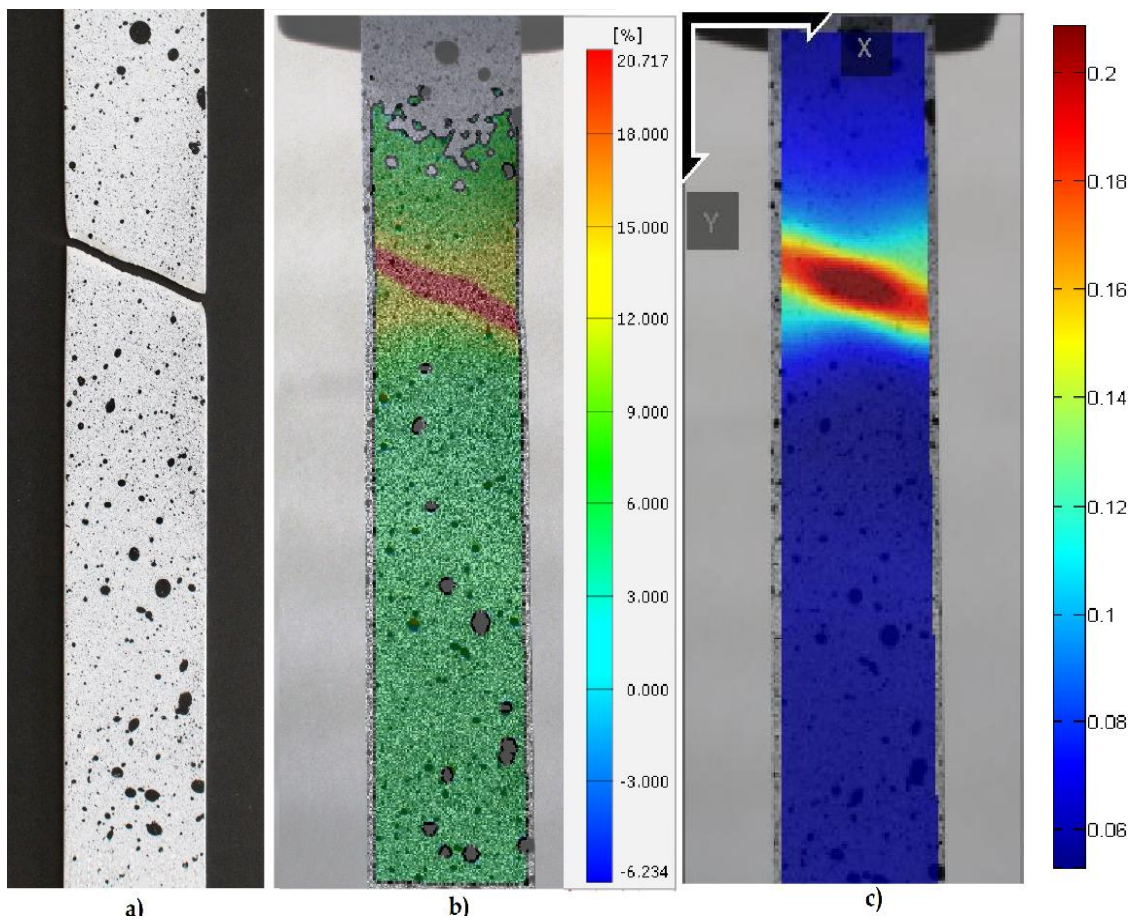


Figura 5.14 - Fratura no provete A1 a); Deformação de Lagrange do provete A1 no Gom Correlate b); e no NCorr c)

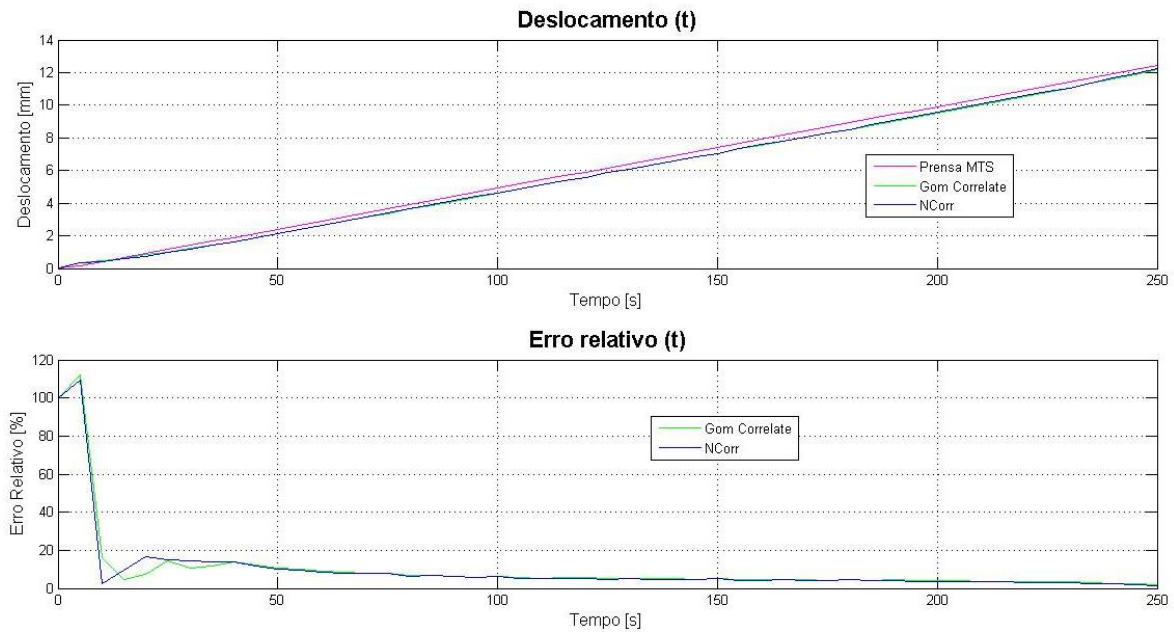


Figura 5.15 – Gráficos deslocamento (t) e erro relativo (t) do ensaio A1 com bloco de 19x19 (GC) e R33 (NC) pixels

Em relação à sincronização entre os dados dos programas e a prensa, a curva do ERM por iteração dos vários alinhamentos de vetores de deslocamento assemelha-se como a função crescente apresentada na fig. 5.16. O tempo de sincronização obtido em praticamente todos os ensaios foi de 0,05 segundos para ambos os *softwares*.

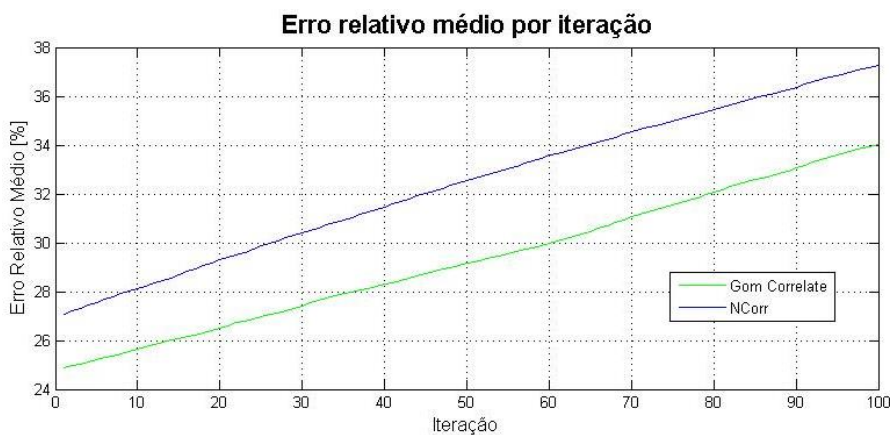


Figura 5.16 – Gráfico do ERM por iteração do ensaio A2

Em relação aos restantes ensaios, vários fatores podem ter estado na origem de erros tão elevados, como por exemplo o tamanho do bloco que, por depender indiretamente de muitas outras propriedades, precisa de ser seleccionado com algum rigor e, para se atingir um bom nível de precisão, muitas das vezes é necessária uma ponderada análise e alguma tentativa e erro nas análises realizadas.

O padrão estocástico que deve ser o mais aleatório possível, sem salpicos demasiado grandes na superfície do provete e o mais uniformemente aplicado, deve também, como já foi referido, estar em concordância com as dimensões do bloco.

Outro fator bastante importante é o enquadramento da fotografia. É indispensável que a linha de visão da câmara fotográfica seja perpendicular ao plano que se pretende estudar e, de preferência que esse plano esteja alinhado com os eixos horizontal e vertical aos quais se pretende obter valores de deslocamento ou extensão. No *software* Gom Correlate é possível definir outro tipo de eixos diretamente na fotografia, alinhando-a da maneira pretendida, no entanto nem todos os programas de correlação possuem esta funcionalidade, pelo que é essencial ajustar bem a posição da câmara em relação ao provete.

O tripé utilizado nos ensaios experimentais não foi o mais adequado, não oferecia uma boa fixação nem estabilidade à câmara e tornava-se por vezes difícil garantir esse alinhamento e perpendicularidade ao plano, obtendo-se assim fotografias desadequadas ao método (fig.5.17). Também a iluminação não se mostrou vantajosa no método experimental e pode ter também sido a causa de propagações de erros.

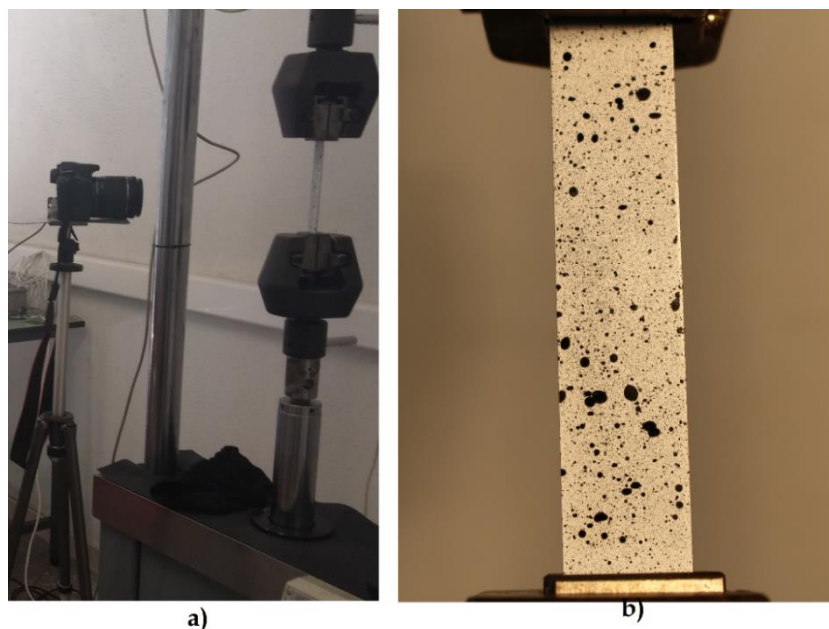


Figura 5.17 – Setup de captura de imagem a); Enquadramento de fotografia desadequado b)

6 Conclusões

Ao longo da presente dissertação, explicou-se detalhadamente em que consistia o método de Correlação Digital de Imagem e as suas diversas aplicações, que incessantemente continuam a ser desenvolvidas e atualizadas. Foram também analisados seis programas de Correlação Digital de Imagem de utilização livre e concluiu-se que os *softwares* que melhor cumpriam os objetivos eram o Gom Correlate e o NCorr.

Os dois programas foram facilmente utilizados na análise das imagens dos ensaios experimentais e não foram detetados quaisquer erros ou falhas no seu funcionamento. Na análise de resultados observou-se que na maioria das vezes as curvas deslocamento-tempo de ambos os programas eram bastante semelhantes sendo que, por vezes apresentavam alguma flutuação de valores nos pontos iniciais por serem de pequena grandeza. O NCorr apresenta uma forte desvantagem que é o seu tempo de análise, pelo que é aconselhada a utilização do Gom Correlate em precedência ao NCorr. Ainda assim, a utilização do NCorr não deve ser descurada completamente, visto que é possível que o seu tempo de análise decresça significativamente utilizando um computador com um processador mais rápido.

Foi possível implementar esta técnica no Laboratório de Mecânica Estrutural ao realizar ensaios de tração uniaxial em provetes de secção regular de alumínio. Durante a realização dos ensaios na prensa MTS, verificaram-se algumas falhas na fixação dos provetes à garra, existindo por vezes escorregamento. Presume-se que este fenómeno não tenha tido uma influência demasiado gravosa nos resultados podendo, no entanto, ter sido a causa de algumas flutuações dos valores de deslocamento, uma vez que enquanto a garra se deslocava num sentido, os pontos superficiais deslocar-se-iam noutra.

Em relação aos parâmetros inerentes dos algoritmos, uma das maiores dificuldades que esta técnica apresenta é a escolha da dimensão do bloco. Sendo um parâmetro que é influenciado por muitas outras propriedades, a sua seleção deve ser fortemente ponderada e, ainda que se tenha em consideração todas as questões referidas anteriormente, por vezes é necessária alguma tentativa e erro de modo a conseguir melhores resultados. Esta questão é mais crítica quando não existem os resultados reais para servirem de comparação, pelo que este parâmetro é fundamental na precisão do método. A Região de Interesse foi facilmente definida e com uma boa resolução de imagem devido às reduzidas dimensões dos provetes.

No que diz respeito às condições experimentais, observou-se que a utilização deste tipo de iluminação não trouxe nenhuma vantagem ao procedimento experimental, pois alterava fortemente determinadas características da foto como a sua saturação e contraste. Também o tripé não era adequado para a câmara fotográfica não lhe concedendo a devida estabilidade e impossibilitando pequenos ajustes entre a posição da câmara e o provete. A plataforma superior do tripé onde assentava a câmara estava apoiada numa rótula, tornando-se mais difícil garantir a perpendicularidade da câmara ao plano e o enquadramento da imagem.

O padrão estocástico é uma propriedade à qual não se tem muito controlo pelo tipo de pintura utilizado. No entanto há que ter um cuidado especial em garantir que a superfície do provete não tem espaços muito grandes em branco – não pintados, nem o contrário.

Não foi possível validar os resultados pelo método inicialmente proposto – a extensometria, devido à vulnerabilidade de ambos os *softwares* no cálculo diferencial dos deslocamentos que é fortemente afetado pelo ruído da captura de imagem. No entanto, a comparação feita através dos deslocamentos medidos pelo LVDT da prensa e os deslocamentos calculados pelos *softwares*, é considerada fiável e precisa o suficiente para a comparação e certificação dos resultados.

De uma forma geral, obteve-se um erro médio de 24,3% nos 10 ensaios realizados. Foram os ensaios A1, A3 e B1 que alcançaram os melhores resultados, em que o ensaio A1 teve um erro de 5,6%, um valor que se distancia largamente dos restantes. Os erros elevados obtidos podem ser explicados pela influência dos parâmetros anteriores e também pelas flutuações dos valores de deslocamento, obtidos pelos programas, nos pontos iniciais e nos pontos finais dos ensaios. Nos pontos iniciais estas flutuações devem-se à dificuldade dos programas em medir deslocamentos muito pequenos (principalmente até aos 2,5 mm) e, nos pontos finais, poderão dever-se essencialmente à instabilidade do ensaio e do possível escorregamento entre a garra e o provete visto que o provete se encontra perto de atingir a rotura.

A função “sincronização.m” cumpriu com os seus objetivos em analisar uma grande quantidade de informação e em dispô-la em gráficos para uma visualização e compreensão mais fácil. Esta função calculava o erro mínimo e o tempo de sincronização entre a captura de imagem e o início do ensaio de cada *software* e constatou-se que, na maioria dos casos, o tempo de sincronização era de 0,05 segundos.

Futuramente, o dispositivo de medição de deformações recorrendo à técnica de Correlação Digital de Imagem deve ser aperfeiçoado com a utilização de melhor equipamento, como a utilização de um tripé mais apropriado à câmara usada e um controlo mais eficaz das

condições de ensaio e dos provetes manuseados. Seria também interessante, a utilização de iluminação mais adequada que não altere fortemente a saturação e o contraste da imagem, prejudicando assim os ensaios experimentais.

Uma das razões pela qual o *software* NCorr foi escolhido, foi pelo facto de facultar o acesso aos seus códigos. Isto poderá ser interessante do ponto de vista de um desenvolvimento de um novo algoritmo DIC. Atualmente, muitos algoritmos são modificados para se moldarem melhor ao tipo de material, ao tipo de deformação e a outras condições de estudo. Também seria proveitoso utilizar a informação destes códigos para uma melhor compreensão do método de Correlação Digital de Imagem e para o aperfeiçoamento de algumas falhas como por exemplo no cálculo das extensões e na seleção das dimensões do bloco.

Essencialmente espera-se que, num futuro próximo, esta técnica esteja devidamente operacional no Laboratório de Mecânica Estrutural e que permita realizar vários tipos de investigações no que diz respeito à medição de deformações, tais como à obtenção das propriedades de um material, à caracterização do tempo de vida de uma estrutura, entre outras inúmeras aplicações.

Referências Bibliográficas

- [1] Vinckier, A., Bossaert, W., & Dechaene, R. (1968). Computation of finite strains from moiré displacement patterns. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 3(I), 65–75.
- [2] Rastogi, P. K. (2000). Principles of Holographic Interferometry and Speckle Metrology. *Photo-Mechanics*, 77, 103–151.
- [3] Américo, P., Magalhães, A., Magalhães, C. A., & Mendonça, A. L. (2016). Computational methods of phase shifting to stress measurement with photoelasticity using plane polariscope. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 130, 213–226.
- [4] Peters, W. H., & Ranson, W. F. (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*, 21(3), 427-431.
- [5] Peters, W. H., Ranson, W. F., Sutton, M. A., Chu, T. C., & Anderson, J. (1983). Application of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 22(6), 232-244.
- [6] Sutton, M., Wolters, W., Peters, W., Ranson, W., & McNeill, S. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*, 1(3), 133–139.
- [7] Chu, T. C., Ranson, W. F., & Sutton, M. A. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25(3), 232–244.
- [8] Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D., & Habraken, A. M. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(11), 1132–1145.
- [9] Ghorbani, R., Matta, F., & Sutton, M. a. (2014). Full-Field Deformation Measurement and Crack Mapping on Confined Masonry Walls Using Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 55(1), 227-243.
- [10] Huňady, R., Hagara, M., & Schrötter, M. (2012). Using high-speed digital image correlation to determine the damping ratio. *Procedia Engineering*, 48, 242–249.
- [11] Koster, M., Kenel, C., Lee, W. J., & Leinenbach, C. (2014). Digital Image Correlation for the Characterization of Fatigue Damage Evolution in Brazed Steel Joints. *Procedia Materials Science*, 3(March 2016), 1117–1122.
- [12] Laurin, F., Charrier, J. S., Lévêque, D., Maire, J. F., Mavel, A., & Nuñez, P. (2012). Determination of the properties of composite materials thanks to digital image correlation measurements. In *Procedia IUTAM* (Vol. 4, pp. 106-115).
- [13] Lagattu, F., Brillaud, J., & Lafarie-Frenot, M.-C. (2004). High strain gradient measurements by using digital image correlation technique. *Materials Characterization*, 53(1), 17–28.
- [14] Tung, S. H., & Sui, C. H. (2010). Application of digital-image-correlation techniques in analysing cracked cylindrical pipes. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering*

- Sciences*, 35(5), 557–567.
- [15] Kanna, S., & Yamashita, Y. (2014). Assessment of Ductile Fracture Criteria Under Compressive Pre-strain With Digital Image Correlation. *Procedia Materials Science*, 3, 264–269.
- [16] Ramos, T., Braga, D. F. O., Eslami, S., Tavares, P. J., & Moreira, P. M. G. P. (2015). Comparison between Finite Element Method Simulation, Digital Image Correlation and Strain Gauges Measurements in a 3-Point Bending Flexural Test. In *Procedia Engineering* (Vol. 114, pp. 232-239).
- [17] Rossi, M., Broggiato, G. B., & Papalini, S. (2008). Application of digital image correlation to the study of planar anisotropy of sheet metals at large strains. *Meccanica*, 43(2), 185–199.
- [18] Luo, P. F., Chao, Y. J., Sutton, M. A., & Peters, W. H. (1993). Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision. *Experimental Mechanics*, 33(2), 123–132.
- [19] Ramos, T., Furtado, A., Eslami, S., Alves, S., Rodrigues, H., Arêde, A., Moreira, P. M. G. P. (2015). 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering - Measurements in a Masonry Wall. In *Procedia Engineering* (Vol. 114, pp. 215–222). Elsevier B.V.
- [20] Sutton, M. A. (2008). *Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements*. Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics.
- [21] Moreira, P. *Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação Digital de Imagem para Avaliação de Grandes Deformações*. Tese de Mestrado. FCT-UNL, 2015.
- [22] Yoneyama, S., & Murasawa, G. (2009). Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*. Eolss Publishers.
- [23] Bing, P., Hui-min, X., Bo-qin, X., & Fu-long, D. (2006). Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. *Measurement Science and Technology*, 17(6), 1615–1621.
- [24] Schreier, H., Orteu, J.-J., & Sutton, M. A. (2009). Digital Image Correlation (DIC). In *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements* (pp. 87–117). Springer US.
- [25] Pan, B., Xie, H., Wang, Z., Qian, K., & Wang, Z. (2008). Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics Express*, 16(10), 7037–7048.
- [26] Lu, H., & Cary, P. D. (2000). Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient. *Experimental Mechanics*, 40(4), 393–400.
- [27] Davis, C. Q., & Freeman, D. M. (1997). Statistics of subpixel registration algorithms based on spatiotemporal gradients or block matching. *Optical Engineering*, 37, 1290.
- [28] Almeida, G. *Image Processing for Displacement Measurements*. Tese de Doutorado. FCT-UNL, 2014.
- [29] Bornert, M., Brémand, F., Doumalin, P., Dupré, J.-C., Fazzini, M., Grédiac, M., Wattrisse, B. (2008). Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors :

- Methodology and Results. *Experimental Mechanics*, 49(3), 353–370.
- [30] Bräuer-Burchardt, C. (2004). A Simple New Method for Precise Lens Distortion Correction of Low Cost Camera Systems. *Pattern Recognition*, 570–577.
- [31] Yoneyama, S., & Kikuta, H. (2006). Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement. *Optical Engineering*, 45(2), 9.
- [32] Pan, B., Yu, L., Wu, D., & Tang, L. (2013). Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(2), 140–147.
- [33] Wang, W. C., Hwang, C. H., Chu, C. I., & Chen, Y. H. (2014). Displacement measurement of interior wall of hollow cylinder by digital image correlation method using fisheye lens. In *Procedia Engineering*, (Vol. 79, pp. 437–446). Elsevier B. V.
- [34] Biscaia, H. C., Cruz, D., & Chastre, C. (2016). Analysis of the debonding process of CFRP-to-timber interfaces. *Construction and Building Materials*, 113, 96–112.
- [35] Biscaia, H. C., Chastre, C., Cruz, D., & Viegas, A. (2016). Prediction of the interfacial performance of CFRP laminates and old timber bonded joints with different strengthening techniques. *Composites Part B: Engineering*, 108, 1–17.
- [36] Brillaud, J., & Lagattu, F. (2002). Limits and possibilities of laser speckle and white-light image-correlation methods : theory and experiments. *Applied Optics*, 41(31), 6603–6613.

Anexo A: Manual de instruções Gom Correlate

Este *software* DIC é bastante simples de utilizar. Possui uma *interface* bastante simples e organizada.

A primeira janela deste programa é a representada na fig. A.1., em que é possível criar um novo projeto, abrir um projeto já criado e, no caso de alguma dúvida, possui uma comunidade de utilizadores deste *software* onde várias questões são respondidas.

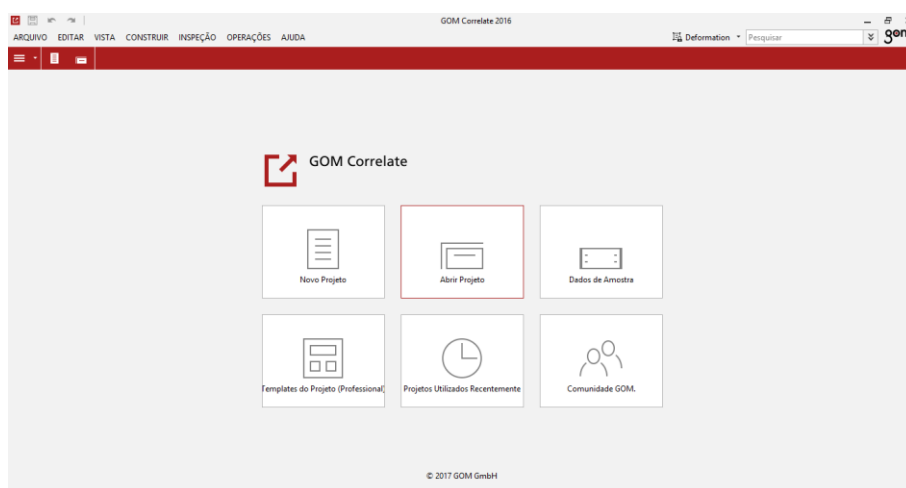


Figura A. 1 – Interface inicial do Gom Correlate

O primeiro passo a seguir à criação do projeto é a importação das fotografias através do seguinte comando:

- “Arquivo” → “Importar” → “Arquivo” → “Imagem de deformação”.

Após este passo, o programa automaticamente cria uma sequência de imagens ordenada através do nome das respetivas. Em seguida é necessário providenciar uma medida de referência ao programa para que este faça a correlação entre pixels e milímetros. Para fazer isso, é necessário carregar com o botão direito onde indica “Deformação 1” como é possível ver no retângulo da imagem A.2:

- “Deformação 1” → “Editar Parâmetros de Criação” → “Editar Calibração” → “Definir Escala”.

Depois basta desenhar uma linha na medida de referência e indicar a sua medida real (para

desenhar a linha é necessário carregar na tecla Ctrl e no botão esquerdo do rato). O passo seguinte passa por definir a Região de Interesse a analisar.

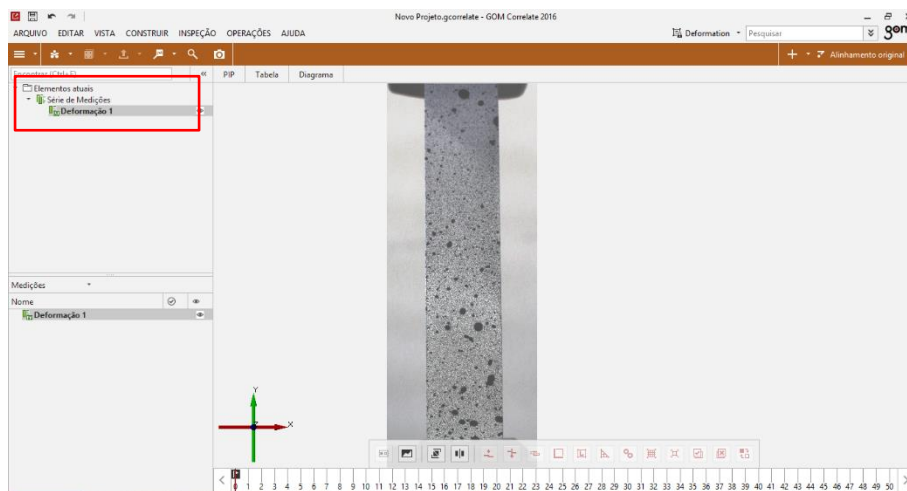


Figura A. 2 – Definir medida de referência

Para construir a Região de Interesse, devem seguir-se os seguintes comandos e definir os parâmetros da análise como exemplifica a figura seguinte:

- “Definir Componente” (1) → “Componente de Superfície” → “Selecionar/Desmarcar polígono” (2) → Definir os parâmetros da análise (3) → “Criar e Fechar”

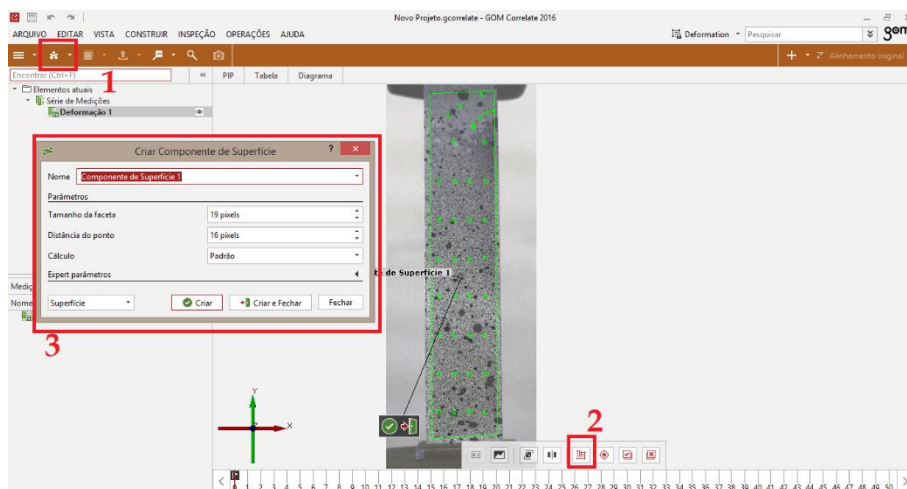


Figura A. 3 – Criação da Região de Interesse

É possível criar outras formas geométricas para a Região de Interesse, como linhas, pontos, círculos, entre outras, dependendo do tipo de análise. Também é possível definir o tamanho do bloco, o passo e a forma de cálculo da análise.

Para obter os resultados basta (fig. A.4):

- “Verificação de todos os elementos atuais visíveis” → Selecionar os parâmetros que se pretendem determinar e definir as suas propriedades → “Ok”.

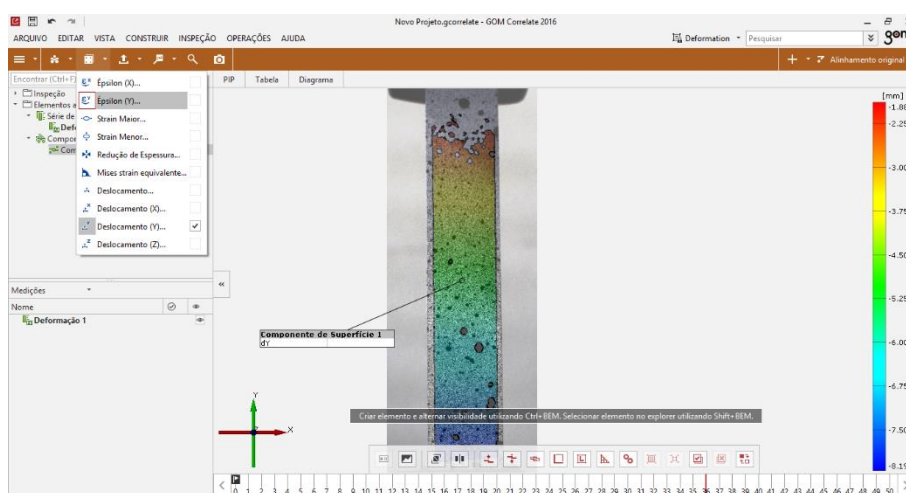


Figura A. 4 – Cálculo dos deslocamentos e extensões

Para finalizar, segue-se o armazenamento de dados, criando o relatório dos resultados obtidos:

- “Criar página de relatório” (ícone da câmara fotográfica) → Selecionar o tipo de relatório e os dados a apresentar assim como o formato a guardar.

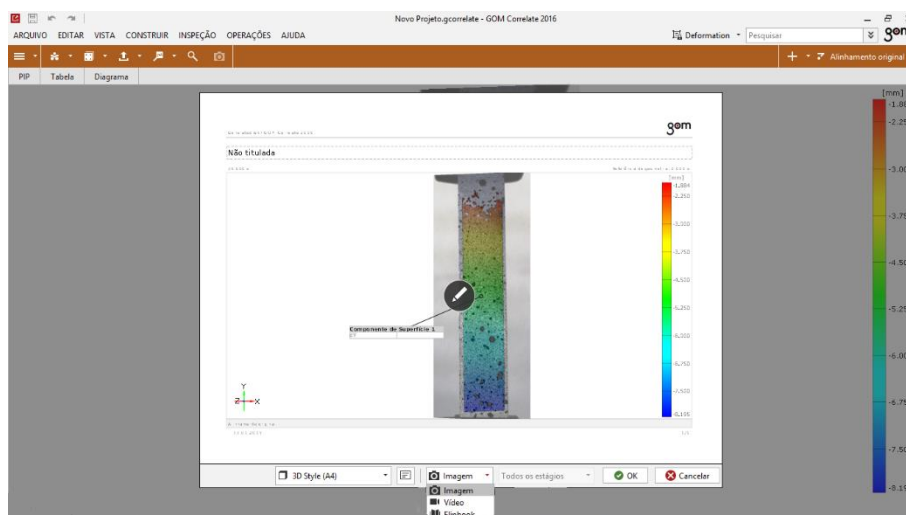


Figura A. 5 – Criação das páginas de relatório

Outras dúvidas que o utilizador possa ter na utilização deste programa também podem ser respondidas através dos tutoriais em vídeos disponibilizados na internet.

Anexo B: Manual de instruções NCorr

O NCorr ainda possui uma *interface* mais intuitiva para o utilizador, pois ao longo da análise vai informando dos passos já completos e dos passos por completar.

Para a sua utilização é necessário a instalação do Matlab e para executar o NCorr basta digitar na linha de comandos: “handles_nccorr=ncorr” e a seguinte janela surge:

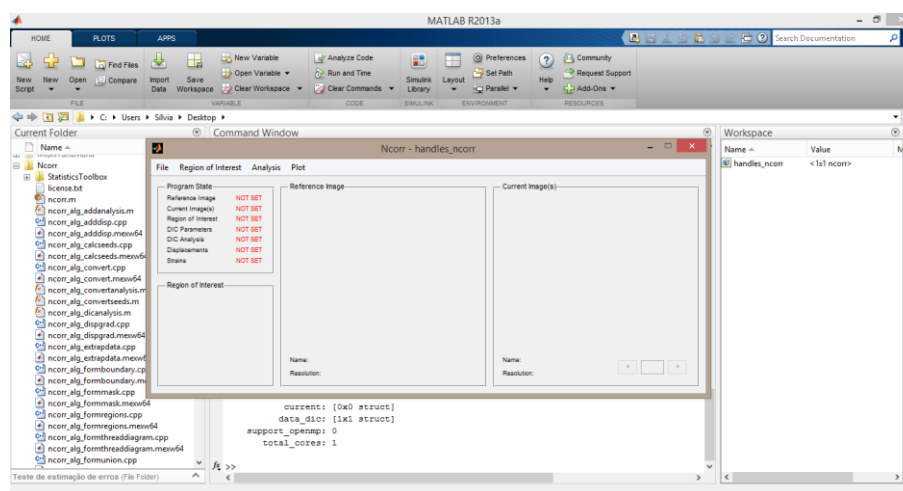


Figura B. 1 – Interface inicial do NCorr

Em relação à instalação e aos procedimentos a realizar para fazer as análises das imagens, existe um manual de utilizador (http://www.ncorr.com/download/ncorrmanual_v1_2_2.pdf), e que explica muito detalhadamente estes tópicos, não havendo necessidade de explicar redundantemente estes passos.

Este *software* disponibiliza muitos documentos e tutoriais de ajuda ao utilizador não só a nível prático, como a nível teórico. O manual acima referido explica as funções de custo e os algoritmos utilizados assim como outros princípios básicos do método DIC.

Para armazenamento dos resultados apenas é possível guardar como imagens ou como GIF.

Anexo C: Código Matlab

Este código recebe como input o nome do ficheiro excel da prensa, o nome do excel com os dados dos *softwares* e o número de *softwares* a comparar com os dados da prensa.

Sempre que o intervalo de fotografias ou *frames* for diferente, deve ser alterado o parâmetro intervalo como demonstra a figura seguinte.

```

sincronizacao.m x
1
2 function sincronizacao(nome_fich_mts,nome_fich_softwares,nr_softwares)
3
4
5 % Esta função tem como objetivo a sincronização dos dados obtidos pelos
6 % softwares com os dados obtidos pela prensa, por forma a minimizar o erro.
7 % O primeiro input é o nome do ficheiro excel com os dados da prensa.
8 % O segundo input é o nome do ficheiro excel com os dados dos softwares.
9 % No terceiro input deve ser referido se é para analisar 1 ou 2 softwares.
10 % Sendo que o software 1 é sempre o Gom Correlate e o software 2 o NCorr.
11 % Os ficheiros excel devem estar contidos no caminho do Matlab.
12
13 % Parâmetros
14 delta_t=0.05; % intervalo entre valores interpolados
15 alcance=5; % segundos
16 intervalo=5; % intervalo entre fotos ou frames em segundos
17 intervalo_leitura=intervalo/delta_t; % intervalo entre leitura de cada
18 % iteração.
19
20 % Lê o excel com os dados da prensa MTS e guarda num vetor o tempo do
21 % ensaio, noutro vetor a força aplicada nesse momento e lê o deslocamento
22 % da garra e guarda noutro vetor.
23 data_mts=xlsread(nome_fich_mts);
24 tempo_mts=data_mts(5:length(data_mts),1);
25 deslocamento_mts=data_mts(5:length(data_mts),3);
26
27
28 % Lê o ficheiro excel que contém os dados de análise dos softwares de
29 % correlação digital de imagem. Guarda num vetor o tempo e o deslocamento.
30 data_soft=xlsread(nome_fich_softwares);
31 tempo_soft1=data_soft(:,2);
32 deslocamento_soft1=data_soft(:,3);
33
34 if nr_softwares==2
35 tempo_soft2=data_soft(:,5);
36 deslocamento_soft2=data_soft(:,6);
37
38 end
39
40
41 % Faz a interpolação dos valores de deslocamento do vetor tempo pretendido.
42 linha=length(tempo_soft1);
43 tempo=[0:delta_t:tempo_soft1(linha,:)+intervalo];
44 [tempo_mts,index]=unique(tempo_mts);
45 desloc_interpolado=interp1(tempo_mts,deslocamento_mts(index),tempo,'linear');
46
47 % Faz um ajuste entre o deslocamento da prensa e os deslocamentos dos
48 % softwares calculando o erro absoluto médio entre eles, depois faz novo ajuste.
49 n_valores= alcance/delta_t;
50 erro_total_1= zeros(n_valores,1);
51 erro_total_2= zeros(n_valores,1);
52 for i=1:n_valores
53 tempo=tempo(i:intervalo_leitura:end);
54 desloc_interpolado1=desloc_interpolado(i:intervalo_leitura:end);
55 %
56 erro1= zeros(linha,1);
57 erro2= zeros(linha,1);
58 for v=4:linha-alcance/intervalo
59 erro1(v)=abs((desloc_interpolado1(v)-deslocamento_soft1(v))/desloc_interpolado1(v));
60 if nr_softwares==2

```

Figura C. 1 – Código da função sincronizacao.m (1)

```

61 -         erro2(v)=abs((desloc_interpolado1(v)-deslocamento_soft2(v))/desloc_interpolado1(v));
62 -     end
63 - end
64 -     erro_total_1(i)= sum(erro1)/length(erro1);
65 -     erro_total_2(i)= sum(erro2)/length(erro2);
66 - end
67 -
68 - % Gráfico do erro mínimo: faz o gráfico dos erros do Gom Correlate e do
69 - % NCorr e seleciona o erro mínimo entre os dois.
70 - yy= 1:length(erro_total_1);
71 - if nr_softwares==2
72 -     plot(yy,erro_total_1,'g',yy,erro_total_2,'b')
73 -     legend('Gom Correlate', 'NCorr')
74 - else
75 -     plot(yy,erro_total_1,'g')
76 -     legend('Gom Correlate')
77 - end
78 - grid('on')
79 - title('\fontsize{16}Erro relativo médio por iteração','FontWeight','bold')
80 - xlabel('\fontsize{12}Iteração')
81 - ylabel('\fontsize{12}Erro Relativo Médio')
82 - if nr_softwares==2
83 -     [minimo1, posicao1]= min(erro_total_1);
84 -     delta1= posicao1*delta_t;
85 -     [minimo2, posicao2]= min(erro_total_2);
86 -     delta2= posicao2*delta_t;
87 -     minimo=min(minimo1,minimo2);
88 -     fprintf('O erro mínimo no Gom Correlate ocorre para t= %f e vale %f\n e no NCorr ocorre para t= %f e vale %f\n',delta1,minimo1,delta2,minimo2);
89 - else
90 -     [minimo1, posicao1]= min(erro_total_1);
91 -     delta1= posicao1*delta_t;
92 -     minimo=minimo1;
93 -     fprintf('O erro mínimo no Gom Correlate ocorre para t= %f e vale %f\n',delta1,minimo1);
94 - end
95 -
96 - if minimo==minimo1;
97 -     posicao=posicao1;
98 - else
99 -     posicao=posicao2;
100 - end
101 - figure;
102 - % Desenha os gráficos deslocamento (t) sincronizados de acordo com o erro
103 - % mínimo.
104 - x=tempo(posicao:intervalo_leitura:end-1);
105 - y=desloc_interpolado(posicao:intervalo_leitura:end-1);
106 - subplot(2,1,1)
107 - if nr_softwares==2
108 -     plot(x,y,'m',tempo_soft1,deslocamento_soft1,'g',tempo_soft2,deslocamento_soft2,'b')
109 -     legend('Prensa MTS','Gom Correlate', 'NCorr')
110 - else
111 -     plot(x,y,'m',tempo_soft1,deslocamento_soft1,'g')
112 -     legend('Prensa MTS','Gom Correlate')
113 - end
114 - grid('on')
115 - title('\fontsize{16}Deslocamento (t)','FontWeight','bold')
116 - xlabel('\fontsize{12}Tempo [s]')
117 - ylabel('\fontsize{12}Deslocamento [mm]')
118 -
119 - % Desenha o gráfico do erro relativo médio ao longo do tempo
120 - subplot(2,1,2)

```

Figura C. 2 – Código da função sincronizacao.m (2)

O output desta função Matlab, como já foi referido, é o gráfico dos erros relativos médios de cada *software*, o gráfico deslocamento-tempo e o gráfico erro relativo-tempo da prensa e de cada programa na iteração ideal.

O excel que contém os dados dos programas DIC deverá ter o formato da figura C.4, para que a função leia as colunas certas. No caso de ser indicado apenas 1 *software*, o programa predefinido é o Gom Correlate por ser o de utilização mais rápida e fácil.

```

120 - subplot(2,1,2)
121 - if minimo==minimo1;
122 -     i=posicao1;
123 - else
124 -     i=posicao2;
125 - end
126 -
127 - tempo1=tempo(i:intervalo_leitura:end);
128 - desloc_interpolado1=desloc_interpolado(i:intervalo_leitura:end);
129 - %
130 - erro1= zeros(linha,1);
131 - erro2= zeros(linha,1);
132 - for v=1:linha
133 -     erro1(v)=abs((desloc_interpolado1(v)-deslocamento_soft1(v))/desloc_interpolado1(v));
134 -     if nr_softwares==2
135 -         erro2(v)=abs((desloc_interpolado1(v)-deslocamento_soft2(v))/desloc_interpolado1(v));
136 -     end
137 - end
138 - if nr_softwares==2
139 -     plot(tempo_soft1,erro1,'g',tempo_soft2,erro2,'b')
140 -     legend('Gom Correlate', 'NCorr')
141 - else
142 -     plot(tempo_soft1,erro1,'g')
143 -     legend('Gom Correlate')
144 - end
145 - grid('on')
146 - title('\fontsize{16}Erro relativo (t)','FontWeight','bold')
147 - xlabel('\fontsize{12}Tempo [s]')
148 - ylabel('\fontsize{12}Erro Relativo')
149 - end

```

Figura C. 3 – Código da função sincronizacao.m (3)

Software: Gom Correlate			Software: NCorr		
Fotos	Tempo	Desloc.	Fotos	Tempo	Desloc.
789	0	0	789	0	0
790	5	0,093	790	5	0,0144
791	10	0,125	791	10	0,0376
792	15	0,135	792	15	0,0531
793	20	0,117	793	20	0,066
794	25	0,153	794	25	0,078
795	30	0,176	795	30	0,0906

Figura C. 4 – *Template* de dados dos deslocamentos obtidos pelos softwares