



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JOSÉ AÍRTON NUNES FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORÍTMO DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE  
IMAGEM PARA O CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES**

BELÉM  
2019

JOSÉ AÍRTON NUNES FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORÍTMO DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE  
IMAGEM PARA O CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES**

Apresentada como requisito básico para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial pelo Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal do Pará, tendo como área de concentração Projetos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues.

BELÉM  
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a)**

N972d Nunes Fernandes, José Airton  
Desenvolvimento de algoritmo de correlação digital de  
imagem para o cálculo de deformações / José Airton Nunes  
Fernandes Nunes Fernandes. — 2019.  
75 f. : il. color.  
Orientador(a): Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Industrial, Instituto de Tecnologia, Universidade  
Federal do Pará, Belém, 2019.  
1. Correlação digital de imagens. 2. Algoritmo. 3.  
Videoextensometria. I. Título.

CDD 620.112

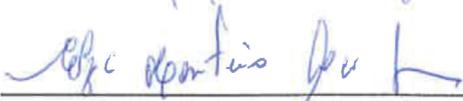
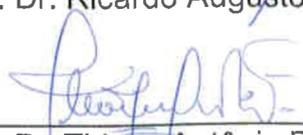
JOSÉ AÍRTON NUNES FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORÍTMO DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE  
IMAGEM PARA O CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Área de concentração: Materiais e Metalurgia.

Data de Aprovação: 27 de setembro de 2019.

Banca examinadora:

 _____ Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues (IFPA)	- Orientador/Presidente PPGEI/UFPA
 _____ Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Elza Monteiro Leão Filha (IFPA)	- Membro Interno PPGEI/UFPA
 _____ Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama	- Membro Interno PPGEI/UFPA
 _____ Prof. Dr. Ricardo Augusto Seawright de Campos	- Membro Externo IFPA
 _____ Prof. Dr. Thiago Antônio Paixão de Sousa Costa	- Membro Externo PPGEMAT/IFPA

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todos que buscam ajudar o próximo, dessa forma reconstruem sonhos e os fortalecem, criando caminhos que possibilitem atingir suas metas mesmos diante das adversidades.

## **AGRADECIMENTO**

A Deus por dar saúde a todos que ajudaram a resgatar esse sonho. Em especial ao Professor Jean Rodrigues pela paciência, tolerância e dedicação ao orientar esse trabalho;

## RESUMO

A extensometria é uma técnica para determinar as deformações em materiais sob solicitação em ensaios mecânicos, sendo seu nível de precisão fundamental para o estudo do comportamento mecânico dos materiais. Associar as técnicas da extensometria aos métodos da correlação digital de imagem traz um avanço significativo para a criação de instrumentos de boa precisão para medidas de deformação sem contato, substituindo os extensômetros convencionais, caros e sempre sujeitos a avarias no decorrer dos ensaios. Nesse trabalho desenvolveu-se algoritmos de correlação digital de imagem para o cálculo de deformações, capazes de medir deformações longitudinais de materiais com alta e baixa capacidade de deformação. Foram desenvolvidos três algoritmos, um pelo uso da ferramenta de correlação *Normxcorr2*, e dois utilizando a ferramenta *cpcorr*, constantes da *toolbox Image* do software MATLAB. Para o desenvolvimento e validação dos códigos foram realizados em máquina universal, ensaios de tração, sendo os corpos de prova, previamente texturizados em dois tipos distintos de textura, uma com grãos médios de 0,28 mm e outra com grãos de 2,90 mm em média. Os ensaios foram então filmados para posterior extração da sequência de imagens a serem analisadas nos algoritmos e comparação das deformações medidas com os valores registrados pela máquina e calculados por uso de cada código. Os resultados mostraram que a precisão das medidas depende fundamentalmente da qualidade da textura produzida no corpo de prova e das condições de iluminação deste. A ferramenta *Normxcorr2* mostrou-se adequada para a determinação das deformações de materiais de alta capacidade de deformação, enquanto a ferramenta *cpcorr*, mais precisa, permitiu a medição de deformações mesmo muito pequenas, ambas contribuindo assim para o desenvolvimento de uma técnica de medição que possa atender diferentes materiais sob condições de deformação diversas.

**Palavras-chave:** Correlação digital de imagens, algoritmo, videoextensometria.

## ABSTRACT

Extensometry is a technique for determining the deformations of materials on request in mechanical tests, and its level of accuracy is fundamental for the study of the mechanical behavior of materials. Associating extensometry techniques with digital image correlation methods brings a significant advance to the creation of good precision instruments for noncontact strain measurements, replacing conventional strain gauges that are always expensive and subject to damage during testing. In this work, digital image correlation algorithms were developed for the deformation calculation, capable of measuring longitudinal deformations of materials with high and low deformation capacity. Three algorithms were developed, one using the Normxcorr2 correlation tool, and two using the cpcorr tool, contained in the MATLAB software toolbox Image. For the development and validation of the codes were performed in a universal machine, tensile tests, and the specimens previously textured in two distinct types of texture, one with average grains of 0.28 mm and another with grains of 2.90 mm. average. The tests were then filmed for further extraction of the sequence of images to be analyzed in the algorithms and comparison of the deformations measured with the values recorded by the machine and calculated using each code. The results showed that the accuracy of the measurements depends fundamentally on the quality of the texture produced in the specimen and the lighting conditions of the specimen. The Normxcorr2 tool proved to be suitable for determining the deformations of high deformation materials, while the more accurate cpcorr tool allowed the measurement of even very small deformations, both contributing to the development of a measurement technique that can meet different materials under different deformation conditions.

**Keywords:** Digital image correlation, algorithm, videoextensometry.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Áreas da computação gráfica.....	16
Figura 2 – ZOI ( <i>Zone of Interest</i> ).....	21
Figura 3 – Deformação normal média.....	22
Figura 4 – Vídeo – extensômetro.....	25
Figura 5 – Desenho esquemático de um sistema de captura e análise de imagem....	26
Figura 6 – Fluxograma do desenvolvimento dos algoritmos estudados.....	29
Figura 7 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo alg_norm.....	31
Figura 8 – Parâmetros de funcionamento do algoritmo alg_norm (a) Origem do sistema de coordenada e forma de determinação dos deslocamentos; (b) aplicação das sub-áreas à superfície do corpo de prova.....	32
Figura 9 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo alg_cpcorr.....	33
Figura 10 – Parâmetros de funcionamento do algoritmo alg_cpcorr (a) Origem do sistema de coordenada e forma de determinação dos deslocamentos; (b) aplicação dos pontos de rastreamento sobre a superfície do corpo de prova.....	34
Figura 11 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo alg_cpcorr_alt.....	35
Figura 12 – Parâmetros de funcionamento do algoritmo alg_cpcorr_alt . (a) Origem do sistema de coordenada e forma de determinação dos deslocamentos; (b) aplicação dos pontos de rastreamento à superfície do corpo de prova.....	36
Figura 13 – Procedimento para a determinação do tamanho médio dos grãos das Texturas produzidas, pela média dos comprimentos vertical e horizontal.....	39
Figura 14 – Textura 1 sobre corpo de prova, produzida por spray.....	40
Figura 15 – Textura 2 sobre corpo de prova, produzida por marcação manual com tinta permanente.....	40
Figura 16 – Câmera com tripé e suporte.....	41
Figura 17 – Corpos de prova texturizados sob ensaio de tração. (a) Textura 1; (b) Textura 2.....	42
Figura 18 – Resultados das medidas de deformação pelos três algoritmos desenvolvidos aplicados na Série 1.....	43

Figura 19 – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova(a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_norm. Passo de 49 frames, Série 1.....	44
Figura 20 – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração, estabelecidos através do algoritmo alg_norm. Passo de 5 frames, Série 1.....	45
Figura 21 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova ao final (a) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (b), medido através do algoritmo alg_cpcorr. Passo de 49 frames, Série 1.....	46
Figura 22 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr. Passo de 5 frames, Série 1.....	47
Figura 23 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr_alt. Passo de 49 frames, Série 1.....	48
Figura 24 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr_alt. Passo de 5 frames, Série 1.....	49
Figura 25 – Resultados das medidas de deformação pelos três algoritmos desenvolvidos aplicados na Série 2.....	50
Figura 26 – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_norm. Passo de 92 frames, Série 2.....	51
Figura 27 – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_norm. Passo de 9 frames, Série 2.....	52
Figura 28 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr. Passo de 92 frames, Série 2.....	53
Figura 29 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr. Passo de 9 frames, Série 2.....	54
Figura 30 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr_alt. Passo de 92 frames, Série 2.....	55

Figura 31 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr_alt. Passo de 9 frames, Série 2.....	56
Figura 32 – Deformação longitudinal medida pelo uso dos algoritmos desenvolvidos sobre corpo de prova 03, de textura 1 e comparação com resultado fornecimento pelo equipamento de ensaio.....	57
Figura 33 – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_norm, corpo de prova 03.....	58
Figura 34 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr, corpo de prova 03... ..	59
Figura 35 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_norm_alt, corpo de prova 03.....	60
Figura 36 – Deformação longitudinal medida pelo uso dos algoritmos desenvolvidos sobre corpo de prova 04, de Textura 1 e comparação com resultado fornecimento pelo equipamento de ensaio.....	61
Figura 37 – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_norm, corpo de prova 04.....	62
Figura 38 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr, corpo de prova 04.....	63
Figura 39 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr_alt, corpo de prova 04.....	64
Figura 40 – Deformação longitudinal medida pelo uso dos algoritmos desenvolvidos sobre corpo de prova 11, de Textura 2 e comparação com resultado fornecimento pelo equipamento de ensaio.....	65
Figura 41 – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_norm, corpo de prova 11.....	66

Figura 42 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, durante ensaio de tração(a) e gráfico de deformação longitudinal (b), medido através do algoritmo alg_cpcorr, corpo de prova 11.....	67
Figura 43 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, durante ensaio de tração durante ensaio de tração (a) e gráfico de deformação longitudinal (b), medido através do algoritmo alg_cpcorr_alt, corpo de prova 11.....	68
Figura 44 – Deformação longitudinal medida pelo uso dos algoritmos desenvolvidos sobre corpo de prova 12, de Textura 2 e comparação com resultado fornecimento pelo equipamento de ensaio.....	69
Figura 45 – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova antes (a) e depois (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_norm, corpo de prova 12.....	70
Figura 46 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, durante ensaio de tração durante ensaio de tração (a) e gráfico de deformação longitudinal (b), medido através do algoritmo alg_cpcorr, corpo de prova 12.....	71
Figura 47 – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova antes (a) e depois (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg_cpcorr_alt, corpo de prova 12.....	72

.....

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 01 – Corpos de prova série 1 e série 2 e suas características.....	38
Tabela 02 – Corpos de prova com textura 1 utilizados pelos algoritmos desenvolvidos, as medidas das deformações em mm, realizada pela máquina de ensaio e as encontradas por cada um dos algoritmos.....	57
Tabela 03 – Corpos de prova com textura 2 utilizados pelos algoritmos desenvolvidos, as medidas das deformações em mm, realizada pela máquina de ensaio e as encontradas por cada um dos algoritmos.....	65

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCD – Charge – Couple Device

DIC – Digital Image Correlation

$\varepsilon$  – Deformação Uniaxial

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>13</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	14
1.1.2 Objetivos específicos .....	14
<b>1.2 Organização do texto</b> .....	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 Imagens digitais</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2 Processamento digital de imagens</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3 Correlação digital de imagem</b> .....	<b>17</b>
<b>2.4 Ferramentas e critérios de correlação digital de imagens no matlab</b> .....	<b>18</b>
<b>2.5 ZOI – Zona de interesse</b> .....	<b>20</b>
<b>2.6 Algoritmo</b> .....	<b>21</b>
<b>2.7. Deformação</b> .....	<b>22</b>
<b>2.8 Os extensômetros</b> .....	<b>22</b>
2.8.1. Funcionamento dos extensômetros .....	23
2.8.2 Os tipos de extensômetros .....	23
<b>2.9 Videoextensometria</b> .....	<b>24</b>
<b>3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1 Concepção dos algoritmos</b> .....	<b>30</b>
3.1.1 Critérios para Desenvolvimento dos Algoritmos .....	30
3.1.2 Algoritmo alg_norm .....	31
3.1.3 Algoritmo alg_cpcorr .....	33
3.1.4 Algoritmo alg_cpcorr_alt .....	35
<b>3.2 Ensaios preliminares</b> .....	<b>37</b>
<b>3.3 Medidas de deformação em corpos e prova sobre tração</b> .....	<b>38</b>
3.3.1 Texturização dos corpos de prova .....	38
3.3.2 Captura de imagens e ensaios de tração .....	41
<b>4 0 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>4.1 Ensaios preliminares</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2 Corpos de prova com textura 1</b> .....	<b>56</b>
<b>4.3 Corpos de prova com textura 2</b> .....	<b>64</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dada a pressão de restrições de emissão e consumo de energia, materiais leves com alta rigidez e força específicas chamam a atenção de engenheiros e designers de todos os tipos de indústrias (LIU e XIA, 2019). Por outro lado, novos materiais de alta tenacidade e superelasticidade têm sido desenvolvidos.

Paralelamente à importância de se desenvolver os materiais em si, caminha o aperfeiçoamento das técnicas de caracterização destes novos materiais. Materiais com alta capacidade de deformação ou ainda produtos de altíssimo módulo de elasticidade representam desafios às técnicas tradicionais de caracterização, tanto no campo das tensões, como no das deformações.

No estudo das deformações dos materiais, bem como no levantamento de suas propriedades elásticas, extensômetros convencionais podem representar um custo significativo no processo de aquisição dos dados, além de apresentarem limitações de uso, em função das faixas de deformação máxima de cada aparelho e sua sensibilidade à choques mecânicos no momento do ensaio. Assim, torna-se fundamental o estudo de técnicas de caracterização que possam prover propriedades dos materiais sob ensaio confiáveis, precisas e com custo adequado.

Neste cenário, a videoextensometria têm se apresentado como uma técnica viável de determinação de deformações. Nesta técnica, o procedimento de cálculo das deformações se dá através do rastreamento de pontos previamente definidos sobre o corpo de prova, em uma sequência de imagens, pelo processo conhecido como correlação digital de imagem, desde o início do ensaio até a ruptura final deste, sendo, portanto, totalmente sem contato mecânico.

Conforme PICOY (2016), o processamento digital de imagens teve suas origens na criação de sistemas de transmissão de imagens na década de 1920. Paralelamente, com o lançamento de computadores pessoais, o armazenamento em massa, os sistemas de visualização e o desenvolvimento de algoritmos, foram usados mediante visão artificial, entre as décadas 1960 e 1970. Sendo, assim, a década de 1960 foi considerada como o ponto de partida para início das aplicações na área de processamento digital de imagens.

Para SATO (2017) a correlação de imagens para levantamento de deformações, a evolução dos computadores e o aumento na resolução das câmeras digitais, ampliaram-se com a utilização do Método de Correlação de Imagens Digitais (CID), apresentando uma melhor precisão na medição de deformações e deslocamentos, antes medidos pontualmente por extensômetros, relógios comparadores, dentre outros.

O método de correlação digital de imagem consiste em monitorar o movimento dos pontos escolhidos em uma sequência de imagens digitais a partir de uma referência inicial. Esse tipo de análise possibilita que os eventos sejam realizados fora do laboratório, sem retirar amostras ou fixar aparelhos, sendo que, para a realização das medidas, é necessário somente que o evento seja filmado ou fotografado. Dessa forma esse método amplia um universo de aplicações que podem ir da mecânica, construção civil à área médica ou odontológica.

Conforme BENTES (2010) o Método de Correlação de Imagens Digitais pode ser aplicado em ensaios de laboratórios visando à caracterização de materiais de engenharia (ensaio de compressão axial, ensaio de tração, ensaio de fissuração, ensaio de flexão, etc.). Este método não destrutivo, e sem contato, permite determinar deslocamentos em tempo real na estrutura em análise de forma rápida, precisa e pouco onerosa, exigindo somente uma câmera fotográfica e um computador.

Neste trabalho foram desenvolvidos códigos em linguagem MATLAB para a medição de deformações longitudinais e transversais em diferentes materiais por meio do uso da técnica de correlação digital de imagens. As medidas foram tomadas de corpos de prova previamente texturizados ensaiados sobre tração e os resultados calculados pelos códigos foram comparados com os resultados de deformação medidos com a máquina de ensaio universal.

## **1.1 Objetivos**

Este trabalho estabelece o objetivo geral, como o que se tem de mais amplo a atingir, e os objetivos específicos, como aqueles que tivemos que trilhar, que passamos a expor.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi o de desenvolver algoritmos através de códigos em MATLAB utilizando correlação digital de imagens para a determinação de deformações longitudinais em ensaios mecânicos de tração.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para conseguirmos atingir o objetivo geral, galgaremos os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar as principais ferramentas de correlação digital de imagem da *toolbox Image* do MATLAB;
- b) Verificar a influência das condições da textura na eficiência do rastreamento das zonas de interesse nas imagens;
- c) Verificar a influência da capacidade de deformação do material na eficiência de cada ferramenta de rastreamento;
- d) Desenvolver gráficos e relatórios que sintetizem os dados lidos durante o processo de correlação.

## 1.2 – Organização do texto

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos sendo que no primeiro encontra-se uma breve descrição das atividades executadas e as motivações para este trabalho; no segundo consta a revisão bibliográfica necessária para o estudo e análise dos resultados. No terceiro capítulo, apresentamos a metodologia da pesquisa propriamente dita com a descrição tanto dos ensaios executados quanto das limitações dos métodos. No quarto capítulo consta uma breve descrição dos ensaios, apresentação e discussões dos resultados. No quinto capítulo consta a conclusão comentando os resultados obtidos, limitações e sugestões para estudos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, a dureza, a ductilidade e a rigidez. As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de experimentos de laboratório cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço (CALLISTER Jr., 1999).

O ensaio de tração é o mais importante método de caracterização mecânica de um material atualmente e por isso tem grande aplicação nas áreas de desenvolvimento de novos materiais, controle de qualidade de produção, dentre outros. Técnicas de caracterização associadas ao ensaio de tração têm sido estudadas de forma a maximizar os dados, e sua precisão, coletados durante o procedimento de ensaio.

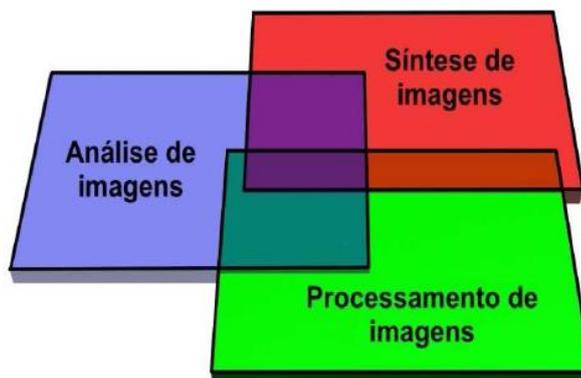
Para GARCIA *et al*, (2013) o ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Mede-se a variação de comprimento (L), como função da carga utilizada (P), e após o tratamento adequado dos resultados obtém-se uma curva tensão( $\sigma$ ) versus deformação( $\epsilon$ ).

### 2.1 Imagens digitais

Conforme PERES (2010) a Computação Gráfica (CG) pode ser dividida em pelo menos três grandes áreas: a Síntese de Imagens (SI), o Processamento de Imagens (PI) e a Análise de Imagens (AI). Essas áreas são esquematizadas na figura 02. O PI considera a manipulação de imagens depois de capturadas por dispositivos que podem ser câmeras digitais, scanners, radares, satélites etc. A área de PI inclui tópicos como diminuição de ruídos, realce e restauração de imagens e seus algoritmos são úteis em estágios iniciais de sistemas de análise de imagens, sendo utilizados para melhor extrair as informações necessárias para a realização das etapas posteriores. Nesta etapa a imagem é um dado de entrada e de saída. Já os algoritmos de AI tomam essas imagens melhoradas no PI como entrada para produzir outro tipo de saída que, em geral, são saídas numéricas, ou seja, a AI consiste em encontrar parâmetros que representem de modo sucinto informações importantes da

imagem. A AI se dedica a desenvolver teorias e métodos voltados para a extração de informações úteis contidas na imagem. A SI é uma área complementar da AI e envolve a criação de imagens sintéticas por computador a partir de dados dos objetos e cena.

**Figura 1** – Áreas da Computação Gráfica



Fonte: PERES(2010)

As imagens digitais são codificações, com um formato determinado, reconhecidas por um computador e que podem ser obtidas mediante uma câmera fotográfica digital. O recurso digital surgiu para satisfazer a necessidade de transmitir imagens entre pontos distantes na época da exploração espacial, sendo que cada unidade da imagem é denominada de pixel, o qual é transformado em valores numéricos e depois em pulsos elétricos, posteriormente transmitidos (SILVA *et al*, 2007).

Segundo MOREIRA (2015) uma imagem digital consiste num conjunto finito de elementos – comumente designados de pixels – que tem, cada um deles, associado a si mesmo uma posição  $(x,y)$  e uma intensidade. Mais precisamente, uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional que associa a cada par de valores  $(x,y)$  – par esse que representa as coordenadas da posição do elemento na imagem – uma intensidade  $f(x,y)$ .

GONZALEZ e WOODS (2003) definem uma imagem como uma função bidimensional  $f(x,y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais no plano e a amplitude para  $f(x, y)$  é a intensidade ou escala de cinza nesse ponto, sendo que, quando  $x, y$  e os valores de intensidade de  $f$  são quantidades finitas e discretas, a imagem é considerada uma imagem digital.

## 2.2 Processamento digital de imagens

Para GONZALEZ e WOODS (2003), existe uma classificação para os processos computacionais, que se dividem em três tipos: processos de baixo nível (que envolvem operações primitivas e são caracterizados quando as entradas e saídas são imagens); processos de nível médio (que envolvem a segmentação e a descrição dos objetos individuais, em que suas entradas são imagens e suas saídas são atributos dessas imagens) e os processos de alto nível (que envolvem a interpretação de objetos reconhecidos).

Dessa forma a imagem digitalizada é uma imagem  $f(x; y)$  discretizada, tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho, podendo ser considerada como uma matriz, cujos índices de linhas e de colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto. Os elementos dessa matriz digital são chamados de elementos da imagem, elementos da figura, *pixels* ou *pels*, estes dois últimos termos são abreviações de *picture elements* (elementos de figura). Quanto mais *pixels* uma imagem tiver melhor é a sua resolução e qualidade.

## 2.3 Correlação digital de imagem

Correlação Digital de Imagem, ou *Digital Image Correlation* (DIC), é um método óptico sem contato que captura imagens digitais de uma superfície de um objeto, em seguida, executa a análise de imagem para obter a deformação de campo total e medidas (PAN *et al*, 2009).

A medição de tensão em amostras que são muito pequenas, grandes, complacentes, moles ou quentes são cenários típicos em que são necessárias técnicas sem contato. Uma técnica que pode cobrir tudo isso e também pode lidar com campos de tensão complicados em estruturas ou materiais estruturais é a Correlação de Imagem Digital. Com esta técnica, a deformação pode ser calculada a partir de uma série de imagens consecutivas com resolução sub-pixel (EBERL *et al*, 2010).

Para AB GHANI *et al*, (2016) essa técnica começa com uma imagem de referência (antes do carregamento) e a série de fotos tiradas durante a deformação. Imagens deformadas mostram um padrão de pontos diferente em relação à imagem de referência inicial não deformada. Estes padrões de diferença podem ser calculados através da correlação dos pixels da imagem de referência e de qualquer imagem deformada e medição de deslocamento de campo total pode ser calculada.

Conforme BLABER *et al*, (2015) a DIC usa algoritmos de registro de imagem para rastrear os deslocamentos relativos de pontos materiais entre uma imagem de referência (tipicamente, o indeformado) e uma imagem corrente (normalmente, o deformado).

Segundo MOREIRA (2015) no domínio dos materiais sujeitos a pequenas deformações, como naqueles tipicamente associados à Engenharia Mecânica, as técnicas de DIC apresentam elevado desempenho, existindo inclusive *softwares* comerciais concebidos para esse efeito. No entanto, no caso de materiais sujeitos a grandes deformações, entre os quais os biomateriais com propriedades de hiperelasticidade, a qualidade dos resultados obtidos com recurso desta técnica pode ser muito insuficiente. O comportamento altamente não linear, e muitas vezes não homogêneo, desses materiais dificulta todos os procedimentos de correlação entre imagens, revelando-se um obstáculo ao sucesso da aplicação da técnica.

## **2.4 Ferramentas e critérios de correlação digital de imagens no matlab**

Como citado por MOREIRA (2015), uma imagem digital é tratada, em MATLAB, como uma matriz/array em que a cada pixel da imagem corresponde a uma posição no array e a respetiva intensidade na escala de cinza. As operações sobre matrizes encontram-se, então, na base de muitas das etapas dos algoritmos desenvolvidos para o rastreamento dos pontos de interesse.

Neste sentido, o MATLAB dispõe de algumas ferramentas computacionais de correlação digital de imagens, como a *Normxcorr2* e a *cpcorr*. A ferramenta de correlação *Normxcorr2* exige a delimitação de sub-região dentro da imagem de referência, que pode ser rastreada na imagem deformada seguinte, possibilitando a determinação do deslocamento da sub-região entre os dois momentos de captura das

imagens. Esta ferramenta gera uma matriz resultante  $C$  que contém os coeficientes de correlação normalizados entre -1 e 1. Em seguida lê-se a matriz dos coeficientes de correlação, buscando o pico, ou coordenada de maior aproximação de 1, para estabelecer a posição da sub-região dentro do *array* que corresponde à imagem deformada, normalmente chamada “corrente”.

Segundo Lewis (1995) e a documentação do MATLAB, a ferramenta *Normxcorr2* utiliza a seguinte equação para calcular os coeficientes de correção normalizada:

$$y(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x-u, y-v) - \bar{t}]}{\{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2\}^{0,5}} \quad (3)$$

onde  $f$  é a imagem corrente

$\bar{t}$  é a média da imagem de referência

$\bar{f}_{u,v}$  é a média de  $f(x, y)$  na região sobre a imagem corrente.

Como reportado por PICOY (2016) e documentação do MATLAB, a ferramenta *Normxcorr2* só pode determinar deslocamentos inteiros, com precisão de um ou dois pixels, o que a torna um método mais adequado para determinar uma aproximação inicial dos deslocamentos ou mais convenientemente aplicado quando o material sob ensaio apresenta grande capacidade de deformação, com deformação entre imagens subsequentes de pelo menos um pixel.

A ferramenta *cpcorr*, segundo documentação do MATLAB, possui precisão de sub-pixel, nomeadamente 0,1 pixel, e capacidade de ajuste (correlação) de deslocamento entre imagens subsequentes de no máximo 4 pixels, o que a torna eficiente na medida mesmo de pequenas deformações no material sendo solicitado. Diferentemente da ferramenta *Normxcorr2*, *cpcorr* não precisa de uma sub-região para correlacionar com a imagem de referência, mas de pontos e sua vizinhança, que são correlacionados com custo computacional muito menor em relação à uma área, por exemplo, tornando esta ferramenta muito mais rápida na execução dos códigos de DIC.

Outro importante fator a ser considerado, conforme também estudado por MOREIRA (2015) e BENTES (2010), é a relação entre o tamanho das sub-regiões de busca ou grids de sub-regiões de busca, assim como grids de pontos de rastreamento,

em relação ao tamanho dos “grãos” da textura produzida e o contraste resultante da aplicação da textura. Uma textura com grãos menores proporciona um rastreamento mais preciso dos pixels de referência para a imagem deformada, contudo exigem maior resolução da câmera de captura, bem como condições de iluminação adequadas. Texturas com grãos maiores podem ser rastreadas sob condições de resolução e iluminação menos favoráveis, mas com custo da redução da precisão das medidas realizadas.

## **2.5 ZOI – Zona de interesse**

Uma importante característica do processamento digital de imagem é a região denominada de zona de interesse, *Zone of Interest* (ZOI), também chamada por alguns autores como região de interesse, *Region of Interest* (ROI), que é descrita conforme os autores abaixo.

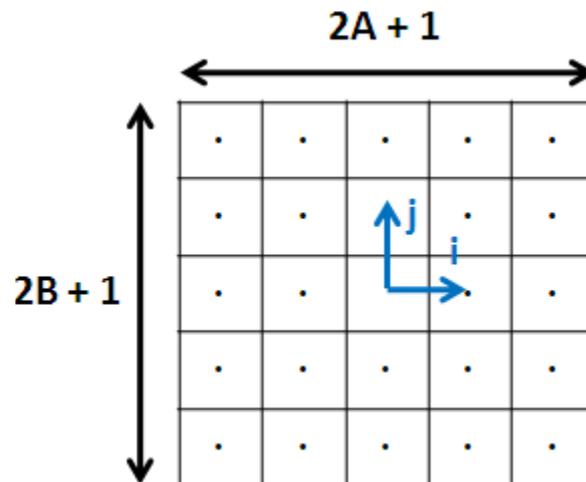
Para ANTONIU (2015), o objetivo principal da DIC-2D (planar) é a obtenção de campos de deslocamentos e de deformações, dentro de uma região de interesse denominada de ROI para uma amostra de material submetido à deformação, mediante adoção de técnicas de processamento de imagens.

Na correlação de imagem digital, é quase impossível rastrear cada pixel apenas com base em seu valor de pixel, porque é necessário que haja muitos valores de pixel repetidos na imagem. Aqui, uma área consiste em vários pixels, nomeados como subconjunto, é introduzida no processo de correlação. Cada subconjunto é considerado com uma distribuição de brilho exclusiva. O deslocamento do objeto é determinado pesquisando a região na imagem deformada que possui uma distribuição de brilho idêntica à do subconjunto da imagem de referência (ZHANG, 2014).

Segundo BENTES (2010) por correlação de imagens aplicada a uma imagem em preto e branco consiste na comparação entre os valores de escala de cinza de cada pixel constituinte de duas imagens, a primeira chamada de referência e a segunda de transformada, obtidas em intervalos de tempo diferentes de um experimento. Como os valores de escala de cinza estão compreendidos somente entre 0 e 255, e uma imagem possui milhares de pixels, logo, haverá diversos pixels com o mesmo valor de escala de cinza o que acarretaria resultados errôneos. Para

resolver esse problema é necessário a introdução do conceito de ZOI. A sigla ZOI, do inglês *Zone of Interest*, é uma região com a quantidade de pixels conhecida, cujo centro é a origem dos vetores  $i$  e  $j$ , conforme esboçado na Figura 02 a seguir.

**Figura 2** – ZOI (*Zone of Interest*).



Fonte: BENTES (2010).

## 2.6 Algoritmo

Para MOREIRA (2015) em diversas aplicações, nomeadamente em engenharia e na medição de deformações, pretende-se resoluções de medida tão elevadas quanto possível. Esse aumento de resolução pode ser alcançado através de um conjunto de estratégias: melhorar a resolução do CCD; utilizar maior ampliação na captura das imagens (que tem como contrapartida a redução de largura de campo); implementar algoritmos de DIC que permitam resoluções inferiores a um pixel (sub-pixel), dentre outras medidas.

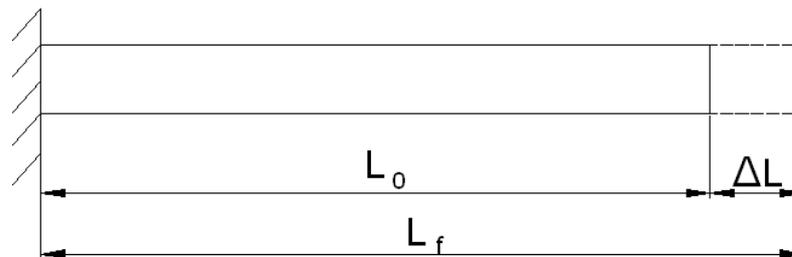
Segundo BLABER *et al*, (2015) em algoritmos DIC baseados em subconjuntos, a imagem de referência é divididos em regiões menores referidas como subconjuntos ou subjanelas. A deformação é considerada homogênea dentro de cada subconjunto, e os subconjuntos deformados são então rastreados na imagem atual.

## 2.7. Deformação

Deformação é a mudança na forma e tamanho de um corpo quando uma força é aplicada no mesmo (HIBBELER, 2000). No caso dos materiais utilizados na engenharia, essas deformações são geralmente imperceptíveis a olho nu. No estudo geral de tensão/deformação, um elemento pode estar submetido a deformações normais ou de cisalhamento.

Deformação normal média (Figura 03) é um parâmetro adimensional, correspondente ao alongamento ou à contração de um elemento por unidade de comprimento HIBBELER (2000).

**Figura 3 – Deformação normal média.**



Fonte: BENTES (2010)

Conforme BENTES (2010), a deformação uniaxial,  $\varepsilon$ , é obtida através da razão da variação do seu comprimento pelo comprimento inicial.

$$\varepsilon = (L_f - L_0) / L_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (2)$$

Onde  $\Delta L$  é a variação do comprimento do elemento, ou seja, a variação entre o comprimento final ( $L_f$ ) e o inicial ( $L_0$ ).

## 2.8 Os extensômetros

Pode-se demonstrar facilmente que, no caso da deformação dupla num ponto, basta o conhecimento das extensões em três direções distintas no plano normal à direção correspondente à extensão principal nula, para que fique completamente definido o estado de deformação nesse ponto. Para se obter o conhecimento das extensões em direções determinadas utilizam-se extensômetros (PORTELA e SILVA, 1996).

Segundo PORTELA e SILVA (1996) a extensometria é um conjunto de técnicas que permitem determinar o estado de deformação em torno de um ponto de um corpo, a partir do conhecimento das extensões em várias direções nesse ponto.

Segundo OLIVEIRA (2010) extensômetros são dispositivos eletrônicos com tecnologia amplamente difundida e uso consolidado na engenharia. Estes dispositivos permitem mensurar, com confiabilidade e precisão deformações de um corpo quando submetido a esforços mecânicos ou efeitos térmicos.

### 2.8.1. Funcionamento dos extensômetros

A necessidade de utilizar um equipamento que realize medidas das variações dos corpos de prova, após o ensaio de tração é muito importante, conforme ressaltam PORTELA e SILVA (1996). Os extensômetros são aparelhos utilizados experimentalmente, para avaliar as extensões ocorridas num dado ponto e numa dada direção numa peça ou corpo de prova. Na realidade, os extensômetros apenas medem a variação de distância ( $\Delta L$ ) de dois pontos inicialmente afastados de ( $L$ ), distância essa que se designa por base de medida, sendo a extensão dada pelas equações 1 e 2.

### 2.8.2 Os tipos de extensômetros

Os extensômetros, segundo PORTELA e SILVA (1996), são classificados de acordo com o fenômeno em que se baseia o seu princípio de funcionamento. Os tipos mais correntes de extensômetros são os seguintes:

- Extensômetros mecânicos - em que por meio de dispositivos mecânicos de alavancas e engrenagens ligados à base se obtém uma ampliação dos deslocamentos relativos das extremidades da base;
- Extensômetros óticos - em que a ampliação do deslocamento relativo das extremidades da base é conseguida por meios óticos (espelhos e lentes);
- Extensômetros elétricos de resistência - que se baseiam na variação da resistência elétrica de um condutor (circuito) quando submetido a uma deformação;
- Extensômetros acústicos ou de corda vibrante - em que a medição das extensões é realizada por auscultação do período de vibração de um fio de aço (corda vibrante)

tendido entre dois pontos ligados à base de medida, sendo a auscultação feita por meio de um eletroímã;

- Extensômetros elétricos de indução - baseados na variação da impedância do circuito de um solenoide quando submetido a uma deformação; 2
- Extensômetros de semicondutores - que se baseiam na propriedade que exibem certos materiais não metálicos de variarem a resistência sob a ação de deformações;
- Extensômetros fotoelásticos - que se baseiam na propriedade que certos materiais têm de exibir características fotoelásticas quando submetidos a deformação.

Para WEBER (2007), os extensômetros são usados para medir deformações em diferentes estruturas. A medida é realizada colando um extensômetro nestas estruturas, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto. Deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Isto leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação. Os extensômetros fornecem um método excelente de converter deformações em quantidade elétrica. As características das medidas com extensômetros são resumidas abaixo:

- Alta precisão de medição;
- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- Fácil utilização desde que conhecida a boa técnica; excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Aplicáveis submersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo desde que utilizado tratamento apropriado;
- Usados como elementos transdutores para medidas de várias quantidades físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento);
- Possibilita a medida em locais remotos;

## **2.9 Videoextensometria**

O vídeo-extensômetro é um equipamento capaz de executar medidas de deformação da captura contínua de imagens da amostra durante o ensaio, usando uma ou mais câmeras de vídeo conectadas a um computador, de acordo com

GOUVEIA (2013). A Figura 04 abaixo mostra um vídeo extensômetro e seu aparato de captura de imagem.

**Figura 4 – Vídeo - Extensômetro**

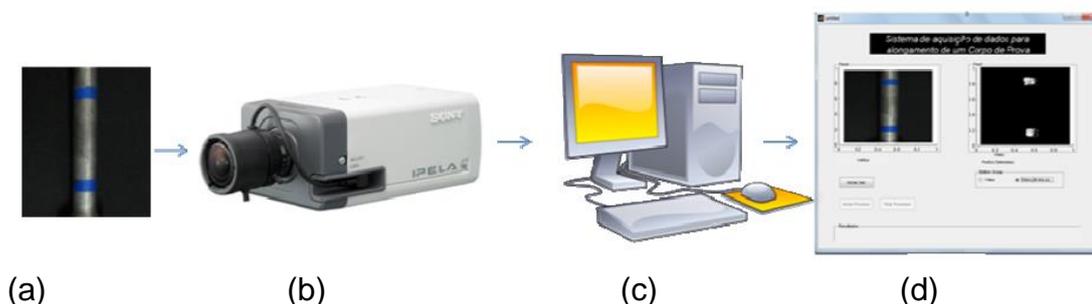


Fonte: Ab Ghani *et al.* (2016).

O vídeo extensômetro é um equipamento que possibilita calcular o alongamento de um corpo de prova durante um ensaio de tração através de Processamento Digital de Imagens particularmente adequado para testes em amostras de elevado alongamento para determinação do alongamento na carga máxima e/ou ruptura. Essa ferramenta se torna muito útil em situações em que se quer gerar gráficos computadorizados. Ele deve ser acoplado à máquina de forma que seja possível sua fácil regulagem para que atenda às necessidades do operador e aos requisitos da norma.

Para desenvolver esse equipamento é necessária uma câmera que permita uma boa qualidade de imagens e um suporte firme e que absorva vibrações para que a vibração da própria máquina de ensaios não altere os resultados. A câmera escolhida é controlada por um *software* que interpreta os dados capturados e os faz interagir com outro programa que irá relacionar o valor do alongamento com a força aplicada no corpo de prova. A imagem é digitalizada por uma câmera e é processada por um computador em tempo real. Este processamento de imagem permite a determinação do alongamento durante deformações mecânicas. A utilização do vídeo extensômetro tem muitas vantagens em comparação com os convencionais extensômetros mecânicos. Na Figura 05 está o arranjo de um sistema em que a câmera captura imagens do corpo de prova às envia para o computador que através do *software* as processa e segmenta para o cálculo do alongamento. (VASCONCELOS *et al.*, 2012).

**Figura 5** – Desenho esquemático de um sistema de captura e análise de imagem. (a) Corpo de prova marcado; (b) Câmera usada no vídeo extensômetro; (c) computador e (d) janela do software de análise e correlação.



Fonte: (VASCONCELOS *et al.*, 2012).

O sistema consiste na leitura de deslocamentos que ocorre no objeto de estudo. Tal deslocamento, é medido através de marcas realizadas no corpo de prova, sendo a distância entre essas marcas, a posição no instante inicial, ou seja, o comprimento de referência (GOUVEIA, 2013).

Segundo VASCONCELOS *et al.*, (2012) o vídeo extensômetro tem por base de funcionamento o Processamento Digital de Imagens. Sua implementação foi feita visando à praticidade em transformar dados de imagens que são processados utilizando o software MATLAB na plataforma Windows 7 transformando-os em informações digitais.

As técnicas empregadas consistem em capturar o vídeo do ensaio através de uma câmera posta diante do centro do corpo de prova fixado na máquina em tempo real para que essas informações trabalhem em conjunto com a tensão instantânea aplicada no corpo de prova. O software responsável pelo processamento da filmagem transforma o vídeo em frames e processa as imagens com uma velocidade de vinte frames por segundo, velocidade está geralmente de valor mínimo em máquinas de tração que recebem vinte valores de alongamento por segundo, o mesmo que vinte quadros por segundo, já que cada um retorna um valor.

Após a captura dos quadros o programa transforma as imagens obtidas para tons de cinza, desse modo ele interpreta quais pontos das imagens possuem a intensidade das cores azul ou vermelha por segmentação. Dependendo da cor que for programada para a captação e dependendo da cor com que o corpo de prova for marcado. Com a interpretação dos dois pontos marcados, por meio de uma função que detecta o centro geométrico de cada região encontrada, é calcula a distância em

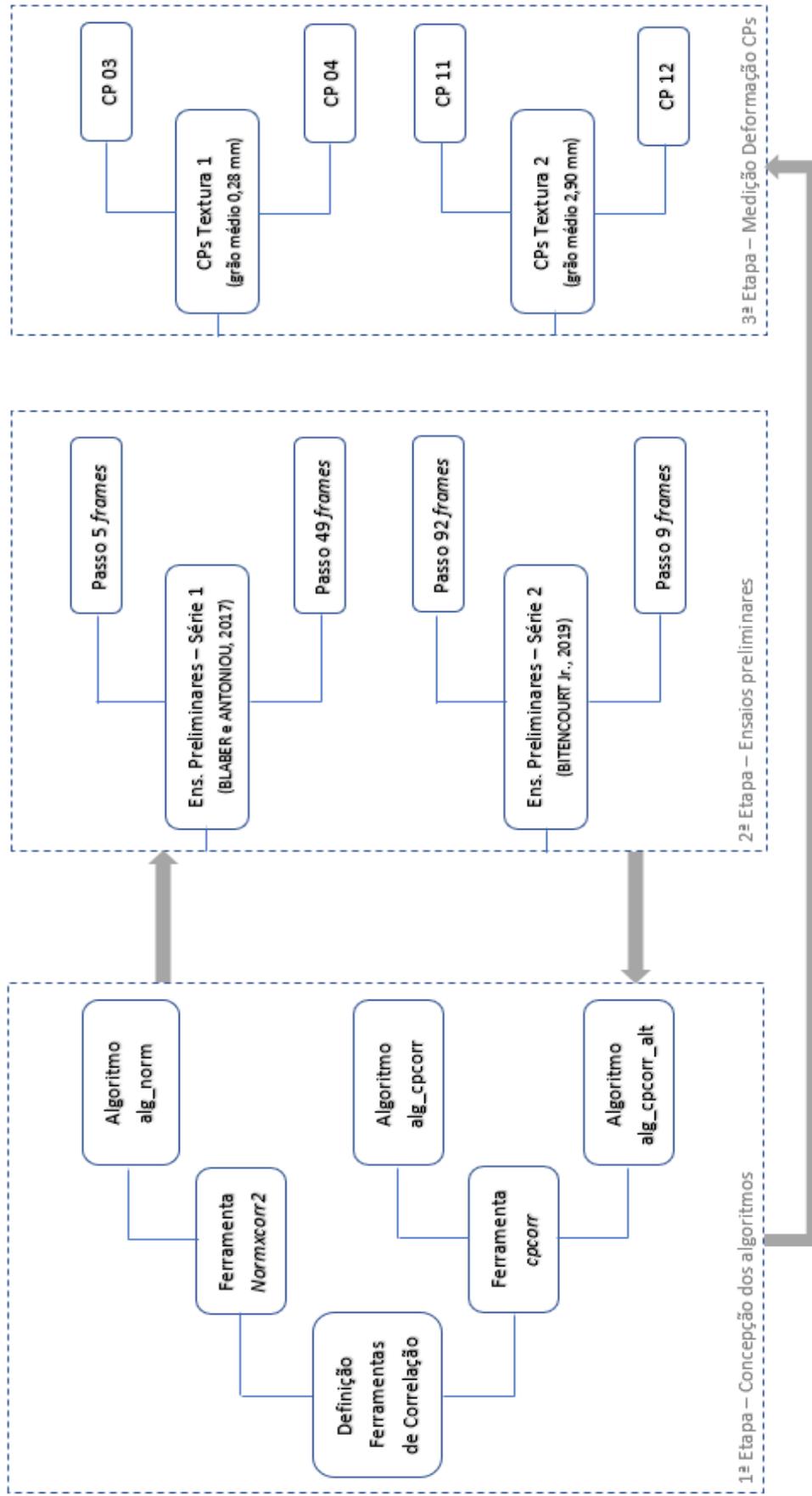
*pixels* aplicando o cálculo Euclidiano para distância entre dois pontos. Logo em seguida é efetuada a conversão para alongamento em milímetros. Essa conversão depende diretamente de uma calibragem feita previamente com a distância entre a lente da câmera e o corpo de prova. Como o suporte está fixado essa calibração só é necessária caso por algum motivo excepcional o suporte tenha que ser movido do local (GONZALES, 2009 apud VASCONCELOS *et al*, 2012).

### **3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

A metodologia para o desenvolvimento dos algoritmos de correlação de imagens foi aplicada em três etapas: uma primeira etapa de concepção dos algoritmos, na qual foi levantando por pesquisa bibliográfica as ferramentas do MATLAB mais adequadas à técnica de DIC, sendo então desenvolvidos os códigos; uma segunda etapa que consistiu em um processo iterativo de desenvolvimento dos algoritmos à partir da aplicação dos mesmos na medida de deformação de corpos de prova produzidos por BLABER e ANTONIOU (2017) e BITENCOURT Jr (2019); e por fim uma terceira etapa na qual foram produzidos corpos de prova para ensaio de tração, os quais foram texturizados em duas formas distintas e medidas suas deformações em tração pelo uso de todos os algoritmos desenvolvidos.

A figura 06 ilustra o fluxograma aplicado no desenvolvimento dos algoritmos testados ao longo do trabalho.

Figura 6: Fluxograma do desenvolvimento dos algoritmos estudados.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1 Concepção dos algoritmos

Para a concepção dos algoritmos, foram inicialmente levantadas as ferramentas do MATLAB adequadas à aplicação da técnica de DIC. De trabalhos como MOREIRA (2015), BENTES (2010), PICOY (2016), ZHANG (2014) e AB GHANI *et al.* (2016), escolheu-se as ferramentas de correlação digital de imagem *Normxcorr2* e *cpcorr*, ambas constantes da *Toolbox Image* do MATLAB.

#### 3.1.1 Critérios para Desenvolvimento dos Algoritmos

O parâmetro inicial avaliado para a concepção dos algoritmos se refere ao sistema de coordenadas utilizado para a definição da posição de cada ponto de rastreamento e a medida de seu deslocamento na imagem corrente em relação à imagem de referência. Optou-se por utilizar dois sistemas de coordenadas diferentes para a determinação dos deslocamentos: um sistema em que os deslocamentos são calculados à partir da distância original entre dois pontos/sub-áreas adjacentes, medidos sempre no sentido longitudinal; e um outro sistema em que o deslocamento de cada ponto/sub-área é calculado à partir de sua própria posição original, referenciada ao canto superior esquerdo do *array* que representa a imagem de referência.

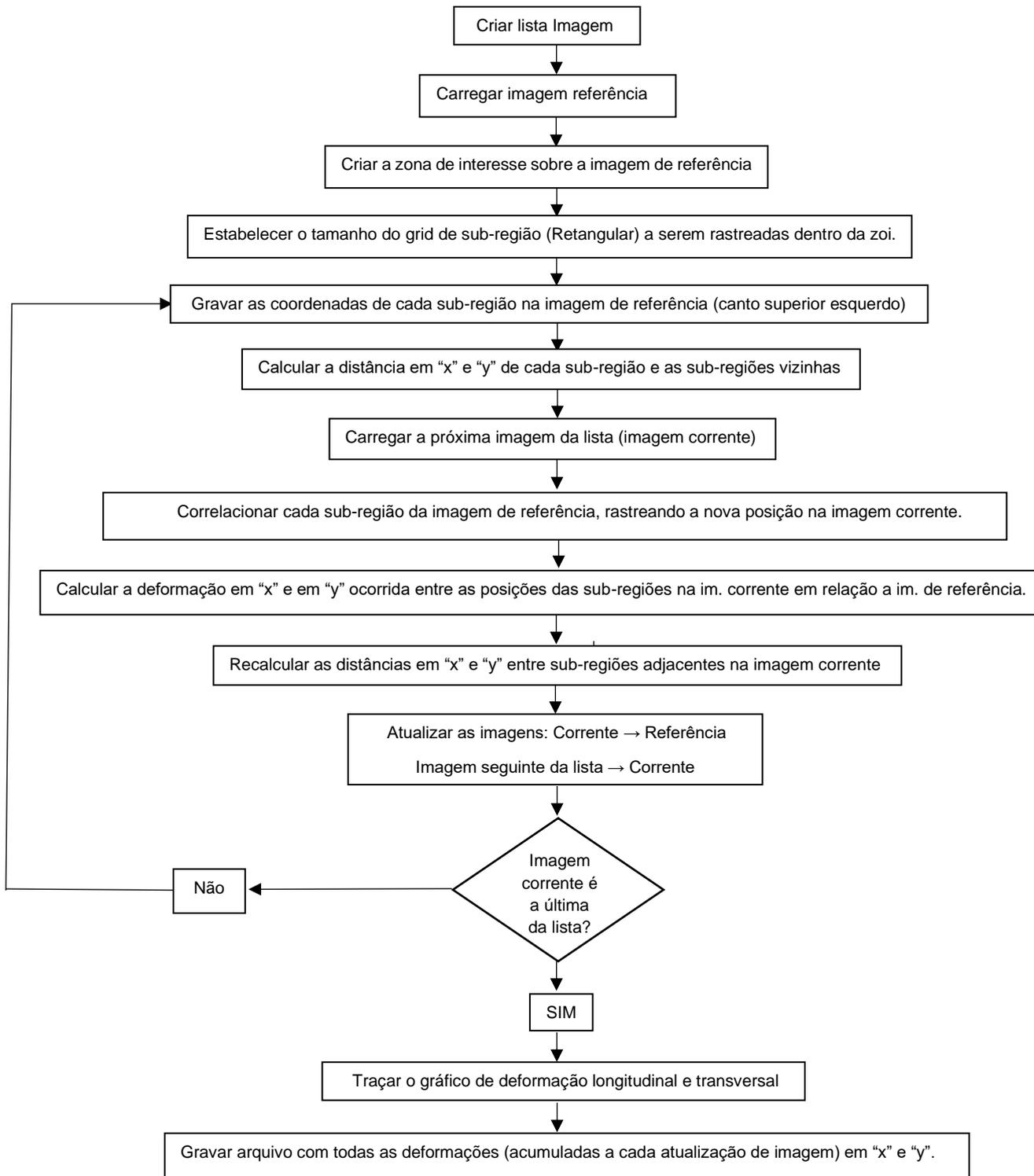
Em seguida, como mais um parâmetro inicial a ser definido para a concepção dos algoritmos, decidiu-se adotar duas formas de localização das sub-regiões de rastreamento, assim como para os pontos de rastreamento: uma permitindo a criação de grids automáticos de sub-regiões/pontos, a partir da definição do número de linhas e colunas do grid; e outra de livre posicionamento pelo usuário, de modo que este possa escolher os pontos de rastreamento mais convenientes em função da qualidade da textura ou presença de especificidades, como furos, ressaltos dentro outros, na superfície do material solicitado.

Isto posto, foram desenvolvidos três algoritmos, doravante denominados como: **alg\_norm**, algoritmo desenvolvido utilizando a ferramenta de correlação *Normxcorr2*; **alg\_cpcorr**, algoritmo desenvolvido com a utilização da ferramenta de correlação *cpcorr*, estes dois primeiros concebidos para o estabelecimento dos pontos/sub-áreas de rastreamento por geração de grid automático; **alg\_cpcorr\_alt**, algoritmo que se utiliza da ferramenta de correlação *cpcorr* mas que permite ao usuário a livre localização da quantidade de pontos de rastreamento por ele escolhida.

### 3.1.2 Algoritmo alg\_norm

O algoritmo alg\_norm foi desenvolvido seguindo o fluxograma apresentado na Figura 07.

**Figura 7** – Fluxograma do funcionamento do algoritmo alg\_norm.

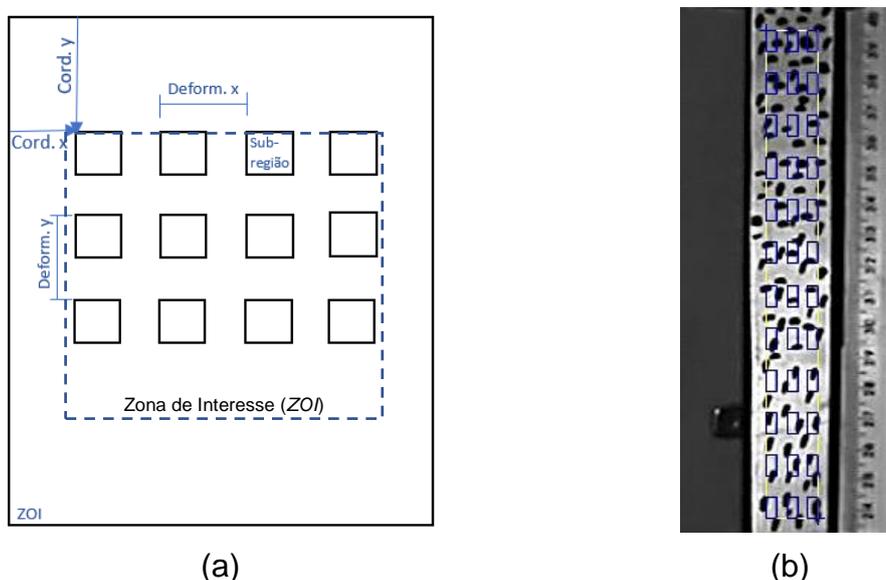


Este algoritmo requer que seja criado um grid retangular pelo usuário, pelo estabelecimento do número de linhas e colunas pretendidos, que comporão as sub-regiões de rastreamento durante a correlação normalizada entre imagens subsequentes. Inicialmente se estabelece uma Zona de Interesse (*Zone of Interest*) – ZOI, a partir da qual se localiza o grid escolhido. A origem do sistema de coordenadas é estabelecida no canto superior esquerdo do *array* da imagem de referência, sendo cada sub-região criada referenciada à este ponto em relação ao seu respectivo canto superior esquerdo.

Os deslocamentos, e conseqüentemente as deformações, são calculadas a partir da distância original entre sub-regiões adjacentes, na imagem indeformada (de referência) e as novas posições correspondentes de cada sub-região rastreada na imagem corrente, nas direções longitudinal (y) transversal (x).

A deformação final de cada passo entre imagens subsequentes será a média das deformações em x e em y. Abaixo temos duas figuras: a Figura 08 (a) mostra o comportamento da aplicação do código tendo uma referência indicada pelas posições iniciais de x e y, e também as deformações das sub-regiões, sempre analisadas com relação ao ponto superior esquerdo de cada sub-região; a Figura 08 (b) mostra a zona de interesse e as sub-regiões no próprio corpo de prova durante o processo de correlação cruzada normalizada.

**Figura 8** – Parâmetros de funcionamento do algoritmo *alg\_norm*. (a) Origem do sistema de coordenada e forma de determinação dos deslocamentos; (b) aplicação das sub-áreas à superfície do corpo de prova.

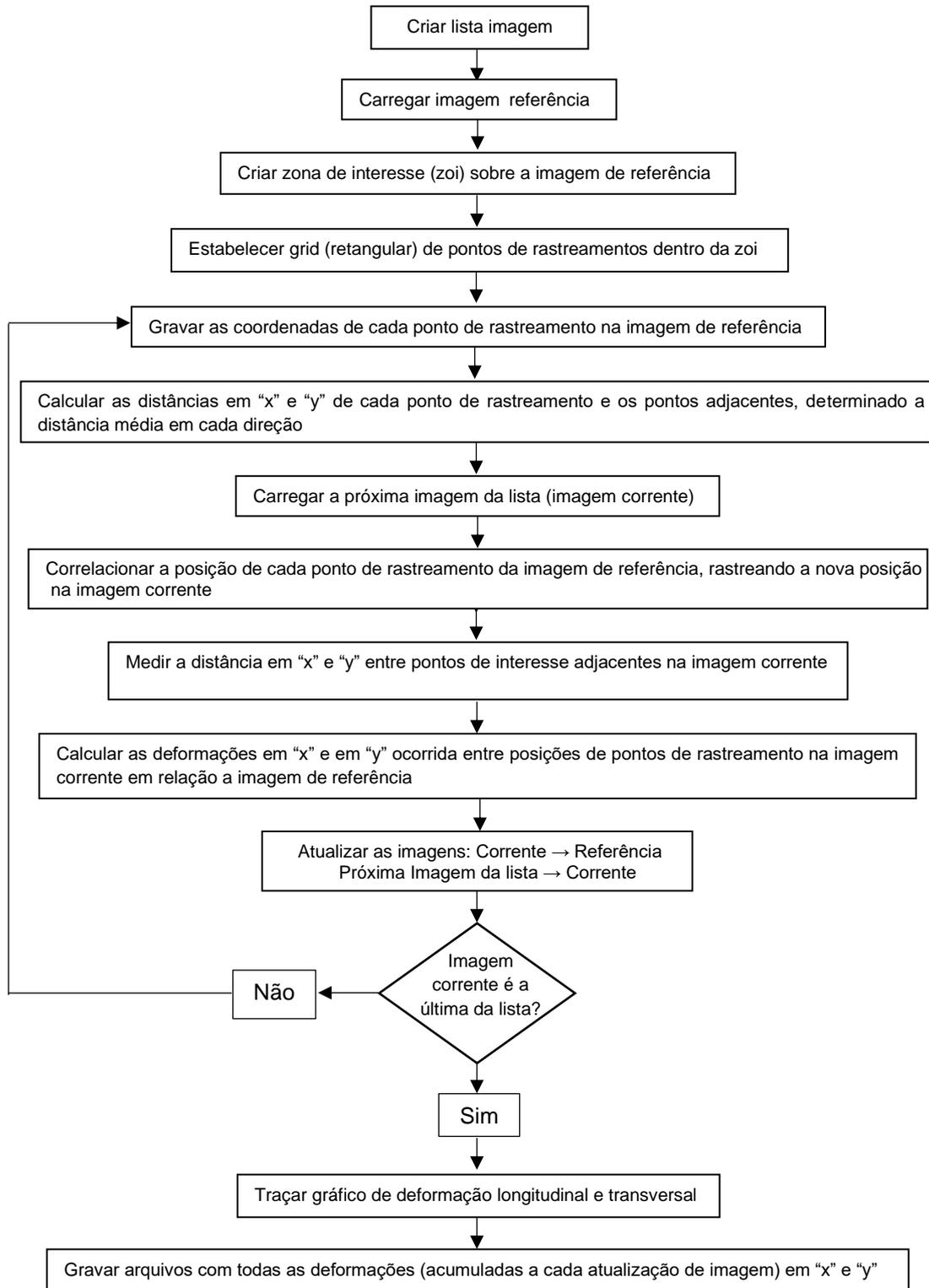


Fonte: próprio autor.

### 3.1.3 Algoritmo alg\_cpcorr

O algoritmo alg\_cpcorr foi desenvolvido seguindo o fluxograma apresentado na Figura 09.

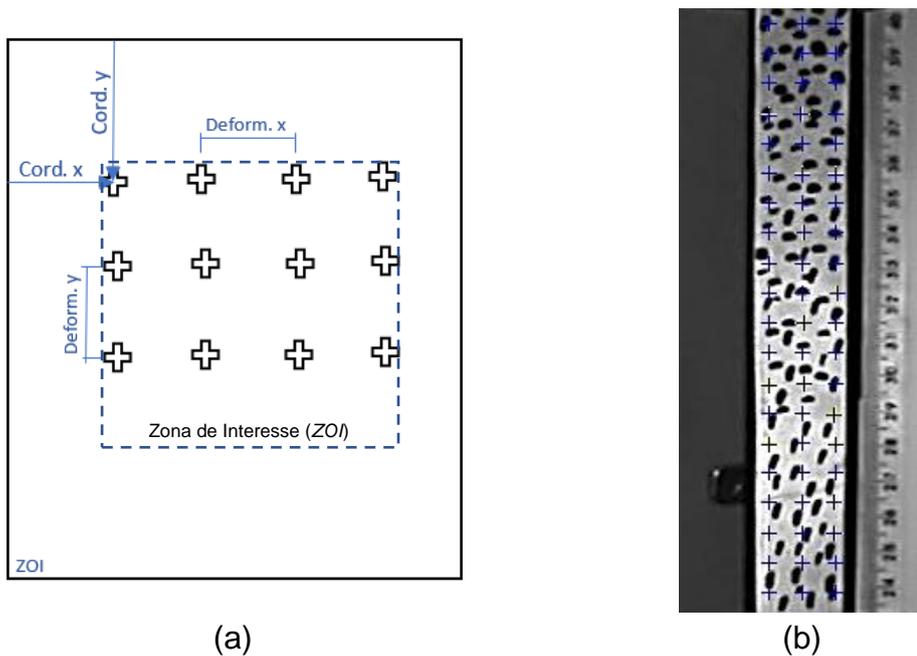
**Figura 9** – Fluxograma do funcionamento do algoritmo alg\_cpcorr.



O algoritmo necessita que após criada a zona de interesse, seja estabelecido sobre esta um grid retangular para a localização dos pontos de rastreamento, a serem utilizados nas correlações pela ferramenta *cpcorr*. Temos abaixo a Figura 10 (a) onde a origem do sistema de coordenadas está fixada na extremidade superior esquerda do *array* da imagem de referência. A Figura 10 (b) mostra a criação do grid de rastreamento sobre a superfície do corpo de prova.

As deformações, tanto em x como em y, são calculadas a partir da distância original de dois pontos adjacentes na imagem de referência e a nova distância medida na imagem corrente após o processo de correlação. A deformação final se calcula pela média das deformações em “x” e “y”.

**Figura 10** – Parâmetros de funcionamento do algoritmo *alg\_cpcorr*. (a) Origem do sistema de coordenada e forma de determinação dos deslocamentos; (b) aplicação dos pontos de rastreamento sobre a superfície do corpo de prova.

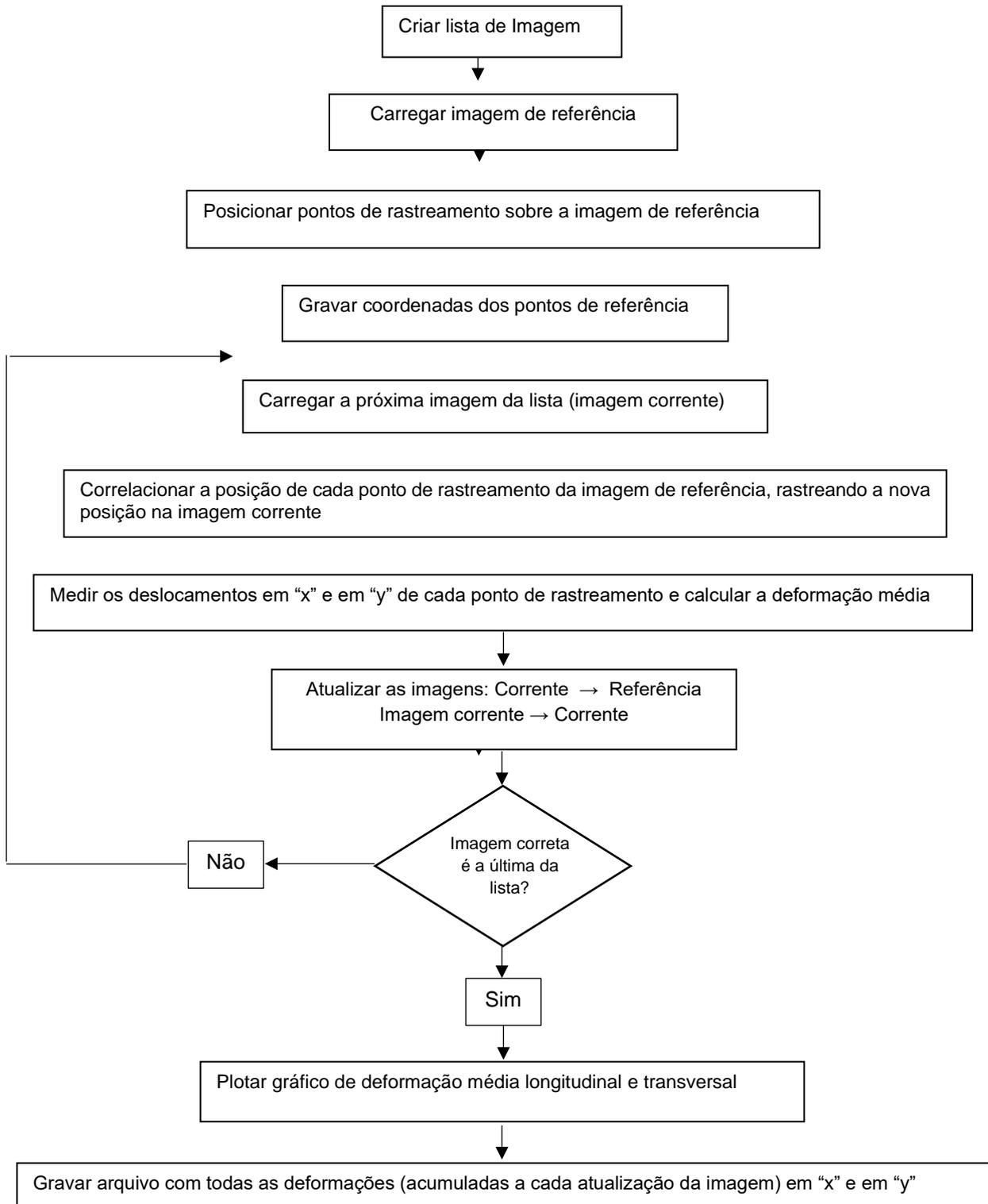


Fonte: próprio autor.

### 3.1.4 Algoritmo alg\_cpcorr\_alt

A Figura 11 ilustra o fluxograma de funcionamento do algoritmo alg\_cpcorr\_alt.

**Figura 11** – Fluxograma do funcionamento do algoritmo alg\_cpcorr\_alt.

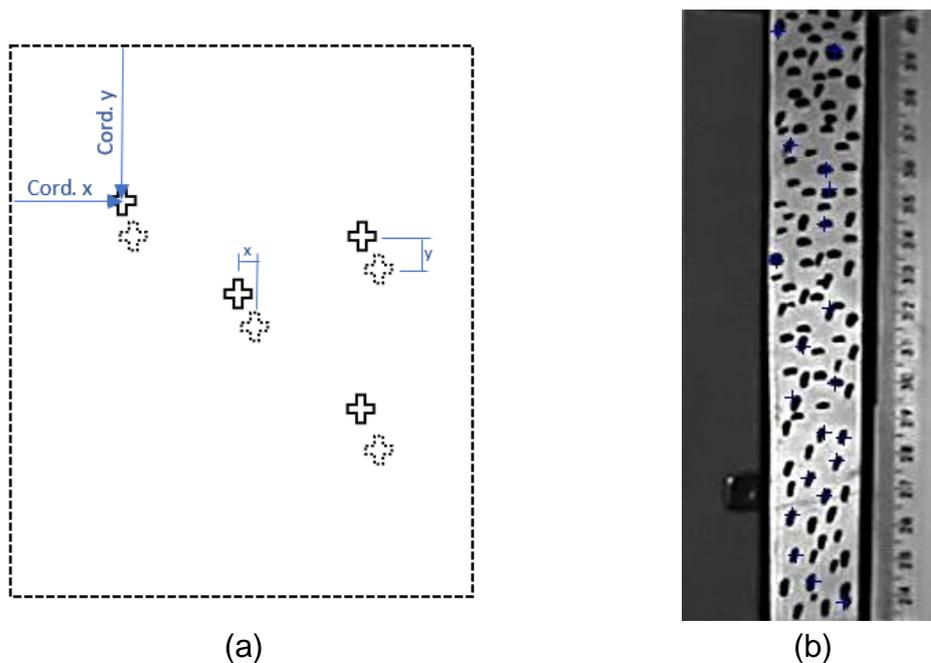


Neste algoritmo, o usuário escolhe a quantidade de pontos de rastreamento a serem localizadas no *array* da imagem de referência, passando em seguida a posicioná-los manualmente nas regiões em que considerar mais importantes, como por exemplo no entorno de furos ou ressaltos ou ainda em áreas com iluminação e qualidade da textura favoráveis.

A diferença fundamental deste algoritmo em relação aos anteriores é a forma como o sistema de coordenadas estabelecido calcula os deslocamentos de cada ponto de rastreamento. Como nos anteriores, a origem do sistema de coordenadas está estabelecida no canto superior esquerdo do *array* da imagem de referência, mas diferentes dos demais códigos, neste, os deslocamentos de cada ponto são referidos em relação à posição individual deste ponto rastreado por correlação cruzada entre a imagem de referência e a imagem corrente.

As deformações são calculadas nos eixos longitudinal ( $y$ ) e transversal ( $x$ ), sendo a medida de deformação final apresentada no gráfico como a média aritmética de todas as deformações em cada direção. A Figura 12 ilustra esquematicamente o funcionamento do sistema de coordenadas para a determinação dos deslocamentos.

**Figura 12** – Parâmetros de funcionamento do algoritmo *alg\_cpcorr\_alt*. (a) Origem do sistema de coordenada e forma de determinação dos deslocamentos; (b) aplicação dos pontos de rastreamento à superfície do corpo de prova.



Fonte: Próprio autor (2019).

### 3.2 Ensaios preliminares

Paralelamente ao desenvolvimento e avaliação dos algoritmos, foram inicialmente realizados testes sistemáticos, de forma interativa, com um conjunto de imagens disponibilizado por BLABER e ANTONIOU (2017), no site da Plataforma Open source *Ncorr*<sup>1</sup>, uma poderosa ferramenta de correlação digital de imagens 2-D. Os autores disponibilizaram um conjunto de 49 imagens, em condições de alta resolução e excelente textura, de material com alta capacidade de deformação, que se passa a denominar neste trabalho como **Série 1**.

Nesta etapa, utilizou-se ainda um conjunto de 92 imagens resultantes do desenvolvimento do trabalho de BITENCOURT Jr. (2019), que ensaiou em tração corpos de prova em compósito de matriz epóxi e reforço de fibras de vidro, segundo a norma ASTM D 3039. A este conjunto de imagens se passa a denominar **Série 2**.

A metodologia de captura das imagens do corpo de prova sob ensaio consistiu na filmagem de todo o ensaio e posterior extração dos *frames* do vídeo, gerando assim a sequência de imagens necessária para o estabelecimento dos pontos ou regiões de rastreamento e cálculo das deformações. Assim, deve-se também considerar, no desenvolvimento inicial dos algoritmos, o *passo/step* de deformação entre imagens subsequentes. A extração de um número muito grande de *frames* de um vídeo pode gerar uma quantidade demasiadamente grande de imagens com evolução dos deslocamentos muito pequena entre imagens subsequentes, exigindo um nível de precisão das ferramentas de rastreamento mais elevado, além de um custo computacional para processamento de todas as imagens muito demorado, ou até mesmo inexequível. Desta forma, tanto a Série 1 quanto a Série 2 tiveram as respectivas deformações longitudinais medidas em dois passos diferentes: 5 e 49 *frames* para a Série 1 e 9 e 92 *frames* para a Série 2.

Os ensaios preliminares serviram basicamente para desenvolver a capacidade dos algoritmos em criar automaticamente a lista de imagens a serem correlacionadas, tratá-las transformando-as em escala de cinza durante o processamento, estabelecer o grid de pontos de rastreamento, realizar a correlação cruzada normalizada e finalmente plotar os resultados de deformação longitudinal e transversal resultantes dos ensaios.

---

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.ncorr.com/>

Como observado por MOREIRA (2015), quando o coeficiente de correlação normalizado entre uma sub-região da imagem de referência e sua nova posição na imagem corrente é muito baixo, muito menor que 1, a sub-região pode ser localizada na imagem corrente em posição muito distinta da posição original na imagem anterior, configurando o fenômeno conhecido como descorrelação. Neste sentido, os ensaios preliminares foram conduzidos também para avaliar este efeito nos ensaios realizados.

A tabela 01 mostra os corpos de prova utilizados no desenvolvimento dos algoritmos, a sua série, suas características quanto a capacidade de deformação e os respectivos passos.

Tabela 01: Corpos de prova utilizados na fase de ensaios preliminares para desenvolvimento dos algoritmos

CORPO DE PROVA	CARACTERÍSTICAS	PASSO
Série 1	Alta capacidade de deformação	5 frames
		49 frames
Série 2	Baixa capacidade de deformação	9 frames
		92 frames

Fonte: Próprio autor.

### 3.3 Medidas de deformação em corpos e prova sobre tração

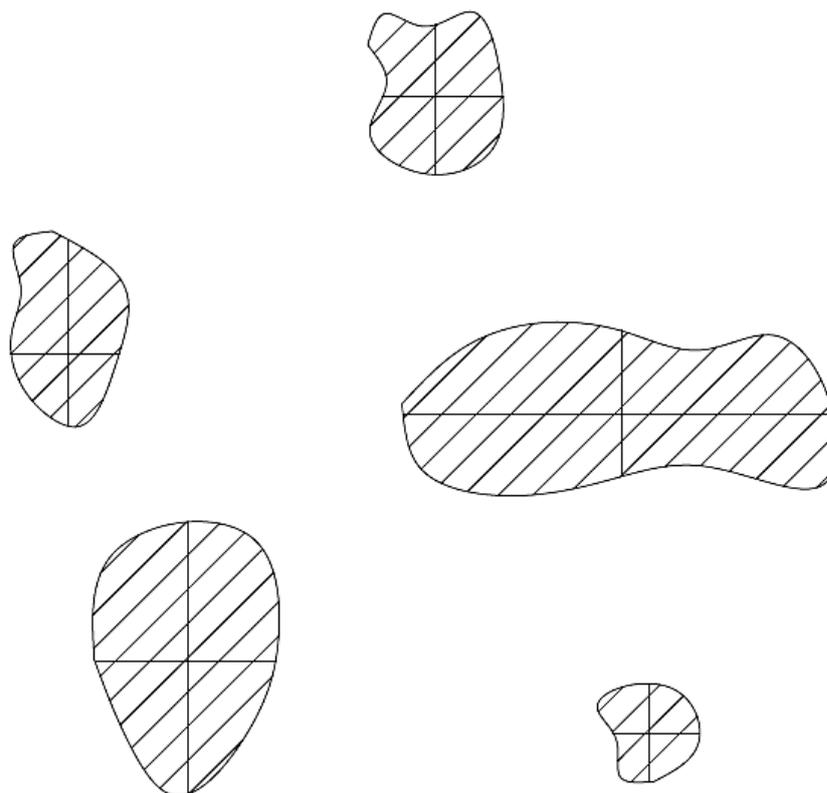
Após a etapa de desenvolvimento inicial dos algoritmos, produziu-se corpos de prova de alumínio plano para ensaios de tração, segundo a norma ABNT NBR 7549. Os corpos de prova foram texturizados com dois tipos bem distintos de texturas e em seguida ensaiados, sendo cada procedimento filmado, e os resultados de deformação longitudinal e transversal comparados entre os diferentes algoritmos e os valores registrados na máquina de ensaio universal utilizada.

#### 3.3.1 Texturização dos corpos de prova

Foram produzidos dois tipos diversos de textura sobre a superfície dos corpos de prova. O primeiro tipo, denominada de “Textura 1” foi produzido usando a técnica reportada por GONZÁLES *et al*, (2014); MOREIRA (2015) e GHANI *et al*, (2016) que aplicaram tinta em spray sobre o corpo de prova para gerar um padrão aleatório e único de grãos que possibilitam seu uso na técnica de correlação digital de imagem.

Em seguida à geração da textura, foram medidos nas direções vertical e horizontal, em torno aproximadamente do centro geométrico, as dimensões de 15 grãos escolhidos aleatoriamente em cada textura gerada, conforme mostrado esquematicamente na Figura 13, para o cálculo do tamanho médio dos grãos da textura. A Textura 1 apresentou um grão médio de 65 pixels (0,28 mm).

**Figura 13** – Procedimento para a determinação do tamanho médio dos grãos das Texturas produzidas, pela média dos comprimentos vertical e horizontal.



Fonte: próprio autor.

A Figura 14 ilustra o resultado obtido para a Textura 1, produzida pela técnica de spray de tinta sobre o corpo de prova.

**Figura 14** – Textura 1 sobre corpo de prova, produzida por spray.



Fonte: próprio autor.

A Textura 2 foi produzida seguindo os procedimentos reportados por PICOY (2016), que desenhou pontos aleatórios com um marcador de tinta permanente sobre uma viga para o uso das técnicas de DIC. Tal como realizado para a Textura 1, o tamanho médio do grão da Textura 2 foi calculado em 659 pixels (2,90 mm). A Figura 15 ilustra o resultado obtido pelo uso desta técnica na confecção da Textura 2 a ser testada nos ensaios de tração.

**Figura 15** – Textura 2 sobre corpo de prova, produzida por marcação manual com tinta permanente.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3.2 Captura de imagens e ensaios de tração

As imagens foram capturadas pelo uso de uma câmera Sony HANDYCAM-DCR\_SR20, com CCD de resolução de 720 x 480 pixels, fixada sobre tripé. A Figura 16 ilustra o aparato de captura de imagem, conforme utilizado nos ensaios.

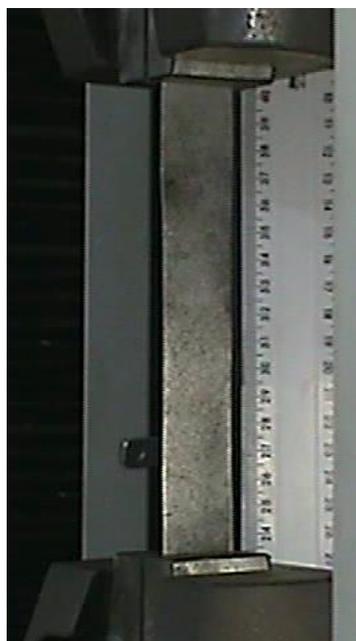
**Figura 16** – Câmera com tripé e suporte



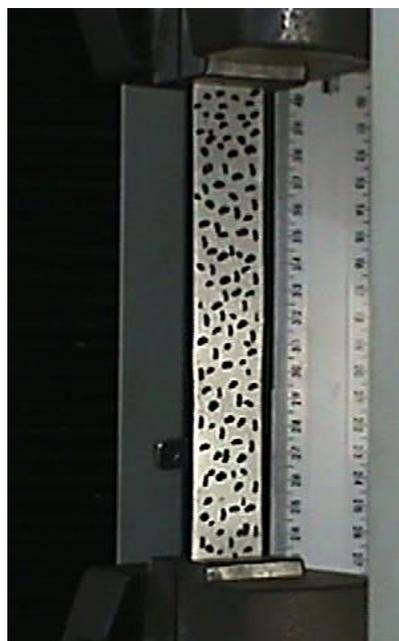
Fonte o próprio autor

Os ensaios de tração foram realizados conforme procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 7549, com velocidade de ensaio de 5 mm por minuto. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal AROTEC WDW-100E. A Figura 17 ilustra o ensaio de tração dos corpos de prova. Em (a) tem-se o ensaio de um corpo de prova com textura 1 e em (b) com a textura 2.

**Figura 17** – Corpos de prova texturizados sob ensaio de tração. (a) Textura 1; (b) Textura 2.



(a)



(b)

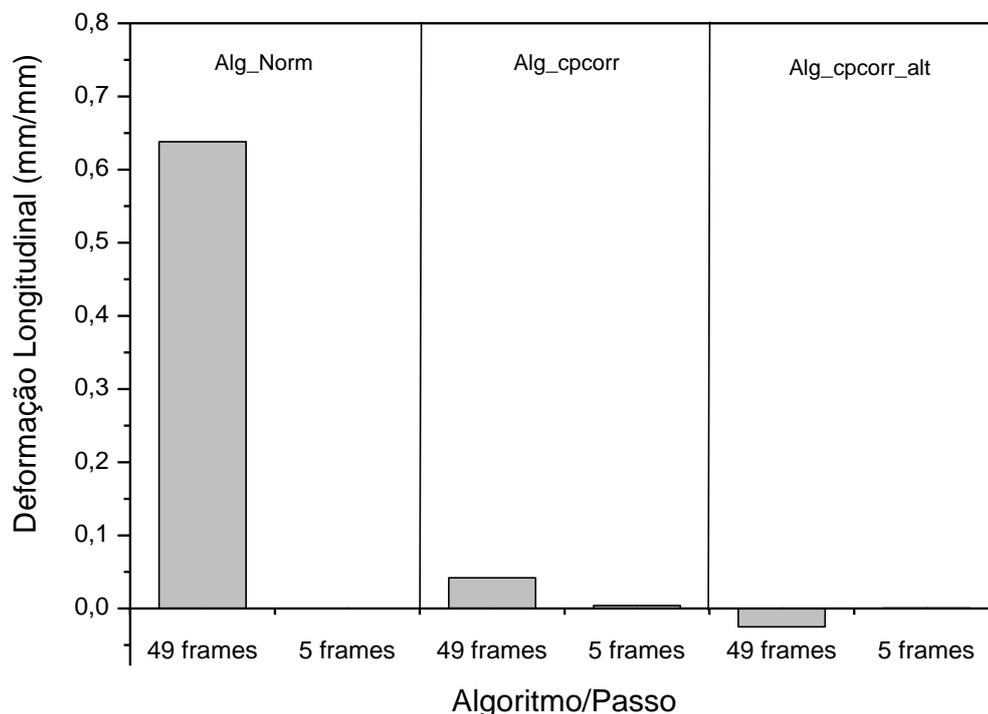
Fonte: próprio autor

## 4. 0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Ensaios preliminares

A série de imagens dos corpos de prova da Série 1 foi submetida à análise dos algoritmos desenvolvidos e os resultados estão apresentados na Figura 18.

**Figura 18** – Resultados das medidas de deformação pelos três algoritmos desenvolvidos aplicados na Série 1.



Fonte: próprio autor

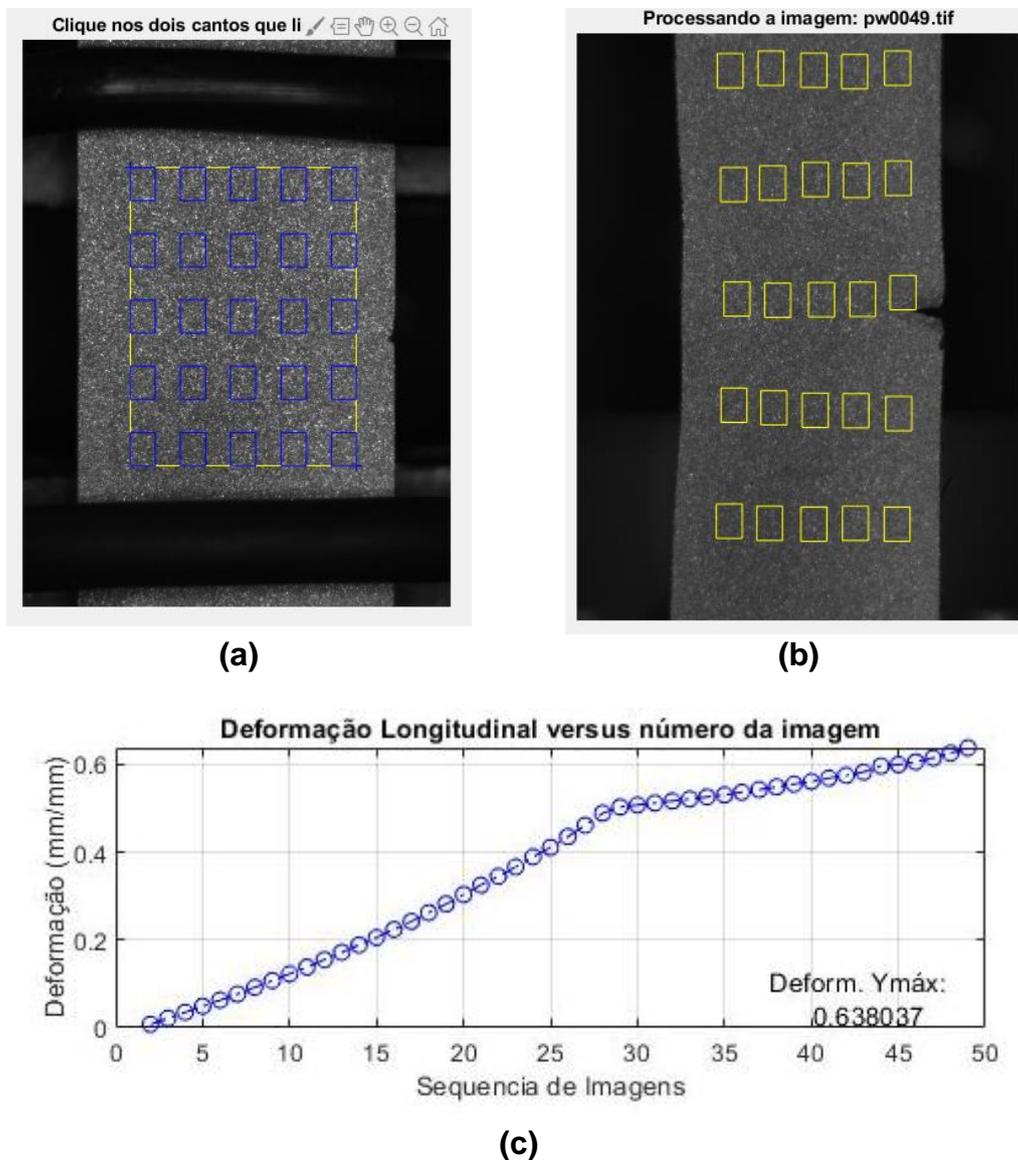
Apesar de não se ter a deformação longitudinal final do material da Série 1, BLABER e ANTONIOU (2017) especificam ser um material de alta capacidade de deformação. Os resultados encontrados para a deformação longitudinal do material, passo de 49 *frames*, pelo uso dos algoritmos *alg\_norm*, *alg\_cpcorr* e *alg\_cpcorr\_alt*, foram de 0,638, 0,042 e -0,025 mm/mm, respectivamente.

Pode-se concluir que o algoritmo *alg\_norm* proveu os melhores resultados de deformação no ensaio, haja vista o material ser bastante deformável, o que gera um *step* de deformação entre imagens de 1,33% em média, representando, se considerado que o comprimento da imagem de referência no sentido longitudinal é de pouco mais de 882 pixels, uma evolução entre imagens subsequentes de mais de 11

pixels em média, muito acima da capacidade máxima da ferramenta cpcorr de rastrear pontos entre imagens, que é de no máximo 4 pixels, como reportado anteriormente.

A Figura 19 (a) e (b) mostram o grid das sub-regiões antes e depois do ensaio. Percebe-se após o ensaio a grande diferença entre os afastamentos das sub-regiões, confirmando o alto nível de deformação registrado.

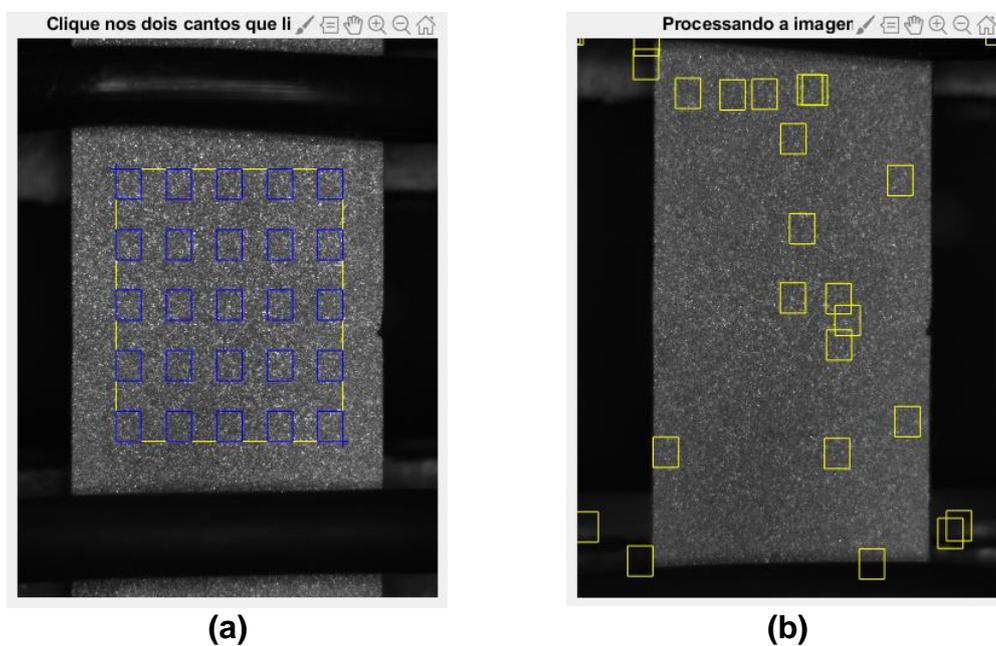
**Figura 19** – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_norm. Passo de 49 frames, Série 1.



Fonte: próprio autor

A Figura 20 mostra o impacto do passo sobre a capacidade de medida dos algoritmos. Em (a) temos o grid das sub-regiões estabelecido sobre o corpo de prova, com forma retangular. À medida que a deformação avança, como o próprio material já possui alta capacidade de deformação, o aumento do *step* entre imagens leva à grandes deformações entre imagens subsequentes, excedendo a capacidade da ferramenta de correlacionar as referências, gerando as desconexões que são vistas na figura 20 (b). Este efeito torna inexecuível a realização da correlação.

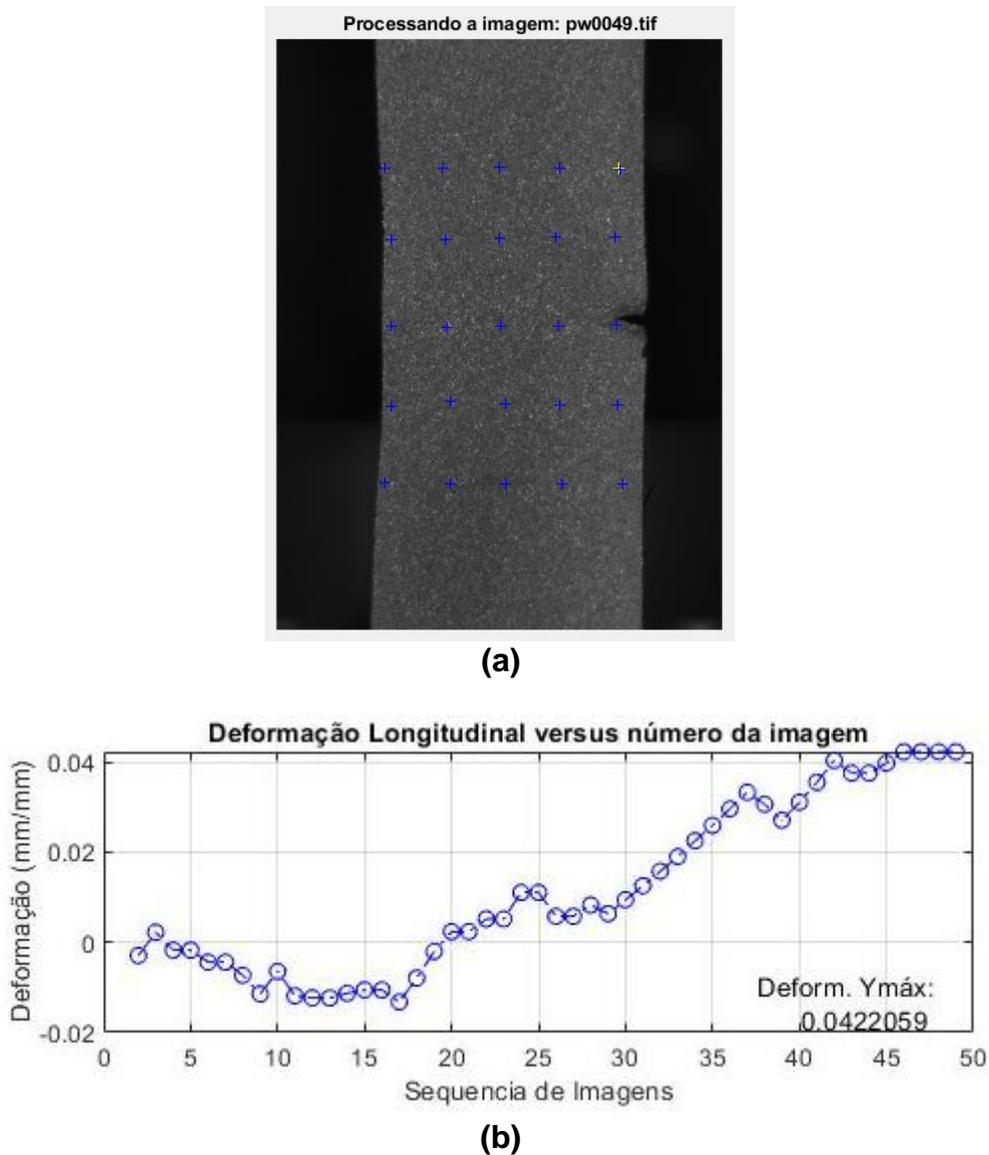
**Figura 20** – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração, estabelecidos através do algoritmo *alg\_norm*. Passo de 5 frames, Série 1.



Fonte: próprio autor

A figura 21 ilustra a trajetória do grid de rastreamento estabelecido no algoritmo *alg\_cpcorr*. Como já mencionado, a deformação média de 11 pixels entre imagens registrado para este material excede em muito a capacidade da ferramenta *cpcorr* em correlacionar os pontos entre imagens de referência e corrente, o que acarretou na baixa deformação registrada na figura 21 (b).

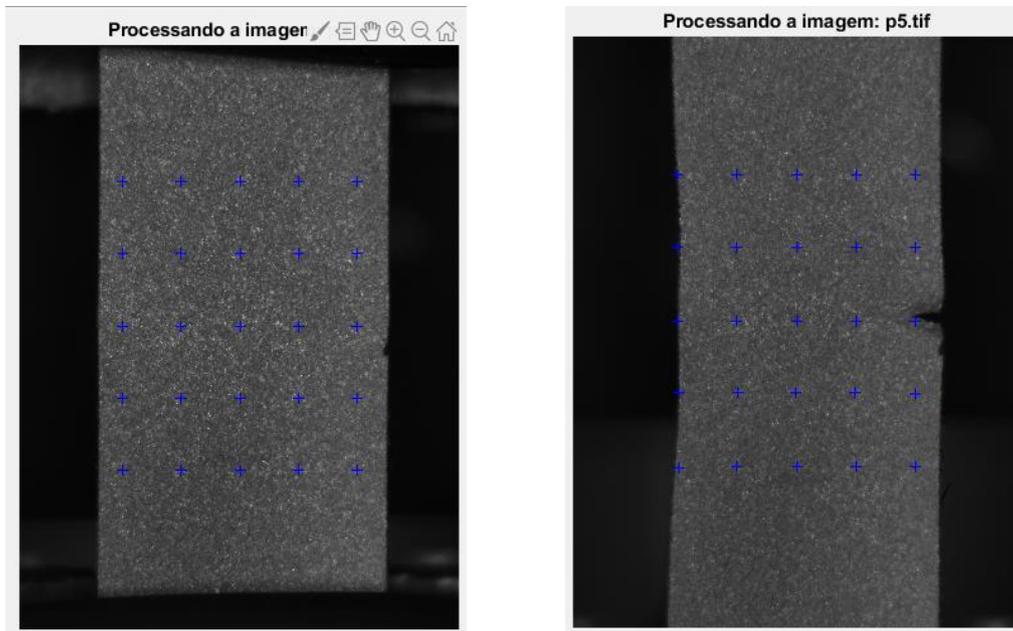
**Figura 21** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, ao final (a) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (b), medido através do algoritmo alg\_cpcorr. Passo de 49 *frames*, Série 1.



Fonte: próprio autor

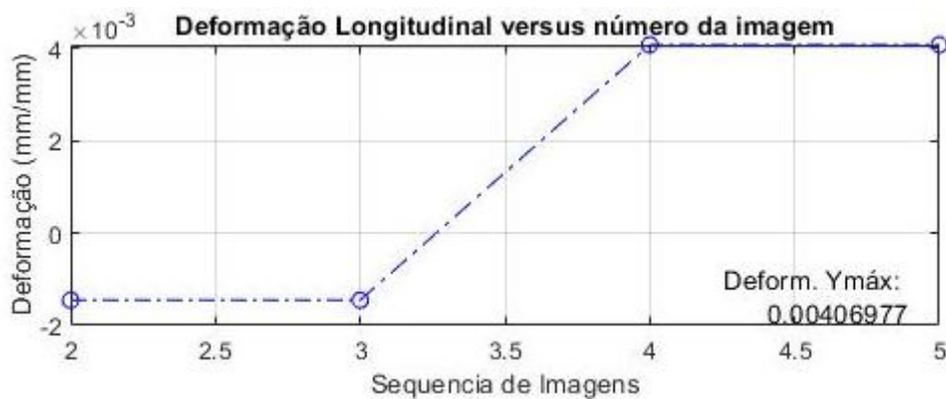
A figura 22 ilustra de forma muito clara como a ferramenta cpcorr não se mostrou adequada, da forma como o algoritmo foi escrito, para a medição das altas deformações registradas para o material da Série 1. Observa-se entre as figuras 22 (a) e (b), que o grid gerado se mantém praticamente indeformado, enquanto o material abaixo mostra grande deformação.

**Figura 22** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_cpcorr. Passo de 5 frames, Série 1.



(a)

(b)

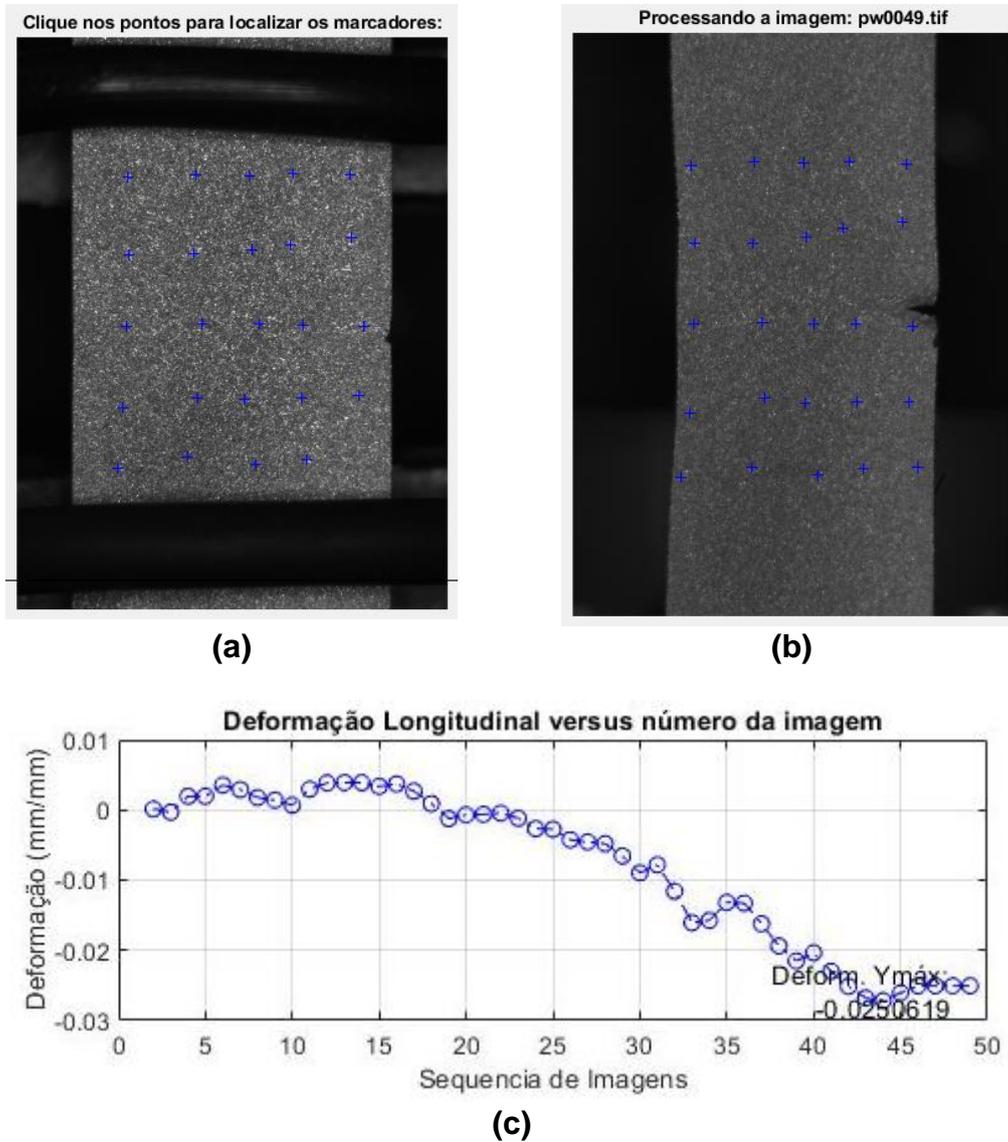


(c)

Fonte: próprio autor

Tal qual registrado na figura 22, as imagens na figura 23 (a) e (b) mostram o grid de pontos de rastreamento praticamente indeformado, também pelo fato de esta figura ilustrar o desempenho do algoritmo alg\_cpcorr\_alt, que utiliza a mesma ferramenta de correlação da figura anterior (cpcorr), demonstrando que neste caso, o passo não interferiu ou melhorou o desempenho do algoritmo.

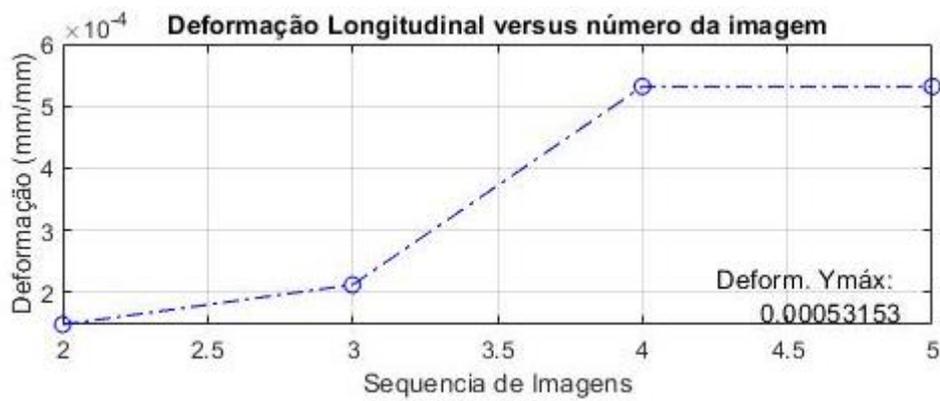
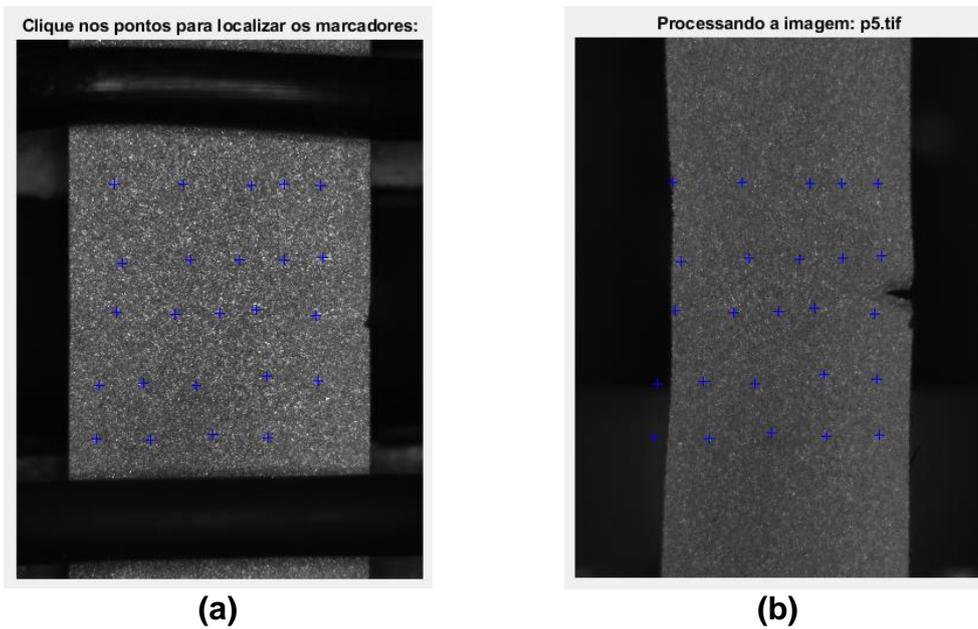
**Figura 23** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo `alg_cpcorr_alt`. Passo de 49 *frames*, Série 1.



(c)  
Fonte: próprio autor

A figura 24 ratifica a incapacidade do algoritmo `alg_cpcorr_alt`, da forma como foi escrito, que se utiliza da ferramenta `cpcorr` para realizar as correlações, em calcular adequadamente as deformações de material muito elástico. Neste caso, mais uma vez o passo não melhorou o desempenho do código em MATLAB.

**Figura 24** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo `alg_cpcorr_alt`. Passo de 5 *frames*, Série 1.

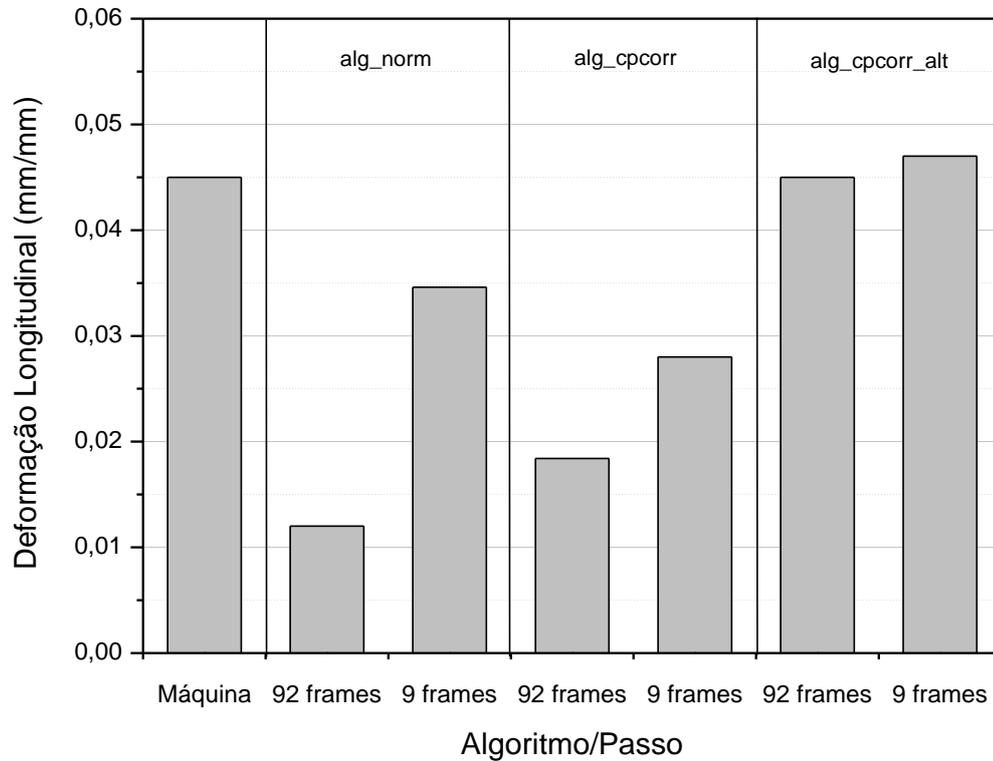


(c)

Fonte: próprio autor

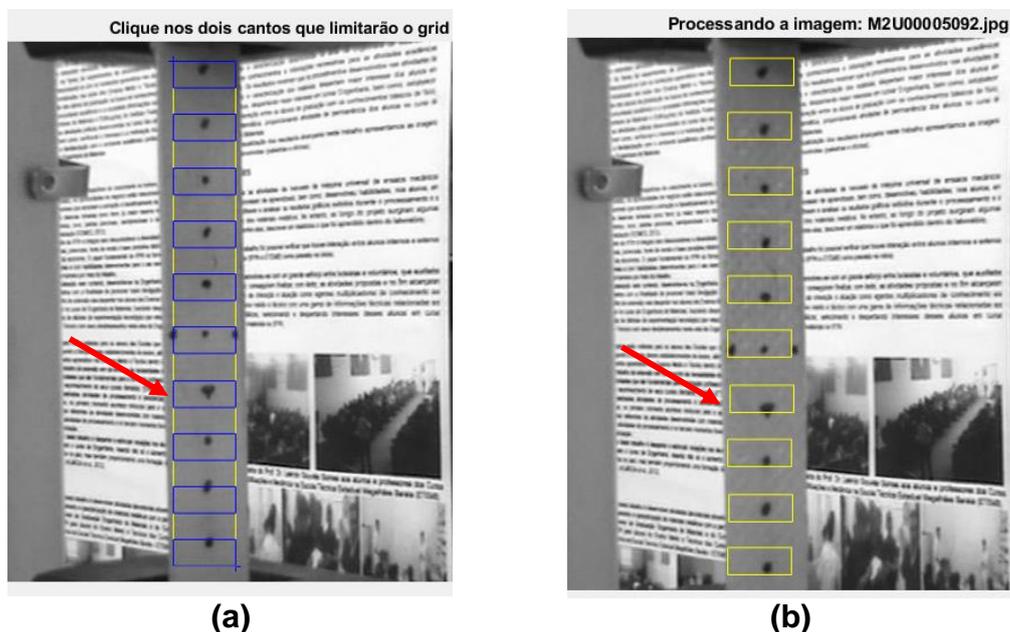
A figura 25 ilustra os resultados obtidos pelos códigos desenvolvidos aplicados no material da Série 2. O gráfico permite perceber que o algoritmo `alg_cpcorr_alt` proveu os resultados mais próximos dos valores de deformação registrados na máquina de ensaio universal.

**Figura 25** – Resultados das medidas de deformação pelos três algoritmos desenvolvidos aplicados na Série 2.



A figura 26 ilustra o desempenho do algoritmo `alg_norm` aplicado ao material da Série 2. Comparando-se as imagens em (a) e (b), pode-se perceber como a ferramenta `Normxcorr2` utilizada não provê deslocamentos com a precisão necessária para rastrear as sub-áreas quando o material é pouco deformável. As setas vermelhas indicam uma sub-área em que se percebe claramente que a marca inicialmente totalmente encapsulada dentro da sub-área, apresenta deslocamento não rastreado pela ferramenta de correlação, que sub-avalia os verdadeiros deslocamentos registrados.

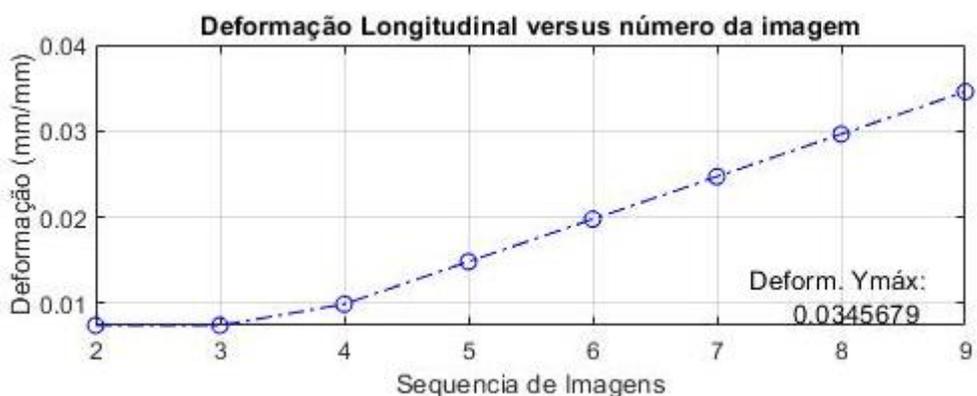
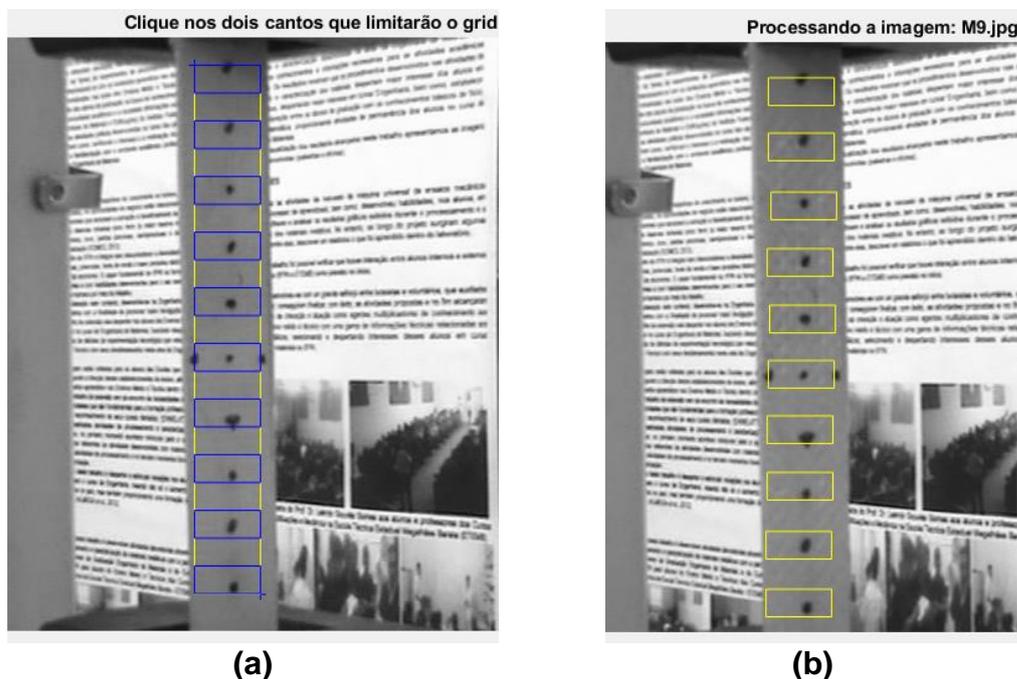
**Figura 26** – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo *alg\_norm*. Passo de 92 *frames*, Série 2.



(c)  
Fonte: próprio autor

A figura 27 ilustra como o desempenho do algoritmo *alg\_norm* foi incrementado pelo aumento do *step* de deformação entre imagens subsequentes, resultantes da análise de apenas 9 frames do vídeo do ensaio. Os valores calculados para a deformação longitudinal neste caso, 0,0346 mm/mm, são bem superiores aos valores calculados no passo de 92 *frames*, mas ainda 23% abaixo dos valores registrados na máquina de ensaio.

**Figura 27** – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo `alg_norm`. Passo de 9 frames, Série 2.

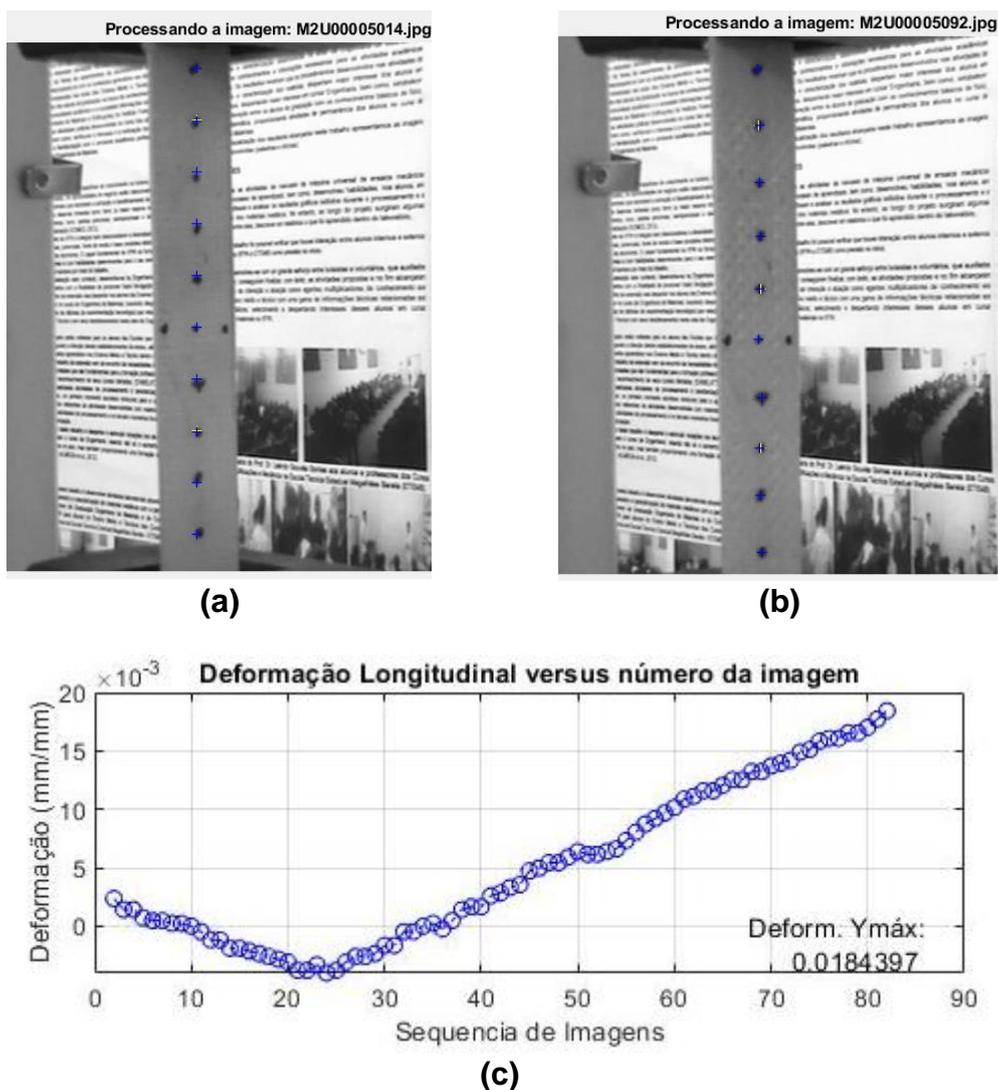


(c)  
Fonte: próprio autor

A figura 28 ilustra o desempenho do algoritmo `alg_cpcorr` no cálculo das deformações longitudinais do material da Série 2. Apesar de a ferramenta `cpcorr`, utilizada neste algoritmo, ser bem mais precisa que a ferramenta `Normxcrr2`, o que deveria se mostrar mais adequado para registrar as pequenas deformações observadas para este material, os valores de deformação calculados foram bem inferiores aos valores registrados pela máquina de tração. Isso se deve, provavelmente em função da baixa resolução da textura, o que deixa a superfície do corpo de prova com extensas áreas de baixo contraste de cinza entre pixels e sua

vizinhança. Isto pode ser observado no gráfico da figura 28 (c). A deformação negativa registrada entre a imagem 1 e 22 não tem significado físico, se devendo à dificuldade de correlação dos pontos em região de baixo contraste.

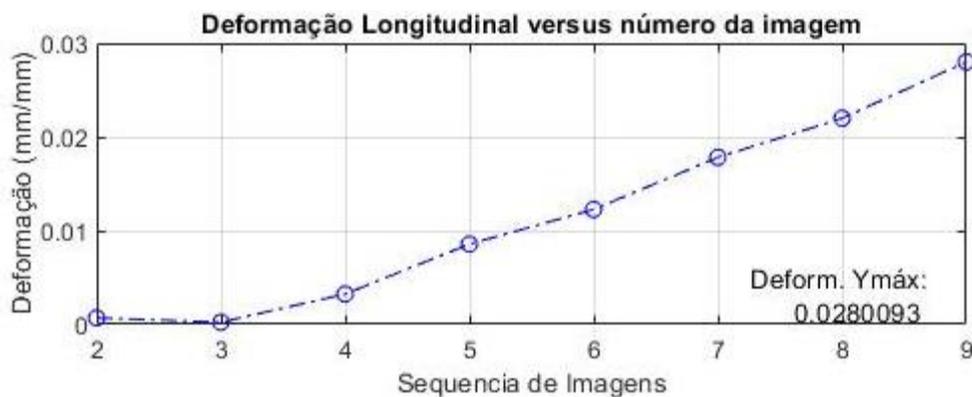
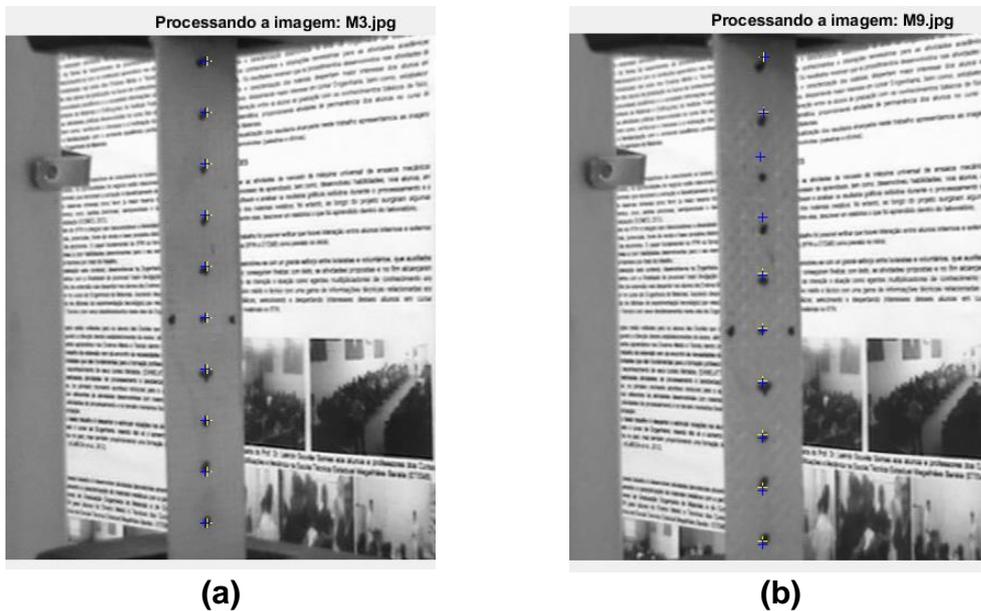
**Figura 28** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_cpcorr. Passo de 92 frames, Série 2.



Fonte: próprio autor

A análise da figura 29 demonstra que o aumento do *step* de deformação entre imagens, pela redução de 92 para 9 frames o passo de análise do vídeo, não contribuiu para melhorar o desempenho do algoritmo alg\_cpcorr, prevalecendo a dificuldade de correlação de pontos equivalentes em regiões de baixo contraste dentro da imagem.

**Figura 29** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_cpcorr. Passo de 9 frames, Série 2.

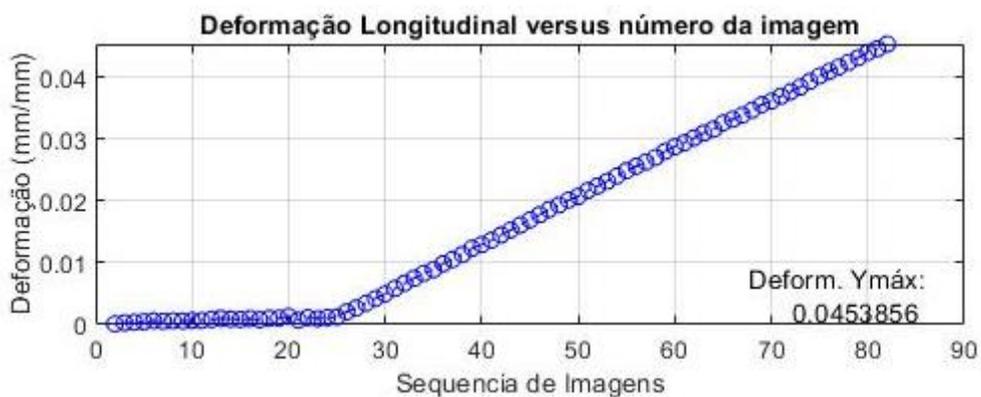
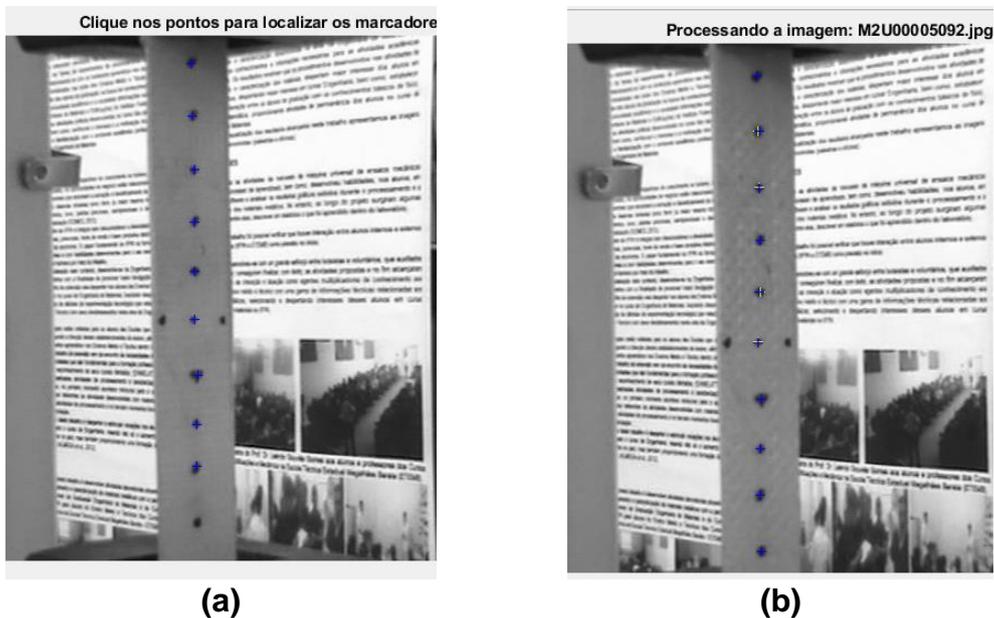


(c)

Fonte: próprio autor

O desempenho do algoritmo alg\_cpcorr\_alt aplicado ao material da Série 2 está ilustrado na figura 30. Com a possibilidade de se posicionar adequadamente cada ponto de rastreamento sobre a imagem de referência, é possível incrementar a eficiência do algoritmo em correlacionar cada ponto entre imagens subsequentes, aumentando assim a eficiência do código. A deformação longitudinal medida, 0,045 mm/mm foi exatamente a mesma registrada pela máquina de ensaio.

**Figura 30** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_cpcorr\_alt. Passo de 92 frames, Série 2.

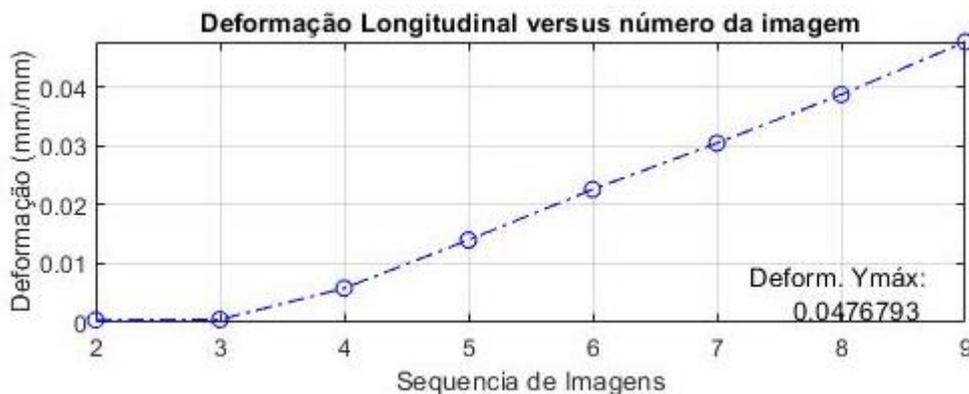
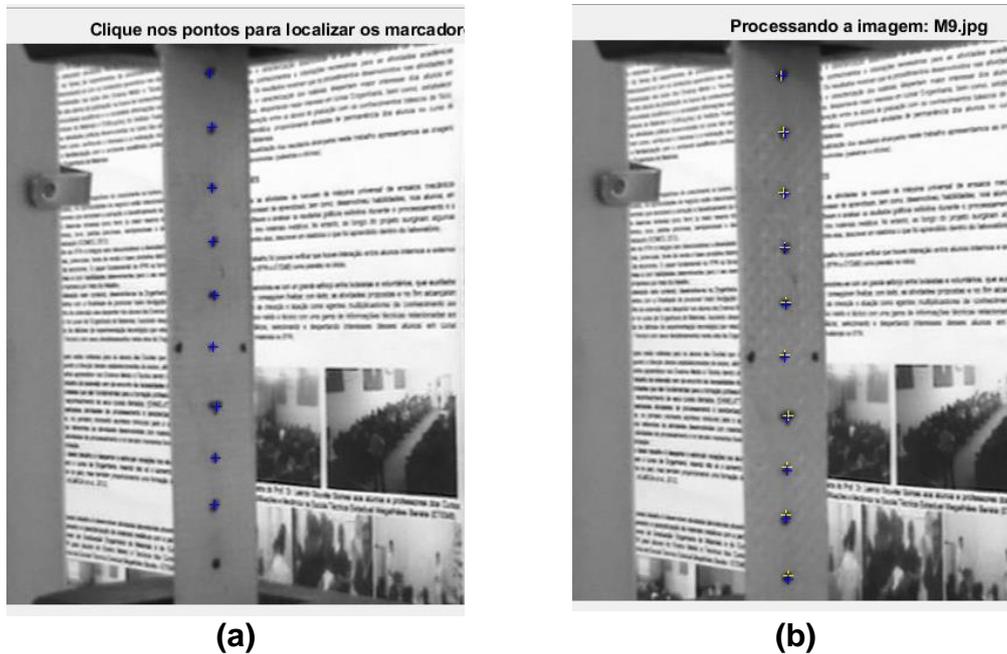


(c)

Fonte: próprio autor

A eficiência verificada no desempenho do algoritmo alg\_cpcorr\_alt na figura 30, se repete na análise da figura 31, que apresenta passo de 9 frames, contra 92 da imagem anterior. O passo pouco influenciou o desempenho do algoritmo, que mais uma vez reproduziu de forma muito próxima os valores de deformação registrados na máquina de ensaio.

**Figura 31** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_cpcorr\_alt. Passo de 9 frames, Série 2.



(c)  
Fonte: próprio auto

#### 4.2 Corpos de prova com textura 1

A tabela 02 identifica os corpos de prova com textura 1 utilizados pelos algoritmos desenvolvidos, as medidas das deformações em mm/mm, realizada pela máquina de ensaio e as encontradas por cada um dos algoritmos.

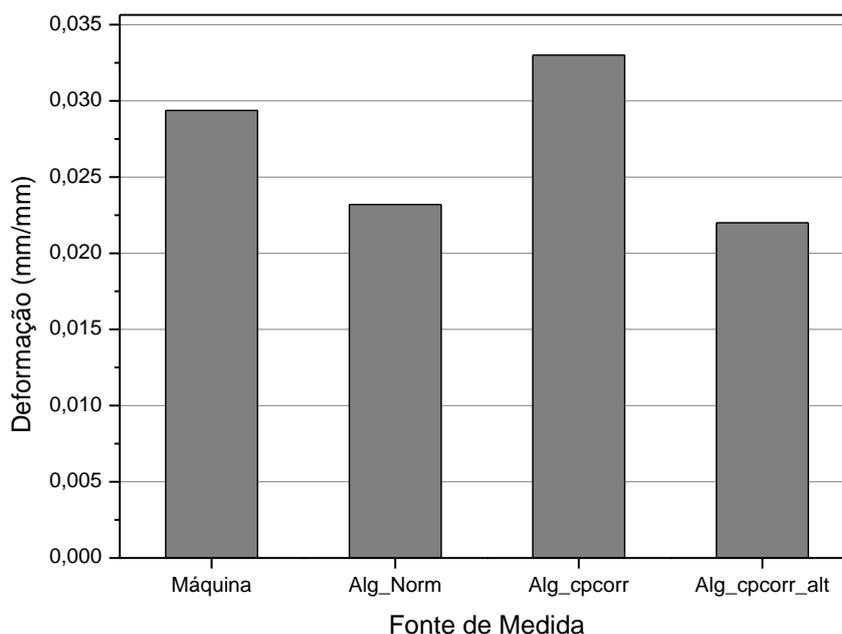
Tabela 02: Identificação dos corpos de prova com textura 1e suas medidas de deformação, realizadas pela máquina de ensaios e pelos algoritmos utilizados.

CORP. DE PROV.	Máquina	Alg_norm	Alg_cpcorr	Alg_cpcorr_alt
	Deformação longitudinal (mm/mm)			
03	0,02937	0,0232	0,033	0,022
04	0,02630	Descorrelação	0,022727	0,027600

Fonte: Próprio autor

A Figura 32 mostra um comparativo para os códigos escritos e os resultados da máquina para o corpo de prova com textura 1. Os resultados comprovam que o código alg\_norm subavaliou as medidas de deformação longitudinal, devido à pequena deformação total, de 0,02937mm/mm, sofrida pelo corpo de prova medida através da máquina de ensaio. A ferramenta Normxcorr2 para ser precisa necessita de uma deformação igual ou maior a 1 pixel entre fotos. Os algoritmos alg\_cpcorr e alg\_cpcorr\_alt poderiam apresentar um desempenho melhor, pelo fato de serem capazes de medir deslocamentos em subpixel, mas devido à baixa resolução da textura do corpo de prova, o rastreamento dos pontos durante a deformação foi dificultado.

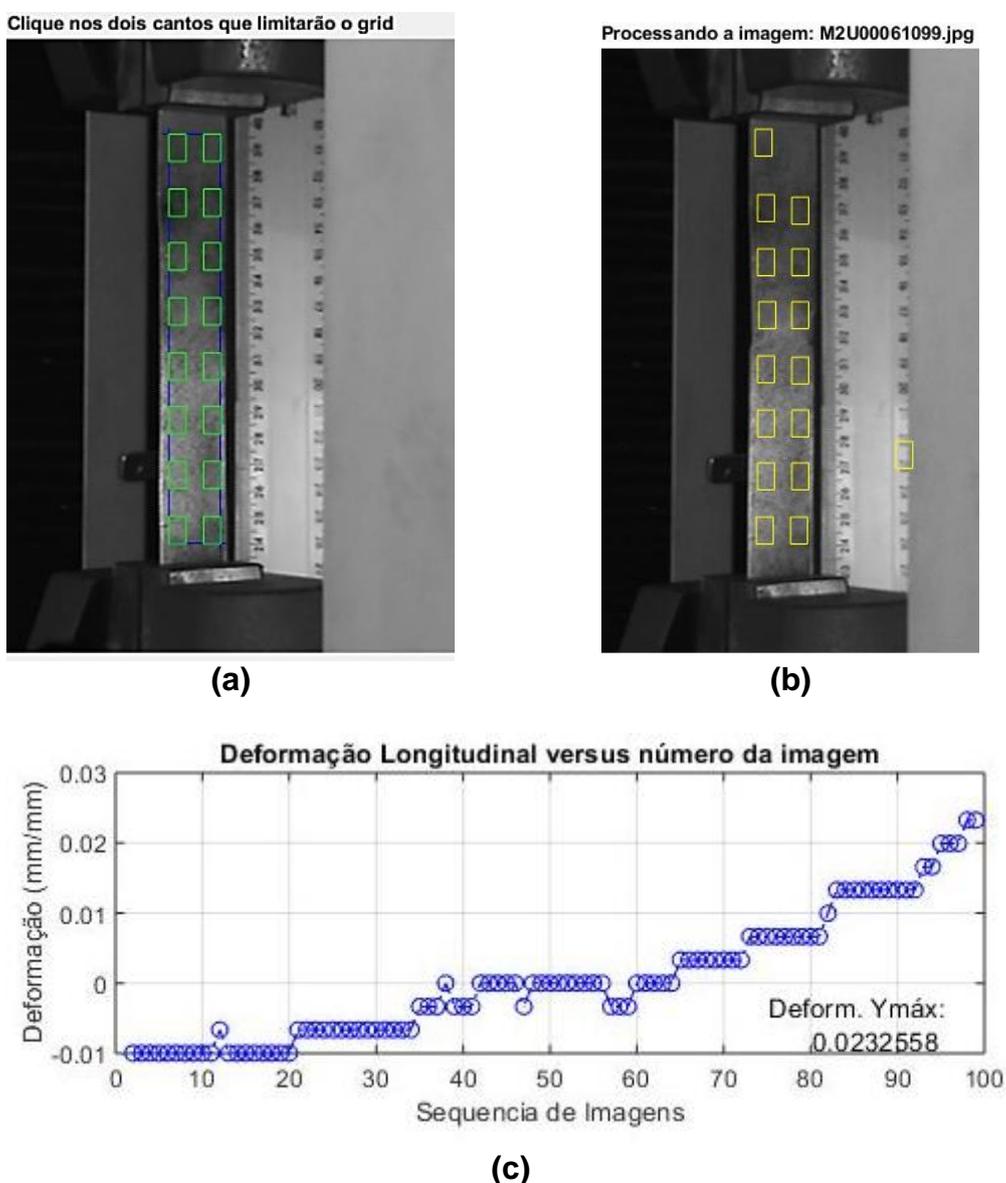
**Figura 32** – Deformação longitudinal medida pelo uso dos algoritmos desenvolvidos sobre corpo de prova 03, de Textura 1 e comparação com resultado fornecimento pelo equipamento de ensaio.



Fonte: próprio autor

Na figura 33 verifica-se que o algoritmo alg\_norm apresentou desconexão no rastreamento das sub-áreas ao longo do ensaio, em função à baixa resolução da textura e iluminação insuficiente do corpo de prova no momento do ensaio. As medidas de deformação ficam assim comprometidas, já que são uma média de todas as deformações registradas para as sub-áreas.

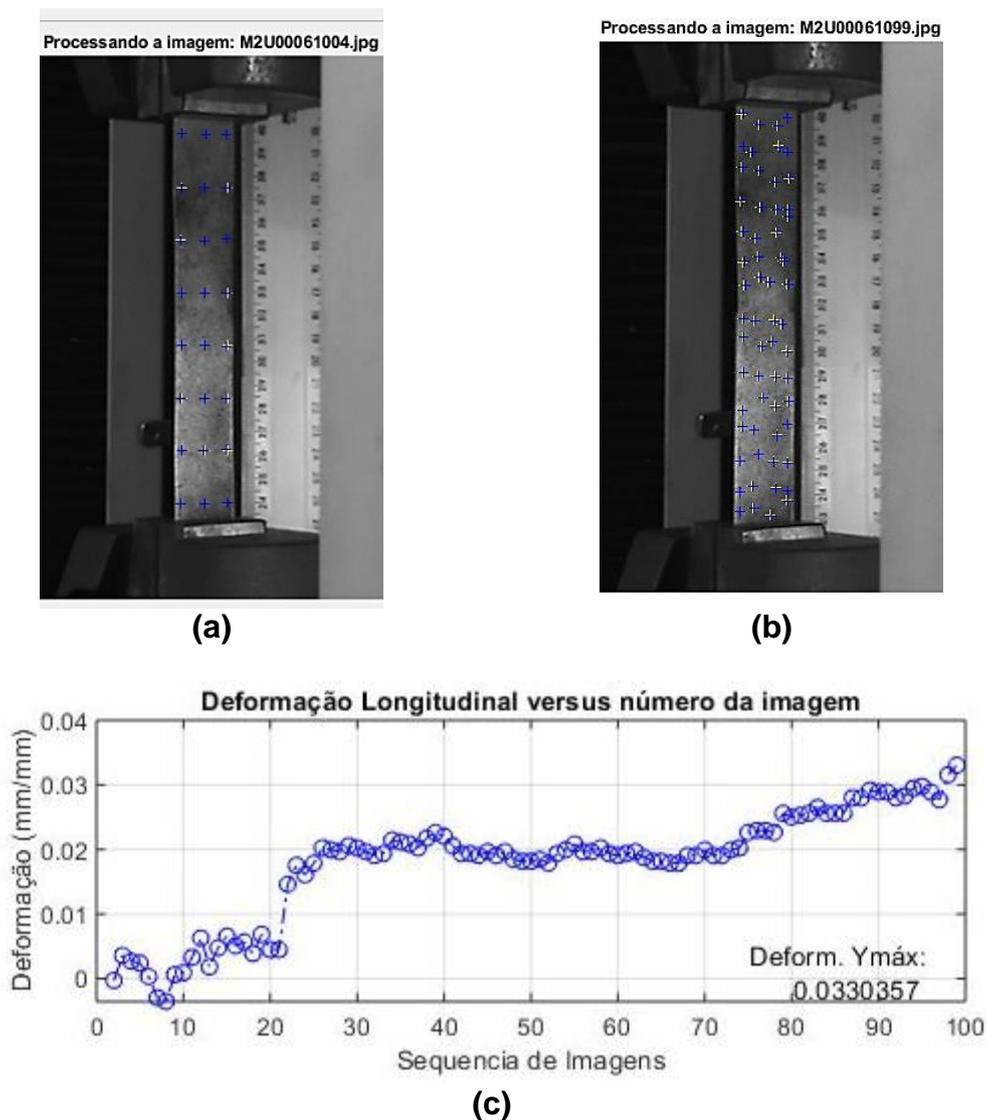
**Figura 33** – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_norm, corpo de prova 03.



Fonte: próprio autor

O algoritmo `alg_cpcorr` superestimou as medidas de deformação longitudinal, como pode ser observado na figura 34. Apesar da alta precisão da ferramenta de rastreamento `cpcorr`, a baixa resolução da textura e a iluminação deficiente do corpo de prova dificultam o processo de correlação.

**Figura 34** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo `alg_cpcorr`, corpo de prova 03.

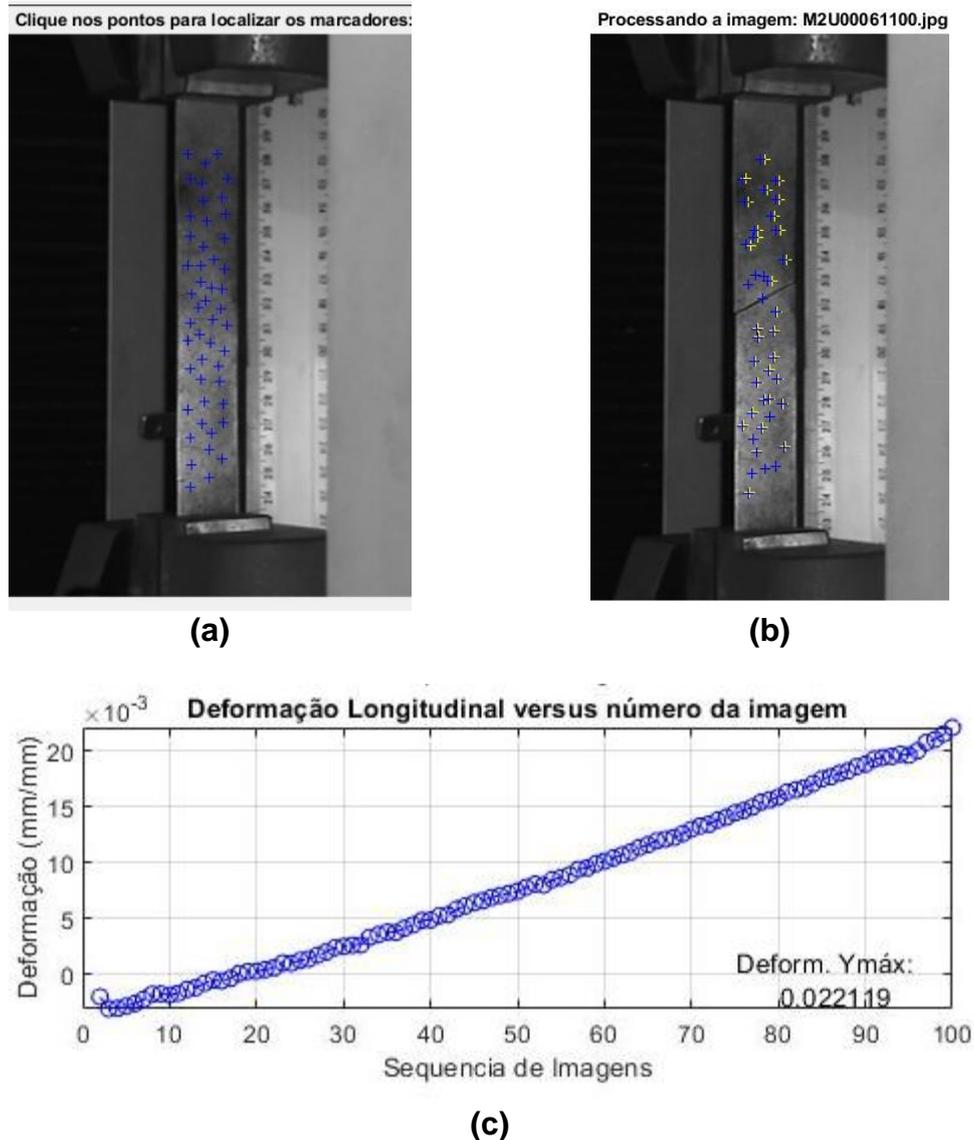


Fonte: próprio autor

O algoritmo `alg_cpcorr_alt` apresentou as mesmas dificuldades encontradas pelo algoritmo `alg_cpcorr`. Na figura 35 pode-se verificar que o código sub-avaliou os

valores de deformação, em razão da baixa iluminação e resolução deficiente da textura do corpo de prova.

**Figura 35** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo `alg_norm_alt`, corpo de prova 03.

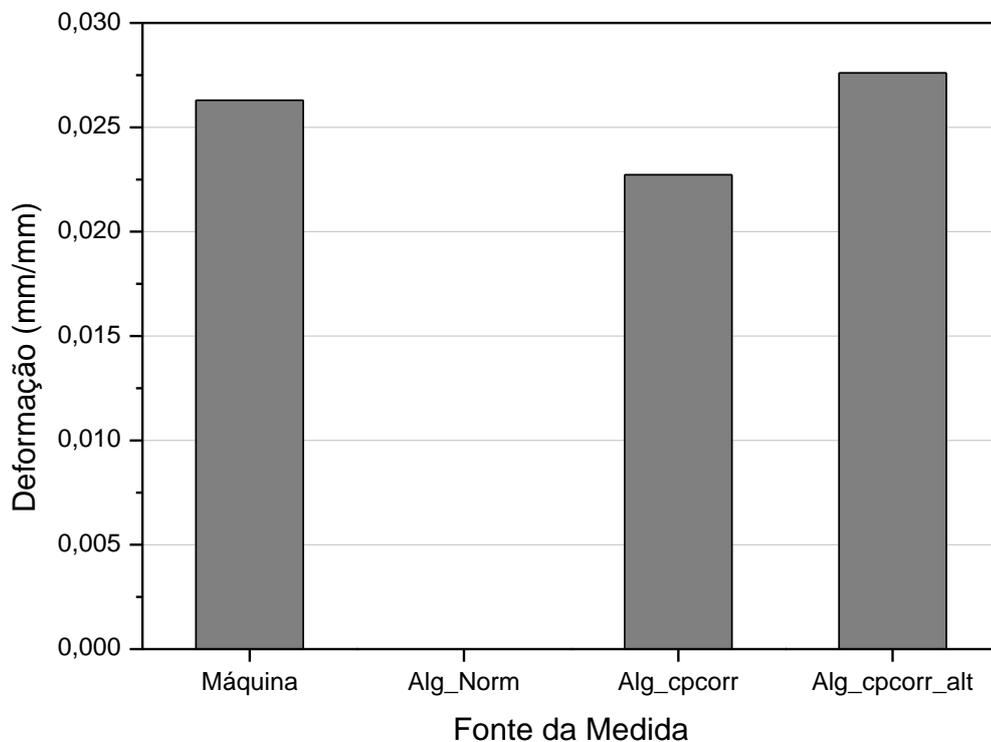


Fonte: próprio autor

A figura 36 mostra um comparativo para os códigos escritos e os resultados da máquina para o corpo de prova com textura 1, mas com uma condição de iluminação melhor em relação ao corpo de prova 03. Conforme a figura abaixo o algoritmo `alg_normr`, embora tenha sido aplicado ao corpo de prova, não realiza nenhuma medida sequer, devido a sua baixa precisão. Os algoritmos `alg_cpcorr` e

alg\_cpcorr\_alt apresentaram bom desempenho. O alg\_cpcorr calculou um nível de deformação abaixo do valor da deformação total medida pela máquina, que foi de 0,0262mm/mm, em função do cpcorr utilizar uma grade, o que possibilita o posicionamento de pontos de rastreamento em regiões de baixo contraste da imagem, dificultando o rastreamento. O alg\_cpcorr\_alt, pelo fato de permitir que o usuário posicione cada ponto de rastreamento, permite a localização dos pontos em regiões de bom contraste da imagem, maximizando a eficiência do código.

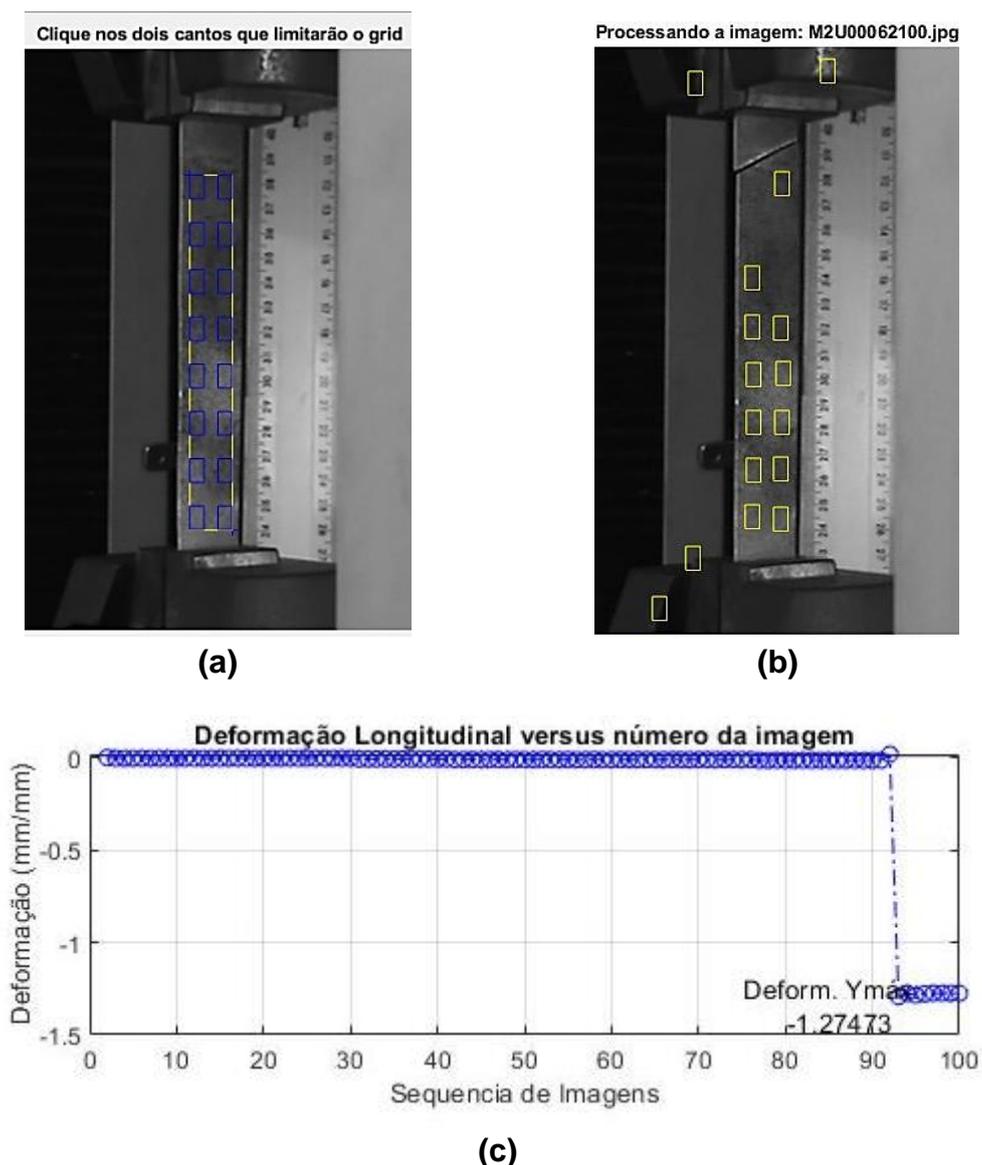
**Figura 36** – Deformação longitudinal medida pelo uso dos algoritmos desenvolvidos sobre corpo de prova 04, de textura 1 e comparação com resultado fornecimento pelo equipamento de ensaio.



Fonte: próprio autor

A figura 37 ilustra que o algoritmo alg\_norm, mesmo dada a melhoria das condições de iluminação do corpo de prova em relação ao anterior, incorreu no fenômeno da descorrelação, impossibilitando a medida das deformações.

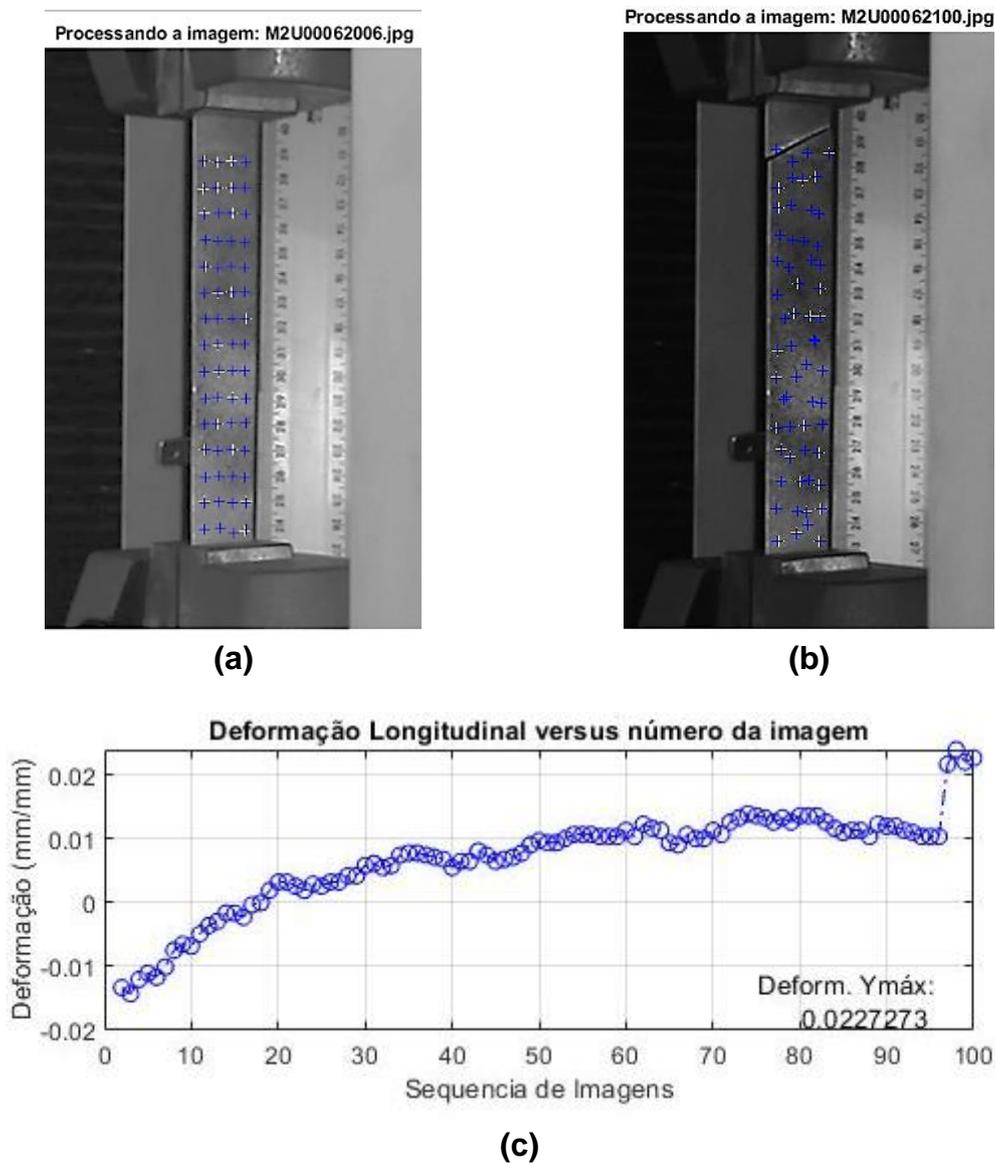
**Figura 37** – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_norm, corpo de prova 04.



Fonte: próprio autor

A figura 38 ilustra o desempenho do algoritmo alg\_cpcorr no cálculo das deformações longitudinais do corpo de prova 04. Apesar da melhora na iluminação ter incrementado o desempenho do algoritmo, o valor calculado pelo algoritmo, 0,0227 mm/mm, foi 13,7% inferior ao aferido pela máquina de ensaio.

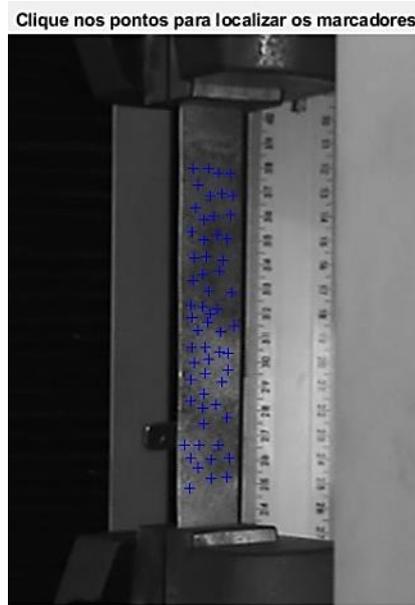
**Figura 38** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_cpcorr, corpo de prova 04.



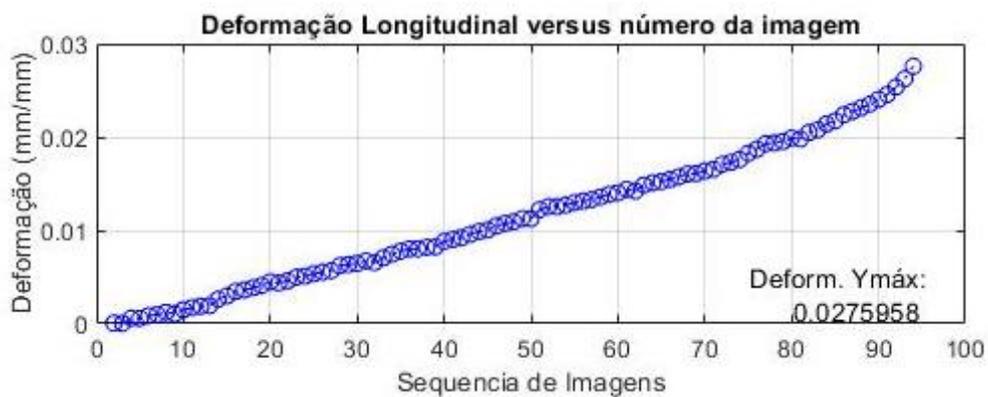
(c)  
Fonte: próprio autor

Conforme ilustrado na figura 39, os valores calculados através do algoritmo alg\_cpcorr\_alt foram somente 4,9% superiores aos registrados na máquina de ensaio, demonstrando a melhora do desempenho do código com a melhora das condições de iluminação.

**Figura 39** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_cpcorr\_alt, corpo de prova 04.



(a)



(b)

Fonte: próprio autor

### 4.3 Corpos de prova com textura 2

A tabela 03 identifica os corpos de prova com Textura 2 utilizados pelos algoritmos desenvolvidos, as medidas das deformações em mm, realizada pela máquina de ensaio e as encontradas por cada um dos algoritmos.

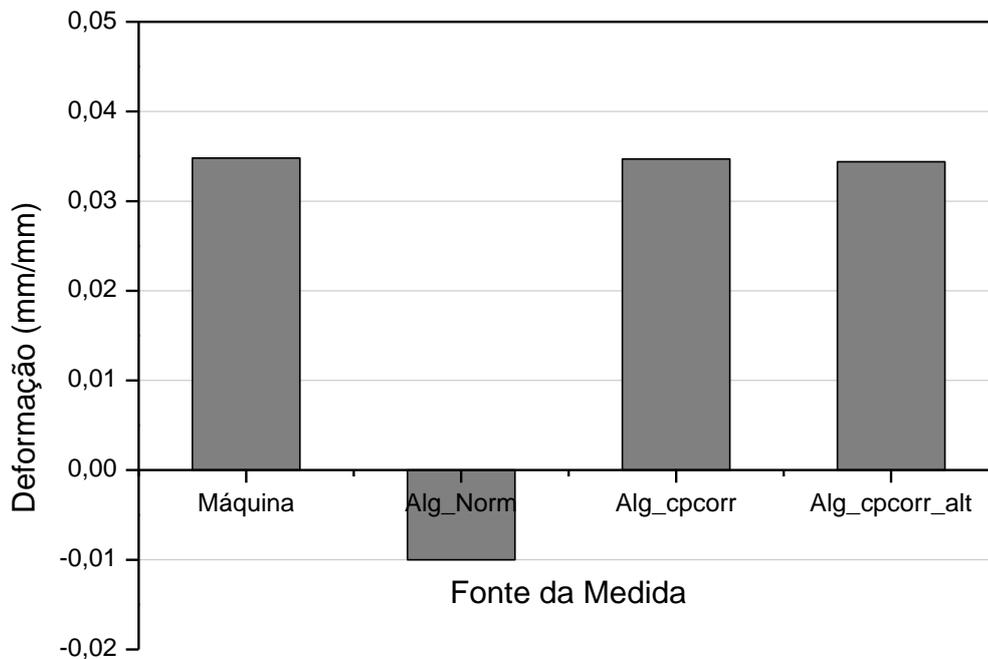
Tabela 03: Identificação dos corpos de prova com textura 2 e suas medidas de deformação, realizadas pela máquina de ensaios e pelos algoritmos utilizados.

CORP. DE PROV.	Máquina	Alg_norm	Alg_cpcorr	Alg_cpcorr_alt
	Deformação Longitudinal (mm/mm)			
11	0,0348	0,010	0,0347	0,0344
12	0,03507	Não mediu	0,01503	0,0346

Fonte: Próprio Autor

A Figura 40 apresenta um comparativo para os códigos escritos e os resultados da máquina para o corpo de prova com textura 2. O algoritmo alg\_norm, devido à pequena deformação sofrida pelo corpo de prova, apresenta resultados negativos, ocasionada em grande parte por decorrelações das sub-áreas durante a aplicação do código. O algoritmo alg\_cpcorr apresenta graficamente uma medida bem próxima do valor da máquina, demonstrando a efetividade do código para a medida da deformação. O algoritmo alg\_cpcorr\_alt apresenta um valor acima do valor registrado na máquina, uma vez que, embora o contraste seja grande, a resolução é baixa.

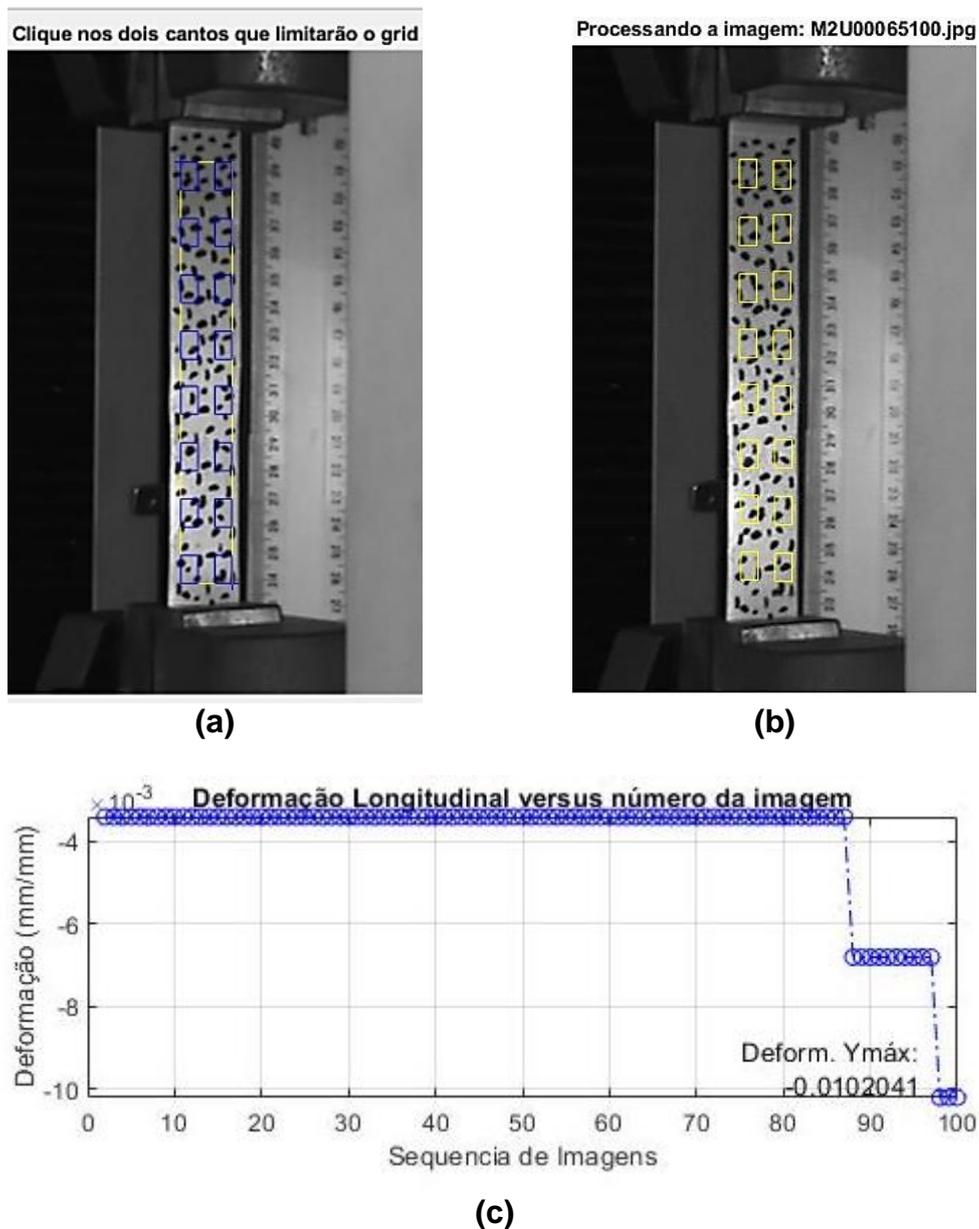
**Figura 40** – Deformação longitudinal medida pelo uso dos algoritmos desenvolvidos sobre corpo de prova 11, de textura 2 e comparação com resultado fornecimento pelo equipamento de ensaio.



Fonte: próprio autor

A figura 41 ilustra que o algoritmo alg\_norm não possibilitou o cálculo das deformações longitudinais do corpo de prova 11, provavelmente em função da baixíssima deformação entre imagens desta série, que dificulta a realização da correlação por meio da ferramenta Normxcorr2, de precisão máxima de 1 pixel.

**Figura 41** – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e ao final (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_norm, corpo de prova 11

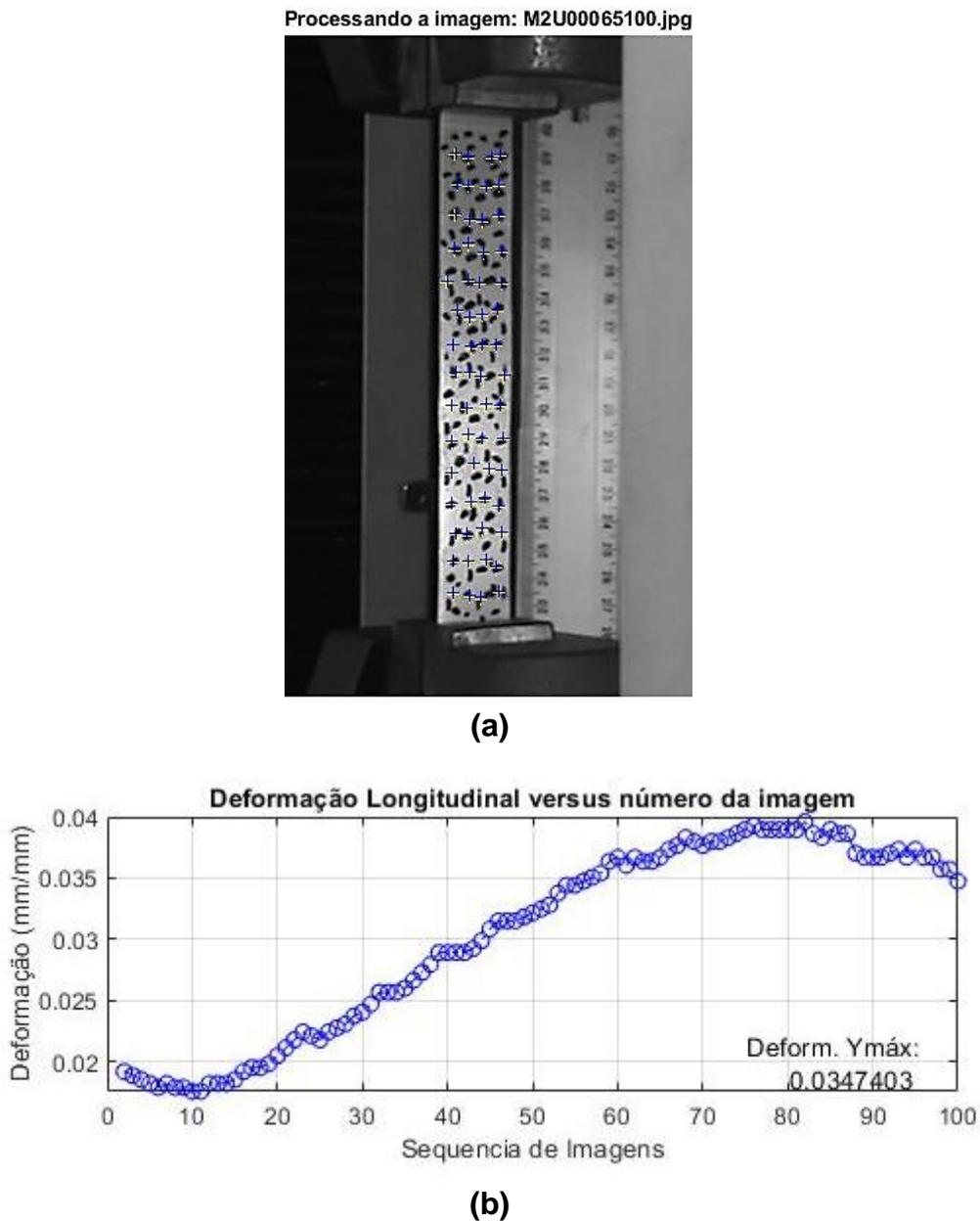


Fonte: próprio autor

A figura 42 ilustra o desempenho do algoritmo alg\_cpcorr na determinação das deformações longitudinais do corpo de prova 11. O gráfico exibido na Figura 42 (b)

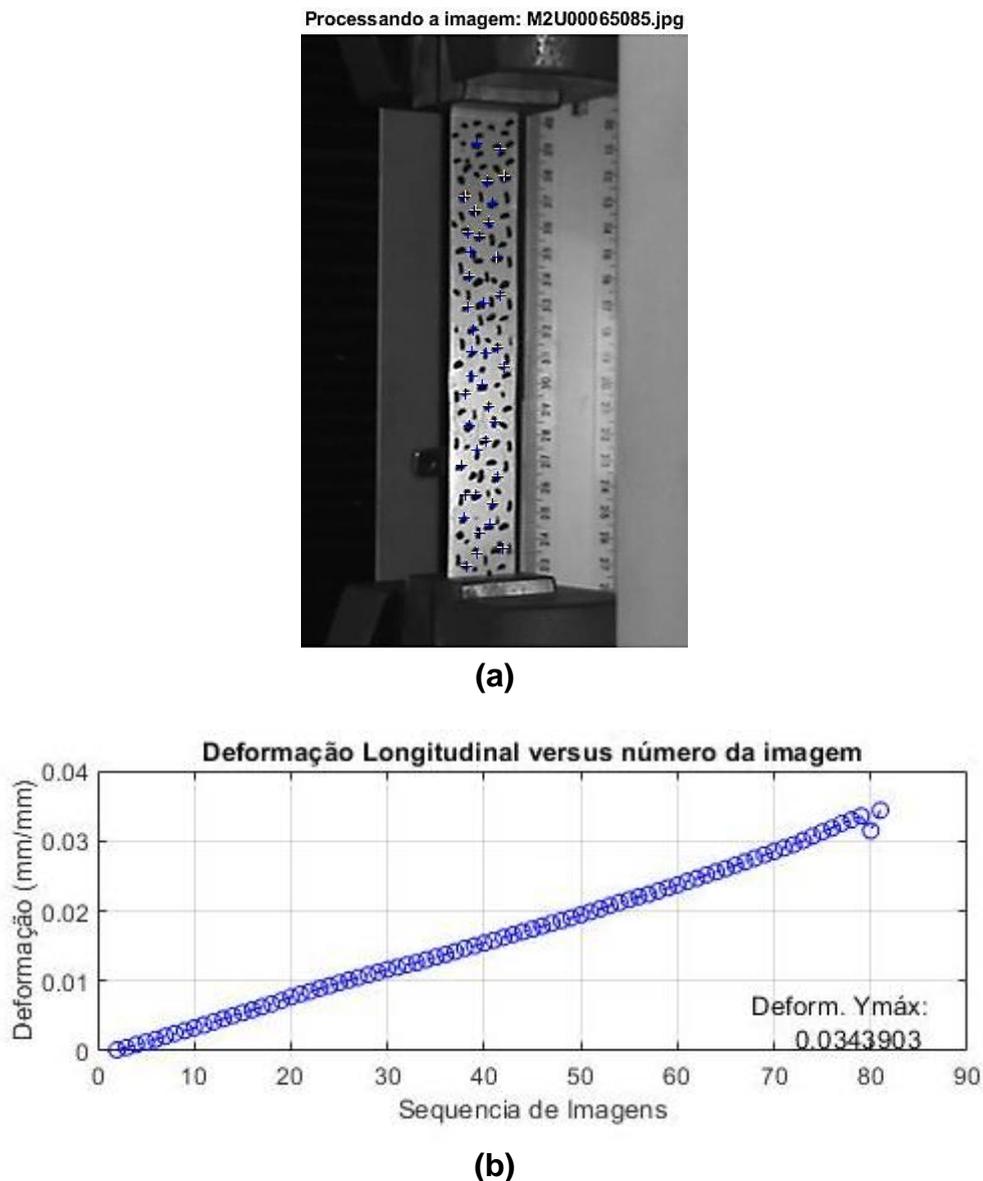
demonstra que o código foi eficiente no cálculo da deformação, chegando a um valor 0,0347 mm/mm, praticamente idêntico ao valor registrado na máquina de ensaio, que foi de 0,0348 mm/mm, dessa forma a diferença entre os dois valores é de 0,12%.

**Figura 42** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, durante ensaio de tração (a) e gráfico de deformação longitudinal (b), medido através do algoritmo alg\_cpcorr, corpo de prova 11



A figura 43 demonstra o funcionamento do algoritmo `alg_cpcorr_alt` na predição medição da deformação do corpo de prova 11. Verifica-se, que a exemplo do algoritmo `alg_cpcorr`, este código também proveu resposta de deformação, 0,0344 mm/mm, somente 1,15% abaixo do valor registrado no equipamento de ensaio.

**Figura 43** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, durante ensaio de tração (a) e gráfico de deformação longitudinal (b), medido através do algoritmo `alg_cpcorr_alt`, corpo de prova 11.

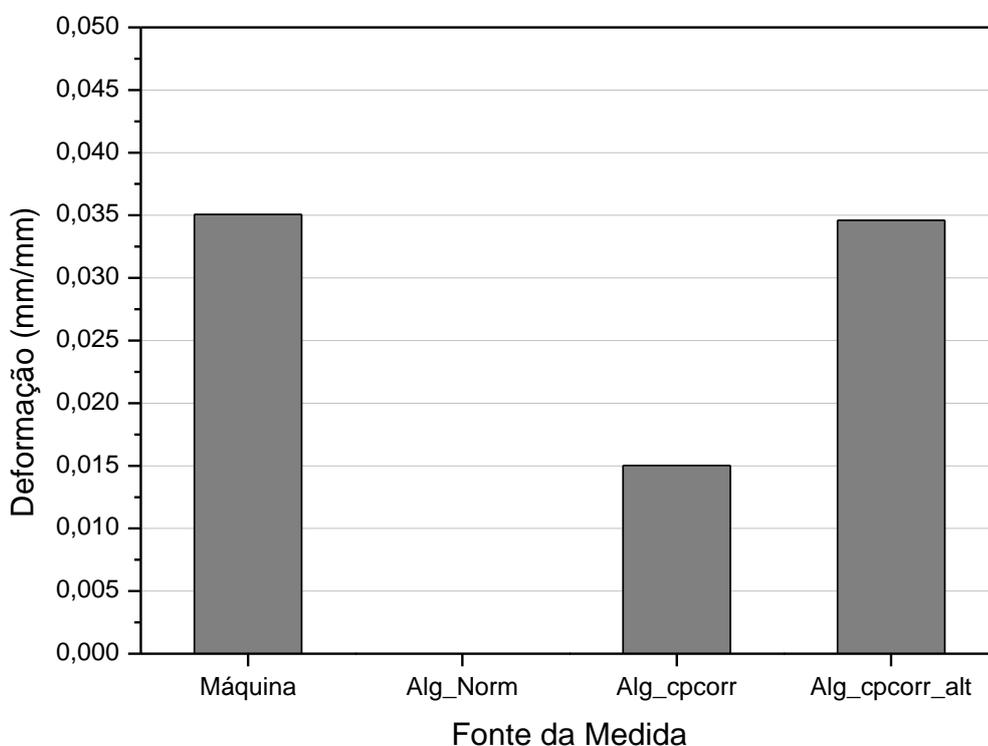


Fonte: próprio autor

A Figura 44 mostra um comparativo para os códigos escritos e os resultados da máquina para o corpo de prova com textura 2. O código `Alg_norm` devido a

deformação apresentada ser de pequeno valor não expressa medida significativa. O Alg\_cpcorr apresenta uma medida muito abaixo do valor da deformação total medida pela máquina devido a forma de rastreamento dos pontos que leva em consideração a deformação em relação a extremidade de cada ponto dentro da zona de referência. O código Alg\_cpcorr\_alt apresenta uma medida eficiente com valor muito próximo do valor medido pela máquina visto o código possibilitou um bom acompanhamento da deformação do corpo de prova.

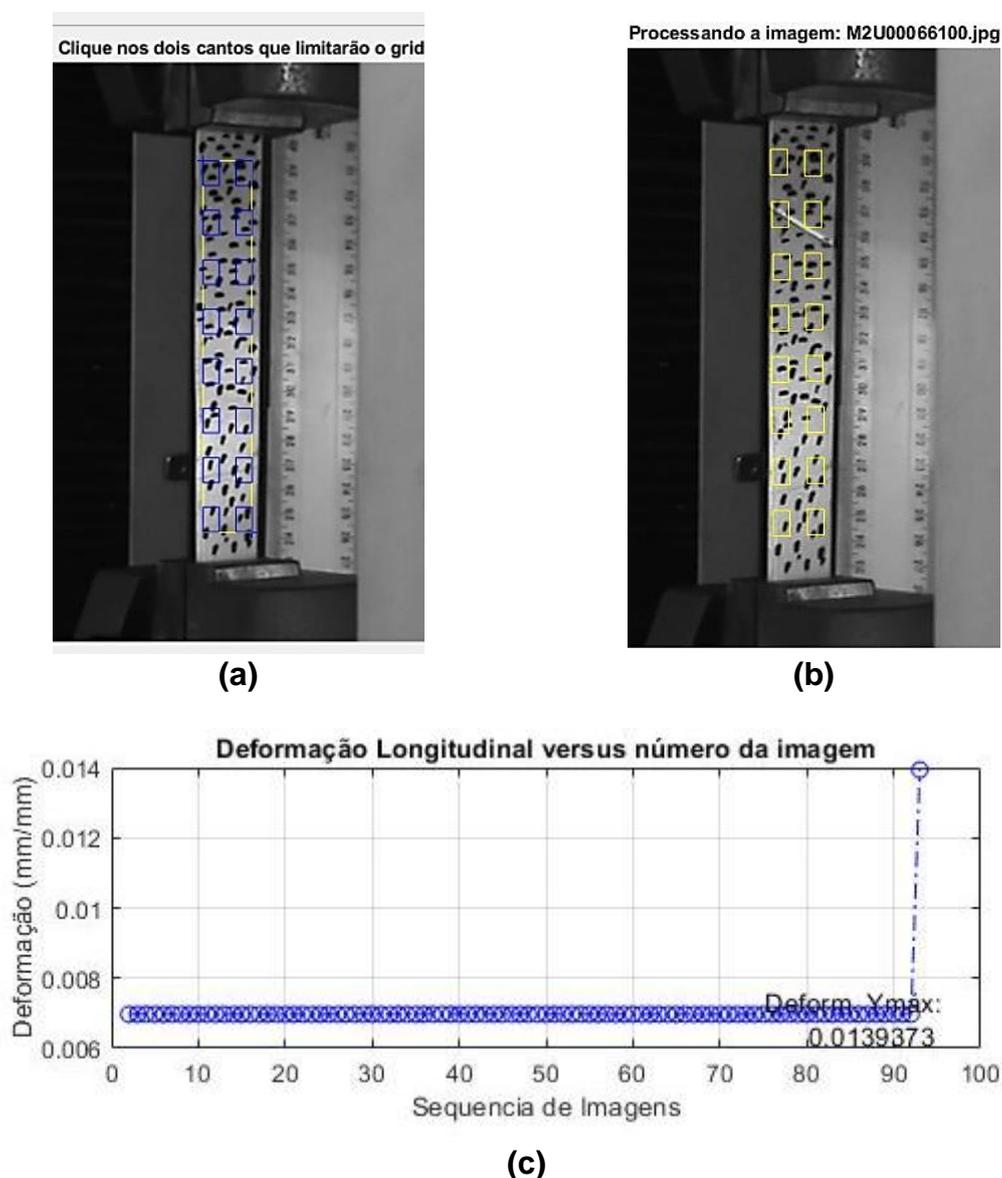
**Figura 44** – Deformação longitudinal medida pelo uso dos algoritmos desenvolvidos sobre corpo de prova 12, de textura 2 e comparação com resultado fornecimento pelo equipamento de ensaio.



Fonte: próprio autor

A figura 45 demonstra que o algoritmo alg\_norm, apesar da condição mais favorável de contraste de cinza na superfície do corpo de prova 12, praticamente não registrou as deformações observadas no material, em função da pequena taxa de deformação entre imagens ocorrida no ensaio, excedendo a precisão da ferramenta Normxcorr2 utilizada no código.

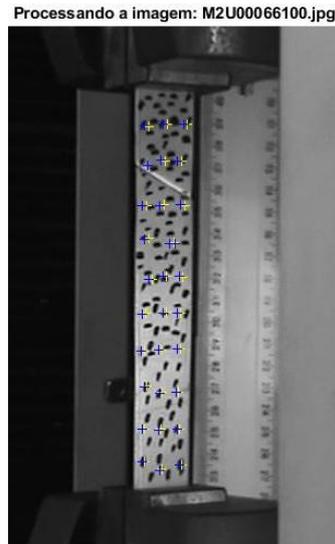
**Figura 45** – Rastreamento de sub-regiões sobre corpo de prova, antes (a) e depois (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_norm, corpo de prova 12.



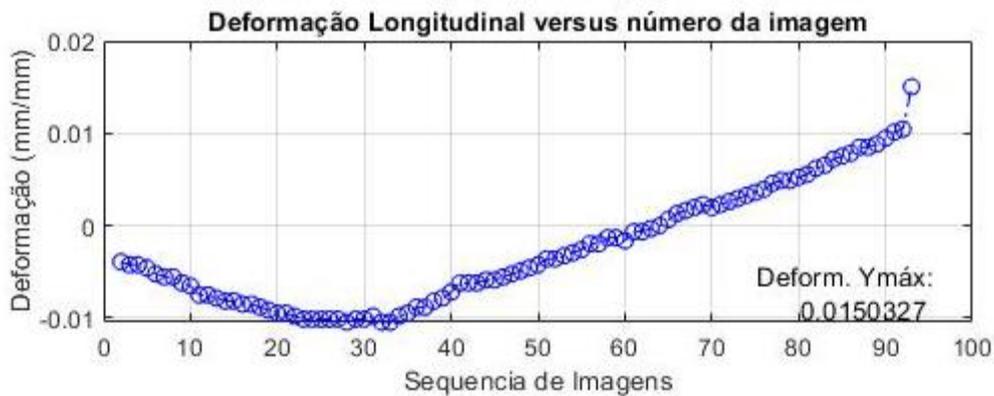
Fonte: próprio autor

Os resultados observados para a deformação longitudinal, na figura 46, demonstram que o algoritmo alg\_cpcorr, por estabelecer um grid retangular automático, permite a localização de pontos de rastreamento em áreas de baixo contraste da imagem, que registram deformações muito baixas ou mesmo zero, reduzindo a média das deformações calculadas durante a execução do código.

**Figura 46** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, durante ensaio de tração (a) e gráfico de deformação longitudinal (b), medido através do algoritmo alg\_cpcorr, corpo de prova 12.



(a)

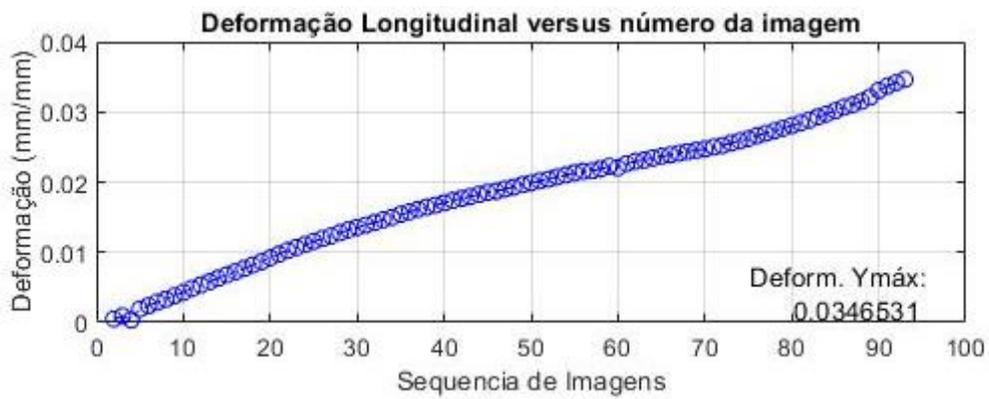
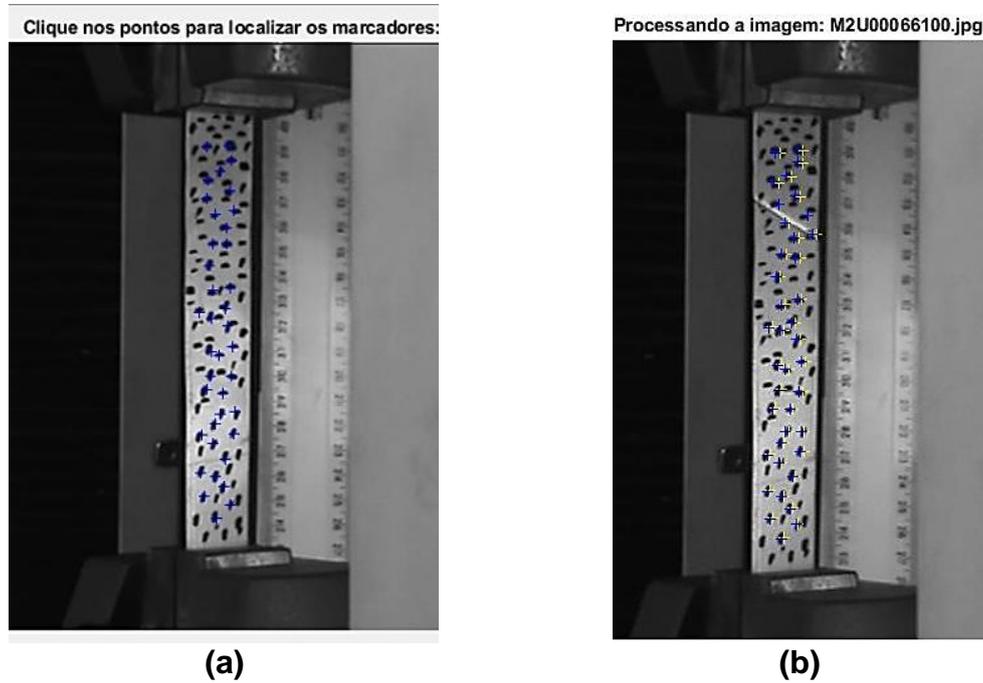


(b)

Fonte: próprio autor

A figura 47 ilustra o funcionamento do algoritmo alg\_cpcorr\_alt, aplicado ao corpo de prova 12. O código foi eficiente em calcular a deformação longitudinal, chegando ao valor de 0,0346 mm/mm, que é somente 1,3% inferior ao valor registrado pelo equipamento de ensaio, 0,035 mm/mm.

**Figura 47** – Rastreamento de pontos de referência sobre corpo de prova, antes (a) e depois (b) de ensaio de tração e gráfico de deformação longitudinal (c), medido através do algoritmo alg\_cpcorr\_alt, corpo de prova 12.



(c)

Fonte: próprio autor

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo geral desenvolver algoritmos em MATLAB, capazes de determinar a deformação longitudinal de corpos de prova sob ensaio de tração, pelo uso da técnica de Correlação Digital de Imagem.

O uso das ferramentas *Normxcorr2* e *cpcorr* do *toolbox Image* do MATLAB, possibilitou o desenvolvimento de códigos computacionais capazes de rastrear as sub-regiões de interesse em uma sequência de imagens, permitindo o uso da técnica de DIC;

O algoritmo *alg\_norm*, desenvolvido pelo uso da ferramenta *Normxcorr2* foi eficaz na medida de deformação longitudinal dos corpos de prova quando estes apresentavam grande capacidade de deformação, porém se mostrou ineficiente na medida de deformação de materiais mais rígidos, com pouca deformação final;

O algoritmo *alg\_cpcorr* se mostrou preciso na medida de pequenas deformações, característica principal da ferramenta de correlação de imagens *cpcorr*, utilizada na sua concepção, porém foi inócuo quando utilizado para medir deformações acima de 1 pixel entre imagens;

O algoritmo *alg\_cpcorr\_alt* foi eficiente na medida de pequenas deformações, porém ineficaz quando utilizado em materiais que apresentavam deformação entre imagens superior a 1 pixel;

Os resultados demonstraram que os corpos de prova de textura com grãos maiores, 2,9 mm em média, apresentaram os pontos de rastreamento e sub-regiões, mais eficientemente rastreadas ao longo das sequencias de imagem de cada série testada;

Os dados e gráficos gerados em cada algoritmo foram suficientes para a avaliação e comparação dos resultados de deformação longitudinal gerados em relação àqueles medidos pelo equipamento de ensaio;

Os algoritmos desenvolvidos mostraram ser viável a medição de deformações longitudinais pelo uso da técnica de DIC, método sem contato, portanto mais seguro que o uso de extensômetros convencionais.

## REFERÊNCIAS

AB GHANI, A. F.; ALI, M. B; DHARMALINGAM; MAHMUD, J. **Digital image correlation (DIC) technique in measuring strain using opensource platform Ncorr**. Journal of Advanced Research in Applied Mechanics, v. 26, n. 1, p. 10-21, 2016.

ANDRADE, A. S. **Materiais orgânicos I**. Universidade Federal do Paraná. Curso de Engenharia Industrial Madeireira, 2006.

ANTONIOU, A. **DIC algorithms**. Ncoor, Georgia, 2015. Disponível em: <http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms>. Acesso em: 15 mar. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM - ISO 7500-1: Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2004.

BENTES, H. P. H. **Cálculo de deformações através do método de correlação de imagens**. Monografia (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

BITENCOURT Jr, A. H. S. **Projeto e desenvolvimento de taliscas em compósito de matriz polimérica para corrente de transportadores industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

BLABER, J.; ADAIR, B.; ANTONIOU, A. **Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software**. Experimental Mechanics, 2015.

CALLISTER, W. D. **Ciência de Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. São Paulo: LTC, 1999..

CALLISTER, W. D. **Ciência de Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. São Paulo: LTC, 2002.

EBERL, C.; THOMPSON, R.; GIANOLA, D.; BUNDSCHUH, S. **Digital image correlation and tracking with MATLAB**. Tech Rep, 2010.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro , 2013.

GONZALEZ, R. C. **Digital Image Processing**. United States: Prentice Hall, 2002

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing using Matlab**. Prentice Hall, 2003.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**, 3 Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, 2000.

LEWIS, J.P. **Fast Normalized Cross-Correlation**. This is an expanded version of a paper from Vision Interface, 1995 (reference [10]) “Fast Template Matching”, *Vision Interface*, p. 120-123, 1995.

LIU, Z.; XIA, Y. **Development of a numerical material model for axial crushing mechanical characterization of woven CFRP composites**. *Composites Structures*, v. 230, n. 111531, 2019.

MOREIRA, P. G. M. **Desenvolvimento de algoritmo de correlação digital de imagem para avaliação de grandes deformações**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto, 2015.

OLIVEIRA, A. W. C. **Estudo para desenvolvimento de um novo conceito de extensômetros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Amazonas, 2010.

PAN, B. et al. **Two dimensional digital image correlation for in plane displacement and strain measurement: a review**. *Measurement Science and Technology*, Oxford, v. 20, n. 6, p. 20-26, Apr. 2009.

PERES, L. M. **Aplicação de processamento digital de imagens à problemas de engenharia civil**. Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2010.

PICOY, Y. S. M. **Correlação digital de imagens para medições de deslocamentos em vigas em balanço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Lavras, 2016.

PORTELA, A; SILVA, A. **Mecânica dos Materiais**. Ed. Plátano, Lisboa, 1996.

SATO, F. H. **Monitoramento de umidade em concreto de barragem de usina hidroelétrica para estudo de reação álcali-agregado e utilização de correlação de imagens digitais**. Tese (doutorado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2017.

SILVA, M. J. A.; ALVES, M. C. A.; COSTA, I. F. **Imagem: uma abordagem histórica**. Curitiba: Editora da UFPR, 2007. 10 p.

VASCONCELOS, P. R. C.; HOLANDA, G. C.; AGUIAR, W. M.; CARVALHO, A. A.; CARVALHO, R. N.; ALEXANDRIA, A. R. **Sistema de aquisição de dados do alongamento de um corpo de prova em um ensaio de tração por meio de técnicas de processamento digital de imagens**. Anais do VII CONNEPI. Palmas: Tocantins, 2012.

WEBER, A. L. **Metrologia e instrumentação. Extensometria (Instrumentação)**. Departamento de Engenharia Mecânica: UCS, 2007

ZHANG, K. **Digital image correlation analysis of alkali silica reaction in concrete with recycled glass aggregate**. Dissertação (Mestrado de Ciências na Engenharia Civil) - Graduate College of the University of Illinois at Urbana, Champaign, 2014.