

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

Renan Silveira Brum

**EXTENSÔMETRO ÓPTICO EM ENSAIOS MECÂNICOS
UTILIZANDO OS MÉTODOS DIC 2D E *TEMPLATE MATCHING***

Timóteo

2017

Renan Silveira Brum

**EXTENSÔMETRO ÓPTICO EM ENSAIOS MECÂNICOS
UTILIZANDO OS MÉTODOS DIC 2D E *TEMPLATE MATCHING***

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Almir Silva Neto
Coorientador: Prof. Me. Douglas Nunes de Oliveira

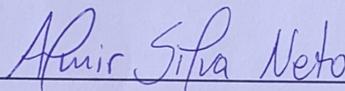
Timóteo

2017

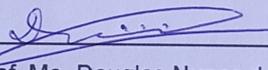
Renan Silveira Brum

**EXTENSÔMETRO ÓPTICO EM ENSAIOS MECÂNICOS
UTILIZANDO OS MÉTODOS DIC 2D E *TEMPLATE MATCHING***

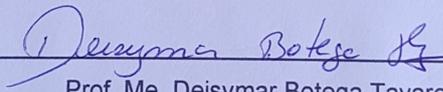
Trabalho aprovado. Timóteo, 19 de dezembro de 2017:



Prof. Dr. Almir Silva Neto
Orientador



Prof. Me. Douglas Nunes de Oliveira
Coorientador



Prof. Me. Deisymer Botega Tavares
Professor Convidado

Timóteo

2017

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e a minha família, aos meus pais Rogéria Maria Silveira Brum e José Brum Filho, ao meu irmão Rangel Silveira Brum, que sempre me incentivaram e apoiaram durante toda minha vida.

Agradeço a todos meus amigos, que participaram diretamente de todas as alegrias e dificuldades que passamos para concluir este curso. Agradeço ao CEFET, todos os professores, toda equipe administrativa e aos demais funcionários por me proporcionar um ambiente agradável e propício para o meu crescimento pessoal e intelectual.

Agradeço em especial aos professores Almir Silva Neto e Douglas Nunes de Oliveira, que foram de extrema importância para o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo não só com seus inestimáveis conhecimentos mas também com todo incentivo necessário para alcançar o objetivo final.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de Iniciação Científica e ao Departamento de Metalurgia e Química (DMQTIM) pela disponibilidade dos laboratórios, materiais e máquinas.

"Esforça-te, e tem bom ânimo; não temas, nem te espantes; porque o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que andares."

Josué 1:9

Resumo

Existem diversas formas de realizar a medição de deformações em ensaios mecânicos de tração. Um dos métodos mais utilizados é o convencional realizado por um extensômetro por contato. Utilizando a área de Processamento Digital de Imagens pode-se demonstrar que existem algumas técnicas para realizar tais medições. Este trabalho apresenta dois métodos: a DIC 2D (Correlação de imagem digital em duas dimensões) pela técnica de correlação de imagem digital, e o método *Template Matching* utilizando a técnica de reconhecimento de padrão. Ambos utilizam a imagem digital e podem encontrar correspondências e deslocamentos. O objetivo desse trabalho é desenvolver uma nova ferramenta para a extensometria ótica utilizando a técnica de reconhecimento de padrão com o método *Template Matching* para analisar as imagens do ensaio mecânico de tração comparando os resultados com a aplicação da técnica de correlação de imagem digital utilizando o método DIC 2D pelo *software* NCORR (*Software* livre utilizado para correlacionar imagens digitais com o propósito de análise dos campos de deslocamentos, coeficientes de correlação e deformações de um material). Para aplicar os métodos foi desenvolvido um sistema experimental de aquisição de imagens digitais sem contato do corpo de prova do ensaio mecânico de tração, afim de se obter um banco de imagens digitais desse ensaio. Foram feitos experimentos para aquisição de imagens digitais dos ensaios mecânicos de tração, o reconhecimento de pixels nas imagens, os cálculos dos deslocamentos de pixels e a deformação utilizando os métodos DIC 2D e o *Template Matching*. De acordo com os resultados vê que as imagens obtidas pelo sistema experimental de aquisição de imagens, aplicadas ao método DIC 2D pelo *software* NCORR, perderam a referência durante a correlação. Mostrando que as imagens não obtiveram um bom coeficiente de correlação, ou seja, as imagens não tem uma correspondência aceitável. Para corrigir esse problema deve-se estudar para escolher a câmera e a iluminação que podem ter interferido nos resultados. Afim de continuar com a aplicação dos métodos, foi adquirida uma nova base de imagem de um ensaio mecânico de tração pelo site do *software* NCORR. De acordo com os resultados pode-se observar que os dois métodos, DIC 2D e *Template Matching* encontraram a referência dos pontos correlacionados, os deslocamentos de pixels horizontais e verticais das correspondências, o coeficiente de correlação de cada imagem afim de investigar o comportamento dos pontos e a deformação média. De acordo com os resultados, conclui-se que o *Template Matching* foi capaz de encontrar as correspondências com um erro pequeno de precisão em comparação ao método DIC, sendo uma opção de baixo custo capaz de ser utilizada para à análise das imagens do ensaio mecânico de tração.

Palavras-chave: ensaios de tração, *Template Matching*, correlação de imagem digital, reconhecimento de padrão.

Abstract

There are several ways to measure deformation in mechanical tensile tests. One of the most used methods is the conventional one performed by a contact extensometer. Using the area of Digital Image Processing it can be demonstrated that there are some techniques to perform such measurements. This work presents two methods: the DIC 2D (Digital Image Correlation in two dimensions) by the digital image correlation technique, and the Template Matching method using the standard recognition technique. Both use the digital image and can find matches and shifts. The objective of this work is to develop a new tool for optical extensometry using the pattern recognition technique with the Template Matching method to analyze images of the mechanical tensile test comparing the results with the application of the digital image correlation technique using the DIC method 2D by NCORR software (Software livre used to correlate digital images for the purpose of analysis of displacement fields, correlation coefficients and deformations of a material). In order to apply the methods, an experimental system was developed to acquire images from the contact of the test specimen of the mechanical tensile test, in order to obtain a digital image bank of this test. Experiments were performed to acquire digital images from mechanical tensile tests, pixel recognition on the images, pixel displacement calculations and deformation using the 2D DIC and Template Matching methods. According to the results, the images obtained by the experimental image acquisition system, applied to the 2D DIC method by the NCORR software, lost their reference during correlation. Since the images did not obtain a good correlation coefficient, that is, the images do not have an acceptable match. To correct this problem one must study to choose the camera and the lighting that can have interfered on results. In order to continue with the application of the methods, a new image of a mechanical tensile test was obtained from the software website NCORR. According to the results it can be observed that the two methods, DIC 2D eTemplate Matching, found the reference of the correlated points, the horizontal and vertical pixel displacements of the correspondences, the correlation coefficient of each image in order to investigate the behavior of the points and deformation. According to the results, it was concluded that the Template Matching method was able to find the correspondences with a small precision error in comparison to the DIC method, being a low cost option able to be used for the analysis of the images of the mechanical test of traction.

Keywords: tensile tests, NCORR, Template Matching, digital image correlation, pattern recognition, pattern matching.

Lista de ilustrações

Figura 1 – (a) Máquina de ensaio de tração e (b) gráfico do ensaio.	16
Figura 2 – Deformação Normal média	16
Figura 3 – Deformação Cisalhante	17
Figura 4 – Formação de uma imagem digital	19
Figura 5 – (a) Imagem de referência (b) Imagem deformada.	20
Figura 6 – Coordenadas das sub-regiões	22
Figura 7 – Deslocamentos lineares para as coordenadas das sub-regiões	23
Figura 8 – Comparação do resultado do coeficiente de correlação.	24
Figura 9 – Critérios da correlação do método DIC 2D	25
Figura 10 – Pesquisa bidimensional de imagens correlatas.	26
Figura 11 – Exemplo da aplicação do método <i>Template Matching</i> . (a) Imagem modelo Q, (b) Imagem de análise A, (c) Casamento, indicado por meio de um rótulo branco sobre a instância do modelo encontrado.	27
Figura 12 – Pintura dos corpos de prova.	30
Figura 13 – Imagem do suporte acoplado na máquina de ensaio.	31
Figura 14 – Fluxograma do método DIC 2D utilizando <i>software</i> NCORR	32
Figura 15 – Estados do <i>software</i> NCORR.	33
Figura 16 – Erro com alto valor do coeficiente de correlação	35
Figura 17 – Parâmetros setados para os métodos (a) DIC 2D (b) <i>Template Matching</i>	36
Figura 18 – (a) Resultados dos deslocamentos no eixo horizontal. (b) Resultados dos deslocamentos no eixo vertical.	38
Figura 19 – NCORR - Coeficiente de correlação de imagens	38
Figura 20 – <i>Math's</i> encontrados pelo método <i>Template Matching</i>	40
Figura 21 – <i>Math's</i> demarcados na imagem resultante.	40
Figura 22 – Gráfico dos deslocamentos horizontais pelo métodos DIC 2D e <i>Template Matching</i>	44
Figura 23 – Gráfico dos deslocamentos verticais pelo métodos DIC 2D e <i>Template Matching</i>	44
Figura 24 – Gráfico dos Coeficientes de correlação pelo métodos DIC 2D e <i>Template Matching</i>	45
Figura 25 – Gráfico das Deformações médias pelo métodos DIC 2D e <i>Template Matching</i>	45
Figura 26 – Compiladores Suportados pelo NCORR.	52
Figura 27 – Página de download do <i>software</i> NCORR.	53
Figura 28 – GUI inicial do <i>software</i> NCORR	53
Figura 29 – Erro de inicialização do <i>software</i> NCORR.	54
Figura 30 – Configuração da instalação do <i>software</i> NCORR	54
Figura 31 – Adaptação para instalação manual.	55
Figura 32 – NCORR - Abrir imagem de referência.	56
Figura 33 – NCORR - Selecionar imagem de referência.	57

Figura 34 – NCORR - Imagem de referência configurada.	57
Figura 35 – NCORR - Definir o banco de imagens.	58
Figura 36 – NCORR - Banco de imagens configurado.	58
Figura 37 – NCORR - Definir Região de Interesse (ROI).	59
Figura 38 – NCORR - Definir formato da Região de Interesse (ROI).	59
Figura 39 – NCORR - Configuração Região de Interesse (ROI).	59
Figura 40 – NCORR - Definir Parâmetros DIC.	60
Figura 41 – NCORR - Configuração dos Parâmetros DIC.	60
Figura 42 – NCORR - Análise DIC	61
Figura 43 – NCORR - Seleção da região de interesse.	61
Figura 44 – NCORR - Localização da semente	61
Figura 45 – NCORR - Formatar Deslocamentos.	62
Figura 46 – NCORR - Parâmetros Deslocamentos.	62
Figura 47 – NCORR - Calcular deformação.	63
Figura 48 – NCORR - Parâmetros para deformação.	63
Figura 49 – NCORR - Saída.	64
Figura 50 – NCORR - <i>Plot</i> - Visualização dos campos de deslocamentos.	64
Figura 51 – Instalação do <i>plugin IDE Gradle Pack</i>	66
Figura 52 – Importação do BoofCV pelo Gradle no Eclipse.	66
Figura 53 – Importação das bibliotecas do BoofCV.	67
Figura 54 – Importação das bibliotecas do BoofCV.	67
Figura 55 – TM - Abrir arquivo imagem de referência.	68
Figura 56 – TM - Seleção de imagem de referência.	68
Figura 57 – TM - Imagem de Referência configurada.	69
Figura 58 – TM - Abrir imagens do banco de imagens.	69
Figura 59 – TM - Selecionar imagens do banco de imagens.	70
Figura 60 – TM - Imagem do banco de imagem configurada.	70
Figura 61 – TM - Abrir imagem alvo A.	71
Figura 62 – TM - Imagem alvo A configurada.	71
Figura 63 – TM - Abrir imagem alvo B.	72
Figura 64 – TM - Imagem alvo B configurada.	72
Figura 65 – TM - Executar método <i>Template Matching</i>	73
Figura 66 – TM - Pontos encontrados.	73
Figura 67 – TM - Salvar Match.	74
Figura 68 – TM - Calcular os deslocamentos.	74
Figura 69 – TM - Resultado dos deslocamentos.	75
Figura 70 – TM - Calcular o coeficiente de correlação.	75
Figura 71 – TM - Resultado do coeficiente de correlação.	76
Figura 72 – TM - Calcular a deformação média.	76
Figura 73 – TM - Resultado da deformação média.	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resolução espacial	18
Tabela 2 – Resolução radiométrica	18
Tabela 3 – Tabela com os pontos das sub regiões correlacionadas pelos u e v e os vetores de deslocamentos du e dv pelo método DIC 2D.	37
Tabela 4 – Tabelas com os valores das deformações médias das sub-regiões por imagem.	39
Tabela 5 – Tabela com os pontos encontrados (alvos) e os deslocamentos no eixo horizontal e vertical utilizando <i>Template Matching</i>	41
Tabela 6 – Tabela com os coeficientes de correlação por imagem utilizando <i>Template Matching</i>	42
Tabela 7 – Tabela com os valores das deformações médias do alvo A.	43
Tabela 8 – Tabela OS/Compilador e <i>flags</i>	56

Lista de abreviaturas e siglas

DPI	Dots per inch
GB	Gigabytes
MB	Megabytes
MMQ	Método dos mínimos quadrados
NC	Nível de cinza
PPP	Pontos por polegadas
Webcam	Câmera de video.
TM	Template Matching
DIC	Digital Image Correlation

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	13
1.3	Estrutura do Trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Ensaio Mecânicos	15
2.1.1	Ensaio de tração	15
2.1.2	Deformação	16
2.2	Imagem Digital	17
2.2.1	Processamento de imagens digitais	18
2.2.2	Câmeras digitais	19
2.3	Correlação de Imagem Digital	19
2.3.1	Método DIC 2D	21
2.3.2	Critérios de correlação	23
2.4	Reconhecimento de Padrão	25
2.4.1	Método <i>Template Matching</i>	26
2.4.2	BoofCV	27
2.4.3	Critério da correspondência	28
2.4.4	Coefficiente de correlação de Pearson	28
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	29
3.1	Fontes de dados	30
3.2	Procedimentos experimentais	30
3.3	Procedimentos para aplicação dos métodos DIC 2D e TM	31
3.3.1	Fluxo do método DIC no <i>software</i> NCORR	31
3.3.2	Fluxo do método <i>Template Matching</i> na ferramenta criada para análise das imagens do ensaio de tração.	33
4	RESULTADOS	35
4.1	Instalação e configuração do software NCORR	35
4.2	Montagem do sistema experimental de aquisição de imagem	35
4.3	Resultados obtidos via <i>software</i> NCORR	37
4.4	Resultados obtidos via <i>Template Matching</i>	40
4.5	Comparação dos resultados	43
5	CONCLUSÃO	46
5.1	Trabalhos futuros	46

6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
	APÊNDICE A – TUTORIAL DE INSTALAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE LIVRE NCORR	51
A.1	Requisitos de instalação	51
A.1.1	Requisitos de versão:	51
A.1.2	Requisitos para o Matlab:	51
A.1.3	Requisitos do sistema operacional:	51
A.1.4	Requisitos do compilador MEX:	51
A.1.5	Configuração MEX	51
A.2	Instalação automática	52
A.3	Instalação manual	54
A.4	Utilização do <i>software</i> livre NCORR	56
	APÊNDICE B – TUTORIAL DE INSTALAÇÃO E UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA TM UTILIZANDO O MÉTODO <i>TEMPLATE MATCHING</i>	65
B.1	Requisitos de Instalação	65
B.1.1	Requisitos de versão:	65
B.1.2	Requisitos para o Eclipse:	65
B.1.3	Requisitos do sistema operacional:	65
B.2	Instalação do <i>plugin Gradle IDE Pack</i> no Eclipse	65
B.3	Configuração do BoofCV pelo <i>Gradle</i>	66
B.4	Utilização da ferramenta	68

1 Introdução

No processo industrial, os materiais tem grande importância, com destaque para os materiais metálicos, em especial os aços. É por isso que ensaios mecânicos que identificam suas características são tão relevantes. Segundo (ZOLIN, 2010), dentre as principais vantagens dos ensaios pode-se citar: prevenção de acidentes, garantia da satisfação do cliente, controle dos problemas de manufatura, redução de custos e manutenção da qualidade.

O desenvolvimento de técnicas confiáveis de medição dos campos de deslocamentos em ensaios mecânicos é primordial quando se deseja caracterizar os comportamentos de estruturas usadas nas engenharias (HILD, 2003). No campo de pesquisa da Mecânica dos Sólidos, também existe a necessidade de aprimoramento das técnicas de medição para estudar e analisar o comportamento dos materiais. Os ensaios mecânicos abordados neste trabalho, dentre os diversos ensaios mecânicos (tração, compressão, torção e cisalhamento) são os de tração. O ensaio mecânico de tração é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos como teste para controle das especificações da entrada de matéria-prima.

O uso de tratamento de imagens para medição de deslocamentos já é bem difundido no ramo de mecânica dos fluidos, mas pode ser igualmente adaptada à mecânica dos sólidos (HILD, 2003). Uma possibilidade de avaliação do material, utilizando o ensaio mecânico de tração, é o uso da fotogrametria digital. Em muitas aplicações da fotogrametria digital, existe a necessidade da localização do ponto de referência em uma ou mais imagens através da superposição de imagens. Neste caso é feita a medição do deslocamento destes pontos de referência ao longo de uma sequência de imagens. Uma das técnicas mais utilizadas e mais precisa consiste em calcular os deslocamentos através de algoritmos de correlação de imagens (AREELIS, 2003, p. 01).

1.1 Justificativa

Este trabalho foi motivado pela existência de sistemas, *softwares* e *hardwares*, proprietários de alto custo para analisar os ensaios de tração (ZOLIN, 2010). Alguns desses softwares fazem a análise utilizando o recurso de pontos de contato com o material que podem comprometer o ensaio. Neste trabalho, desenvolve-se uma nova ferramenta para a extensometria ótica utilizando a técnica de reconhecimento de padrão utilizando o método *Template Matching* para análise de imagens digitais do ensaio de tração e aplica-se a técnica de correlação de imagem digital pelo método DIC 2D, utilizando o *software* livre NCORR.

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma nova ferramenta para a extensometria ótica utilizando a técnica de reconhecimento de padrão com o método *Template Matching* para analisar as imagens do ensaio de tração comparando com os resultados obtidos pela

aplicação da técnica de correlação de imagem digital utilizado o método DIC 2D pelo *software* NCORR nas imagens do ensaio mecânico de tração.

Para atingir esse objetivo é necessário:

- Desenvolver uma ferramenta aplicando a técnica de reconhecimento de padrão utilizando o método *Template Matching* para calcular os deslocamentos das correspondências de pixels, coeficientes de correlação e deformações nas imagens digitais do ensaio de tração;
- Instalar o *software* livre NCORR e aplicar a técnica de correlação de imagem digital utilizando o método DIC 2D utilizando as imagens do ensaio de tração;
- Montar um sistema experimental de aquisição de imagens digitais sem contato do corpo de prova do ensaio de tração, afim de criar um banco de imagens para aplicar os métodos DIC 2D e *Template Matching*;

1.3 Estrutura do Trabalho

O texto está estruturado em 5 capítulos, a saber:

O capítulo 1 trata-se da introdução do trabalho, apresentando o tema abordado, a justificativa, motivação e os objetivos do projeto. As bases teóricas são apresentadas no capítulo 2, definições e conceitos sobre ensaios mecânicos, ensaio mecânico de tração, deformação, imagem digital e processamento de imagens digitais. Posteriormente, apresentam-se as técnicas correlação de imagem digital e reconhecimento de padrões, e os respectivos métodos DIC 2D e *Template Matching*.

O capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos através dos quais este trabalho se desenvolve, o que inclui os materiais escolhidos para experimentação, detalhando bem a formulação, suas estruturas e funcionamentos dos métodos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos da aplicação da ferramenta pela método *Template Matching* e pelo *software* livre NCORR utilizando o método DIC 2D. Foram feitos experimentos com os bancos de imagens fornecidas pelo sistema experimental de aquisição de imagens desenvolvido e pelo banco de imagens fornecidas pelo site do *software* NCORR com uma maior resolução. Encontrou-se os deslocamentos de pixels pelas correspondências, coeficientes de correlação e as deformações médias em cada imagem. Por fim, comparou-se os resultados obtidos pelos dois métodos afim de analisar a nova ferramenta criada utilizando o método *Template Matching*. O quinto capítulo conta com as conclusões acerca dos resultados obtidos pelos métodos e projetos futuros a partir deste.

2 Fundamentação teórica

2.1 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos são métodos utilizados para medir uma série de fatores com o objetivo de entender o comportamento do material com que se trabalha (SOUZA, 1982). Isso é feito por meio da análise de suas propriedades mecânicas em várias condições de uso.

Alguns ensaios mecânicos, para serem realizados, necessitam de um elemento material, que chamamos “corpo de prova”, que pode ser uma peça inteira ou uma amostra representativa dela. Os ensaios mecânicos podem ser classificados em não destrutivos e destrutivos, conforme o procedimento adotado (ZOLIN, 2010). Os ensaios não destrutivos (ensaio por inspeção visual, por líquidos penetrantes ou por partículas magnéticas, por ultrassom, por radiografia, por emissão acústica e por correntes parasitas) são aqueles que após a sua realização, não deixam nenhuma marca ou sinal na peça e também não a inutilizam. Já os ensaios destrutivos (ensaios de tração, de compressão, de dureza e fratura), são os do tipo que deixam algum sinal na peça, ou até mesmo a inutilizam.

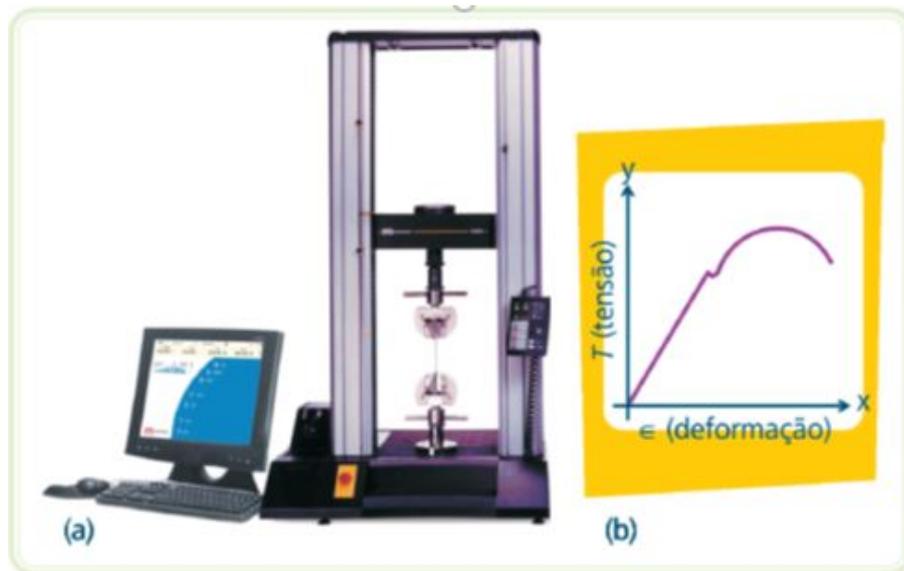
2.1.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um dos testes mecânicos de tensão-deformação mais comuns. Esse ensaio pode ser usado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais (tenacidade, elasticidade, deformação, tensão, dentre outros). Consiste na aplicação de uma força, carga de tração crescente, que ao agir sobre uma superfície de um corpo sólido provoca uma deformação. Quando essa força, tende ao alongamento, aplicada uniaxialmente ao longo do eixo mais comprido do corpo de prova, acontece o que chamamos de tensões de tração (CALLISTER, 2002).

Há uma relação entre tensão aplicada (carga sobre área da seção transversal da peça) e a deformação resultante. Pode-se representar esse fenômeno na forma de um diagrama tensão/deformação indicado pela Figura 1.b.

Os valores para construir o gráfico (diagrama) tensão-deformação são obtidos pelo ensaio de tração realizado em uma máquina apropriada para essa função. A máquina usada para realizar o ensaio de tração deve possuir os seguintes dispositivos: garras para prender a peça ou corpo de prova, uma carga para aplicar uma força e um instrumento para verificar a deformação o extensômetro (CALLISTER, 2002). A máquina de ensaio impõe um deslocamento e mede a força. Assim, quando é aplicada uma força de tração sobre a superfície transversal de uma peça, produz um alongamento. A Figura 1.a representa uma máquina de ensaio de tração.

Figura 1 – (a) Máquina de ensaio de tração e (b) gráfico do ensaio.



Fonte: Adaptado de ANDRADE (1998).

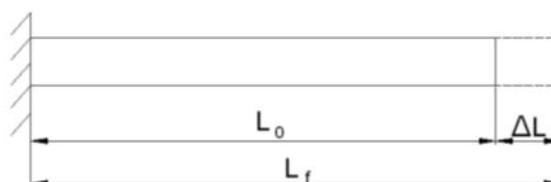
2.1.2 Deformação

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 dificilmente são perceptíveis a olho nu. No estado geral de tensão/deformação, um elemento pode estar submetido a deformações normais ou de cisalhamento.

Segundo Callister (2002) os materiais, quando submetidos a forças ou carregamentos, estão sujeitos a deformações elásticas e/ou permanentes. Um exemplo que pode ser citado é o aço no eixo de um automóvel. Então, torna-se necessário conhecer as propriedades do material antes de se iniciar o projeto de um componente, pois agindo assim pode-se otimizar ao máximo o desempenho da peça a ser construída de forma que a deformação resultante não seja excessiva e não ocorra fratura. A resposta de um material está diretamente relacionada às suas propriedades mecânicas, e isso será refletido no seu desempenho.

A deformação normal média, exemplificada na (Figura 2), é um parâmetro adimensional correspondente ao alongamento ou a contração de um elemento por unidade de comprimento (HIBBELER, 2000).

Figura 2 – Deformação Normal média.



Fonte: Adaptado de MORAIS (2012).

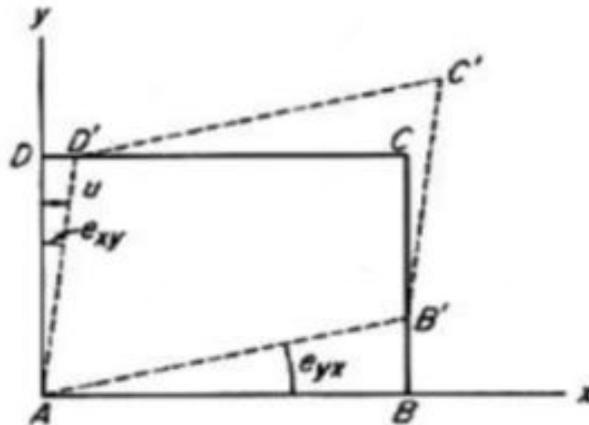
Neste caso, a deformação uniaxial, $\bar{\varepsilon}$, é obtida através da razão da variação do seu comprimento pelo comprimento inicial, como mostra a equação 2.1:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.1)$$

ΔL é a variação do comprimento do elemento, ou seja, a variação entre o comprimento final (L_f) e o inicial (L_0).

A deformação cisalhante altera somente a forma do material mantendo o seu volume constante (HIBBELER, 2000). Trabalhando-se em um elemento de dimensão infinitesimal, este pode se deformar, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Deformação Cisalhante.



Fonte: Adaptado de MORAIS (2012).

Um dos testes mais importantes realizados para caracterizar um material mecanicamente é o ensaio de tração. Apesar de ser um teste completo no que diz respeito ao levantamento das propriedades mecânicas, ele é basicamente usado para determinar a relação entre tensão normal média e a deformação normal média em muitos materiais da engenharia, tais como metais, cerâmicas, polímeros e materiais compostos (HIBBELER, 2009).

2.2 Imagem Digital

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, segundo (GONZALES; WOODS, 2009).

Uma imagem pode ser representada por uma matriz ou uma série de matrizes 2D de números inteiros. As imagens coloridas são representadas por três ou quatro matrizes dependendo do sistema de cores empregado, uma matriz para cada banda de cor. Uma imagem com uma única matriz de intensidades é chamada de imagem em níveis de cinza. Normalmente,

os níveis de intensidade pertencem ao intervalo de valores [0, 255]. Este intervalo pode ser menor, como no caso das imagens binárias onde o intervalo é [0, 1] (GONZALES; WOODS, 2002; PETROU, 2010). Ou pode ser maior em imagens chamadas “*deep color*”, onde são alocados mais de 8 bits por canal.

As imagens digitais são codificações, com um formato determinado, reconhecidas por um computador e que podem ser obtidas mediante uma câmera fotográfica digital. A imagem 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; ALVES; COSTA, 2007).

- Resolução espacial: relacionada com o tamanho do pixel e é frequentemente expressa em ppp (pontos por polegadas) que é igual a dpi (*dots per inch*). As dimensões do pixel são diferentes para cada resolução.

Tabela 1 – Resolução espacial

Resolução	300	600	1200	2750	2540
Tamanho do Pixel (μ m)	84	42	21	20	10

Fonte: Adaptado de SCHENK (1999).

- Resolução radiométrica: Depende dos níveis de quantização (transformação da função contínua em valores de cinza discretos) empregados.

Tabela 2 – Resolução radiométrica

n	Bits	1	2	3	4	5	6	7	8
2^n	Níveis de cinza	2	4	8	16	32	64	128	256

Fonte: Adaptado de SCHENK (1999).

2.2.1 Processamento de imagens digitais

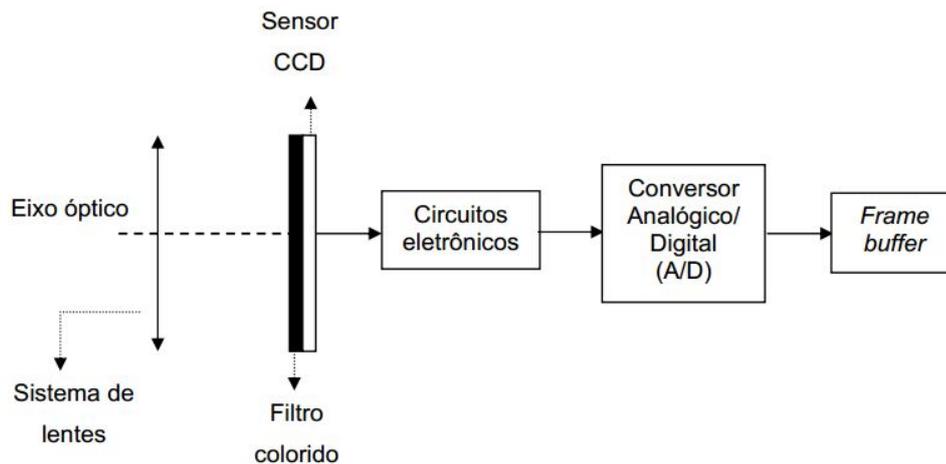
A etapa do processamento de imagens digitais envolve procedimentos normalmente expressos sob forma algorítmica, com o qual a maioria das funções de processamento de imagens pode ser implementada via software. Finalmente, a etapa de saída envolve monitores de vídeo, que é um elemento fundamental de um sistema de processamento de imagens (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Os processos computacionais são classificados em três tipos: processos de baixo nível (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), segundo (GONZALES; WOODS, 2009).

2.2.2 Câmeras digitais

Segundo Tommaselli (2000), câmeras digitais são dispositivos compostos de um sistema de lentes, um chip sensor, que pode ser do tipo CCD (*Charge Coupled Device*) ou CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), processadores e uma memória para a coleta e armazenamento de imagens digitais. O princípio de formação de uma imagem digital mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Formação de uma imagem digital.



Fonte: Adaptado de TOMMASELLI (2000).

O objetivo do conversor A/D é transformar o sinal elétrico analógico gerado pelo CCD em um sinal digital, que é armazenado em uma memória temporária (*frame buffer*).

2.3 Correlação de Imagem Digital

A correlação de imagem digital (DIC) é uma técnica para visualizar campos de deslocamentos por sucessivos pós-processamentos das imagens captadas a uma frequência constante (SKARŻYŃSKI et al, 2011). A técnica utiliza o método de correlação matemática pra calcular o deslocamento no plano em superfícies de componentes ou estruturas sujeitas a tensões térmicas ou mecânicas. Dado um conjunto de pixels nas duas imagens capturadas antes e após a deformação, a DIC extrai os deslocamentos da imagem, por meio da otimização da correlação entre as intensidades das localizações correspondentes (ZHOU et al., 2014).

A DIC, mediante análises de imagens digitais dos objetos submetidas a carregamentos externos, permite obter o campo de deslocamentos (ALBA et al., 2010), sendo que o campo de deslocamento é um mapa de deslocamentos na superfície de um objeto deformado por rastreamento de grupos de pixels, a partir de uma sequência de imagens adquiridas antes e após a deformação.

Na década de 80, foram publicados os primeiros resultados de uma investigação de deformação de um objeto usando imagens digitais (PETERS; RANSON, 1982). Para isso, comparou-se a localização de pequenas regiões de uma imagem digital do objeto de teste

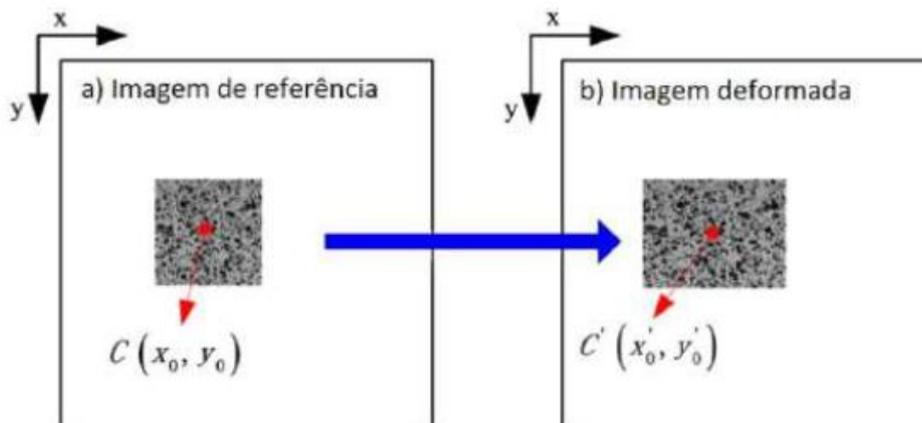
antes e após a aplicação do carregamento, possibilitando obter a medição de deslocamentos entre os dois estados. A partir daí, esse método foi melhorado por meio da inclusão do algoritmo de otimização numérica, usando o método de Newton-Raphson, resultando no desenvolvimento de técnica de correlação digital de imagem (SUTTON; ORTEU; SCHREIER, 2009).

Yuan et al.(2014) desenvolveram um algoritmo autoadaptativo para medições do deslocamento da superfície inteira, podendo otimizar automaticamente a distribuição de toda a amostragem. Wu et al.(2015) utilizaram a técnica DIC, baseada no modelo Newton-Raphson em peças de turbinas eólicas e concluíram que a técnica, por ser destrutiva e não invasiva, fornece assistência importante para o monitoramento de condições e a detecção de falhas em peças de turbinas eólicas em etapa inicial. A técnica DIC torna-se cada vez mais uma ferramenta analítica para aplicações mecânicas e estruturais, em razão do baixo custo e fácil disponibilidade de equipamentos e software (XIE; KANG, 2015).

A correlação de imagem digital é baseada na comparação das imagens de luz branca, antes, durante e após a deformação de um corpo-de-prova, como mostra a Figura 5. As imagens são divididas em sub-regiões e a correlação entre as imagens coletadas gera uma matriz de vetores de deslocamento em toda a imagem.

A precisão dos deslocamentos medidos utilizando DIC é limitada pelo número de pixels dentro da imagem e da dimensão das regiões (subconjuntos) (CRAMMOND; BOYD; BARTON, 2014).

Figura 5 – (a) Imagem de referência (b) Imagem deformada.



Fonte: Adaptado de TANG (2012).

Métodos ópticos são amplamente utilizados na mecânica experimental, para obter acesso direto aos dados cinemáticos (dados que descrevem os movimentos dos corpos) emitidos a partir de estudos mecânicos. Entre as técnicas envolvendo metrologia óptica, a técnica DIC trabalha com uma abordagem não destrutiva, permitindo que o campo de deslocamento seja obtido sem danos à estrutura. Ele é simples de ser usado e pode ser aplicado em experimentos de materiais e em estruturas industriais em geral (HEDAN et al., 2014).

2.3.1 Método DIC 2D

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

O processo do método DIC 2D, começa com a captura das imagens da amostra, com o objetivo de se obter a correlação entre os pontos selecionados na imagem de referência (imagem inicial) e a imagem deformada (imagem atual). O método DIC 2D executa este procedimento por meio de sub-regiões da imagem de referência e determina sua posição na imagem deformada. O resultado é uma matriz que contém os deslocamentos.

As sub-regiões são conjuntos de pontos coordenados (pares ordenados (x, y) das coordenadas cartesianas). A sub-região na imagem de referência e a imagem deformada encontram-se ilustradas na Figura 6.

A transformação dos pontos de sub-regiões da referência inicial a sub-regiões deformadas tem um comportamento linear representado na Equações 2.2 e 2.3:

$$\tilde{x}_{cur_i} = x_{ref_i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{ref_i} - y_{ref_c}) \quad (2.2)$$

$$\tilde{y}_{cur_j} = y_{ref_i} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{ref_i} - y_{ref_c}) \quad (2.3)$$

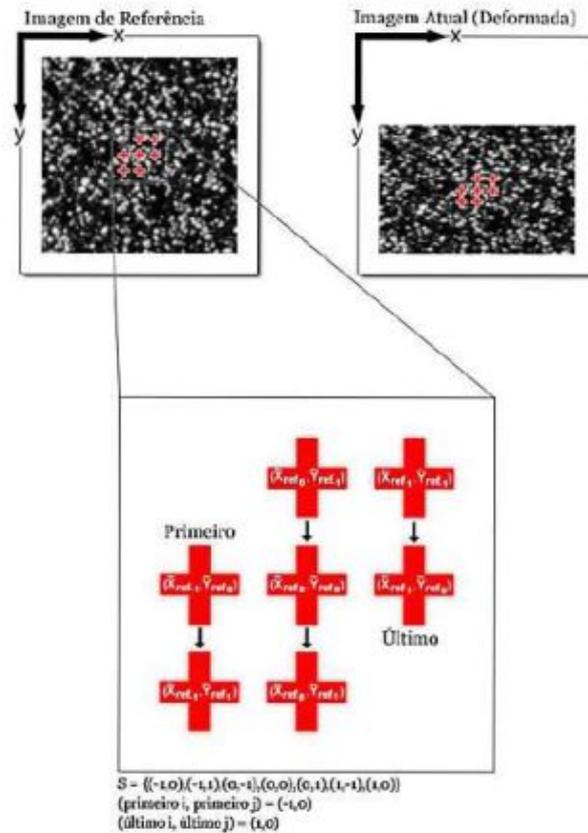
Em que (i, j) pertence ao conjunto S e, x_{ref_i}, y_{ref_j} são coordenadas x e y de um ponto da sub-região da referência inicial; x_{ref_c}, y_{ref_c} são coordenadas x e y do centro da sub-região de referência inicial; $\bar{x}_{cur_i}, \bar{y}_{cur_j}$ são coordenadas x e y de um ponto final da sub-região deformado; (i, j) são índices utilizados para posição relativa dos pontos de sub-região, referente ao centro da sub-região; S é o conjunto que contém os pontos da sub-região; rc indica o deslocamento que vai da referência até atual sistema de coordenadas; u é a variável de deslocamento dos pontos da sub-região S referente ao eixo x ; v é a variável de deslocamento dos pontos da sub-região S referente ao eixo y .

A equação 2.4, apresenta-se a forma geral da deformação do vetor p :

$$p = (uv \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y})^T \quad (2.4)$$

Sendo T a transposta do vetor p .

Figura 6 – Coordenadas das sub-regiões



Fonte: Adaptado de ANTONIU (2015).

As equações 2.2 e 2.3 podem ser escritas na forma de matriz (Equação 2.5):

$$\xi_{ref_c} + w(\Delta \xi_{ref}; P_{rc}) = \begin{Bmatrix} x_{ref_c}^T \\ y_{ref_c}^T \\ 1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + \frac{du}{dx_{rc}} & \frac{du}{dy_{rc}} & u_{rc} \\ \frac{dv}{dx_{rc}} & 1 + \frac{dv}{dy_{rc}} & v_{rc} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \Delta x_{ref}^T \\ \Delta y_{ref}^T \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

ξ é o vetor que contém as coordenadas x e y dos pontos das sub-regiões; dx e dy são as distâncias entre um ponto e o centro da sub-região. Para efeitos de processamento, considera-se a sub-região de referência deformando dentro da configuração de referência, a qual é representada pelas Equações 2.6 e 2.7.

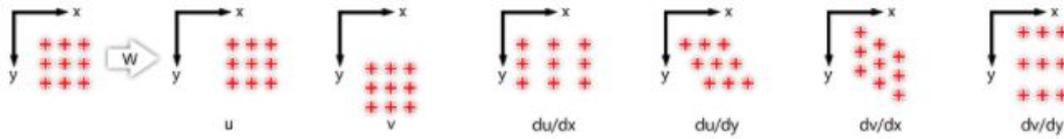
$$\bar{x}_{ref_i} = x_{ref_i} + u_{rr} + \frac{\partial u}{\partial x_{rr}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rr}}(y_{ref_i} - y_{ref_c}) \quad (2.6)$$

$$\bar{y}_{ref_i} = y_{ref_i} + v_{rr} + \frac{\partial v}{\partial x_{rr}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rr}}(y_{ref_i} - y_{ref_c}) \quad (2.7)$$

sendo (i, j) pertencente ao conjunto S e, \bar{x}_{ref_i} , \bar{y}_{ref_i} são coordenadas x e y de um ponto da sub-região referencial final; rr representa o deslocamento da referência do sistema de coordenadas para o sistema de coordenadas de referência.

O propósito é identificar o melhor P_{rc} (deformação que vai da referência até a atual) quando a deformação em P_{rr} é 0. Um dos métodos para identificar é o método de composição inversa, ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Deslocamentos lineares para as coordenadas das sub-regiões



Fonte: Adaptado de ANTONIU (2015).

Se apenas uma câmera for empregada nos experimentos, o método é conhecido como DIC 2D, o qual permite a medição de deslocamentos sobre um plano perpendicular ao eixo óptico. Quando duas câmeras são empregadas, o método é conhecido como DIC 3D (Correlação de Imagem Digital em três dimensões), que permite a medição de deslocamentos experimentados pelo objeto nas três direções espaciais (SESÉ et al., 2014). A robustez de uma análise do método DIC 2D pode ser comprometida por um número de diferentes fatores, tais como, deslocamento elevado entre as imagens subsequentes ou diferentes fatores introduzidos durante a captação das imagens, como trincas, sombras, etc (FAGERHOLT; BORVIK; HOPPERSTAD, 2012).

2.3.2 Critérios de correlação

Para estabelecer os parâmetros de comparação entre a sub-região de referência final e a sub-região atual final, estes podem ser comparados pelos valores de escala de cinza nos pontos de sub-região de referência finais com os valores de escala de cinza nos pontos de sub-regiões atual finais.

Os parâmetros utilizados no método DIC 2D são:

1. Critério de correlação cruzada normalizada, representado pela Equação 2.8:

$$C_{CC} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m)(g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m]^2 \sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m]^2}} \quad (2.8)$$

2. Critério normalizado de mínimos quadrados, representado pela Equação 2.9:

$$C_{LS} = \sum_{(i,j) \in S} \left[\frac{f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m]^2}} - \frac{g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m]^2}} \right]^2 \quad (2.9)$$

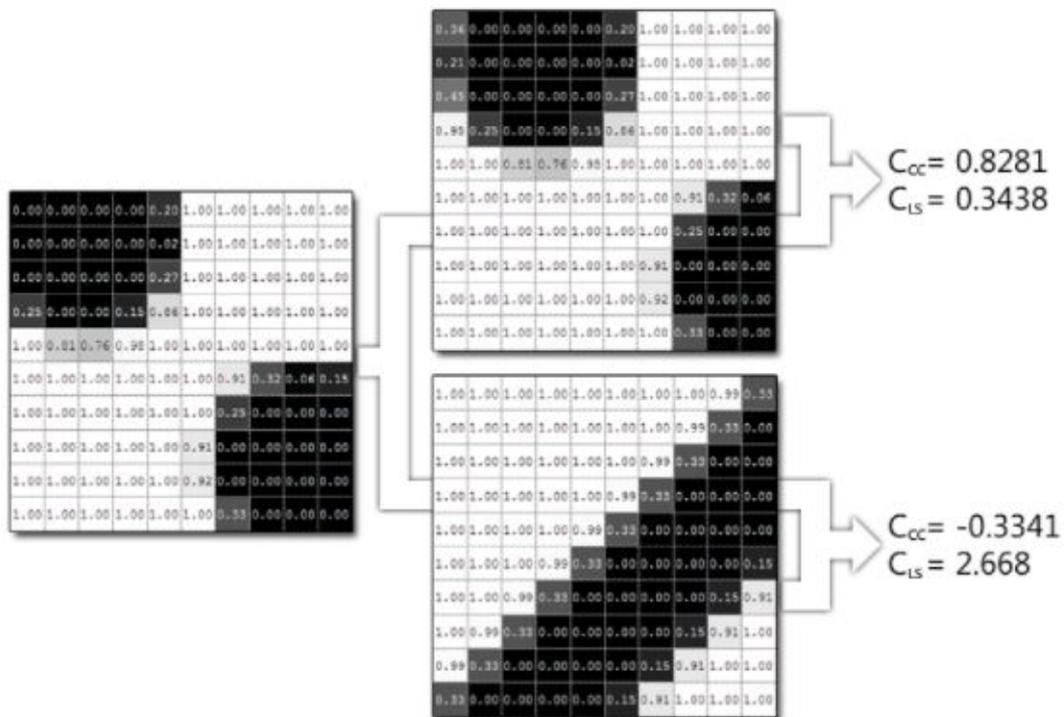
Onde, f e g são funções da imagem de referência e da imagem atual respectivamente, que representa o valor da escala de cinza correspondente a cada ponto (x, y) ; fm , gm são valores médios de escala de cinza da sub-região de referência final e sub-região atual (Equações 2.10 e 2.11). Logo,

$$fm = \frac{\sum_{(i,j) \in S} f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j})}{n(S)} \tag{2.10}$$

$$gm = \frac{\sum_{(i,j) \in S} g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j})}{n(S)} \tag{2.11}$$

Onde $n(S)$ é o número de elementos em S . A divisão da quantidade do denominador permite a invariância referente aos valores de escala de cinza. O resultado é um critério de correlação que são invariantes as mudanças nos valores de escala de cinza. A proximidade e o coeficiente normalizados de correlação cruzada, a correlação se calcula entre pares de sub-regiões pertencentes à imagem de referência e à imagem deformada, procurando a máxima medida. Um exemplo prático do uso dos critérios pode ser ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Comparação com as duas imagens à direita em escala de cinza.



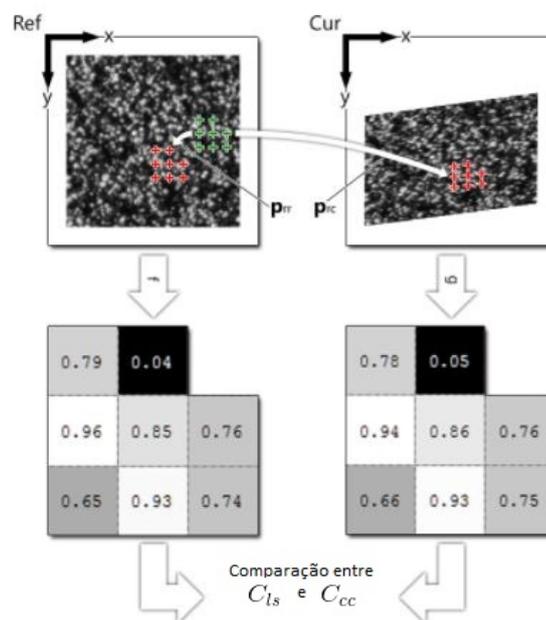
Fonte: Adaptado de ANTONIU (2015).

Em geral, os passos para utilização dos critérios de correlação são descritos a seguir:

1. Formar uma sub-região inicial na configuração de referência.

2. Os valores de escala de cinza de referência, nesse ponto, são armazenados em uma matriz.
3. Aplicar a função (princípio de tensão) na sub-região de referência inicial para levá-lo à configuração atual, onde uma matriz tenha os valores atuais de escala de cinza e são armazenados em uma matriz de tamanho equivalente ao passo 1.
4. Após comparar as duas matrizes, utilizando os critérios de correlação citados acima. Esse processo está ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Critérios da correlação do método DIC 2D



Fonte: Adaptado de ANTONIU (2015).

O passo seguinte da análise é a forma de estabelecer o método para identificação de maneira automatizada. A principal aplicação do método DIC 2D se dá na utilização de um esquema iterativo não linear de otimização de mínimos quadrados que reduz as equações.

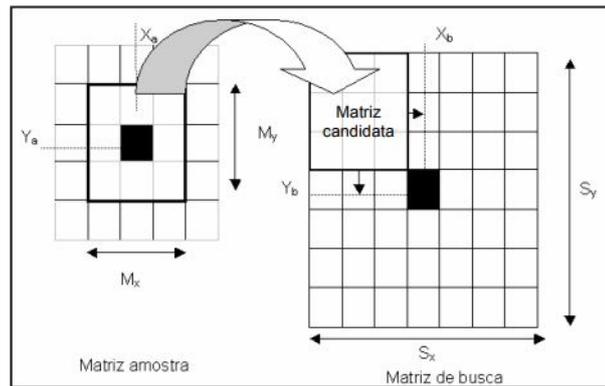
2.4 Reconhecimento de Padrão

Segundo Schenk (1999), o método de reconhecimento de padrão é um método baseado em área, que consiste em comparar a distribuição de níveis de cinza de uma matriz amostra (padrão) com matrizes candidatas pertencentes a uma matriz de busca, usando uma função de correlação adequada como na Figura 10.

Alguns aspectos são importantes neste método, como:

- Dimensão por padrão: padrões com dimensões maiores garantem uma melhor correspondência, porém, aumentam o custo computacional;

Figura 10 – Pesquisa bidimensional de imagens correlatas.



Fonte: Adaptado de ANDRADE (1998).

- Localização e dimensão da janela: o método de *Template Matching* é baseado em área, assim, métodos de redução do espaço de busca podem ser usados para garantir boas aproximações.

Um padrão pode ser visto como uma entidade a partir da qual é possível extrair algum tipo de característica, seja simbólica ou numérica. A técnica de reconhecimento de padrões tem como objetivo identificar um padrão a partir das suas características. A criação de mecanismos automáticos que imita habilidades dos seres humanos e dos animais em tarefas ainda é um sonho e, ao mesmo tempo, uma motivação para realização de intensas pesquisas, as quais têm crescido proporcionalmente ao aumento das exigências associadas às aplicações relacionadas ao tema. Diversas áreas do conhecimento tais como biologia, psicologia, medicina, engenharia, inteligência artificial e visão computacional possuem problemas relacionadas ao reconhecimento de padrões (JAIN; DUIN; MAO, 2000).

A importância do reconhecimento de padrões em visão computacional está relacionada com a ideia de simulação de processamentos complexos de percepção visual em máquinas (CONCI; AZEVEDO; LETA, 2008).

O processo de reconhecimento de padrões em imagens digitais é realizado de forma que: um mecanismo descritor faz extração de um conjunto de atributos das imagens que contém o objeto ou padrão de referência (Q) e um ou mais conjuntos de atributos da imagem que está sendo analisada (A). A detecção do padrão é feita verificando-se a semelhança entre o vetor de atributos extraídos de (Q) e os vetores extraídos de (A). O objetivo de uma medida de similaridade é exprimir esta semelhança. Se o grau de similaridade entre dois vetores for acima de um limiar definido pelo usuário, diz-se que há um casamento entre (Q) e a subimagem de (A), a partir da qual foi extraído o vetor de atributos. Daí o termo casamento de padrão ou *Template Matching* (LONG; ZHANG; FENG, 2005).

2.4.1 Método *Template Matching*

Template Matching é um método muito utilizado em visão computacional, contudo, a fim de definir do que se trata inicialmente deve-se esclarecer o significado das palavras

Template e Matching.

A palavra *Template* é definida como sendo algo desenvolvido para servir de modelo para alguma coisa. *Matching* é definido como sendo uma comparação de similaridade com relação à forma, analisando-se a semelhança ou a diferença. Um *Template* pode adicionalmente exibir alguma variabilidade, ou seja, nem todas as instâncias precisam ser exatamente iguais. Exemplo disso é o fato de um objeto poder ser observado de diferentes pontos de vista. Mudanças de iluminação, sensores de imagens ou configuração dos sensores podem também criar variações significantes (BRUNELLI, 2009).

Logo, deve-se procurar o modelo Q (imagem de consulta ou imagem de busca) numa imagem de análise A (imagem teste), o objetivo é localizar uma instância de Q em A. Um indicador é traçado no local da instância encontrada, para advertir a localização do casamento, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo da aplicação do método *Template Matching*. (a) Imagem modelo Q, (b) Imagem de análise A, (c) Casamento, indicado por meio de um rótulo branco sobre a instância do modelo encontrado.



Fonte: Adaptado de BRAHMBHATT (2014).

O método *Template Matching* basicamente percorre toda a imagem comparando se cada conjunto de pixels tem o mesmo valor que o do *Template*. Quando se encontra um número suficiente aceitável para o algoritmo desenvolvido, é dito que foi encontrado um *Match*, ou seja, foi encontrado o *Template* ou alvo na imagem dada com entrada. Ao final, tem-se a indicação da localização do *template* ou alvo nas imagem de teste.

2.4.2 BoofCV

O BoofCV é uma biblioteca em Java de código aberto para aplicações em visão em tempo real e robótica. Escrito a partir do zero para facilidade de uso e alto desempenho. Sua funcionalidade abrange uma ampla gama de assuntos, incluindo rotinas de processamento de imagem otimizadas de baixo nível, calibração de câmera, detecção/rastreamento de recursos, estrutura de movimento e reconhecimento. O BoofCV foi lançado sob uma licença Apache 2.0 para uso tanto acadêmico quanto comercial (MARENGONI; STRINGHINI, 2009).

O BoofCV está organizado em vários pacotes: *image processing*, *features*, *geometric vision*, *calibration*, *recognition*, *visualize*, e *IO* (Termo utilizado para entrada e saída de dados). O processamento de imagem contém funções de processamento de imagem comumente usadas que operam diretamente em pixels. Os recursos possuem algoritmos de extração de re-

curso para uso em operações de nível superior. O reconhecimento são para o rastreamento de objetos visuais complexos. Visão geométrica composta por rotinas para processar recursos de imagem extraídos usando geometria 2D e 3D. Visualização tem rotinas para renderização e exibição de recursos extraídos. O pacote *IO* possui rotinas de entrada e saída para diferentes estruturas de dados (MARENGONI; STRINGHINI, 2009).

2.4.3 Critério da correspondência

A função *SUM_DIFF_SQ*, soma da diferença ao quadrado ou erro euclidiano ao quadrado, é utilizada pelo método *Template Matching* para encontrar o ponto da correspondência do alvo na imagem de entrada, retornando o ponto de maior intensidade na posição esquerda superior como mostra a Figura ??, através da comparação de pixel a pixel entre o *template* ou alvo e a imagem de entrada, dada pela equação 2.13:

$$R(x, y) = \sum_{x', y'}^{w-1} = (Q(x', y') - A(x + x', y + y'))^2 \quad (2.12)$$

Sendo a imagem *A* com dimensão $W \times H$ e a imagem *Q* com dimensão $w \times h$, o resultado *R* será $(W - w + 1) \times (H - h + 1)$. A soma é feita sobre a imagem, tal que, $x' = 0 \dots w - 1$, $y' = 0 \dots h - 1$.

2.4.4 Coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson (r) pode ser definido como uma medida do grau de relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias (SCHULTZ e SCHULTZ, 1992). Para imagens monocromáticas r é dada pela Equação 2.13:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\sqrt{\sum_i (x_i - x_m)^2} \sqrt{\sum_i (y_i - y_m)^2}} \quad (2.13)$$

Onde: X_i - Pixel i da imagem X . X_m - Média entre os pixels X_i e Y_i . Y_i - Pixel i da imagem Y . Y_m - Média entre os pixels X_i e Y_i . A correlação entre duas imagens i e j é definida pela covariância entre essas duas imagens, normalizada pelo produto de seus respectivos desvios padrões. Na equação acima o numerador é a covariância e o denominador é o produto dos desvios padrões de X e Y , respectivamente. O coeficiente de correlação r retorna valores entre -1 e 1, sendo que $r = 1$ indica duas imagens idênticas, $r = 0$ para imagens completamente diferentes e $r = -1$ representa duas imagens opostas, ou seja, uma negativo da outra. Assim consegue-se um quantitativo estatístico da relação entre duas imagens. Quanto mais próximo de 1 for o valor de r , mais semelhança pixel a pixel existem entre as duas entidades analisadas.

3 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos são organizados nas seguintes etapas:

1. Montar um sistema experimental de aquisição de imagens digitais, sem contato, sequenciadas de um corpo de prova submetido a um ensaio de tração, afim de fornecer a base de dados para aplicação dos métodos DIC 2D e *Template Matching*;
2. Desenvolver uma ferramenta aplicando a técnica de reconhecimento de padrão utilizando o método *Template Matching* para medição dos deslocamentos de pixels das correspondências e as deformações médias nas imagens digitais do ensaio de tração;
3. Instalar o *software* livre NCORR e aplicar a técnica de correlação de imagem digital utilizando o método DIC 2D;

O preparo dos experimentos foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais campus Timóteo (CEFET-MG) pertencente ao Departamento de Metalurgia e Química (DMQTIM).

Os equipamentos e programas computacionais usados na realização deste trabalho de pesquisa são:

- Computador Intel Core 2 Duo, 500GB de disco rígido e 4 GB de memória RAM;
- Câmera monocromática industrial modelo DMK 22BUC03 monocromática CMOS USB 2.0;
- Lente CCTV 1/3"5-50 mm Computar;
- Máquina de ensaio EMIC DL30000;
- Lâmpadas;
- Notebook com processador Intel Core i5-4570 de 3.20 GHz e 8 GB de memória RAM;
- Corpos de prova de 13 mm x 100 mm para ensaios de tração em aço ABNT 1020;
- *Software* Matlab 2012b e 2015a 64 bits;
- *Software* Microsoft Visual Studio 2017;
- *Software* Microsoft SDK 7.1;
- *Software* NCORR v1.2.1 e v1.2.2;
- *Software Eclipse IDE for Java Developers Oxygen.1a Release (4.7.1a)*;
- Bibliotecas BoofCV 3.0.0.

3.1 Fontes de dados

Os dados foram obtidos apenas por uma fonte de dados:

- Pela câmera monocromática que vai alimentando o banco de imagens através de um gatilho programado iniciado junto com a máquina de ensaio;

3.2 Procedimentos experimentais

Inicialmente, para realizar os ensaios mecânicos de tração é necessário preparar o ambiente e os materiais envolvidos.

A primeira etapa foi preparar os corpos de prova. Foram feitas aplicações de uma tinta branca em toda superfície dos materiais, deixando ela predominantemente de cor branca. Logo após, foram feitos pontos aleatórios de tinta preta nas mesmas superfícies, afim de simular uma textura na superfície do corpo de prova e fornecer um conjunto único de alvos para as imagens digitais como mostra na Figura 12.

Figura 12 – Pintura dos corpos de prova.



Fonte: Fotografia do autor.

Em seguida, para o obter imagens com uma qualidade maior foi confeccionado um suporte para posicionar a câmera monocromática na Máquina de ensaio EMIC DL30000, sendo possível capturar imagens antes e depois do início do ensaio. Também foi preparada a iluminação para que não houvesse sombras na região de interesse.

A Figura 13 mostra a montagem e a calibração do aparato experimental, onde foi confeccionado o suporte de fixação e posicionamento da câmera para capturar as imagens antes e após a aplicação dos carregamentos.

Figura 13 – Imagem do suporte acoplado na máquina de ensaio.



Fonte: Fotografia do autor.

3.3 Procedimentos para aplicação dos métodos DIC 2D e TM

3.3.1 Fluxo do método DIC no *software* NCORR

O método DIC 2D utilizando o *software* livre NCORR contém vários processos e muitos deles têm dependência com os resultados de processos predecessores. O fluxo das etapas de trabalho do NCORR é descrito a seguir:

1. Definir imagem de referência

- Deve-se buscar a primeira imagem realizada do ensaio mecânico de tração.

2. Definir o banco de imagens

- Deve-se buscar todas as imagens realizadas do ensaio mecânico de tração.

3. Definir Região de Interesse (ROI)

- Pode-se desenhar a área de interesse como também carregar uma imagem binária apontando a área de interesse em branco que deve conter a mesma especificação da imagem de referência.

Dependências: Requer a imagem de referência e o banco de imagens.

4. Definir parâmetros DIC

- Deve-se configurar o tamanho do raio de pixel da semente, e o tamanho da matriz de subconjuntos, *Subset*, que serão criados dentro da malha de pixels da semente.

Dependências: Requer a imagem de referência, banco de imagens e ROI configurados.

5. Análise DIC

- Deve-se selecionar a região de interesse onde será configurada a semente.

- Deve-se marcar a localização da semente na região de interesse configurada.

Dependências: Requer os parâmetros DIC 2D a serem configurados.

6. Formatar deslocamento

- Deve-se configurar a unidade a ser utilizada, convertida pela tamanho do pixel na imagem.

Dependências: Exige que o estado análise DIC tenha sido executado.

7. Calcular deformação

- Deve-se configurar o raio de deformação. Raio de deformação de um círculo que seleciona um grupo de pontos para se ajustar ao plano.

Dependências: Exige que o estado Formatar deslocamento tenha sido executado.

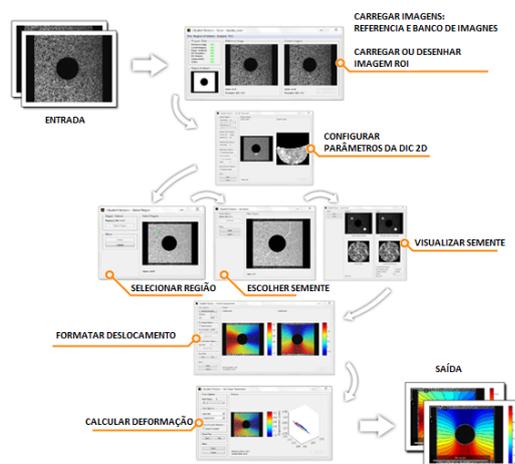
8. Saída

- Apresenta em gráficos os campos de deslocamentos e deformação média na região de interesse obtidos pela função de correlação.
- É possível configurar a unidade a ser utilizada, convertida pela tamanho do pixel na imagem.

Dependências: Exige que os estados análise DIC, Formatar deslocamento e Calcular deformação tenham sido executados.

A Figura 14 descreve o fluxo descrito anteriormente onde mostra-se cada estado do processamento do método DIC 2D pelo *software* NCORR. Deve-se atender cada requisito e dependência para alcançar o retorno do programa que são os gráficos dos cálculos dos deslocamentos dos pixels dentro da região de interesse.

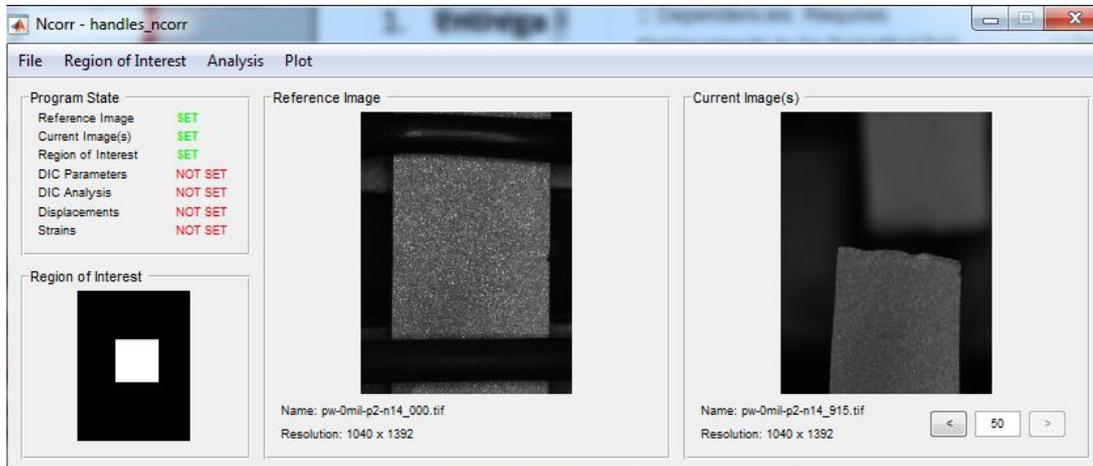
Figura 14 – Fluxograma do método DIC 2D utilizando *software* NCORR



Fonte: Adaptado de ANTONIU (2015).

Qualquer uma dessas etapas podem ser alteradas a qualquer momento, desde que as dependências tenham sido atendidas. O estado do programa está visível no canto superior esquerdo da GUI principal do NCORR, conforme mostrado pela Figura 15:

Figura 15 – Estados do *software* NCORR.



Fonte: Fotografia do autor.

3.3.2 Fluxo do método *Template Matching* na ferramenta criada para análise das imagens do ensaio de tração.

Utilizou-se o método *Template Matching* para encontrar as correspondências, o método Pearson para calcular o coeficiente de correlação e com base no procedimento do método de DIC 2D, calcular os deslocamentos e a deformação dos pontos correlacionados. As etapas do procedimento desse método são:

1. Definir imagem de referência
 - Deve-se buscar a primeira imagem realizada no ensaio.
2. Definir Banco de Imagens
 - Deve-se buscar as imagens realizadas no ensaio.
3. Definir imagem(s) alvo(s)
 - Define tamanho da imagem(s) alvo(s) e a localização do(s) alvo(s) na imagem de referência.
4. Análise *Template Matching*
 - Dependências: Requer os parâmetros das imagem alvo e banco de imagens configurados;
Dependências: Requer a imagem alvo com tamanho menor a imagem de entrada;

5. Executar o método *Template Matching*

- Executa o método *Template Matching* na imagem utilizando o(s) alvo(s) configurados. O retorno da função denomina-se *Match*, que é a localização ponto superior esquerdo da imagem alvo na imagem de busca. Essa correspondência servirá como parâmetro para criação do novo alvo que será correlacionado com a próxima imagem do banco de imagens. Logo, esse procedimento será recorrente para todas as imagens do banco de imagens.

Dependências: Exige que o(s) alvos(s) e as imagem do banco de imagens tenham sido configurados;

6. Calcular os deslocamentos

- Calcula os deslocamentos de pixel entre a imagem *Match* encontrada na imagem de busca e o *Match* da primeira imagem de referência.
- Dependências: Requer que o método *Template Matching* tenha sido executado pelo menos uma vez.

7. Calcular coeficiente de correlação

- Calcula o coeficiente de correlação entre as imagem alvo e a imagem de busca do banco de imagens.
- Dependências: Requer que o método *Template Matching* tenha sido executado em alguma imagem.

8. Calcular Deformação

- Mede-se a deformação média do alvo.
- Dependências: Requer que o método *Template Matching* tenha sido executado na imagem de referência e em outra imagem do banco de imagens.

Deve-se atender a cada requisito e dependência dos estados da ferramenta para alcançar os resultados. São eles: os cálculos dos deslocamentos de pixels, coeficiente de correlação e a deformação média nas imagens resultantes. Durante o processamento de imagem para encontrar as correspondências, cria-se uma nova imagem com os mesmos parâmetros da imagem de busca onde desenha-se um retângulo na posição dos alvos encontrados na imagem de busca.

4 Resultados

4.1 Instalação e configuração do software NCORR

Na instalação da versão 1.2.1 do *software* NCORR para a plataforma Matlab 2012b, ocorreram erros na aplicação, sendo necessária a instalação manual do *software* NCORR. Utilizou-se do compilador C++ 11 compatível aos pré-requisitos da aplicação. Porém em algumas situações o *software* não se mostrou tão estável, necessitando então realizar testes também durante o processo de execução. Foram necessárias as compilações manuais de todas as funções antes de iniciar a GUI principal do NCORR. Antes de comparar o método e realizar qualquer experimento foi necessário o estudo da aplicação NCORR. Foram encontrados erros quanto a utilização do compilador escolhido, onde algumas variáveis não compilavam interrompendo o progresso na utilização do *software* NCORR. Houveram contatos com a equipe de desenvolvimento do *software* NCORR por *e-mail* enviando os erros encontrados e, um tempo depois, lançaram uma nova versão 1.2.2 que corrigiu tais problemas.

4.2 Montagem do sistema experimental de aquisição de imagem

Inicialmente foi criada uma base de imagens contendo as fotografias do corpo de prova durante todo ensaio mecânico de tração realizado no laboratório de ensaios mecânicos do Departamento de Metalurgia e Química do CEFET-MG no campus de Timóteo. Em seguida realizou-se alguns experimentos com a base de imagens digitais geradas pelo aparato experimental aplicada ao processamento de imagem utilizando o método DIC 2D pelo *software* NCORR. Observou-se um alto valor do coeficiente de correlação na imagem 16 do banco de imagens caracterizando-se uma possível perda de referencia. Logo, confirmou-se visualmente que a localização da SEED fugiu do comportamento esperado como mostra a Figura 16.

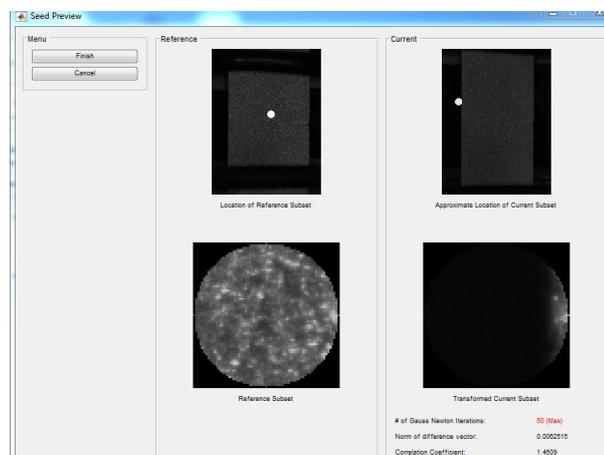


Figura 16 – Erro com alto valor do coeficiente de correlação.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

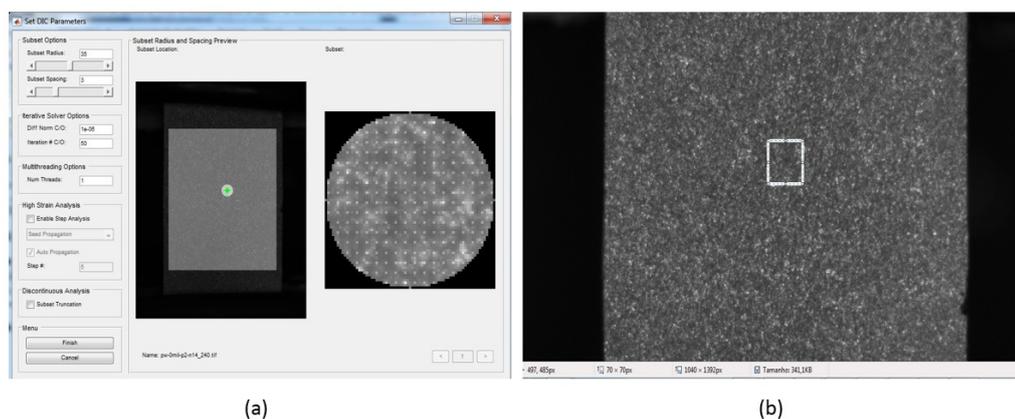
Esse resultado pode ser devido a baixa resolução da câmera utilizada, conjunto de lentes, iluminação e padrões de pintura comparada às utilizadas em aparatos comerciais. Alguns aspectos sobre a configuração do aparato experimental ainda precisam ser melhorados para se obter um valor de correlação de imagem aceitável. Procurar obter uma aquisição de imagens digitais com uma resolução mais alta, afim de melhorar a precisão do *software* NCORR aplicado nas imagens digitais.

Afim de prosseguir com a aplicação dos métodos e comparação dos resultados utilizou-se de outra base de imagens digitais de ensaio de tração. Foram obtidas pelo site do *software* NCORR, que contém imagens com uma resolução de 1040 x 1392 pixels, resolução maior comparada às imagens adquiridas no aparato experimental de 744 x 480 pixels.

Definiu-se também um padrão para o entrada de dados configurando o mesmo ponto central das malhas SEED e alvo em (484,468) na imagem de referência, partindo-se da mesma localização afim de comparar os resultados obtidos pelos dois métodos DIC 2D e *Template Matching*.

Por padrão o método DIC 2D pelo *software* NCORR gera a malha da SEED num formato de uma circunferência. Então configurou-se o raio de 35 pixels com ponto central da circunferência definido anteriormente, extraída da imagem de referência. E para o método *Template Matching* definiu-se o tamanho da malha do alvo num formato de um quadrado de 70 x 70 pixels a partir do ponto superior esquerdo (449, 433), onde se localiza o ponto de referência da imagem alvo, respeitando a posição do mesmo ponto central configurado pelo método DIC 2D. O dois parâmetros são mostrados pela Figura 17.

Figura 17 – Parâmetros setados para os métodos (a) DIC 2D (b) *Template Matching*.



Fonte: Fotografia do autor.

4.3 Resultados obtidos via *software* NCORR

Realizando o processamento de imagem aplicando o método DIC 2D com o novo banco de imagens pelo *software* NCORR, obteve-se o resultado dos pontos das sub-regiões encontradas representados pelos vetores u na região do eixo x e v na região do eixo y e os vetores de deslocamentos du e dv mostrados pela Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela com os pontos das sub regiões correlacionadas pelos u e v e os vetores de deslocamentos du e dv pelo método DIC 2D.

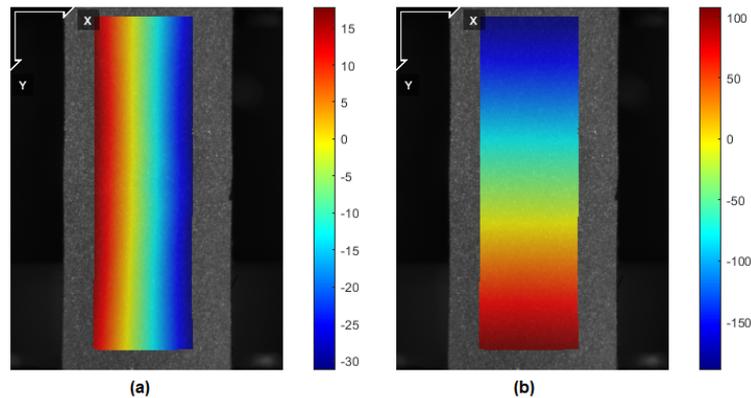
DIC 2D					
IMAGEM	SUB-REGIÃO	u	v	du	dv
imagem1	SUBREG1	484,0000	468,0000	0	0
imagem2	SUBREG2	482,3871	453,6564	-1,6129	-14,3436
imagem3	SUBREG3	485,3802	437,6600	1,3802	-30,3400
imagem4	SUBREG4	482,9948	429,4805	-1,0052	-38,5195
imagem5	SUBREG5	483,7040	426,4853	-0,2960	-41,5147
imagem6	SUBREG6	485,4038	415,8056	1,4038	-52,1944
imagem7	SUBREG7	484,6184	413,4373	0,6184	-54,5627
imagem8	SUBREG8	484,6876	410,7111	0,6876	-57,2889
imagem9	SUBREG9	484,7089	404,5219	0,7089	-63,4781
imagem10	SUBREG10	485,1076	400,4216	1,1076	-67,5784
imagem11	SUBREG11	482,2280	399,6944	-1,7720	-68,3056
imagem12	SUBREG12	482,7726	394,6352	-1,2274	-73,3648
imagem13	SUBREG13	480,2910	391,1519	-3,7090	-76,8481
imagem14	SUBREG14	481,4812	385,9814	-2,5188	-82,0186
imagem15	SUBREG15	480,3865	383,2545	-3,6135	-84,7455
imagem16	SUBREG16	480,6184	376,5867	-3,3816	-91,4133
imagem17	SUBREG17	481,1537	355,9186	-2,8463	-112,0814
imagem18	SUBREG18	479,9459	348,7520	-4,0541	-119,2480
imagem19	SUBREG19	480,8932	346,6835	-3,1068	-121,3165
imagem20	SUBREG20	480,8655	346,5473	-3,1345	-121,4527

Fonte: Elaborada pelo autor.

A figura 18 representa os resultados do processamento das imagens nos eixos x e y em toda área de interesse, obtendo um bom resultado identificando em vermelho o deslocamento máximo em azul o deslocamento mínimo em pixels. A Figura 18(a) representa o resultado dos cálculos dos deslocamentos no eixo horizontal na área de interesse no corpo de prova. Esse resultado era esperado visto que o ensaio é de alongamento na região vertical, sofrendo um encolhimento no eixo horizontal devido a deformação. A Figura 18(b) representa o resultado dos cálculos dos deslocamentos na região de interesse no eixo vertical. Em ver-

melho o deslocamento máximo vertical e em azul o deslocamento mínimo vertical em pixels, também um resultado esperado pelo ensaio de tração onde o material sofre um alongamento no eixo Y.

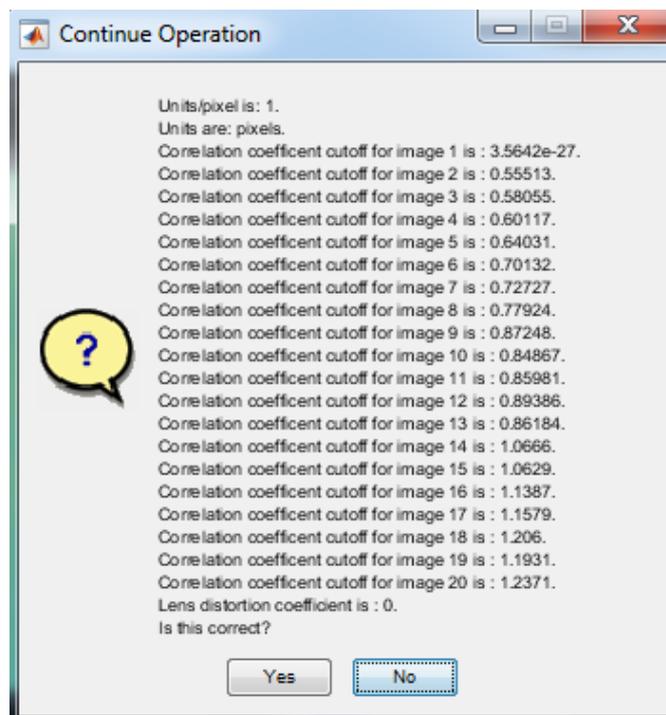
Figura 18 – (a) Resultados dos deslocamentos no eixo horizontal. (b) Resultados dos deslocamentos no eixo vertical.



Fonte: Fotografia do autor.

A partir dos campos de deslocamentos calculou-se o coeficiente de correlação pelo Método de Mínimos Quadrados para cada imagem. Os valores são apresentados na Figura 19, afim de investigar e analisar a dispersão e propagação dos pontos das sub-regiões correlacionadas.

Figura 19 – NCORR - Coeficiente de correlação de imagens.



Fonte: Fotografia do autor.

Os resultados dos coeficientes de correlação mostram o quão bom ou ruim é a correlação entre as sub-regiões e a imagem atual do banco de imagens. Logo, pelos resultados vê que o valor do coeficiente está próximo de 0 pela direita nas primeiras imagens então pode-se dizer que a correlação é boa nessas imagens. Porém, a medida que se aumenta o número de imagens o coeficiente de correlação aumenta passando até de 1. Logo podemos dizer que com o aumento das imagens a correlação tende a ser ruim, correndo o risco de perder a referência.

Em seguida são apresentadas pela Tabela 4 os valores das deformações médias dos pontos correlacionados das sub-regiões. Vê que o valor aumento no decorrer das imagens, um resultado esperado para o ensaio mecânico de tração visto que o material tende a alongar.

Tabela 4 – Tabelas com os valores das deformações médias das sub-regiões por imagem.

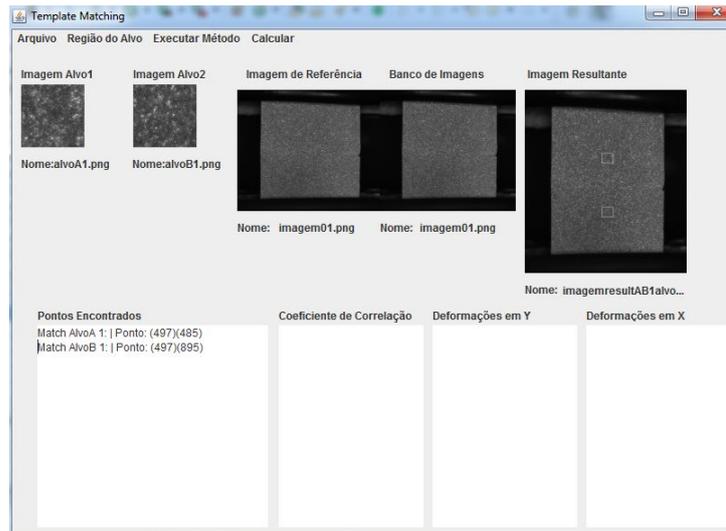
DEFORMAÇÃO MÉDIA		
IMAGEM	SUB-REGIÃO	$\bar{\epsilon}$
imagem1	SUBREG1	0,0000000
imagem2	SUBREG2	0,0286872
imagem3	SUBREG3	0,0606800
imagem4	SUBREG4	0,0770390
imagem5	SUBREG5	0,0830294
imagem6	SUBREG6	0,1043888
imagem7	SUBREG7	0,1091254
imagem8	SUBREG8	0,1145778
imagem9	SUBREG9	0,1269562
imagem10	SUBREG10	0,1351568
imagem11	SUBREG11	0,1366112
imagem12	SUBREG12	0,1467296
imagem13	SUBREG13	0,1536962
imagem14	SUBREG14	0,1640372
imagem15	SUBREG15	0,1694910
imagem16	SUBREG16	0,1828266
imagem17	SUBREG17	0,2241628
imagem18	SUBREG18	0,2384960
imagem19	SUBREG19	0,2426330
imagem20	SUBREG20	0,2429054

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 Resultados obtidos via *Template Matching*

Inicialmente obteve-se a imagem de referência na qual os primeiros alvos devem ser obtidos, e em seguida configurou-se o banco de imagens. Após esses parâmetros de entrada terem sido configurados aplicou-se o método *Template Matching* na primeira imagem do banco de imagens com as imagens dos alvos A e B encontrando-se os pontos de referência dos *Match's* na imagem de busca como mostrado na Figura 20.

Figura 20 – *Match's* encontrados pelo método *Template Matching*

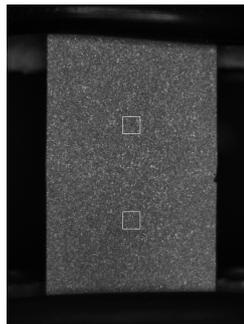


Fonte: Fotografia do autor.

Os primeiros pontos encontrados contêm parâmetros para os cálculos dos deslocamentos, coeficiente de correlação e deformação. Cada ponto encontrado torna-se parâmetro para criar uma nova imagem alvo, onde posteriormente utiliza-se para correlacionar com a próxima imagem do banco de imagens na próxima execução do método *Template Matching*.

A imagem resultante é gerada após a execução do método *Template Matching*. Essa imagem resultante é uma cópia da imagem de busca, porém, com a marcação da localização dos *Match's* encontrados. Essa marcação é feita por um retângulo com bordas de cor branca como mostrado na Figura 21.

Figura 21 – *Match's* demarcados na imagem resultante



Fonte: Fotografia do autor.

A seguir são apresentados todos os pontos de referência, esquerdo superior, de cada alvo encontrado nas imagens de busca do banco de imagens e os deslocamentos de cada imagem alvo nos eixos X e Y em relação a imagem de referência mostrada pela Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela com os pontos encontrados (alvos) e os deslocamentos no eixo horizontal e vertical utilizando *Template Matching*

TEMPLATE MATCHING										
Imagem	Alvo A	[x][y]		DES[x][y]		Alvo B	[x][y]		DES[x][y]	
imagem1	alvoA1	449	433	0	0	alvoB1	449	933	0	0
imagem2	alvoA1	447	419	-2	-14	alvoB1	447	926	-2	-7
imagem3	alvoA2	450	403	1	-30	alvoB2	450	918	3	-8
imagem4	alvoA3	448	395	-1	-38	alvoB3	448	918	-2	0
imagem5	alvoA4	449	392	0	-41	alvoB4	449	923	1	5
imagem6	alvoA5	451	381	2	-52	alvoB5	451	921	2	-2
imagem7	alvoA6	450	379	1	-54	alvoB6	450	927	-1	6
imagem8	alvoA7	450	376	1	-57	alvoB7	450	933	0	6
imagem9	alvoA8	450	370	1	-63	alvoB8	450	936	0	3
imagem10	alvoA9	450	366	1	-67	alvoB9	450	941	0	5
imagem11	alvoA10	447	365	-2	-68	alvoB10	447	949	-3	8
imagem12	alvoA11	448	360	-1	-73	alvoB11	448	953	1	4
imagem13	alvoA12	445	357	-4	-76	alvoB12	445	960	-3	7
imagem14	alvoA13	446	353	-3	-80	alvoB13	446	967	1	7
imagem15	alvoA14	445	350	-4	-83	alvoB14	445	975	-1	8
imagem16	alvoA15	445	344	-4	-89	alvoB15	445	980	0	5
imagem17	alvoA16	446	324	-3	-109	alvoB16	445	971	0	-9
imagem18	alvoA17	445	317	-4	-116	alvoB17	444	970	-1	-1
imagem19	alvoA18	446	315	-3	-118	alvoB18	445	970	1	0
imagem20	alvoA19	446	315	-3	-118	alvoB19	445	972	0	2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Logo, com o resultado das posições e deslocamentos de cada imagem alvo na imagem de busca, calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson afim de investigar e analisar a dispersão e propagação dos pontos correlacionados nas imagens de busca. Assim, iterativamente esse processamento é feito para cada imagem do banco obtendo-se o coeficiente de correlação como mostrado pela Tabela 6.

Tabela 6 – Tabela com os coeficientes de correlação por imagem utilizando *Template Matching*.

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO		
IMAGEM	ALVO A	CC
imagem 1	alvoA1	1,0000000
imagem 2	alvoA1	0,6704850
imagem 3	alvoA2	0,678371
imagem 4	alvoA3	0,6967187
imagem 5	alvoA4	0,6828911
imagem 6	alvoA5	0,6963489
imagem 7	alvoA6	0,6887768
imagem 8	alvoA7	0,6697493
imagem 9	alvoA8	0,6752572
imagem 10	alvoA9	0,6730266
imagem 11	alvoA10	0,6870151
imagem 12	alvoA11	0,6694932
imagem 13	alvoA12	0,6923868
imagem 14	alvoA13	0,6759263
imagem 15	alvoA14	0,6858257
imagem 16	alvoA15	0,7035584
imagem 17	alvoA16	0,6847559
imagem 18	alvoA17	0,6981359
imagem 19	alvoA18	0,6939840
imagem 20	alvoA19	0,6838169

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os resultados dos coeficientes de correlação de Pearson observa-se que os pontos estão mais próximos e não variam muito a cada imagem. Pode-se dizer que houve uma boa correlação pois os valores estão próximos de 1.

Por fim, as deformações médias do alvo A foram calculadas a partir dos parâmetros dos primeiros alvos encontrados na primeira imagem de referência como mostra a Tabela 7.

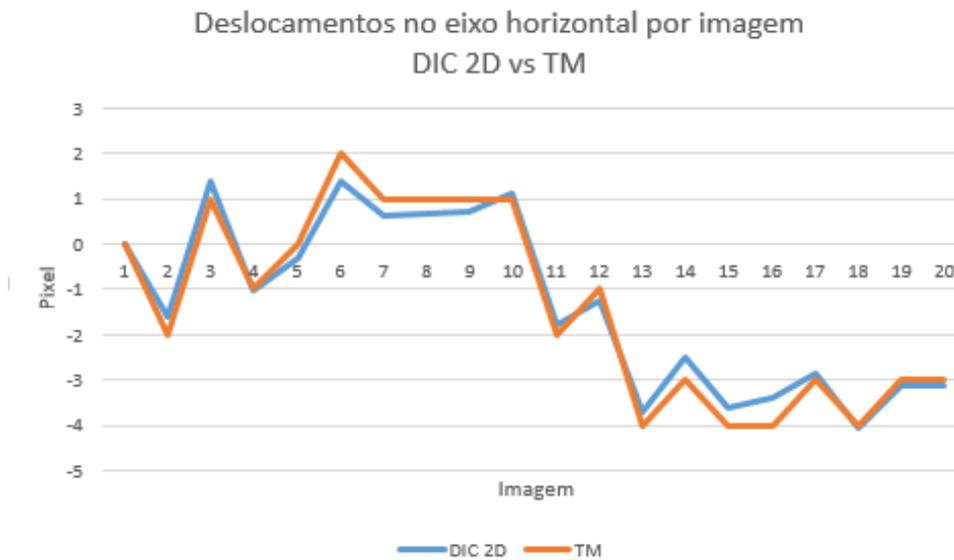
Tabela 7 – Tabela com os valores das deformações médias do alvo A.

DEFORMAÇÃO MÉDIA		
IMAGEM	ALVO A	$\bar{\epsilon}$
imagem1	alvoA1	0,000
imagem2	alvoA1	0,028
imagem3	alvoA2	0,060
imagem4	alvoA3	0,076
imagem5	alvoA4	0,082
imagem6	alvoA5	0,104
imagem7	alvoA6	0,108
imagem8	alvoA7	0,144
imagem9	alvoA8	0,126
imagem10	alvoA9	0,134
imagem11	alvoA10	0,136
imagem12	alvoA11	0,146
imagem13	alvoA12	0,152
imagem14	alvoA13	0,160
imagem15	alvoA14	0,166
imagem16	alvoA15	0,178
imagem17	alvoA16	0,218
imagem18	alvoA17	0,232
imagem19	alvoA18	0,236
imagem20	alvoA19	0,236

Fonte: Elaborada pelo autor.

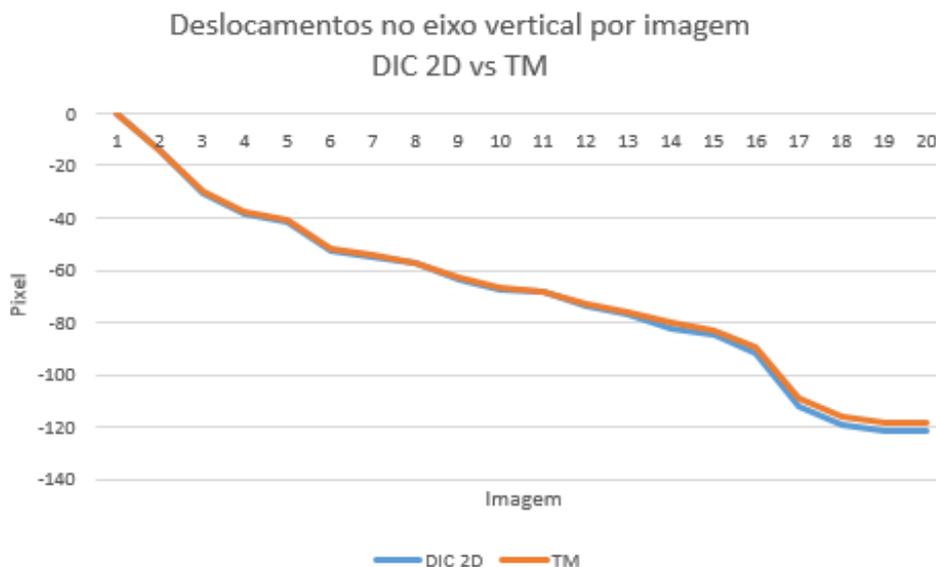
4.5 Comparação dos resultados

Afim de comparar os resultados encontrados pelos métodos DIC 2D e *Template Matching*, converteu-se os pontos de referência das imagens alvo, superior esquerdo, para o centro da imagem adotando o mesmo padrão das sub-regiões do método DIC 2D. Assim todos os pontos são referentes ao centro das imagens correlacionadas. De acordo com resultados dos deslocamentos encontrados pelos métodos DIC 2D e *Template Match*, observa-se que os valores estão bem próximos, com uma diferença maior de menos que 1 pixel no eixo horizontal como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Gráfico dos deslocamentos horizontais pelo métodos DIC 2D e *Template Matching*.

Fonte: Fotografia do autor.

Pelo eixo vertical observa-se que os valores também estão próximos com uma diferença maior de menos que 3 pixels como mostra a pela Figura 23.

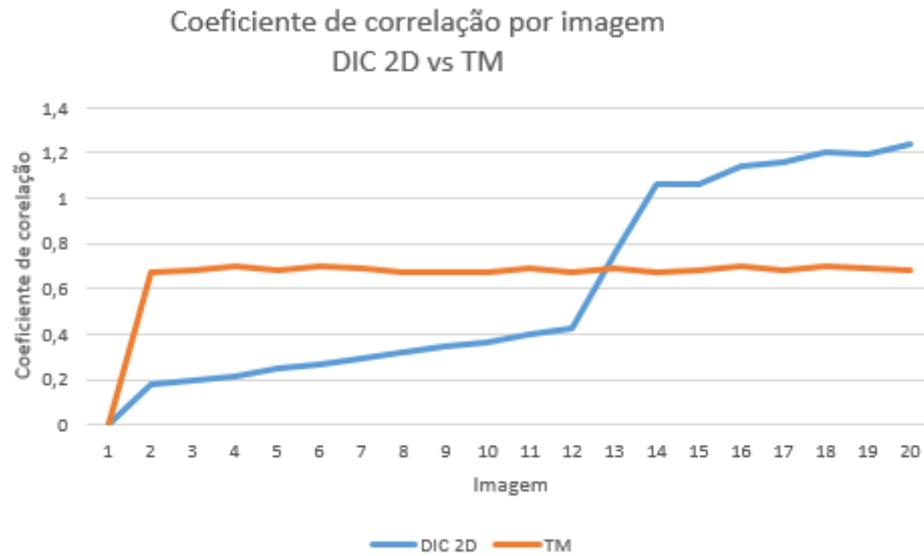
Figura 23 – Gráfico dos deslocamentos verticais pelo métodos DIC 2D e *Template Matching*.

Fonte: Fotografia do autor.

De acordo com os resultados dos coeficientes de correlação, MMQ e Pearson, existe uma boa correlação entre as correspondências como mostra a Figura 24. Pelo método DIC 2D podemos observar que o valor do coeficiente de correlação tende a aumentar muito a cada iteração do método com uma nova imagem, isso se dá pela comparação entre a sub imagem de referência com a imagem atual do banco. No método *Template Matching* pode-se observar que os valores do coeficiente de correlação utilizando a função de Pearson foi mais linear em

relação ao coeficiente MMQ pelo método *Template Matching*.

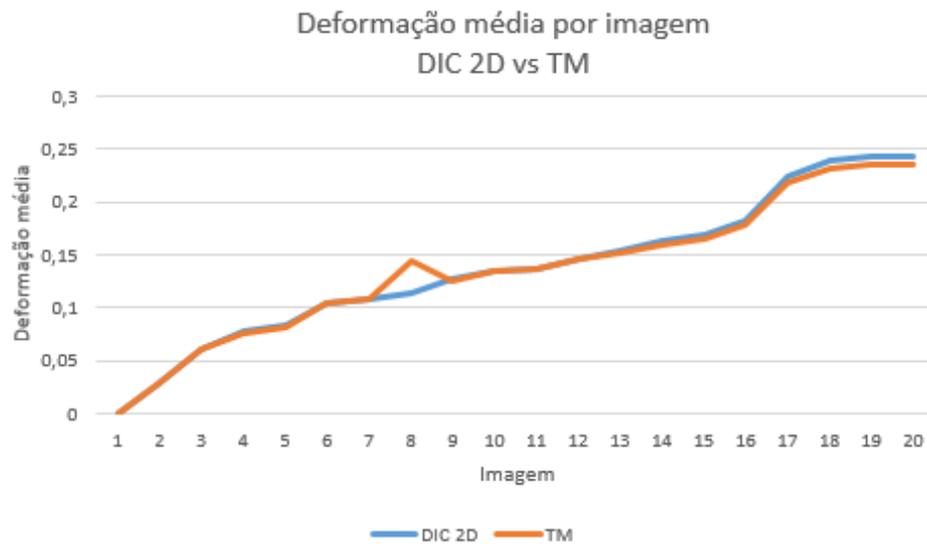
Figura 24 – Gráfico dos Coeficientes de correlação pelo métodos DIC 2D e *Template Matching*.



Fonte: Fotografia do autor.

Pelos resultados das deformações médias pode-se observar que os valores estão bem próximos, porem, existe uma precisão maior pelo método DIC 2D Figura 25.

Figura 25 –



Fonte: Fotografia do autor.

5 Conclusão

A configuração experimental para aquisição de imagem sugerida ainda não mostrou-se satisfatória devido aos recursos utilizados. Pelos experimentos feitos pode-se dizer que utilizando o banco de imagens de exemplo do NCORR, obteve-se melhores resultados. O aparato experimental para aquisição de imagens de ensaio mecânico ainda precisa ser mais estudado para obter imagens com resoluções que ajudem no processamento de imagens digitais.

A técnica de reconhecimento de padrão pelo método *Template Matching* foi eficaz na identificação das correspondências e medição dos deslocamentos, nas imagens do corpo de prova, sendo possível trabalhar com vários padrões, entre eles os pontos desenhados e a dispersão de pontos aleatórios de tinta preta na superfície branca do corpo de prova.

Obteve-se uma diferença nos deslocamento de pixels de aproximadamente 1 pixel no eixo horizontal e aproximadamente 3 pixels no eixo vertical, entre os métodos DIC 2D e o *Template Matching*. Os resultados permitem concluir que o método *Template Matching* foi eficaz na correlação de imagens e a ferramenta criada pode ser uma solução de baixo custo para a analisar as imagens do ensaio de tração.

As duas técnicas, correlação de imagem digital e reconhecimento de padrão, enquanto comparado com o extensômetro por contato, obtêm uma vantagem de não ser uma técnica invasiva. Conseguem medir os deslocamentos verticais e horizontais de pontos do material em estudo, utilizando um sistema ótico adequado com um custo benefício baixo. Sendo assim, são técnicas possíveis de serem aplicadas em diversas áreas da engenharia, permitindo o processamento de um número elevado de imagens com rapidez.

5.1 Trabalhos futuros

Otimizar o tempo de processamento de imagem utilizando as bibliotecas gráficas do BoofCV no *software* NCORR. Melhorar a interface da ferramenta criada deixando mais interativa. Criar mais funções visuais para plotagem dos resultados, gráficos e tabelas, e criar um recurso para o salvamento de cada estado como é feito no *software* NCORR.

6 Referências Bibliográficas

- ALBA, E. L. et al. Análisis de deformaciones en probetas planas mediante correlación digital de imágenes. In: CONGRESO NACIONAL INGENIERÍA MECÁNICA, 8., 2010, Lagunillas. Proceedings... Lagunillas: Asociación Española de Ingeniería Mecánica, 2010. p. 01-08.
- ANDRADE, J. B. Fotogrametria. Curitiba. SBEE, 1998.
- ANTONIOU, A. DIC algorithms. Ncor, Georgia, 2015. Disponível em: <http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms>. Acesso em: 15 mar. 2017.
- AREELIS. Vélocimétrie par Intercorrélation d'Images de Particules, Technopôle du Madrillet , 2003. Disponível em: <http://eric.rouland.free.fr/piv.pdf>.
- BRADSKI, G.; KAEHLER, A. Learning OpenCV: computer vision in c++ with the opencv library. Cambridge: O'Reilly Media, Inc., 2013.
- CALLISTER, W. D. "Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução". 5ed. LTC, São Paulo, 2002, p. 78-100
- CHEN, J. et al. Improved extended digital image correlation for crack tip deformation measurement. Optics and Lasers in Engineering, London, v. 65, p. 103-109, Feb. 2015.
- CONCI, A.; AZEVEDO, E.; LETA, F. R. Computação Gráfica. Rio de Janeiro, Editora Campus, 2008. v. 2. 432 p.
- CRAMMOND, G. S. W.; BOYD, J. M.; BARTON, D. Evaluating the localised through-thickness load transfer and damage initiation in a composite joint using digital image correlation. Composites. Part A. Applied Science and Manufacturing, Kidlington, v. 61, p. 224–234, June 2014.
- ENGEL, P. M; NUNES, R. V. IRENE: INtelligent Processing of Multispectral Images by Self-Organizing Maps. **International Symposium on Artificial Neural Networks**, Tainan, Taiwan, December 15-17,1994.
- FAGERHOLT, E.; BORVIK, T.; HOPPERSTAD, O. S. Measuring discontinuous displacement fields in cracked specimens using digital image correlation with mesh adaptation and crack-path optimization. Optics and Lasers in Engineering, London, v. 51, n. 3, p. 299-310, Mar. 2012.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Processamento digital de imagens. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 69 p.
- HEDAN, S. et al. One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, v. 68, p. 22–35, June 2014.

- HOBROUGH, A. G. L. Obituary. *Photogrammetric Record*, London, v. 18, n. 104, p. 337–340, Dec. 2003.
- HIBBELER, R.C. *Resistência dos Materiais*, 3.º Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, 2000.
- HILD, F. *Identification du comportement mécanique des matériaux et de la rupture des structures à l'aide de méthodes optiques*, 2003, Notas de Aulas IPSI – Laboratoire de Mécanique et Technologie de l'Université de Paris – France.
- ITSEEZ. OpenCV. 2014. Disponível em: <<http://itseez.com/OpenCV/>>. Acesso em: 16 out. 2017.
- JAIN, A. K.; DUIN, R.P.W.; MAO, J. Statistical Pattern Recognition: A Review. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol: 22, No. 1, 5-37:264-323, January 2000.
- KUSUMOTO, A. Y. *Identificação de alvos em ensaios de separação de carga utilizando visão computacional*. 2015. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- LONCARIC, S. A Survey of Shape Analysis Techniques. *Pattern Recognition*, v. 31, n. 8, p. 983-1001, 1998.
- LONG; ZHANG; FENG, D. Fundamentals of Content-based Image Retrieval. In: FENG, D.; SIU, W. C.; ZHANG, H. **Multimedia Information Retrieval and Management: Technological Fundamentals and Applications (Signals and Communication Technology)**, Berlin, 2005. p.1-26.
- MARENGONI, M.; STRINGHINI, S. Tutorial: introdução à visão computacional usando opencv. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, v. 16, n. 1, p. 125–160, 2009.
- MARQUES FILHO, Ogê; VIEIRA NETO, Hugo. *Processamento Digital de Imagens*, Brasport, 1999.
- MOLZ, R. F. *Uma Metodologia para o Desenvolvimento de Aplicações de Visão Computacional Utilizando um Projeto Conjunto de Hardware e Software*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática. Programa de Pós-Graduação em Computação., 2001.
- MORAIS, W.A. *Tensões e deformações*, Universidade Santa Cecília, 2012. Disponível em: <http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo8/Capitulo1-parte1.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017.
- OPENCV. *Installation on Windows*. 2014. Disponível em: <<http://docs.opencv.org/doc/tutorials/introduction/windowsinstall/windowsinstall.html>>. Acesso em: 21 out. 2017.
- OPENCV. *Meanshift and Camshift*. 2014. Disponível em: <<http://docs.opencv.org/trunk/doc/pytutorials/pyvideo/pymeanshift/pymeanshift.html>>. Acesso em: 16 out. 2017.

- PETERS, W. H.; RANSON, W. F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*, Redondo Beach, v. 21, n. 3, p. 427-431, June 1982.
- SESÉ, L. F. et al. Simultaneous in-and-out-of-plane displacement measurements using fringe projection and digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 52, p. 66–74, Jan. 2014.
- SHENK, T. “Digital Photogrammetry”. The Ohio State University, volume 1, 1999.
- SHIMAKURA, S. E. Interpretação do coeficiente de correlação. [s.l.]: UFPR, 2006. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/silvia/ce003/node74.html>>. Acesso em: 12 Maio 2017.
- SILVA, M. J. A.; ALVES, M. C. A.; COSTA, I. F. *Imagem: uma abordagem histórica*. Curitiba: Editora da UFPR, 2007. 10 p.
- SKARŻYŃSKI, Ł.; SYROKA, E.; TEJCHMAN, J. Measurements and Calculations of the Width of the Fracture Process Zones on the Surface of Notched Concrete Beams. *Strain*, v. 47, 2011, p. 319-332.
- SOUZA, Sérgio agosto de, *Ensaio Mecânicos em Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos*, São Paulo, Edgard Blücher, 1982.
- SUTTON, M. A.; ORTEU, J. J.; SCHREIER, H. W. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Columbia: Springer, 2009, p. 276.
- SCHULTZ, Duane P.; SCHULTZ, Sydney Ellen. *História da psicologia moderna*. 16. ed. São Paulo: Cultrix, p. 439, 1992.
- TANG, Z. et al. Photogrammetry-based two-dimensional digital image correlation with non-perpendicular camera alignment. *Optical Engineering*, Redondo Beach, v. 51, n. 2, p. 3602, Feb. 2012.
- TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K. Modernas Tecnologias de Aquisição de Imagens em Fotogrametria. *BOLETIM DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS*. Curitiba, v. 6, nº 1, p. 49-64, 2000.
- WU, R. et al. Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 65, p. 38-45, Feb. 2015.
- XIE, H.; KANG, Y. Digital image correlation technique. *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 65, p. 1-2, Feb. 2015.
- YUAN, Y. et al. A self-adaptive sampling digital image correlation algorithm for accurate displacement measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 65, p. 57-63, Feb. 2014.

- ZOLIN, I. Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análise de falhas. 3. ed. Santa Maria: UFSM, 2010. Disponível em: <<http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixoctrlprocindust/tecautomind/ensaiosmec/161012ensmecanfal.pdf>>, Acesso em: 20 dez. 2017.
- ZHOU, Y. et al. Image pre-filtering for measurement error reduction in digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 65, p. 46-56, Feb. 2014.

APÊNDICE A – Tutorial de instalação e utilização do *software* livre NCORR

A.1 Requisitos de instalação

A.1.1 Requisitos de versão:

- Requerido: MATLAB R2009a+.
- Recomendado: R2015a+.

NOTA: NCORR foi desenvolvido no MATLAB R2009a e não foi testado em versões anteriores.

A.1.2 Requisitos para o Matlab:

- Obrigatório: *Image Processing Toolbox do MATLAB* (Caixa de ferramentas de processamento de imagem).
- Obrigatório: *Statistics Toolbox* do MATLAB (Caixa de ferramentas de estatísticas).

A.1.3 Requisitos do sistema operacional:

- Recomendado: Windows ou Linux.

NOTA: O NCORR foi desenvolvido no Windows 7 e também testado no Ubuntu 14.04 LTS. NCORR não foi testado no Mac OS.

A.1.4 Requisitos do compilador MEX:

- Recomendado: Visual Studio 2008+ ou GCC 4.2+.

A.1.5 Configuração MEX

Primeiro, deve se certificar de que um compilador C++ suportado tenha sido instalado no seu computador. Encontre a versão do seu MATLAB e depois determine quais compiladores C++ são suportados. Por exemplo, R2015a tem os seguintes compiladores suportados como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Compiladores Suportados pelo NCORR.

MATLAB Product Family – Release 2015a									
Compiler	MATLAB	MATLAB Compiler	MATLAB Compiler SDK			MATLAB Coder	SimBiology	Fixed-Point Designer	
	For MEX-file compilation, load library, and external usage of MATLAB Engine and MAT-file APIs	Excel add-in for desktop	C/C++	.NET	Java	Excel add-in for MPS	For accelerated computation	For accelerated computation	
Microsoft Windows SDK 7.1 Available at no charge, requires .NET Framework 4.0	✓	✓	✓				✓	✓	✓
Microsoft Visual C++ 2013 Professional	✓	✓	✓	✓ ⁴		✓ ¹⁰	✓	✓	✓
Microsoft Visual C++ 2012 Professional	✓	✓	✓	✓ ⁴		✓ ¹⁰	✓	✓	✓
Microsoft Visual C++ 2010 Professional SP1	✓	✓	✓	✓ ⁴		✓ ¹⁰	✓	✓	✓
Microsoft Visual C++ 2008 Professional SP1 and Windows SDK 6.1 ^{1,2}	✓	✓	✓	✓ ⁴			✓	✓	✓

Fonte: Fotografia do autor.

A partir desta lista, o Microsoft Windows SDK 7.1 parece ser o único compilador gratuito de C++ disponível para o Versão R2015a. Se você tiver acesso a vários compiladores, use o compilador mais recente que tenha suporte a *OpenMP* (ou seja, se você tiver acesso ao Microsoft Visual C++ 2013 Professional, use-o). Nota que o Windows SDK 7.1 não suporta o *OpenMP*, então, se você estiver usando este pacote, então *multithreading* não pode ser usado, embora a versão *threaded* única do NCORR funcione.

Depois de baixar um compilador suportado, verifique se o MEX foi configurado corretamente no MATLAB através do comando "mex -setup C++" no terminal do MATLAB.

A.2 Instalação automática

A instalação automática só foi testada no Matlab R2009a e R2015a no Windows usando o *software* Microsoft Visual Studio e R2015a no Ubuntu 14.04 LTS usando g++. A instalação automática deve funcionar com diferentes versões do MATLAB no Windows, mas para o Linux, apenas o R2015a funcionará. Isso ocorre porque o *Mathworks* atualizou a interface MEX para o R2015a, que alterou a forma como as *flags* do compilador são definidas no Linux. Se estiver usando uma versão mais antiga do Matlab no Linux, execute a instalação manual (Seção A.3). Além disso, se estiver usando um compilador diferente no Windows (ou seja, g++ através do *gnumex*), então execute a instalação manual.

Depois que o MEX for configurado corretamente, obtenha a versão mais recente do NCORR a partir dos site www.ncorr.com na guia *downloads*. A versão mais recente é v1.2.2, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Página de download do *software* NCORR.

Program

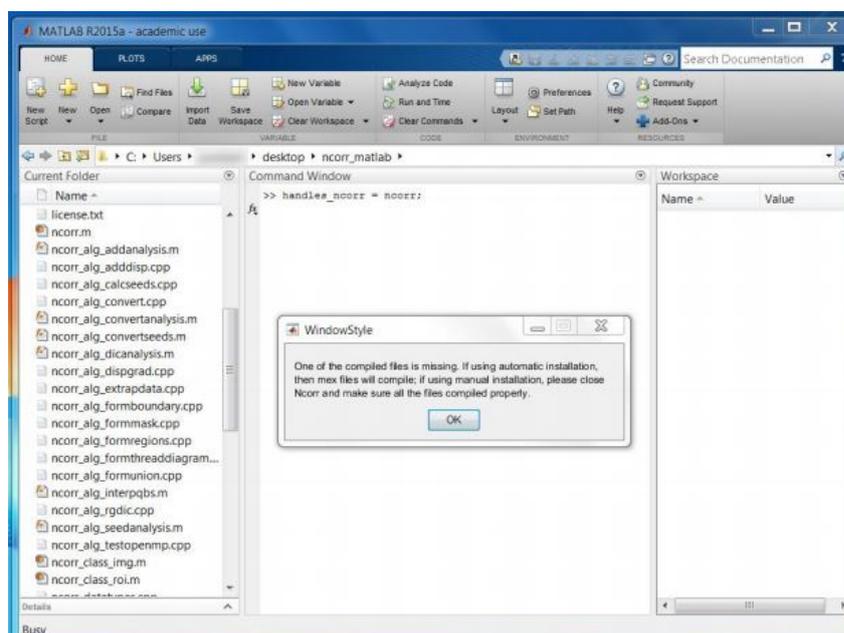
[] ncorr_v1.2.2 - Zip

Downloads

Click on the link under "Program" on the menu to the containing .m, .cpp, and .h source files as well as the automatically compiles the MEX files before running.

Fonte: Fotografia do autor.

Em seguida, navegue até o diretório onde você salvou o NCORR. Verifique se nenhum dos arquivos foi movido ou alterado. A partir daí, digite "handles_ncorr = ncorr" no terminal Matlab, conforme mostrado na Figura 31.

Figura 28 – GUI inicial do *software* NCORR

Fonte: Fotografia do autor.

Uma caixa de diálogo aparecerá sobre os arquivos compilados em falta. Uma vez que esta é uma nova instalação, os arquivos ainda não serão compilados, então clique em OK para continuar. Em seguida, uma caixa de diálogo aparecerá sobre o suporte a *OpenMP*. Clique na caixa de verificação para o *OpenMP* se você tiver um processador *multicore*, quiser suporte *multicore* e já instalou um compilador suportado com o suporte *OpenMP*.

NOTA: Se você usar todos os seus núcleos durante a computação, logo qualquer outro

aplicativo no computador irá diminuir drasticamente o desempenho, então, se você planeja usar seu computador durante a computação talvez seja melhor deixar de fora um núcleo ou dois. Se você optar por não usar *multithreading*, então deixe o suporte a *OpenMP* desmarcado e clique em Finalizar.

Se a compilação for concluída com êxito, mas é determinado que o compilador não suporta realmente *OpenMP*, a seguinte mensagem de erro aparecerá como mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Erro de inicialização do *software* NCORR.



Fonte: Fotografia do autor.

Deve-se conseguir que o NCORR funcione simplesmente desativando o suporte do *OpenMP*. Basta clicar "OK", reescreva "handles_ncorr = ncorr" no terminal do MATLAB e deixar a opção de suporte *OpenMP* desmarcada como mostrado na Figura 30. Se o suporte *OpenMP* for desejado, você precisa usar um compilador diferente que suporte o *OpenMP*.

Figura 30 – Resultado final da instalação do *software* NCORR

```
>> handles_ncorr = ncorr

handles_ncorr =

ncorr with properties:

    handles_gui: [1x1 struct]
    reference: [0x0 struct]
    current: [0x0 struct]
    data_dic: [1x1 struct]
support_openmp: 0
total_cores: 1
```

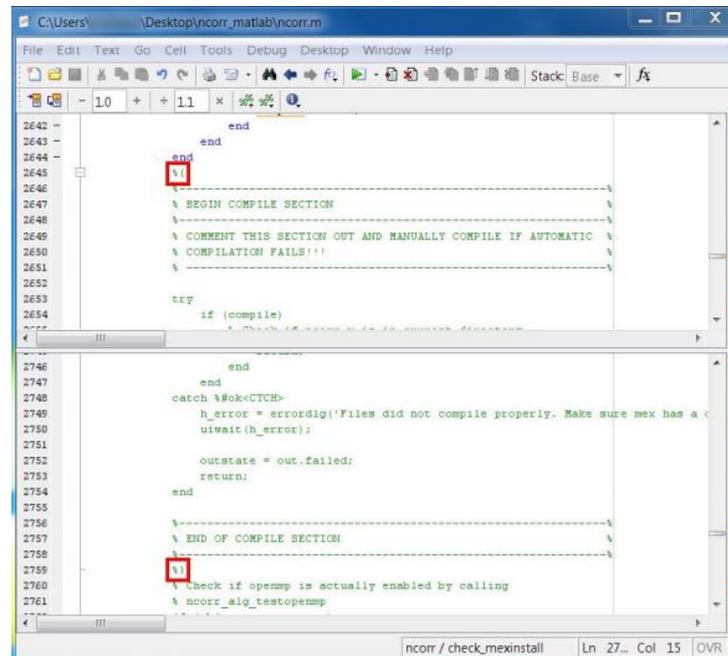
Fonte: Fotografia do autor.

A.3 Instalação manual

Essas etapas mostram como executar a instalação manual da NCORR, que envolve a compilação de MEX diretamente através do terminal, bem como a criação de um arquivo "ncorr_installinfo.txt" que contém informações sobre suporte *multithread*. O primeiro passo é

comentar a seção de compilação automática no arquivo `ncorr.m`. Adicione "%" antes da seção de compilação e "%" depois do fim da seção, conforme mostrado na Figura 31:

Figura 31 – Adaptação para instalação manual.



Fonte: Adaptado de ANTONIU (2015).

O próximo passo é compilar manualmente todas as bibliotecas necessárias e arquivos MEX. Existem três arquivos básicos da biblioteca .cpp e doze arquivos MEX. Inicie compilando as bibliotecas pelo terminal do MATLAB:

```
>> mex -c standard_datatypes.cpp
>> mex -c ncorr_datatypes.cpp
>> mex -c ncorr_lib.cpp
```

Em seguida, compile os seguintes arquivos MEX com:

```
>> mex ncorr_alg_formmask.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
>> mex ncorr_alg_formregions.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
>> mex ncorr_alg_formboundary.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
>> mex ncorr_alg_formthreaddiagram.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
>> mex ncorr_alg_formunion.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
>> mex ncorr_alg_extrapdata.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
>> mex ncorr_alg_adddisp.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
>> mex ncorr_alg_convert.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
>> mex ncorr_alg_dispgrad.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
```

NOTA: Ao compilar os arquivos MEX com o Linux, as bibliotecas `standard_datatypes` e `ncorr_datatypes` serão compiladas com um extensão ".o" em vez de uma extensão ".obj". Os últimos três arquivos que precisam ser compilados são:

- "`ncorr_alg_testopenmp.cpp`"
- "`ncorr_alg_calcseeds.cpp`"

- "ncorr_alg_rgdic.cpp".

Esses arquivos utilizam o *OpenMP* e, portanto, precisam ser compilado com certas *flags* do compilador. Se o suporte *multithread* não for desejado, os arquivos podem ser compilado como os outros arquivos MEX da seguinte maneira:

```
mex ncorr_alg_testopenmp.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
mex ncorr_alg_calcseeds.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
mex ncorr_alg_rgdic.cpp standard_datatypes.obj ncorr_datatypes.obj ncorr_lib.obj
```

Caso contrário, as *flags* precisam ser passadas para o compilador. Os sinalizadores necessários são mostrados pela Tabela 8.

Tabela 8 – Tabela OS/Compilador e *flags*

OS/Compilador	Flags
Windows / Visual C++	COMPFLAGS= "\$COMPFLAGS/openmp/DNCORR_OPENMP"+L34
Linux / G++	Antes do MATLAB R2015a: CXXFLAGS="\$CXXFLAGS -fopenmp -" - DNCORR_OPENMP"CVVLIBS="\$CXXLIBS -lgomp" R2015a+ (remover a barra invertida): CXXFLAGS="\$CXXFLAGS -fopenmp -" - DNCORR_OPENMP"CVVLIBS="\$CXXLIBS -lgomp"

Fonte: Adaptado de ANTONIU (2015).

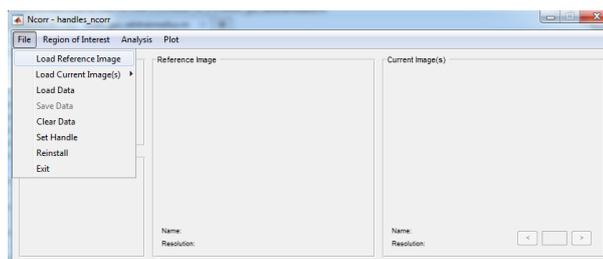
A.4 Utilização do *software* livre NCORR

O procedimento para utilização do software segue os mesmos passos descritos no fluxo do método DIC 2D.

1. Definir imagem de referência

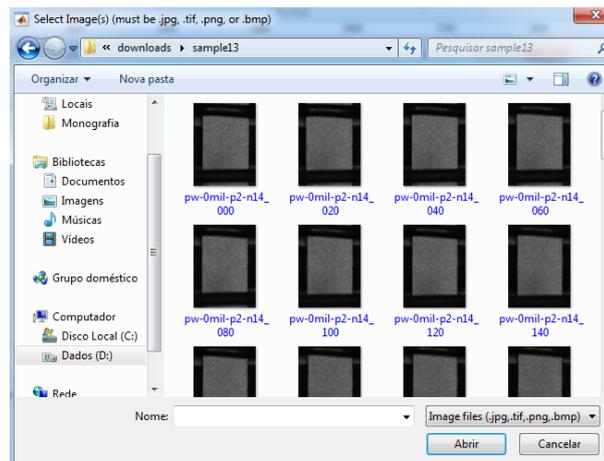
- Deve-se buscar a primeira imagem realizada do ensaio mecânico de tração.
Clique no menu *File* em seguida *Load Reference Image* mostrado pela Figura 32:

Figura 32 – NCORR - Abrir imagem de referência.



Fonte: Fotografia do autor.

Figura 33 – NCORR - Selecionar imagem de referência.

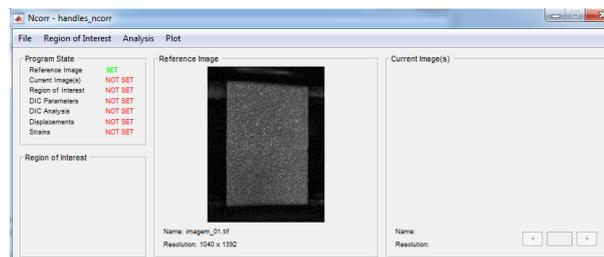


Fonte: Fotografia do autor.

Em seguida selecionar o arquivo da imagem, Figura 33.

A imagem de referência foi configurada, Figura 34:

Figura 34 – NCORR - Imagem de referência configurada.



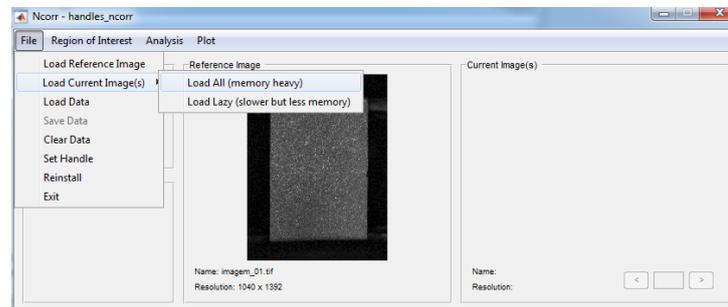
Fonte: Fotografia do autor.

2. Definir o banco de imagens

As imagens devem ter o nome com a estrutura: "*name_#.ext*". Onde "*name*" é o nome do conjunto de imagens, "*#*" é um número associado à imagem, e "*ext*" é a extensão da imagem, que deve ser .jpg, .tif, .png ou .bmp (um exemplo seria "imagem_15.png").

Clique no menu *File* em seguida *Load Current Image(s)* em seguida *Load All*:

Figura 35 – NCORR - Definir o banco de imagens.

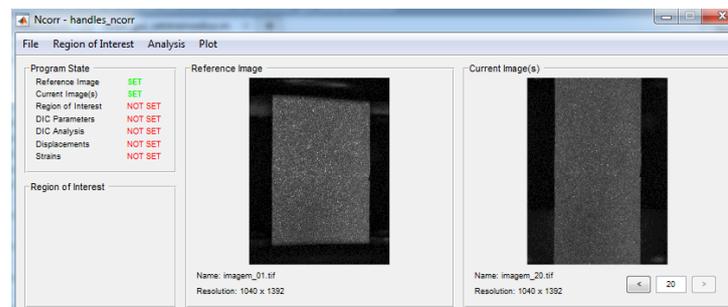


Fonte: Fotografia do autor.

Clicando em "*Load all*" (carregamento total), irá armazenar todas as imagens no espaço de trabalho. Se você estiver analisando um grande número de imagens, poderá ter um problema, pois pode resultar em falta de espaço de memória RAM. No entanto, ao usar o "*Load Lazy*" (carregamento preguiçoso), apenas o nome e o caminho das imagens são armazenados; As imagens são carregadas com base em sua localização armazenada "sob demanda". Isso significa que, ao fazer análises no NCORR usando o carregamento preguiçoso, o usuário deve certificar-se de não mover as imagens para um diretório diferente ou alterá-las.

Banco de imagens configurado, Figura 36:

Figura 36 – NCORR - Banco de imagens configurado.



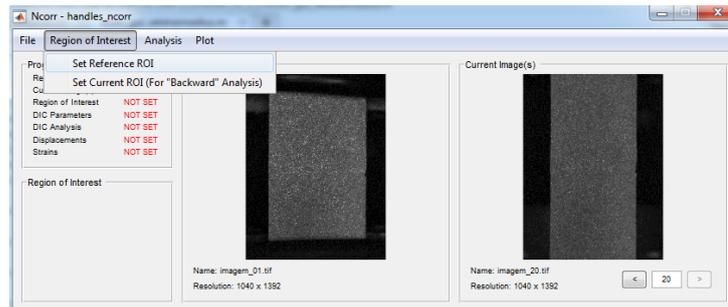
Fonte: Fotografia do autor.

3. Definir Região de Interesse (ROI)

- Pode-se desenhar a área de interesse como também carregar uma imagem binária apontando a área de interesse em branco que deve conter a mesma especificação da imagem de referência.

Clique no menu *Region of Interest* em seguida *Set Reference ROI*, Figura 37:

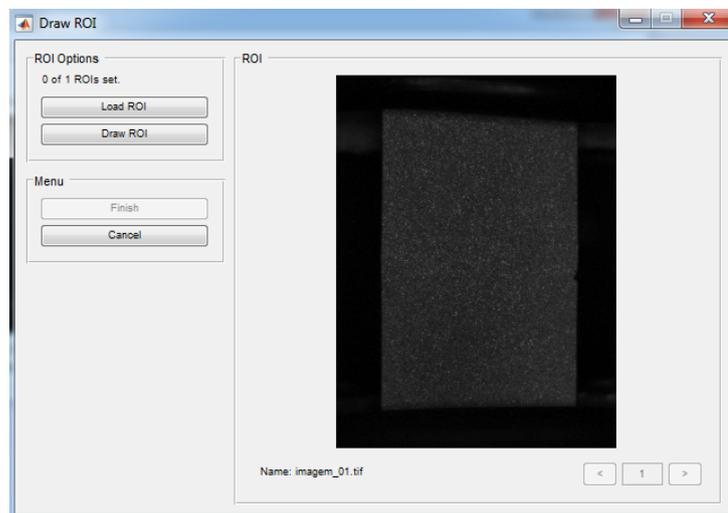
Figura 37 – NCORR - Definir Região de Interesse (ROI).



Fonte: Fotografia do autor.

Selecionar a opção de desenhar ou carregar imagem, Figura 38:

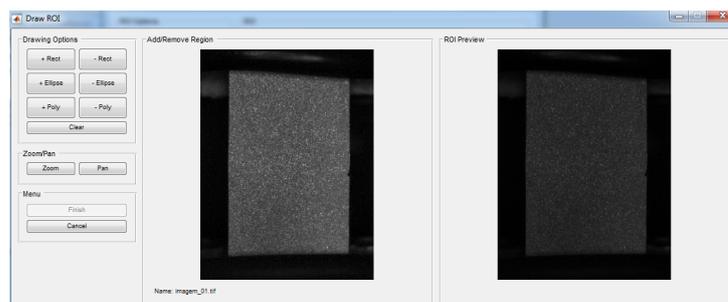
Figura 38 – NCORR - Definir formato da Região de Interesse (ROI).



Fonte: Fotografia do autor.

Caso selecione "*Load ROI*" deverá abrir a imagem. Caso selecione "*DRAW ROI*" um janela abrirá pedindo que desenhe a forma da região requerida: retângulo, elipse ou polígono; Figura 39:

Figura 39 – NCORR - Configuração Região de Interesse (ROI).



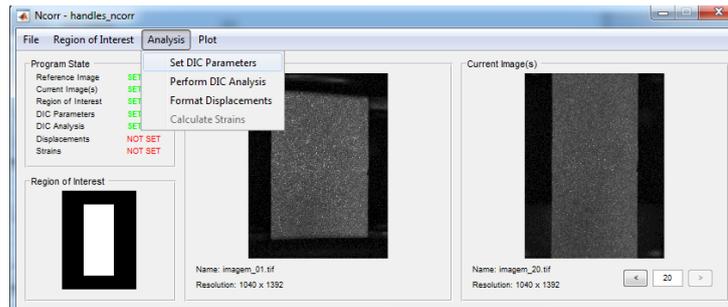
Fonte: Fotografia do autor.

Confirme a configuração desse estado clicando em *Finish*.

4. Definir parâmetros DIC

- Deve-se configurar o tamanho do raio de pixel da semente, e o tamanho da matriz de subconjuntos, *Subset*, que serão criados dentro da malha de pixels da semente. Clique no menu *Analysis* em seguida em *Set DIC Parameters*, Figura 40:

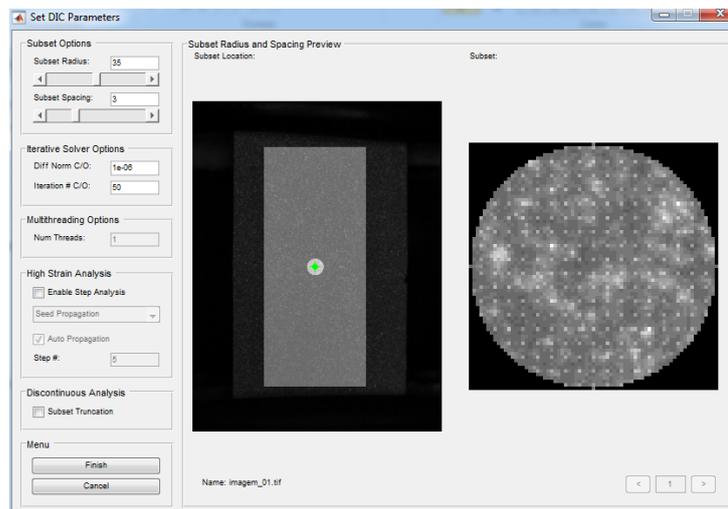
Figura 40 – NCORR - Definir Parâmetros DIC.



Fonte: Fotografia do autor.

Em *Subset Radius* configure o tamanho da malha de pixel da semente e em *Subset Spacing* defina o tamanho dos sub conjuntos em cada semente. Deve-se manter os parâmetros *Iterative Solver Options*, *Multithreading Options*, *High Strain Analysis* e *Discontinuous Analysis* como padrão, Figura 41:

Figura 41 – NCORR - Configuração dos Parâmetros DIC.

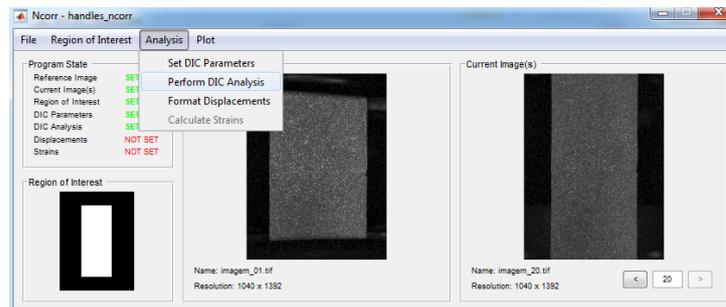


Fonte: Fotografia do autor.

5. Análise DIC

Clique no menu *Analysis* em seguida *Perfom DIC Analysis*, Figura 42:

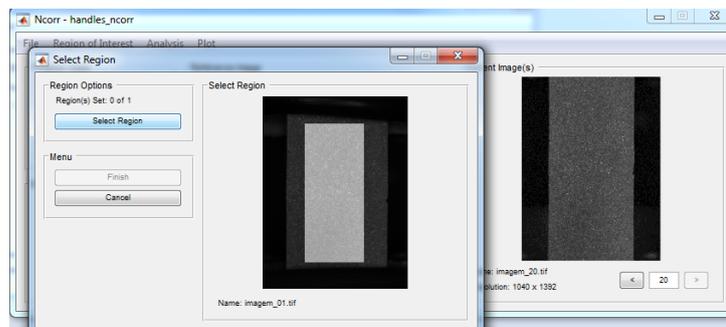
Figura 42 – NCORR - Análise DIC



Fonte: Fotografia do autor.

Selecione a região de interesse onde será configurada a semente clicando na imagem, Figura 43.

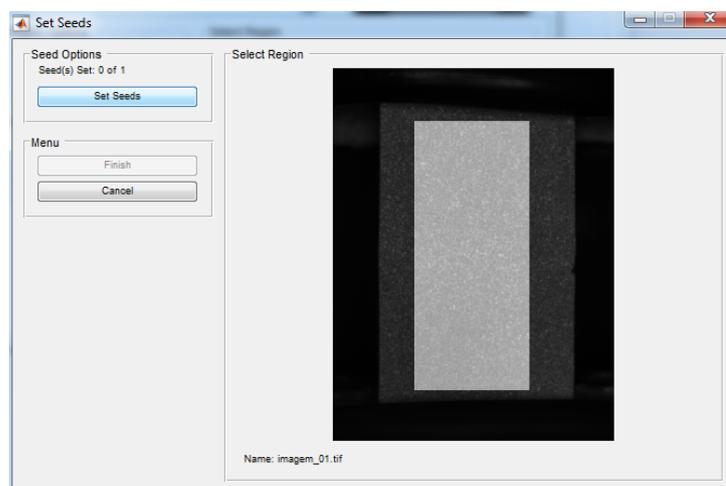
Figura 43 – NCORR - Seleção da região de interesse.



Fonte: Fotografia do autor.

Marque a localização da semente na região de interesse configurada, Figura 44:

Figura 44 – NCORR - Localização da semente



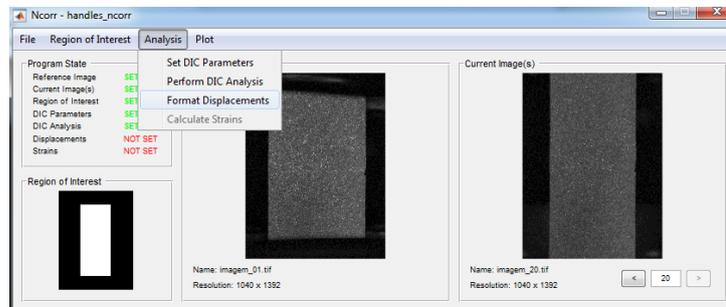
Fonte: Fotografia do autor.

Clique em *Finish* par salvar as configurações.

6. Formatar deslocamento

- Deve-se configurar a unidade a ser utilizada, convertida pela tamanho do pixel na imagem. Clique no menu *Analysis* em seguida *Format Displacements*, Figura 45:

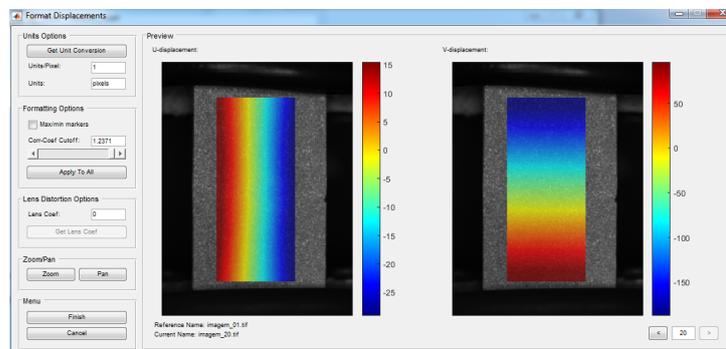
Figura 45 – NCORR - Formatar Deslocamentos.



Fonte: Fotografia do autor.

Apresenta os campos de deslocamentos horizontais e verticais nas imagens do banco correlacionadas. Configure em *Get Unit Conversion* a relação de unidade requerida com o pixel. Mantenha como padrão as configurações *Formatting Options* e *Lens Distortion Options*. Figura 46:

Figura 46 – NCORR - Parâmetros Deslocamentos.



Fonte: Fotografia do autor.

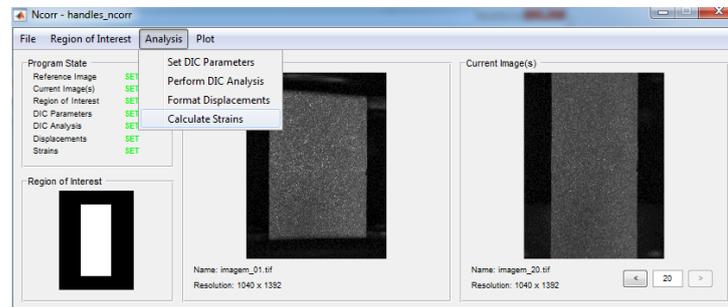
Clique em *Finish* para salvar as configurações deste estado.

7. Calcular deformação

- Deve-se configurar o raio de deformação. Raio de deformação de um círculo que seleciona um grupo de pontos para se ajustar ao plano.

Clique no menu *Analysis* em seguida *Calculate Strains*, Figura 47:

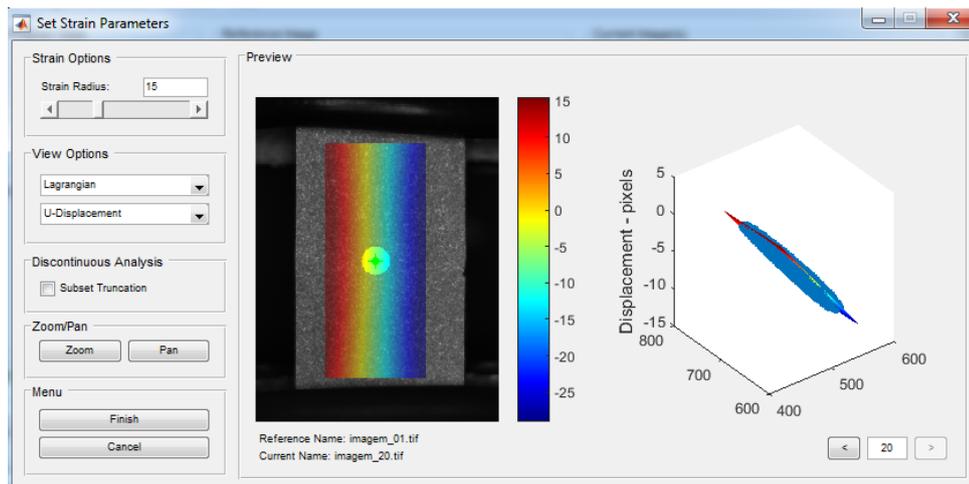
Figura 47 – NCORR - Calcular deformação.



Fonte: Fotografia do autor.

Configure no campo *Strain Radius* o tamanho do raio do sub conjunto que deverá ser utilizado no cálculo da deformação média. Mantenha os outros parâmetros como padrão, Figura 48:

Figura 48 – NCORR - Parâmetros para deformação.



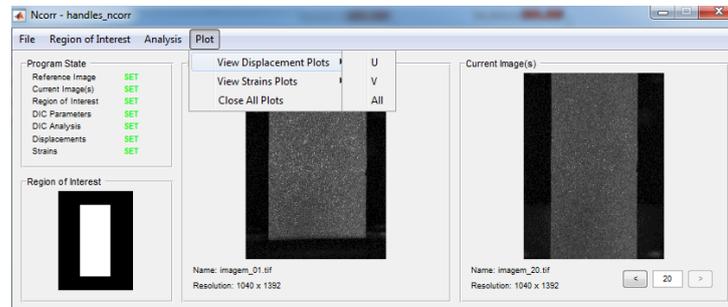
Fonte: Fotografia do autor.

Clique em *Finish* para salvar as configurações deste estado.

8. Saída

Clique no menu *Plot* em seguida em *View Displacement Plots* para visualizar em escala o campo de deslocamento, horizontal e vertical, em cada imagem do banco, Figura 49. No sub menu *View Strain Plots* visualiza-se o campo de deformações da

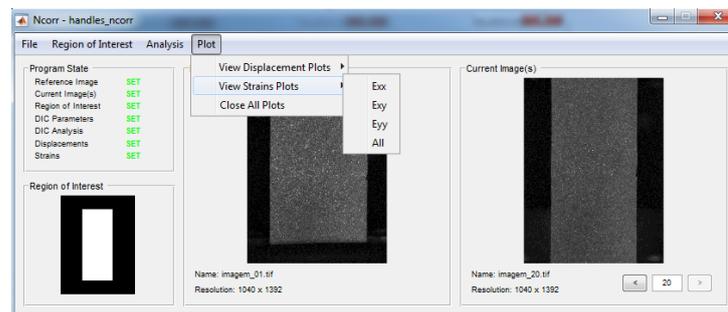
Figura 49 – NCORR - Saída.



Fonte: Fotografia do autor.

imagem de interesse, Figura 50

Figura 50 – NCORR - *Plot* - Visualização dos campos de deslocamentos.



Fonte: Fotografia do autor.

APÊNDICE B – Tutorial de instalação e utilização da ferramenta TM utilizando o método *Template Matching*

B.1 Requisitos de Instalação

B.1.1 Requisitos de versão:

- Requerido: Biblioteca BoofCV 3.0.0
- Requerido: IDE Eclipse Luna+
- Requerido: Java JDK 1.7+
- Recomendado: IDE Eclipse Oxygen 2.0

NOTA: O método *Template Matching* foi implementado no Eclipse Oxygen 2.0.

B.1.2 Requisitos para o Eclipse:

- Obrigatório: *Plugin Gradle IDE Pack*.

B.1.3 Requisitos do sistema operacional:

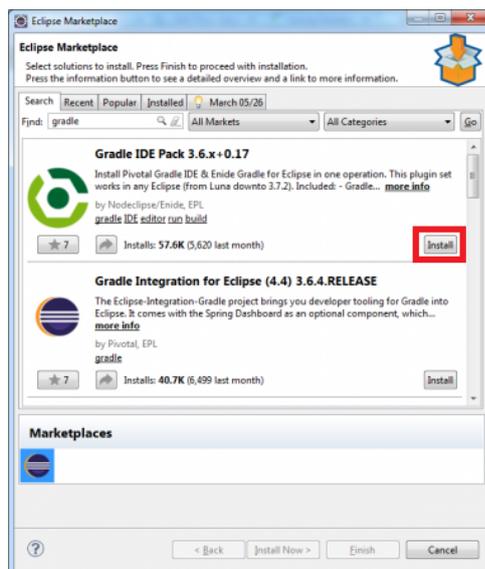
- Recomendado: Windows.

NOTA: A ferramenta *Template Matching* foi desenvolvida no Windows 7, e não foi testada no Mac OS ou Linux.

B.2 Instalação do *plugin Gradle IDE Pack* no Eclipse

Deve-se instalar o *plugin IDE Grandle Pack* pelo Eclipse *Marketplace* como mostrado na Figura 51. *Gradle Inc.*, a empresa por trás da estrutura de compilação da *Gradle* fornece ferramentas para o Eclipse IDE. Essas ferramentas permitem criar, importar e executar projetos habilitados para *Gradle* e monitorar a tarefa de execução. Ao importar o *plugin Grandle*, ele mesmo corrige as dependências de algumas referências de bibliotecas nos códigos fonte.

Figura 51 – Instalação do *plugin IDE Gradle Pack*.



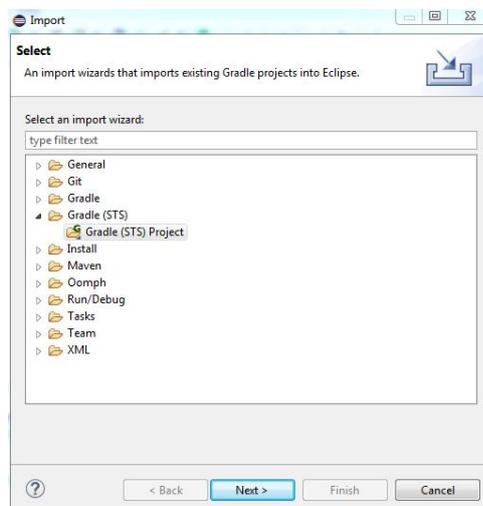
Fonte: Adaptado de Mathworks.

Em seguida, aguardar o *download* dos pacotes antes de importar os projetos do BoofCV.

B.3 Configuração do BoofCV pelo *Gradle*

O próximo passo é importar o projeto pelo *Gradle* como mostrado pela Figura 52, buscando o caminho de projetos da biblioteca BoofCV que contêm todos os projetos de testes utilizados pelo BoofCV. Deve-se importar o caminho dos projetos BoofCV 'boofcv-v0.27-src' no botão *Browser*.

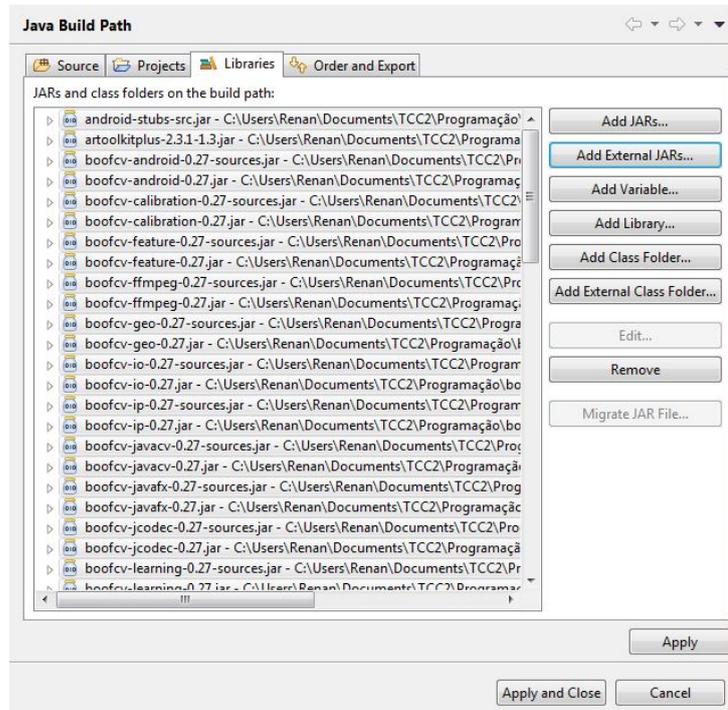
Figura 52 – Importação das bibliotecas do BoofCV.



Fonte: Fotografia do autor.

Após a importação de todos os projetos e configuração de dependências deve-se importar também todas as bibliotecas .jar do BoofCV para o *Java Path Library* do projeto *Feature* onde foi criada a ferramenta para o método *Template Matching*. Como mostrado pela Figura 53.

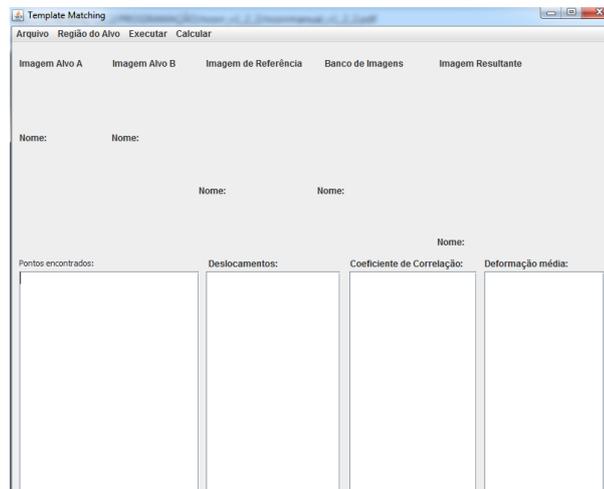
Figura 53 – Importação das bibliotecas do BoofCV.



Fonte: Fotografia do autor.

Em seguida, executar a classe *TM.java* para iniciar a como mostra a Figura 54.

Figura 54 – Importação das bibliotecas do BoofCV.



Fonte: Fotografia do autor.

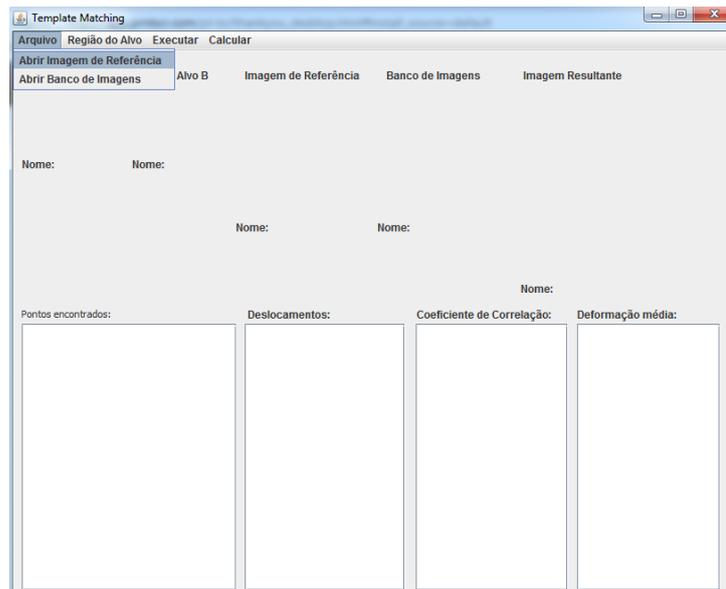
B.4 Utilização da ferramenta

1. Abrir a imagem de referência

Por padrão instancia-se a primeira imagem do banco de imagens.

Clique no menu "Arquivo" em seguida "Abrir imagem de Referência", Figura 55:

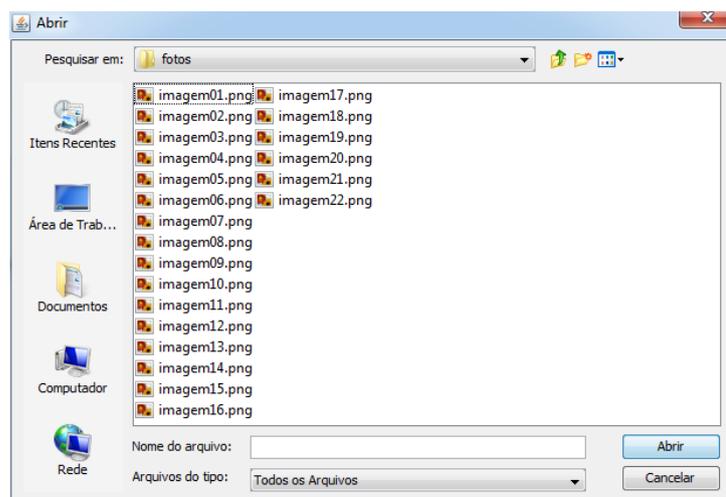
Figura 55 – TM - Abrir arquivo imagem de referência.



Fonte: Fotografia do autor.

Selecione o arquivo de imagem e clique em "Abrir", Figura 56:

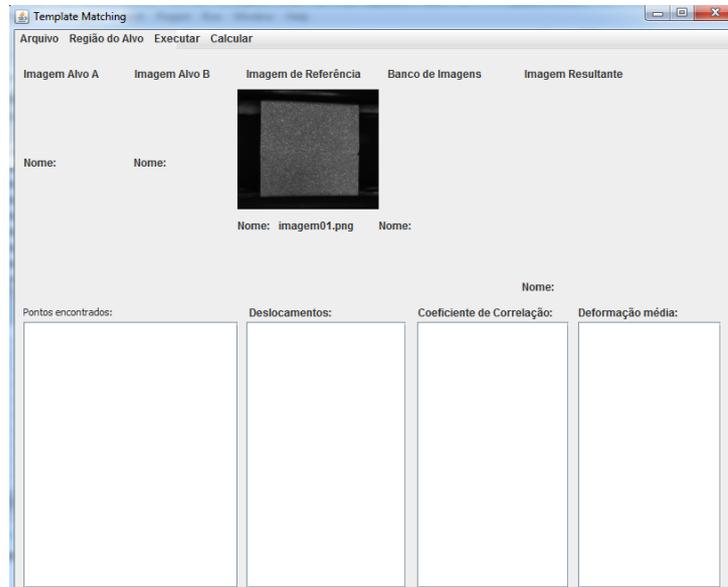
Figura 56 – TM - Seleção de imagem de referência.



Fonte: Fotografia do autor.

A imagem é mostrada no campo Imagem de Referência, Figura 57:

Figura 57 – TM - Imagem de Referência configurada.

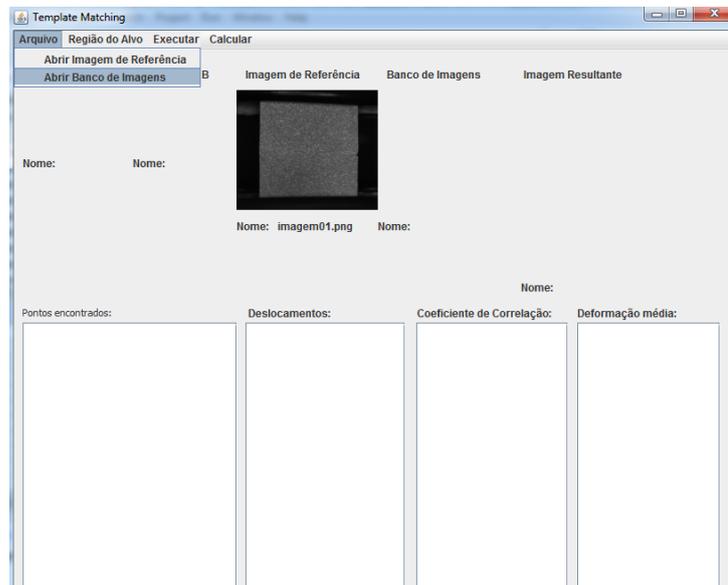


Fonte: Fotografia do autor.

2. Abrir as imagens do banco de imagens

Clique no menu "Arquivo" em seguida "Abrir banco de imagens", Figura 58:

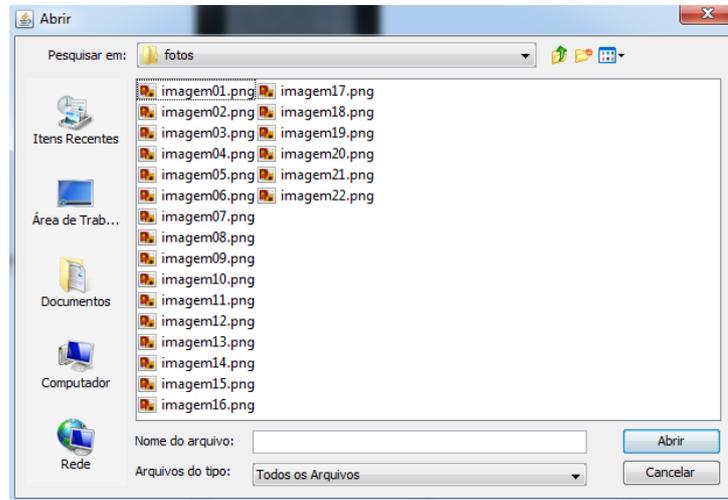
Figura 58 – TM - Abrir imagens do banco de imagens.



Fonte: Fotografia do autor.

Selecione o arquivos de imagens e clique em "Abrir", Figura 59:

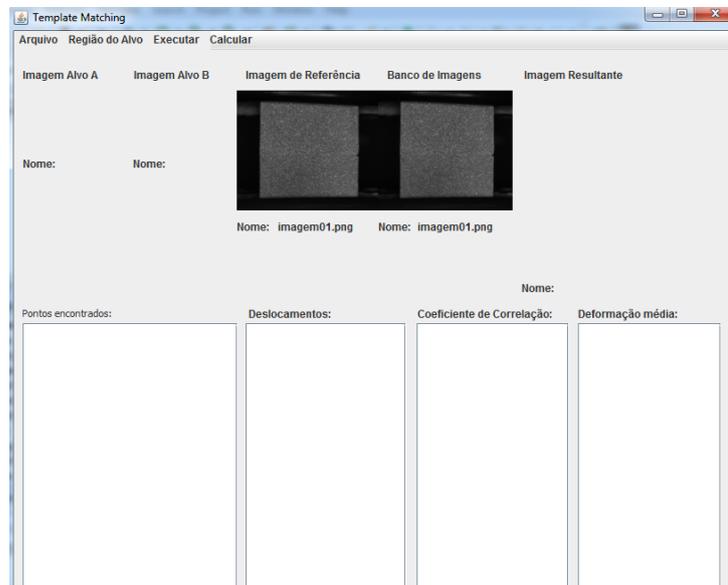
Figura 59 – TM - Selecionar imagens do banco de imagens.



Fonte: Fotografia do autor.

A primeira imagem do banco de imagens é mostrada no campo Banco de Imagens, Figura 60:

Figura 60 – TM - Imagem do banco de imagem configurada.

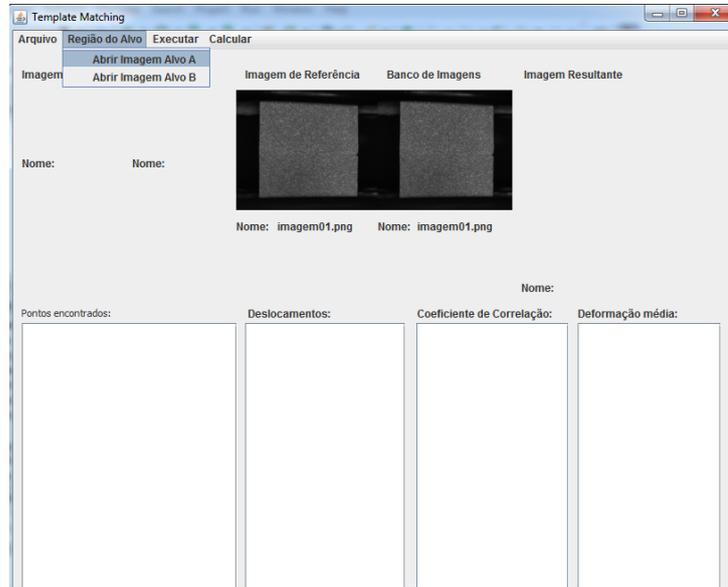


Fonte: Fotografia do autor.

3. Abrir a imagem alvo A

Clique no menu "Região do Alvo" em seguida "Abrir imagem alvo A" e selecione o arquivo da imagem alvo, Figura 61:

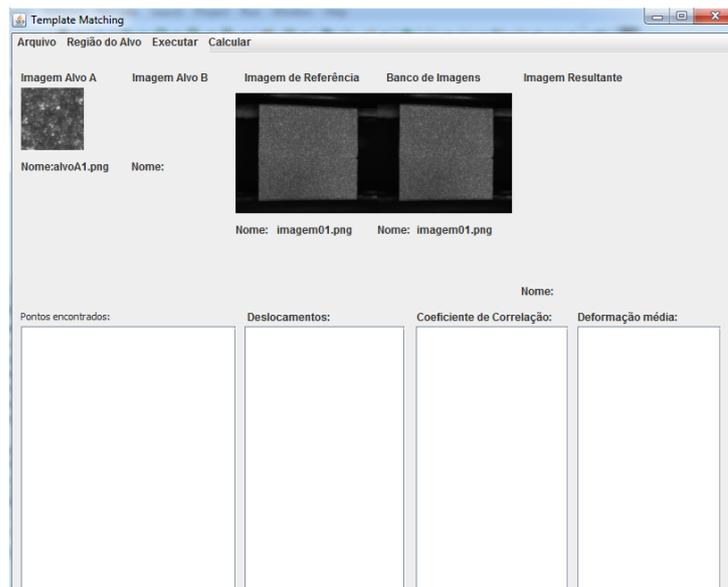
Figura 61 – TM - Abrir imagem alvo A.



Fonte: Fotografia do autor.

A imagem alvo A é mostrada no campo Imagem Alvo A, Figura 62:

Figura 62 – TM - Imagem alvo A configurada.

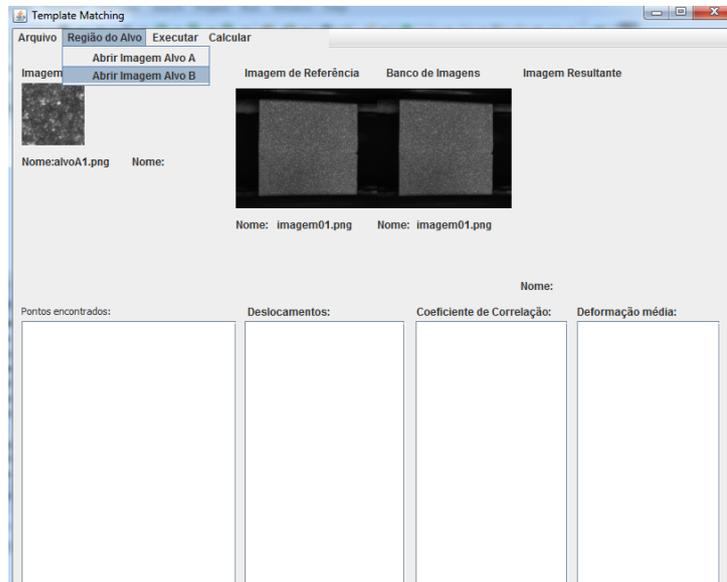


Fonte: Fotografia do autor.

4. Abrir a imagem alvo B

Clique no menu "Região do Alvo" em seguida "Abrir imagem alvo B" e selecione o arquivo da imagem alvo, Figura 63:

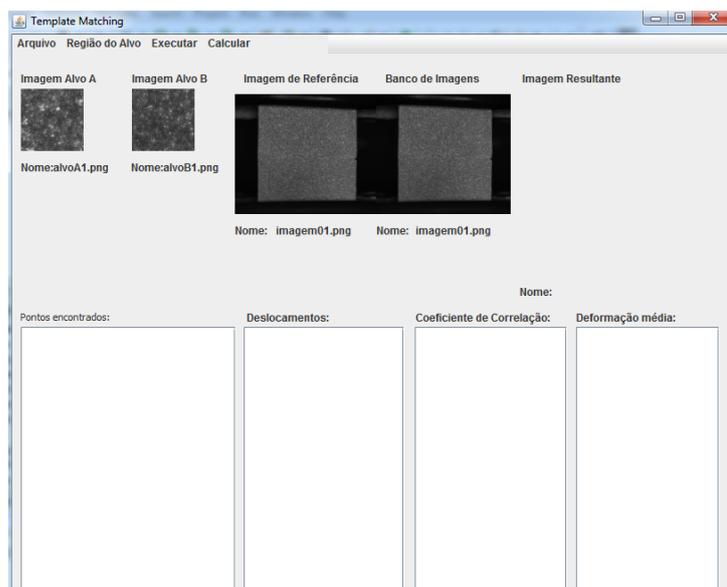
Figura 63 – TM - Abrir imagem alvo B.



Fonte: Fotografia do autor.

A imagem alvo B é mostrada no campo Imagem Alvo B, Figura 64:

Figura 64 – TM - Imagem alvo B configurada.

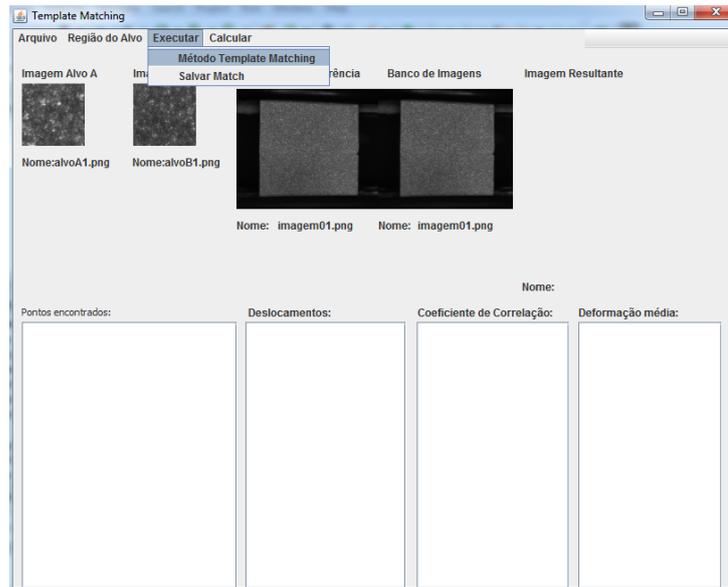


Fonte: Fotografia do autor.

5. Executar método Template Matching

Clique no menu "Executar" em seguida "Encontrar Match", Figura 65:

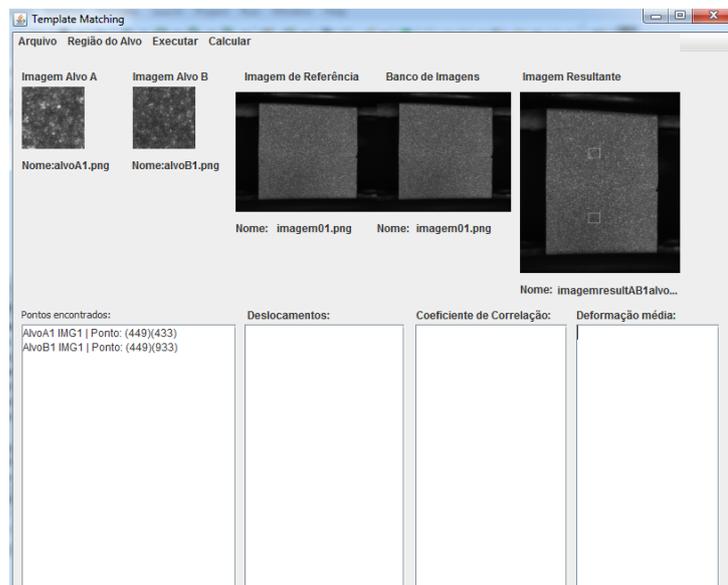
Figura 65 – TM - Imagem alvo B configurada.



Fonte: Fotografia do autor.

Os resultados do método são mostrados no campo "Pontos Encontrados" listando a referência da correspondência encontrada na imagem de busca. Também é gerada a imagem resultante demarcando com um retângulo de cor branca a posição do alvo na imagem de busca, Figura 66.

Figura 66 – TM - Pontos encontrados.

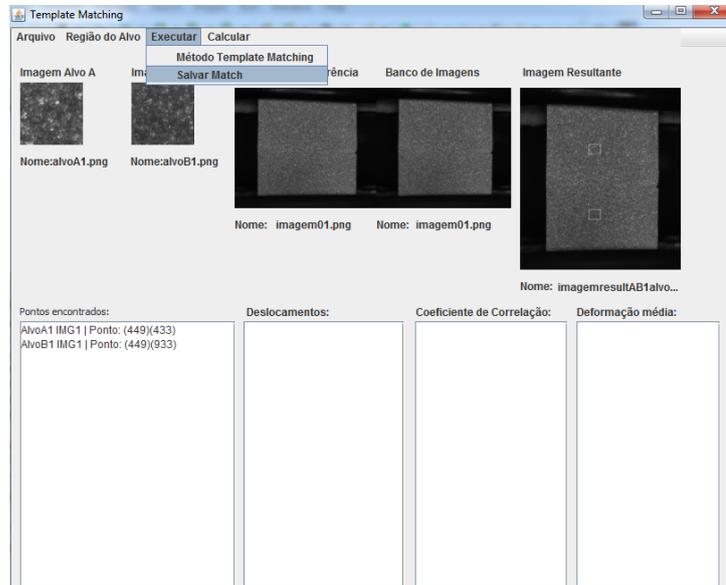


Fonte: Fotografia do autor.

6. Salvar Match

Clique no menu "Executar Método" em seguida "Salvar Match", Figura 67:

Figura 67 – TM - Salvar Match.

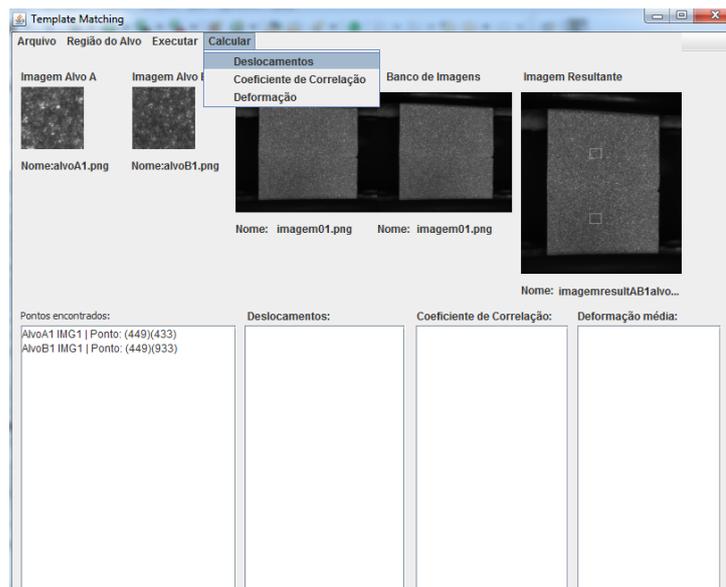


Fonte: Fotografia do autor.

7. Calcular os Deslocamentos

Clique no menu "Calcular" em seguida "Deformação", Figura 68:

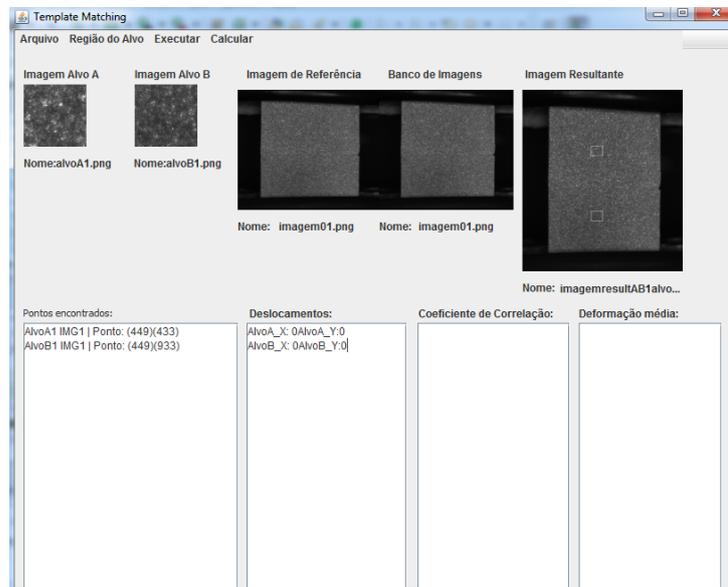
Figura 68 – TM - Calcular os deslocamentos.



Fonte: Fotografia do autor.

O resultado é apresentado no campo "Deslocamentos", Figura 69:

Figura 69 – TM - Resultado dos deslocamentos.

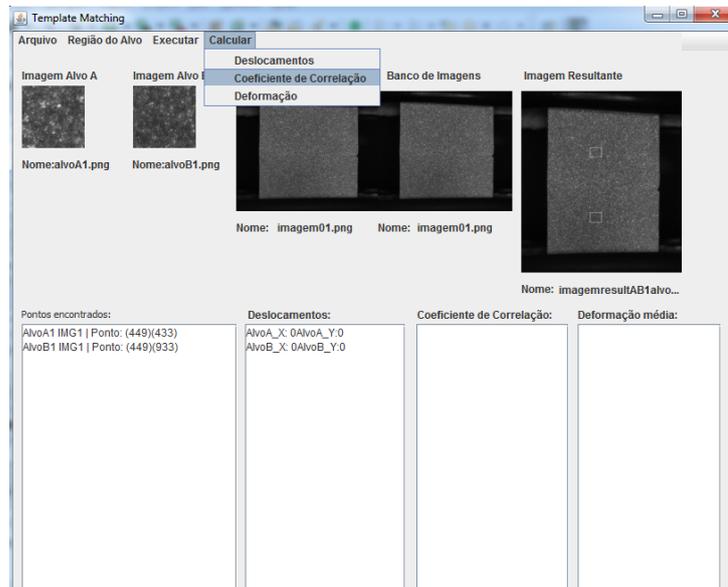


Fonte: Fotografia do autor.

8. Calcular o Coeficiente de Correlação

Clique no menu "Calcular" em seguida "Coeficiente de Correlação", Figura 70:

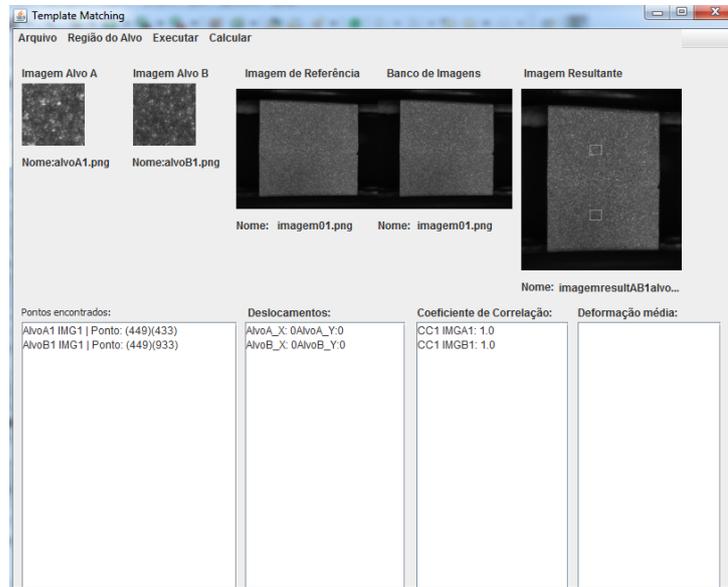
Figura 70 – TM - Calcular o coeficiente de correlação.



Fonte: Fotografia do autor.

O resultado é apresentado no campo Coeficiente de Correlação, Figura 71:

Figura 71 – TM - Resultado do coeficiente de correlação.



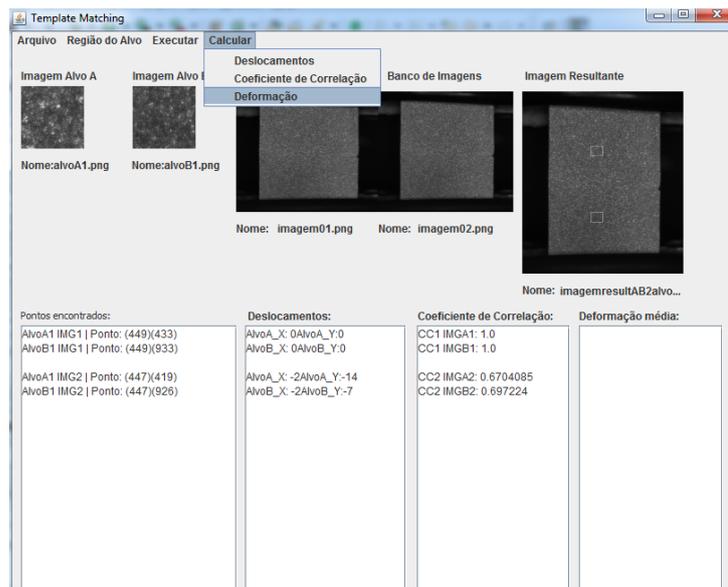
Fonte: Fotografia do autor.

9. Calcular Deformação média

Para calcular a deformação de um determinado ponto é necessário ter executado pelo menos duas iterações com o método *Template Matching*.

Clique no menu "Calcular" em seguida "Deformação média", Figura 72:

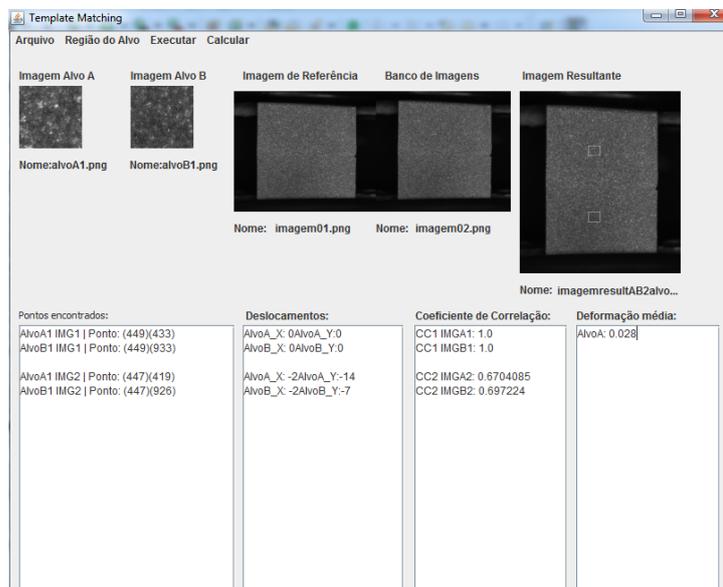
Figura 72 – TM - Calcular a deformação média.



Fonte: Fotografia do autor.

O resultado é apresentado no campo Deformação média, Figura 73:

Figura 73 – TM - Resultado da deformação média.



Fonte: Fotografia do autor.