



YULIANA SOLANCH MAYORCA PICOY

**CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS PARA
MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS EM VIGAS
EM BALANÇO**

LAVRAS - MG

2016

YULIANA SOLANCH MAYORCA PICOY

**CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS PARA MEDIÇÕES DE
DESLOCAMENTOS EM VIGAS EM BALANÇO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Sistemas e
Automação, área de concentração em
Engenharia de Sistemas e
Automação, para a obtenção do
título de Mestre.

Orientador

Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães

Coorientador

Dr. Roberto Alves Braga Júnior

LAVRAS - MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Picoy, Yuliana Mayorca.

Correlação digital de imagens para medições de deslocamentos em vigas em balanço / Yuliana Mayorca Picoy. – Lavras : UFLA, 2016.

76 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador(a): Ricardo Rodrigues Magalhães.

Bibliografia.

1. Técnica DIC. 2. Deformação. 3. Viga aço. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

YULIANA SOLANCH MAYORCA PICOY

**ANÁLISE DA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS PARA
MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTO EM VIGAS EM BALANÇO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de março de 2016.

Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães	UFLA
Dr. Roberto Alves Braga Júnior	UFLA
Dr. Giovanni Francisco Rabelo	UFLA
Dr. Rolando Gonzalez	Universitat de València

Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

LAVRAS - MG
2016

*Dedico o presente projeto a todas aquelas pessoas que acreditaram em minha
pessoa e incentivaram a cumprir os meus objetivos acadêmicos!*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por proporcionar-me todos os dias seu imenso amor que se manifesta por meio da sua proteção, suas bênçãos e seus desafios.

Agradeço a meus pais, pelo exemplo de vida, pela educação que eles me deram, pela preocupação com o meu bem-estar, e pelo seu infinito amor que tento retribuir todos os dias da minha existência.

Agradeço a meu irmão, por seu amor e confiança, que me ajudam a entender a responsabilidade que temos como irmãos mais velhos.

Agradeço a minha irmã, pela sua existência e a todos os meus familiares que sei que, mediante suas orações, querem a minha felicidade.

Agradeço a Elisângela Ribeiro, amiga incondicional, pela ajuda com a aprendizagem do idioma, por ser um pilar, chave para sentir-me motivada nesta nova experiência acadêmica, e, sobretudo, pelo presente de compartilhar sua família comigo e, assim, dar início a uma grande amizade que, com certeza, irei lembrar com imenso carinho e gratidão para toda a minha vida.

Agradeço a meus professores, colegas e a meus amigos brasileiros e estrangeiros que Deus colocou no meu caminho para aprender com eles e compartilhar momentos inesquecíveis.

Agradeço a meu orientador Ricardo por sua dedicação e seu apoio constante, por suas correções e suas recomendações que me ajudaram a ter uma orientação no projeto.

Agradeço a meu professor Roberto a quem, desde o começo, contei com seu apoio incondicional para resolver minhas dúvidas no ambiente acadêmico do mestrado.

Muito obrigada, a todos vocês que foram parte de um novo capítulo muito importante da minha vida.

RESUMO

A correlação digital de imagens (DIC) utiliza técnicas de processamento digital que permitem obter o campo de deslocamento de um objeto em regiões de interesse. A diferença entre DIC e as outras técnicas de medição convencionais é que ela permite a medição de modo não invasivo e com um baixo custo benefício. DIC é uma técnica aplicada na engenharia civil, engenharia mecânica, ciências dos materiais e na engenharia biomédica, entre outras. Com isso, pode ser usada e adaptada às mais diversas situações de medição, permitindo o processamento de um número elevado de imagens com rapidez e precisão. No presente trabalho, objetivou-se determinar os deslocamentos em vigas em balanço, usando a técnica DIC. Para esse fim, foram estudadas geometrias de vigas de aço, antes e depois de serem aplicados carregamentos na extremidade livre, obtendo-se os campos de deslocamento resultante ao longo da viga. Para o desenvolvimento da técnica DIC, este trabalho foi dividido em três etapas, sendo a primeira, a configuração experimental; a segunda, o uso de um software para o processamento das imagens e a última etapa foi a comparação dos resultados obtidos com resultados analíticos. O procedimento adotado foi aplicado para carregamentos de 0,05 N, 0,1 N, 0,2 N, 0,5 N, 10N, 20N e 50N. Os resultados para carregamentos a partir de 10 N se mostraram satisfatórios, quando comparados com valores analíticos.

Palavras - chave: Técnica DIC, Deformação, Viga aço.

ABSTRACT

Digital Image Correlation (DIC) uses digital image processing techniques, giving the field of displacement of an object in regions of interest. The difference between DIC and other a conventional measurement technique is that it allows non-invasive measurement mode and has a low cost benefit. DIC can be applied in civil engineering, mechanical engineering, materials science and biomedical engineering, among others. Thus, it can be used and adapted to many different measurement situations allowing a quickly and accurately processing of a large number of images. This study aims to measure displacements in a cantilever beam by using DIC. A steel beam was subjected to load sat its free and pictures were taken before and after loads application in order to mea sure displacement fields along the beam length via DIC. The work was divided into three stages, the first one was the experimental setup, the second one used Ncorr software for the image processing and the last step was to compare the results obtained from DIC with analytical data. Loads of 0.05 N, 0.1 N, 0.2 N, 0.5 N, 10 N, 20 N and 50N were applied to the beam and results for loads from 10 N were satisfactory when compared to analytical values.

Keywords: DIC technique, Deformation, Beam steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Elementos de um sistema de processamento de imagens	14
Figura 2 (a) Imagem de referência e (b) Imagem deformada	18
Figura 3 Exemplos de algumas técnicas de medição	20
Figura 4 Coordenadas das sub-regiões são ilustradas em vermelho, contendo o ponto central. S representa o conjunto de coordenadas.	21
Figura 5 Deslocamentos lineares para as coordenadas das sub-regiões.....	23
Figura 6 Os valores de escala de cinza, na parte esquerda, compara-se com as duas imagens à direita. Os critérios de correlação mostram que os valores de escala de cinza da direita são semelhantes com a sub-região da imagem superior da esquerda, onde Ccc está perto de 1 e Cls está perto de 0.....	25
Figura 7 Exemplo gráfico dos passos descritos anteriormente	27
Figura 8 São os passos do esquema de otimização não- linear utilizada na DIC.....	28
Figura 9 Correlação normalizada cruzada	29
Figura 10 Relação força-deslocamento numa viga à tração. l - comprimento da viga, F - força de tração, u - deslocamento, α - ângulo de rotação	32
Figura 11 Viga engastada típica. A - ponto de origem da viga, L - comprimento da viga, W - largura da viga, t - espessura da viga	33
Figura 12 Arco de deflexão do feixe sob a carga no final fixo. K curvatura da viga, P carregamento, v - deslocamento vertical	34
Figura 13 Os passos a serem realizados no MEF	38
Figura 14 Arranjo experimental para a utilização da técnica DIC	40
Figura 15 Imagem de referência (papel branco)	41
Figura 16 Imagem deformada (papel branco)	41
Figura 17 Viga de aço com pontos pequenos e próximos. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg	42
Figura 18 Viga de aço com pontos pequenos e afastados. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg	43
Figura 19 Viga de aço com pontos grandes e próximos. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg	43
Figura 20 Viga de aço com pontos grandes e afastados. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg	44

Figura 21 Viga de aço com pontos grandes e pequenos. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg	44
Figura 22 a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 50g; c) viga com carregamento de 100g; d) viga com carregamento de 200g; e) viga com carregamento de 500g; f) viga com carregamento de 1kg; g) viga com carregamento de 2kg; h) viga com carregamento de 5kg.....	45
Figura 23 Parte engastada da viga.....	46
Figura 24 Carregamento de 1kg	47
Figura 25 Malha gerada para a viga	47
Figura 26 Imagem do papel processada via DIC usando threshold	48
Figura 27 Imagem do papel processada via DIC sem threshold	49
Figura 28 Deslocamentos de 1 kg no Ncorr em pixels.....	50
Figura 29 Deslocamentos DIC vs. Analítico.....	51
Figura 30 Deslocamento de 1kg via DIC	52
Figura 31 Deslocamentos DIC vs. Analítico.....	53
Figura 32 Deslocamentos de todos os carregamentos via DIC.....	53
Figura 33 Deslocamento em cores na viga de aço A36 com o carregamento de 1kg em milímetros	54
Figura 34 Ponto mínimo de deslocamento	55
Figura 35 Ponto máximo de deslocamento.....	55

SUMÁRIO

RESUMO	5
LISTA DE FIGURAS	7
SUMÁRIO.....	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
Objetivo geral	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 Imagens digitais	13
3.1.1 Processamento digital de imagens.....	13
3.1.2 Histórico das aplicações do processamento digital de imagens	15
3.2 Correlação Digital de Imagens	16
3.2.1 Objetivo da técnica DIC-2D	20
3.2.2 Princípio matemático e o algoritmo utilizado em DIC-2D	21
3.2.3 Critérios de correlação.....	24
3.2.4 Passos geral para a utilização dos critérios de correlação	26
3.2.5 Otimização não linear	27
3.2.5.1 Estimativa inicial.....	28
3.2.5.2 Gauss Newton no linear método de mínimos ou quadrados iterativos	30
3.3 Teoria de elasticidade aplicado a vigas em balanço	31
3.4 Métodos dos Elementos Finitos	36
4 MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1 Procedimentos experimentais via DIC	39
4.2 Diversos tipos de marcações nas amostras	41
4.2.1 Pontos aleatórios de tinta preta no papel	41
4.2.2 Pontos aleatórios desenhados na viga	41
4.2.3 Dispersão aleatória de tinta na viga.....	45
4.3 Potencial da técnica DIC comparada com a teoria	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 Pontos aleatórios desenhados no papel.....	48
5.2 Pontos aleatórios desenhados na viga	49
5.3 Dispersão aleatória de tinta na viga.....	51
CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS	57
ANEXO A – Software Ncorr	60
ANEXO B – Análises DIC (imagens com desenho de pontos)	64
ANEXO C – Análises DIC (imagens com dispersão de tinta)	71

1 INTRODUÇÃO

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

Hobrough desenhou e construiu um instrumento para a correlação de reconhecimento de alta resolução de fotografia, com a finalidade de permitir medições precisas em terrenos variáveis. É considerado um dos pesquisadores pioneiros ao desenvolver uma forma de correlação digital de imagens para extrair informações de posição a partir desse processo.

A partir das primeiras pesquisas, várias outras técnicas ópticas vêm sendo desenvolvidas para determinar experimentalmente o campo de deslocamentos e tensões em estruturas sujeitas a carregamentos em geral, destacando-se a técnica de correlação digital de imagem (DIC) como uma delas. A técnica DIC utiliza o processamento digital de imagens de um objeto, que permite obter o campo de deslocamento do mesmo em regiões de interesse. O deslocamento pode ocorrer no plano (em duas dimensões) ou fora do plano (em três dimensões).

A diferença entre DIC e outras técnicas de medição convencionais é que ela permite a medição de modo não invasivo, além de ter um custo- benefício baixo. Métodos ópticos são utilizados na mecânica experimental para obter acesso direto aos dados cinemáticos, sendo que a DIC trabalha com uma abordagem não destrutiva, permitindo que o campo de deslocamento seja obtido sem danos à estrutura. Sendo assim, é uma técnica aplicada na engenharia civil,

engenharia mecânica, ciências dos materiais, na engenharia biomédica, entre outras. Com isso, pode ser usada e adaptada às mais diversas situações de medição, permitindo o processamento de um número elevado de imagens com rapidez e precisão.

Dessa forma, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de determinar os deslocamentos de vigas em balanço usando a técnica DIC com apenas uma câmera, o que implica em uma metodologia de baixo custo. Para esse fim, foram estudadas geometrias de vigas de aço, antes e após serem aplicados os carregamentos diversos, obtendo-se os campos de deslocamentos resultantes. Os resultados obtidos foram comparados com dados analíticos e com o Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de comprovar o potencial da técnica DIC para aplicações diversas.

2 OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é medir os deslocamentos de uma viga em balanço, usando a técnica de correlação digital de imagens. Para isso, foram definidos como objetivos específicos:

- Desenvolver um procedimento experimental para medir deslocamentos de vigas em balanço baseado na técnica DIC.
- Avaliar a técnica DIC para diversos tipos de marcações nas amostras.
- Verificar o potencial de aplicação do DIC para medição de deslocamentos em vigas em balanço quando comparado com outras técnicas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Imagens digitais

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).

Gonzalez e Woods (2009) definem uma imagem como uma função bidimensional $f(x,y)$, onde x e y são coordenadas espaciais no plano e a amplitude para $f(x, y)$ é a intensidade ou escala de cinza nesse ponto, sendo que, quando x , y e os valores de intensidade de f são quantidades finitas e discretas, a imagem é considerada uma imagem digital.

Ao analisar imagens brancas e pretas, estas podem ser representadas como uma só matriz de números finitos, mas as imagens coloridas são registradas em três matrizes (BULNES, 2013).

3.1.1 Processamento digital de imagens

Para Gonzalez e Woods (2009), existe uma classificação para os processos computacionais, que se dividem 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).

Sendo assim, a conexão entre o processamento de imagens e a análise de imagens, há uma área de reconhecimento de regiões de interesse numa imagem. Desse modo, o processamento digital de imagens envolve processos onde as entradas e as saídas são imagens e inclui processos de extração de atributos de imagens e resultou no reconhecimento de objetos individuais (GONZALEZ; WOODS, 2009).

Os elementos de um sistema de processamento de imagens de uso genérico são mostrados na Figura 1 que expressa em diagrama, desde sistemas de baixo custo até sofisticadas estações de trabalho utilizadas em aplicações que envolvem intenso uso de imagens.

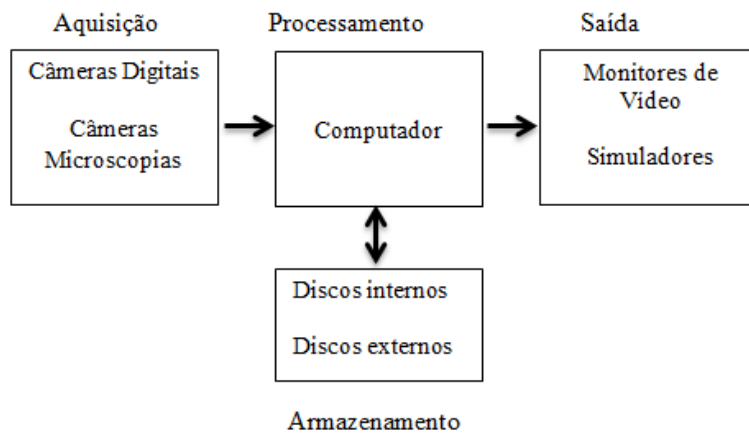


Figura 1 Elementos de um sistema de processamento de imagens

A etapa de aquisição da imagem tem como função converter uma imagem em uma representação numérica adequada para o processamento digital subsequente. Por outro lado, a etapa de armazenamento pode ser dividida em três categorias: (1) armazenamento de curta duração de uma imagem, enquanto ela é utilizada nas várias etapas do processamento, (2) armazenamento de massa

para operações de recuperação de imagens relativamente rápidas, e (3) arquivamento de imagens, para recuperação futura, quando isso se fizer necessário. O espaço de armazenamento requerido é normalmente especificado em bytes (8 bits) e seus múltiplos: KB (kilobyte), MB (megabyte), GB (gigabyte) e TB (terabyte), sendo alguns dos formatos mais comuns o BMP, PCX, TIFF, JPEG e GIF. 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).

3.1.2 Histórico das aplicações do processamento digital de imagens

As primeiras aplicações do processamento digital de imagens ocorreram na indústria de jornais, onde se buscava aprimorar a qualidade de impressão das imagens digitalizadas, transmitidas por meio do sistema Bartlane, que foi um sistema de transmissão de imagens por cabo submarino entre Londres e Nova York, na década de 1920. Esse sistema codificava uma imagem em cinco níveis de intensidade distintos. Essa capacidade seria expandida, já em 1929, para 15 níveis (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Apesar dos primeiros trabalhos envolverem imagens digitais, estas não podem ser consideradas produtos do processamento digital de imagens propriamente dito, porque sua criação não envolveu computadores.

Com a invenção do transistor, em 1948, na empresa Bell Laboratories, iniciou-se o desenvolvimento de linguagens de programação de alto nível (COBOL) nas décadas de 1950 e 1960. Além disso, a invenção do circuito

integrado, em 1958, pela empresa Texas Instruments, o desenvolvimento de sistemas operacionais na década de 1960, o desenvolvimento do microprocessador na década de 1970, pela empresa Intel, o lançamento do computador pessoal em 1981, pela empresa IBM, e a miniaturização progressiva de componentes entre 1970 e 1980, contribuíram para o avanço tecnológico do processamento digital de imagens.

Na década de 1960, os primeiros computadores poderosos para realizar tarefas de processamento de imagens foram criados, e que, juntamente com o início do programa espacial em 1964, chamou-se a atenção dos pesquisadores, em razão do potencial dos conceitos de processamento digital de imagens. Paralelamente às aplicações espaciais, foram desenvolvidas técnicas de processamento digital de imagens para serem usadas em imagens médicas, na década de 1960.

Assim, pode-se inferir que a década de 1960 foi o ponto de partida para o início das aplicações na área de processamento digital de imagens e que é uma área em expansão e que vem expandindo rapidamente suas aplicações de modo que, atualmente, poucos são os ramos da atividade humana que não sejam impactados pelo processamento digital de imagens (GONZALEZ; WOODS, 2009).

3.2 Correlação Digital de Imagens

Correlação Digital de Imagens (DIC) é uma técnica óptica sem contato para medição de deformação do campo total do material. Dado um par de imagens capturadas antes e após a deformação, DIC extrai os deslocamentos da imagem, por meio da otimização da correlação entre as intensidades das localizações correspondentes (ZHOU et al., 2014).

A Correlação Digital de Imagens, 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.

Entre as décadas 1960 e 1970, pesquisadores em inteligência artificial e robótica começaram a desenvolver algoritmos para serem usados em visão computacional com aplicações de fotogrametria (técnica que permite efetuar medições rigorosas a partir de fotografias). Com o avanço das técnicas baseadas em imagens digitais, novas aplicações dessas técnicas foram surgindo, tais como a holografia, moiré, interferometria, etc. (SCHWIDER, 1990).

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. Tendo como eficácia e confiabilidade do algoritmo construído, a confirmação por um conjunto de pontos selecionados na imagem.

Chen et al. (2015) identificaram as deformações descontínuas no alumínio mediante DIC e Xu et al. (2015) utilizaram DIC para estudar as

propriedades eletromecânicas do osso que, segundo a lei de Wolff, o osso pode alterar sua forma quando existe necessidade de adaptação ao ambiente externo, conhecido como remodelação óssea.

Wu et al. (2015) utilizaram a técnica DIC, baseada no modelo Newton Raphson em peças de turbinas eólicas e concluíram que a técnica por não 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 está se tornando 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).

DIC é baseada na comparação das imagens de luz branca, antes, durante e após a deformação de um corpo-de-prova (Figura 2). 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.

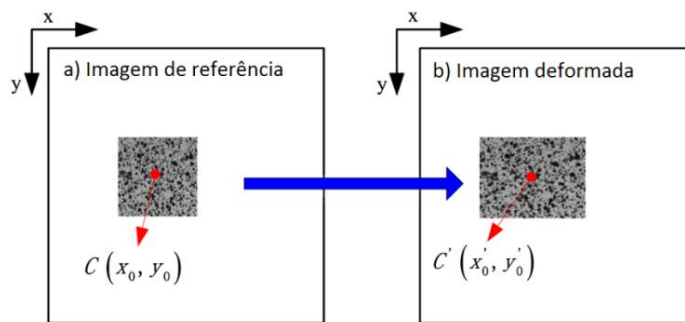


Figura 2 (a)

Imagem de referência e (b) Imagem deformada

Fonte: Adaptado de Tang et al. (2012)

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). Nesse caso, é essencial realizar experimentos com câmeras de alta resolução, a fim de aumentar a confiabilidade das medições.

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. A técnica DIC é simples de ser usada e pode ser aplicada em experimentos de materiais e em estruturas industriais em geral (HEDAN et al., 2014).

Se apenas uma câmera for empregada nos experimentos, a técnica é conhecida como 2D-DIC, a qual permite a medição de deslocamentos sobre um plano perpendicular ao eixo óptico. Quando duas câmeras são empregadas, a técnica é conhecida como 3D-DIC, que permite a medição de deslocamentos experimentados pelo objeto nas três direções espaciais (SESÉ et al., 2014).

A robustez de uma análise DIC 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).

Entre as técnicas de medição, para obter o plano de deslocamentos de um determinado corpo, além da DIC, outras técnicas ópticas são aplicadas como, por exemplo, as técnicas convencionais e numéricas, como observadas na Figura 3.

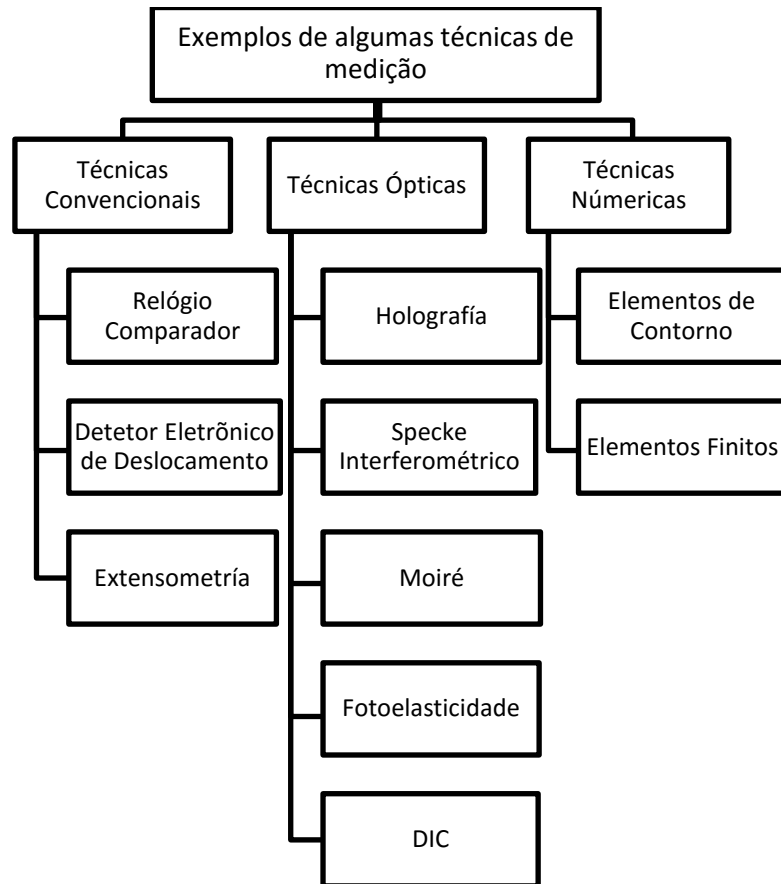


Figura 3 Exemplos de algumas técnicas de medição

3.2.1 Objetivo da técnica DIC-2D

Segundo Antoniu (2015), o objetivo principal DIC-2D é a obtenção de campos de deslocamentos e de deformações dentro de uma região de interesse denomina ROI (Region of interesse) para uma amostra de material submetido a deformação mediante adoção de técnicas de processamento de imagens.

O processo começa com a captura das imagens da amostra e elas servem de referência para a técnica DIC, com o objetivo de se obter a correspondência

entre os pontos selecionados na imagem de referência (imagem inicial) e a imagem deformada (imagem atual). A técnica DIC 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.

3.2.2 Princípio matemático e o algoritmo utilizado em DIC-2D

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 4.

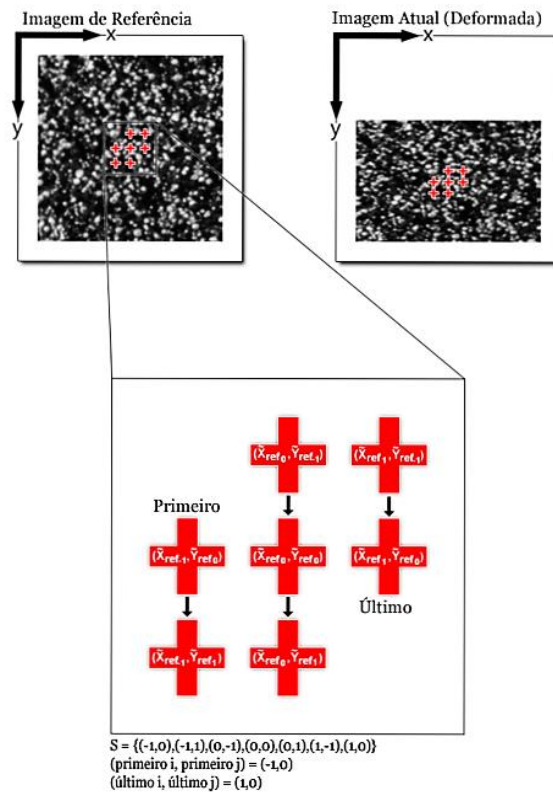


Figura 4 Coordenadas das sub-regiões são ilustradas em vermelho, contendo o ponto central. S representa o conjunto de coordenadas
Fonte: Antoniu (2015)

A transformação dos pontos de sub-regiões da referência inicial a sub-regiões deformadas tem um comportamento linear representado na Equação 1 e 2:

$$\bar{x}_{cur i} = x_{ref i} + u_{rc} + \frac{du}{dxrc} (x_{ref i} - x_{ref c}) + \frac{du}{dyrc} (y_{ref i} - y_{ref c}) \quad (1)$$

$$\bar{y}_{cur j} = y_{ref j} + v_{rc} + \frac{dv}{dxrc} (x_{ref i} - x_{ref c}) + \frac{dv}{dyrc} (y_{ref j} - y_{ref c}) \quad (2)$$

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.

Na Equação 3, representa-se a forma geral da deformação do vetor p.

$$p = \left\{ u \ v \ \frac{du}{dx} \ \frac{du}{dy} \ \frac{dv}{dx} \ \frac{dv}{dy} \right\}^T \quad (3)$$

Em que T é a transposta do vetor p.

As Equações 1 e 2 podem ser escritas na forma de matriz (Equação 4).

$$\varepsilon_{refc} + w(\Delta\varepsilon_{ref}; p_{rc}) = \begin{Bmatrix} x_{refc}^T \\ y_{refc}^T \\ 1 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 + \frac{du}{dx_{rc}} & \frac{du}{dy_{rc}} & u_{rc} \\ \frac{dv}{dx_{rc}} & 1 + \frac{dv}{dy_{rc}} & v_{rc} \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} * \begin{Bmatrix} \Delta x_{ref}^T \\ \Delta y_{ref}^T \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Em que,

ε é o vetor que contem 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 5 e 6.

$$\bar{x}_{refi} = x_{refi} + u_{rr} + \frac{du}{dx_{rr}}(x_{refi} - x_{refc}) + \frac{du}{dy_{rr}}(y_{refj} - y_{refc}) \quad (5)$$

$$\bar{x}_{refj} = x_{refj} + v_{rr} + \frac{dv}{dx_{rr}}(x_{refi} - x_{refc}) + \frac{dv}{dy_{rr}}(y_{refj} - y_{refc}) \quad (6)$$

sendo (i, j) pertencente ao conjunto S e, \bar{x}_{refi} , \bar{x}_{refj} 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 Prc (deformação que vai da referência até a atual) quando a deformação em Prr é 0. Um dos métodos para identificar é o método de composição inversa, ilustrado na Figura 5.

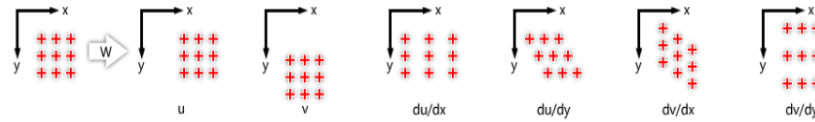


Figura 5 Deslocamentos lineares para as coordenadas das sub-regiões

3.2.3 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 DIC são:

1. Critério de correlação cruzada normalizada, representado pela Equação 7.

$$C_{CC} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m)(g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m]^2 \sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m]^2}} \quad (7)$$

2. Critério normalizado de mínimos quadrados, representado pela Equação 8.

$$C_{LS} = \sum_{(i,j) \in S} \left[\frac{f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m]^2}} - \frac{g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m]^2}} \right]^2 \quad (8)$$

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); f_m , g_m são valores médios de escala de cinza da sub-região de referência final e sub-região atual (Equações 9 e 10).

Logo,

$$f_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j})}{n(S)} \quad (9)$$

$$gm = \frac{\sum_{(i,j) \in S} g(\tilde{x}_{cur i} \tilde{y}_{cur j})}{n(S)} \quad (10)$$

sendo $n(S)$ 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 6.

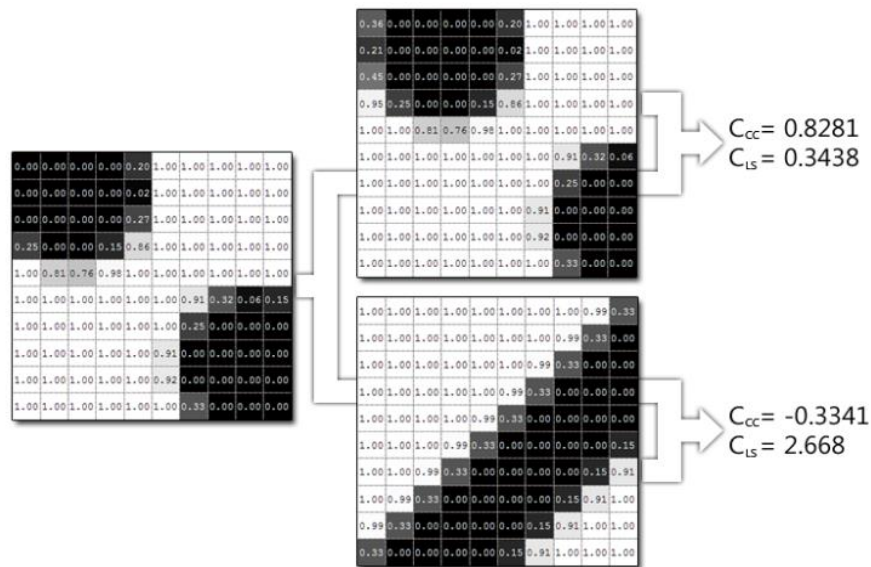


Figura 6 Os valores de escala de cinza, na parte esquerda se comparam com as duas imagens à direita. Os critérios de correlação mostram que os valores de escala de cinza da direita são semelhantes à sub-região da imagem superior da esquerda, onde C_{cc} está perto de 1 e C_{Is} está perto de 0.

Fonte: Antoniu (2015)

3.2.4 Passos gerais para a utilização dos critérios de correlação

Os passos gerais para a utilização dos critérios de correlação são descritos a seguir:

- Formar uma sub-região inicial na configuração de referência. Os valores de escala de cinza de referência, nesse ponto, são armazenados em uma matriz.

- Aplicar a função w (princípio de tensão) na sub-região de referência inicial para levá-lo á 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.

- Após comparar as duas matrizes, utilizando os critérios de correlação citados acima. Esse processo está ilustrado na Figura 7.

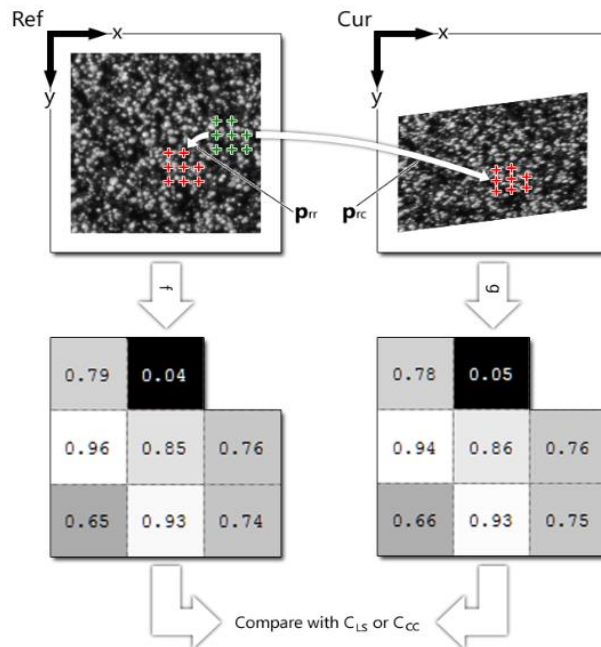


Figura 7 Exemplo gráfico dos passos descritos anteriormente
Fonte: Antoniu (2015)

O passo seguinte da análise é a forma de estabelecer o método para identificação de maneira automatizada. A principal aplicação da técnica DIC se dá na utilização de um esquema iterativo não linear de otimização de mínimos quadrados que reduz as equações 7 e 8.

3.2.5 Otimização não- linear

A otimização não- linear divide-se em três partes principais:

- a. Estimativa Inicial: Necessita de estimativa inicial, porque a otimização iterativa converge no ponto local máximo, portanto uma estimativa inicial perto da zona (ponto ótimo).

- b) Esquema de otimização iterativa Gauss Newton, se discute entre dois esquemas diferentes.
- O aditivo para frente, método de Gauss Newton: Esse é um algoritmo utilizado comumente no DIC. (FA-GN).
 - Método de Gauss Newton de composição inversa: é um caso especial de otimização não- linear. (IC-GN).
- c) Interpolação: Os valores de escala de cinza e os gradientes no subpixel requerem localizações para calcular as quantidades utilizadas nos métodos FA-GN e IC-GN.

3.2.5.1 Estimação inicial

Na Figura 8, apresenta-se o fluxo geral do esquema de otimização não linear. O primeiro passo é identificar a estimativa inicial, com o objetivo se alimentar como entrada inicial ao esquema de otimização iterativa que proporciona resultados mais precisos com se representa na imagem da direita.

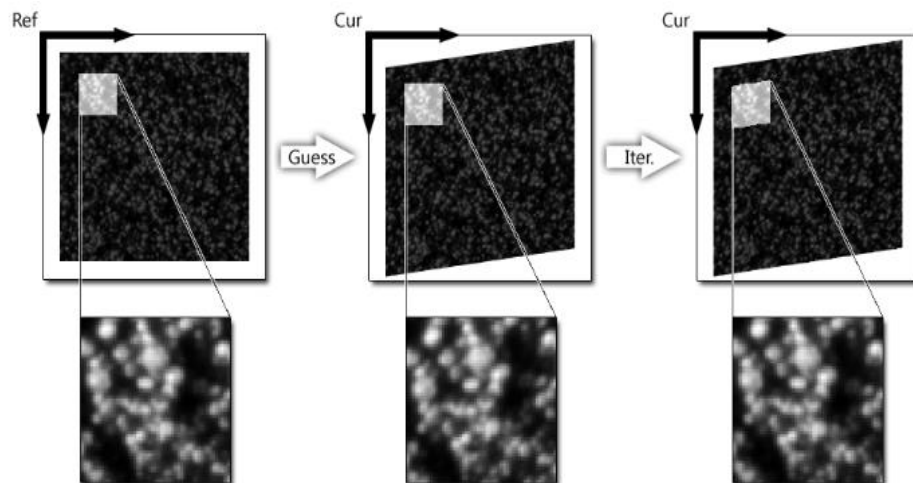


Figura 8 São os passos do esquema de otimização não linear utilizados na DIC
Fonte: Antoniu (2015)

Na Figura 9, ilustra-se a correlação cruzada normalizada, a imagem superior esquerda (Fig. 9.a) ilustra a seleção de uma sub-região de referência. A sub-região se preenche com a imagem na parte inferior esquerda e se alimenta como entrada, junto com a imagem atual, há uma função de correlação cruzada normalizada (NCC). A saída, na região inferior direita (Fig. 9.b) é representada pela matriz de valores dos coeficientes de correlação. A seta indica o valor mais alto (ilustrado como um ponto).

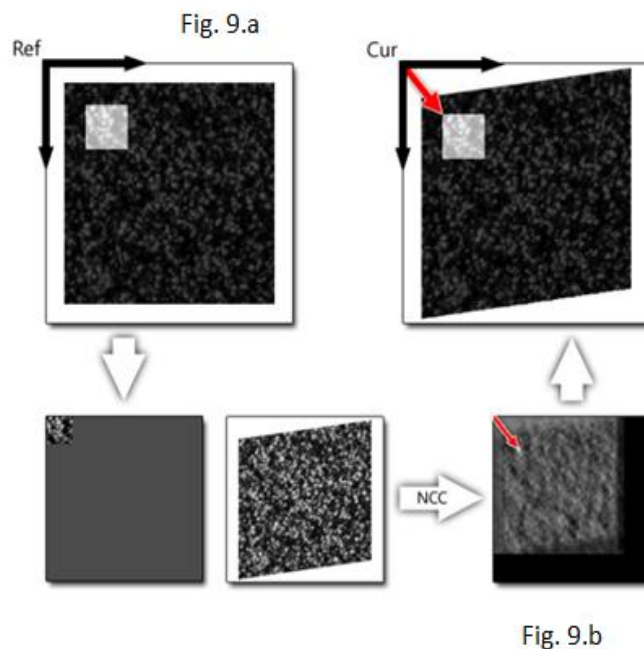


Figura 9 Correlação normalizada cruzada
Fonte: Antoniu (2015)

Há vários métodos para se obter uma estimativa inicial para o esquema de otimização iterativa não-linear, o método mais comum à correlação cruzada normalizada (NCC). Esse método utiliza o coeficiente de correlação e calcula cada localização do pixel na configuração atual de uma maneira computacional eficiente. Deve-se levar em consideração que o método NCC só pode determinar deslocamentos inteiros (número inteiro entre u e v). Assim, esse método é o

mais adequado para proporcionar aproximações nas zonas de deformação relativamente baixas.

3.2.5.2 Gauss – Newton não-linear ou método de mínimos quadrados iterativos

O método de Gauss Newton não linear ou método de mínimos quadrados iterativos é utilizado para identificar as raízes de uma função no caso onde a solução analítica não esteja disponível. Logo, este pode se extrapolar na otimização, mediante a pesquisa das raízes da derivada de uma função.

A função CLS (Critério normalizado de mínimos quadrados) se define como uma função que aceita um só argumento p , que pode se aplicar no PRR (ponto subscrito que representa o deslocamento da referência do sistema de coordenadas para o sistema de coordenadas de referência) ou no PRC (ponto do subscrito que indica o deslocamento que vai da referência até o atual sistema de coordenadas)

A aplicação do argumento acima depende do método a ser utilizado (Seja o aditivo para frente método de Gauss Newton ou Método de Gauss Newton de composição inversa).

A forma geral da equação iterativa utilizada pode ser derivada, ao aplicar a segunda ordem, onde contém os parâmetros de deformação de partida e, finalmente, determina onde a derivada é igual ao vetor zero (Equação 11 e 12).

$$C_{LS}(p_0 + \Delta p) \approx C_{LS}(p_0) + \nabla C_{LS}(p_0)^T * \Delta p + \frac{1}{2} * \Delta p^T * \nabla \nabla C_{LS}(p_0) * \Delta p \quad (11)$$

$$\frac{dC_{LS}(p_0+\Delta p)}{d\Delta p} \approx \nabla C_{LS}(p_0) + \nabla \nabla C_{LS}(p_0) * \Delta p = 0 \quad (12)$$

Em que,

$\nabla C_{LS}(p_0)$ é o gradiente de C_{LS} no (p_0) .

As Equações 11 e 12 permitem formar uma aproximação em função de, com outra função onde o mínimo se pode identificar analiticamente (se deriva e coloca-se em evidência). Isso permite resolver, até que se consiga identificar a solução apropriada. A forma geral da otimização iterativa reorganizada é dada pela equação 13, conhecida como Newton Raphson.

$$\nabla \nabla C_{LS}(p_0) * \Delta p = -\nabla C_{LS}(p_0) \quad (13)$$

3.3 Teoria de elasticidade aplicada a vigas em balanço

A elasticidade é o ramo da física que estuda o comportamento de corpos materiais que se deformam, ao serem submetidos a ações externas, retornando à sua forma original, quando a ação externa é removida.

Um corpo tem comportamento elástico se, após a remoção dos carregamentos originais, a sua forma original é preservada (Figura10).

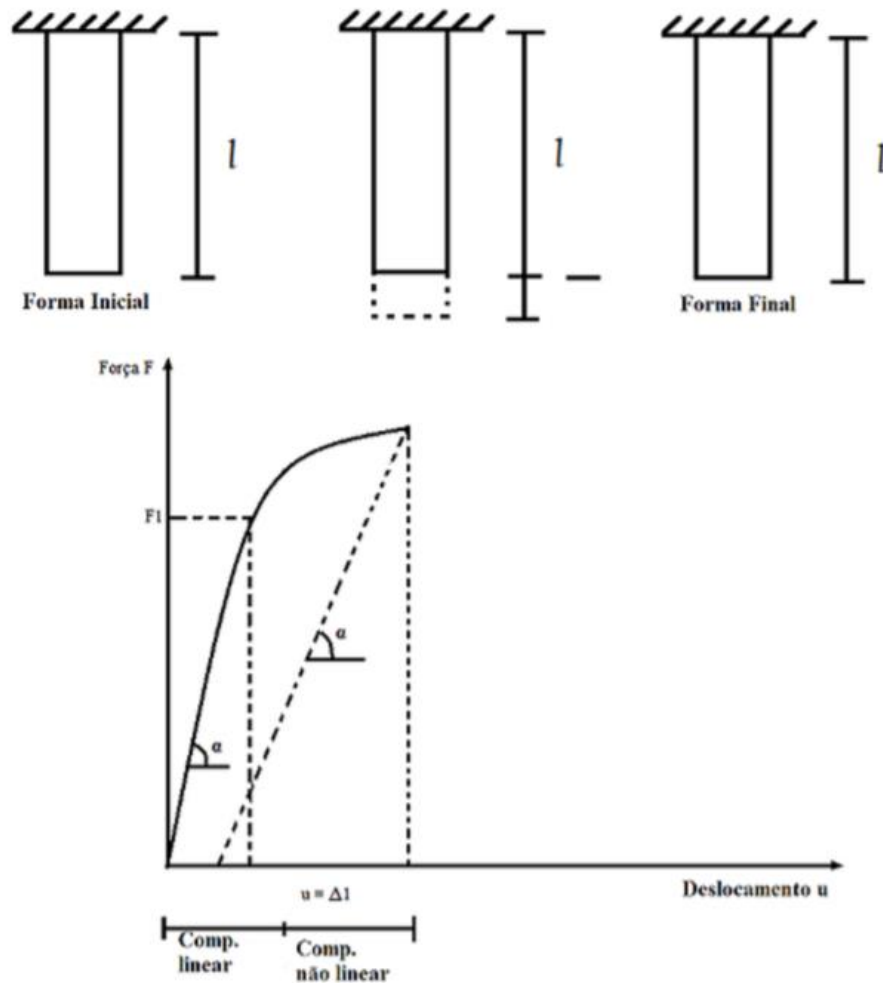


Figura 10 Relação força-deslocamento numa viga à tração. l - comprimento da viga, F - força de tração, u - deslocamento, α - ângulo de rotação

Para entender melhor a teoria da elasticidade dos corpos, deve-se considerar o material homogênea e linear, de tal forma que o menor elemento retirado do corpo possua as propriedades físicas específicas desse corpo. Um corpo é também considerado isotrópico, quando suas propriedades elásticas são consideradas iguais em todas as direções. Quando as propriedades elásticas do

material são diferentes em direções distintas, como exemplo a maior parte dos materiais compostos (BARROS, 2004), o material pode apresentar também o comportamento ortótropo ou anisotrópico. Os materiais têm comportamento ortótropo quando as propriedades no plano são iguais, mas distintas das que ocorrem numa direção ortogonal a esse plano. O material possui comportamento anisotrópico quando as propriedades diferem quanto à direção considerada do carregamento.

Na Figura 11, apresenta-se uma viga em balanço, em que uma extremidade encontra-se fixa e a outra em balanço. A origem do eixo de coordenadas está representada no ponto de engaste (A).

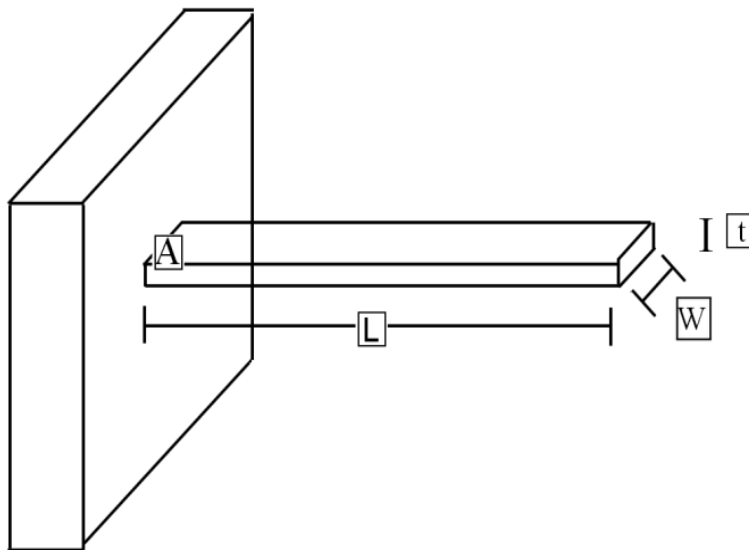


Figura 11 Viga engastada típica. A - ponto de origem da viga, L - comprimento da viga, W - largura da viga, t - espessura da viga.

Se a extremidade livre da viga é submetida a uma carga pontual P, a viga sofre flexão (Figura 12).

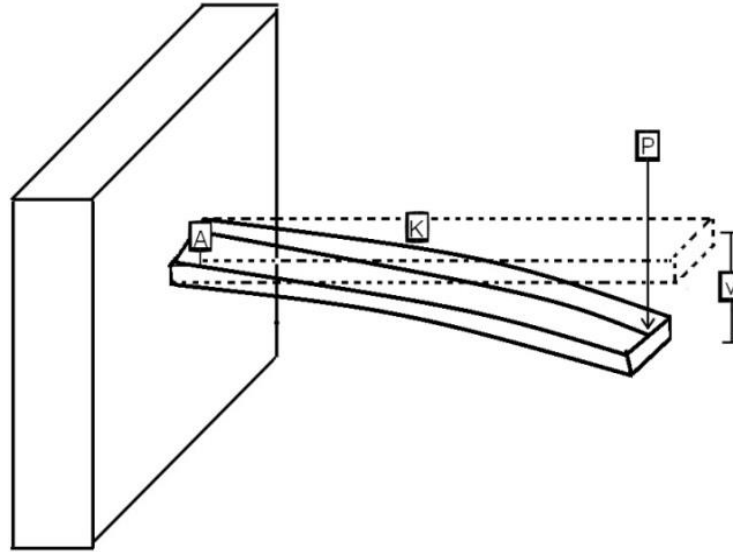


Figura 12 Arco de deflexão do feixe sob a carga no final fixo. K - curvatura da viga, P - carregamento, v - deslocamento vertical.

Admitindo que a viga sofra pequenas deformações, encontra-se na região elástica linear e possua seção transversal, as Equações 14 e 15 podem ser utilizadas.

A curvatura da viga (K) é igual à segunda derivada parcial da deflexão que sofre a mesma submetida a um carregamento (GERE; TIMOSHENKO, 1997),

$$k(x) = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (14)$$

sendo que a curvatura da viga pode também estar relacionada com o momento de flexão M , e a rigidez à flexão EI ,

$$k(x) = \frac{M}{EI} \quad (15)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material, M é o momento fletor e I é o momento de inércia.

O momento fletor pode ser relacionado com a força de cisalhamento V , e a carga lateral q , sobre a viga, por meio das equações 16 e 17.

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (16)$$

$$V = EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \quad (17)$$

$$q = -EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (18)$$

Considerando-se carregamento distribuído q , o mesmo pode ser representado por:

$$q(x) = 0 \quad (19)$$

$$V(x) = P \quad (20)$$

$$M(x) = -PL\left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (21)$$

Assim, a solução da Equação (16) é:

$$\frac{\partial v}{\partial x}(x) = \int_{x=0}^x M(x)dx = -\frac{PL}{EI}\left(x - \frac{x^2}{2L}\right) \quad (22)$$

$$v(x) = \int_{x=0}^x \frac{\partial v}{\partial x} dx = -\frac{PL}{EI}\left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6L}\right) \quad (23)$$

Na Equação (23), é estabelecida, analiticamente, o deslocamento vertical ao longo de uma viga em balanço na linha neutra, desde o ponto de engaste ($x=0$) até o ponto de aplicação da carga ($x=L$). Nesse caso, o deslocamento vertical, no ponto $x=L$, é representado por:

$$v(L) = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (24)$$

3.4 Métodos dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta numérica normalmente empregada na engenharia para prever falhas na etapa de projeto. O objetivo principal do MEF é evitar, sempre que possível, a construção de protótipos e testes no intuito de reduzir custo e tempo na etapa de desenvolvimento de novos produtos. O MEF tem o intuito de verificar o comportamento do produto ou processo, de acordo com suas especificações do projeto em condições de trabalho. Esse método considera cada corpo sólido como um conjunto de pequenos elementos interligados por um conjunto de nós (VALLEJO et al., 2014).

O comportamento de cada um desses elementos é obtido individualmente pela formulação de um sistema de equações diferenciais e

algébricas. As incógnitas são os deslocamentos dos nós, de acordo com o qual se devem expressar os movimentos dos pontos do interior de cada elemento, pela formulação de uma hipótese. O conjunto de equações, representando todo o sólido, pode ser resolvido com o auxílio de algoritmos específicos. Basicamente, a resolução da equação do movimento se dá pela equação (Equação 25):

$$[M]\{u(t)\} + [C]\{u(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (25)$$

onde $[M]$ é a matriz de massa, $[C]$ é a matriz de amortecimento, $[K]$ é a matriz de rigidez, $\{u\}$ é o vetor deslocamento, $\{f(t)\}$ é o vetor de forças (VALLEJO et al., 2014).

As hipóteses que surgem no desenvolvimento do MEF são:

- O meio contínuo é dividido em um número finito de elementos, cujo comportamento é definido por um conjunto finito de parâmetros ou graus de liberdade.

- Os elementos são ligados entre si por um número discreto de pontos, chamados nós, localizado, principalmente, nas arestas dos elementos (embora possa haver nós interiores). Os deslocamentos dos nós são as variáveis desconhecidas do problema.

- O campo de deslocamento no interior de cada elemento é determinado pelas funções de forma, que se relaciona com o movimento dos nós desse elemento. Isto é, o elemento é deformado, mas a deformação é conhecida como uma função dos deslocamentos dos nós.

- As funções de forma são escolhidas pelo usuário, quando o modelo for criado, no momento em que se define o tipo de elemento.

- Um sistema de forças concentradas nos nós é aplicado, de modo que as tensões atuantes sobre cada elemento possam ser determinadas.

Os passos a serem realizados no MEF são definidos, conforme a Figura 13:

1. Dividir a geometria em uma malha de elementos finitos. Esse passo caracteriza o grau de confiança dos resultados e é denominado por desratização.
2. Aplicar as propriedades dos materiais.
3. Aplicar os carregamentos adequados ao tipo de geometria.
4. Aplicar as condições de contorno de engaste.
5. Resolver o sistema de equações e obter a resposta em tensões ou deslocamentos.

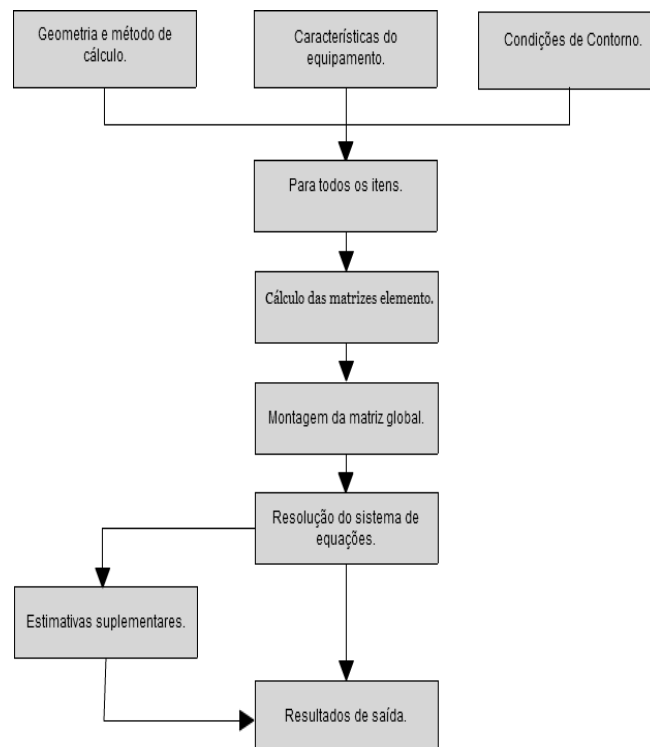


Figura 13 Os passos a serem realizados no MEF
Fonte: Adaptado de Vallejo et al. (2014)

4 MATERIAL E MÉTODOS

Na realização das diversas abordagens propostas como objetivo deste trabalho, ele foi dividido em três etapas:

- a) desenvolvimento de um procedimento experimental para medir deslocamentos de vigas em balanço baseado na técnica DIC;
- b) avaliação da técnica DIC para diversos tipos de marcações nas amostras;
- c) verificação do potencial de aplicação do DIC para medição de deslocamentos em vigas, em balanço, quando comparado com a Teoria de Elasticidade e o método de Elementos Finitos.

O preparo da primeira etapa foi realizado nos laboratórios da UFLA – Laboratório de Mecânica e Automação I e no Laboratório de Óptica n° 4, no Centro de Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA); pertencentes ao Departamento de Engenharia da UFLA – Universidade Federal de Lavras.

4.1 Procedimentos experimentais via DIC

Na primeira etapa, foi o preparo dos procedimentos experimentais que foram divididos em três testes, no primeiro foi feita uma aplicação de pontos aleatórios de tinta preta em um papel comum branco com uma distância de aplicação 250 mm.

No segundo teste, foram preparadas cinco vigas de Aço A36, com as mesmas dimensões: comprimento 150 mm e seção transversal 3,2 mm x 25 mm. Sendo que, cada viga foi pintada com tinta branca e, após, foram realizadas várias marcações aleatórias de pontos pretos. E, por último, realizou-se um orifício de cinco mm de diâmetro na parte direita de todas as vigas para fixá-las com o suporte dos carregamentos.

No terceiro teste, foi preparada 1 viga de Aço A36, com as dimensões: comprimento 215 mm e seção transversal 3 mm x 30 mm. Sendo que, a viga foi pintada com tinta branca e após foi realizada a dispersão de pontos aleatórios de tinta preta. E, por último, realizou-se um orifício de 5 mm de diâmetro na parte esquerda de todas as vigas.

Na Figura 14, observa-se a montagem e a calibração do aparato experimental, onde foi confeccionado um suporte para posicionar as vigas de aço ASTM A36, assim como para capturar as imagens antes e após da aplicação dos carregamentos. Utilizando-se uma câmera Dino-Lite Digital Microscope Premier Rp 116819. Interface USB 2.0 com resolução de 5 Megapixel e ampliação do foco na lente podendo variar entre 10x ~ 50x e 200x, onde foram utilizados para os testes a de 50x. Assim tendo 145 mm de distância entre a câmera em relação às vigas.

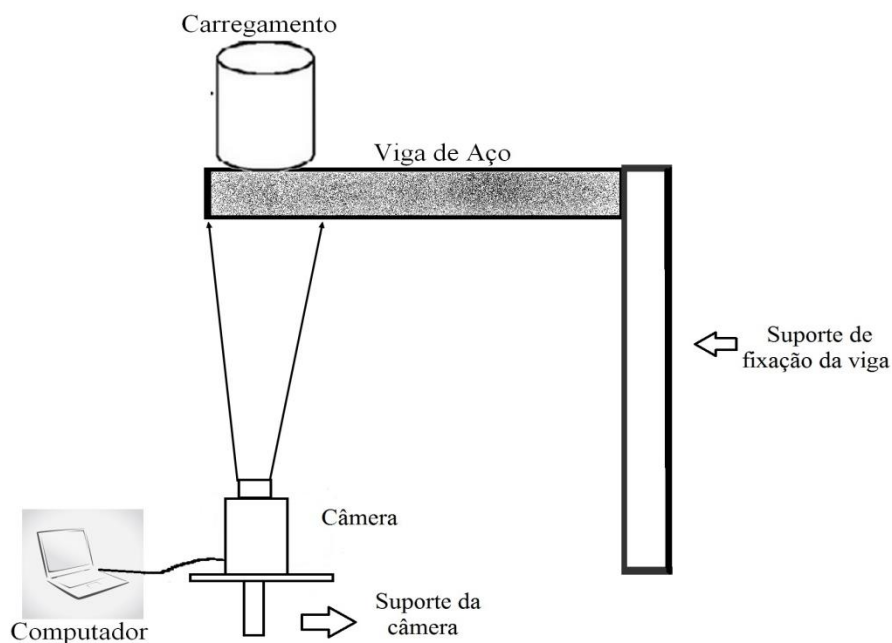


Figura 14 Arranjo experimental para a utilização da técnica DIC

4.2 Diversos tipos de marcações nas amostras

Na segunda etapa, utilizou-se a técnica DIC, realizando vários tipos de marcações no objeto de estudo, os quais podem ser identificados nos três testes descritos a seguir.

4.2.1 Pontos aleatórios de tinta preta no papel

No primeiro teste, foram aplicados pontos aleatórios de tinta preta em um papel comum branco, onde o papel foi sobreposto sobre uma mesa. Primeiro, capturou-se um imagem do papel com os pontos pretos sem nenhum deslocamento (imagem de referência), Figura 15. Após, aplicou-se deslocamento de 1 mm em sentido vertical de baixo para cima no papel. Em seguida capturou-se a imagem (imagem deformada), Figura 16.

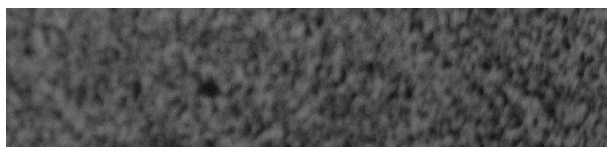


Figura 15 Imagem de referência (papel branco)

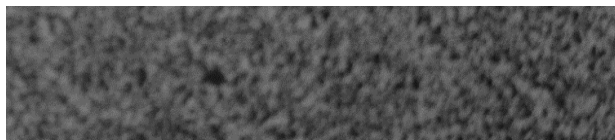


Figura 16 Imagem deformada (papel branco)

4.2.2 Pontos aleatórios desenhados na viga

No segundo teste, utilizaram cinco vigas de Aço A36 onde se desenharam pontos pretos aleatoriamente com o auxílio de dois marcadores; o

primeiro marcador de ponta fina de aproximadamente 1 mm. (pontos pequenos) e o segundo de ponta média de aproximadamente 2 mm. (pontos grandes).

As cinco vigas com pontos aleatórios pretos tiveram as seguintes configurações: (a) pequenos e próximos, sendo de 1 mm a distância entre eles (Viga 1); (b) pequenos e afastados, sendo de 5 mm a separação entre eles (Viga 2); (c) grandes e próximos, sendo de 3 mm a separação entre eles (Viga 3); (d) grandes e afastados, sendo de 5 mm a separação entre eles (Viga 4); (e) mistos, sendo de 5 mm a separação entre eles (Viga 5).

Após os pontos aleatórios desenhados nas cinco vigas de aço, foram aplicados os seguintes carregamentos: 1kg, 2kg e 5kg na parte direita de cada viga. Para isso, foram utilizados 20 mm para fixar a parte esquerda delas e a câmera capturou 38 mm internos, começando em 5 mm após a parte esquerda da fixação da viga (Figura 17 a 21).

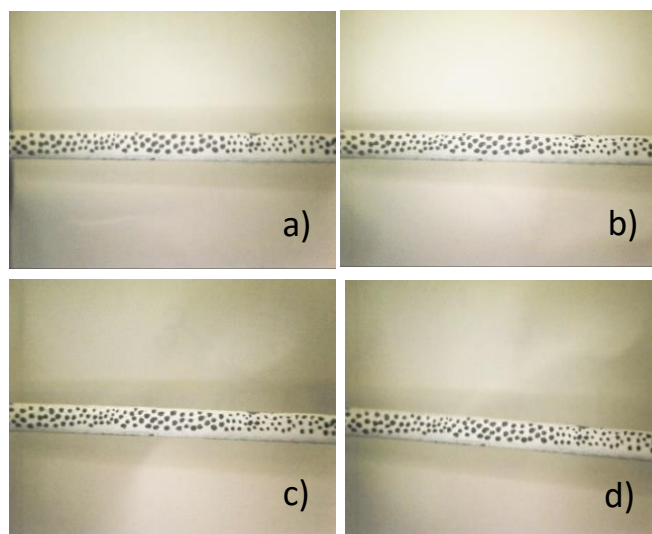


Figura 17 Viga de aço com pontos pequenos e próximos. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg

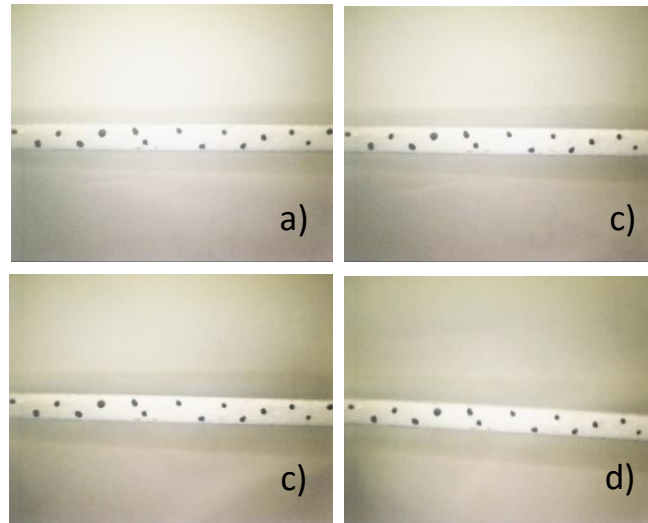


Figura 18 Viga de aço com pontos pequenos e afastados. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg.

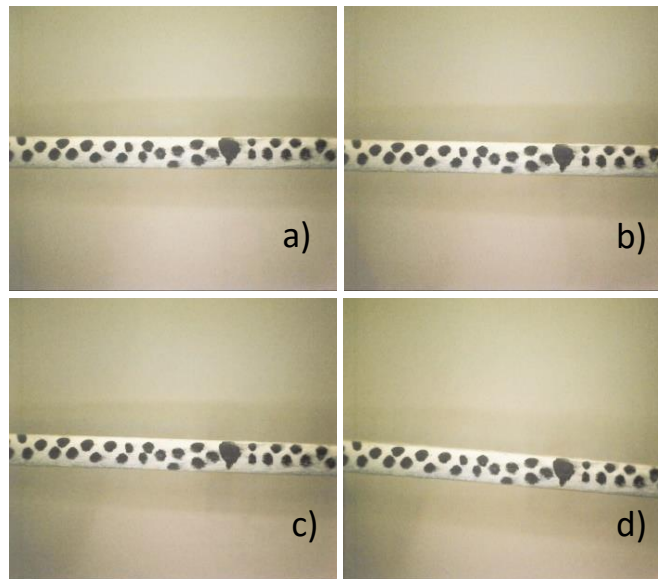


Figura 19 Viga de aço com pontos grandes e próximos. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg

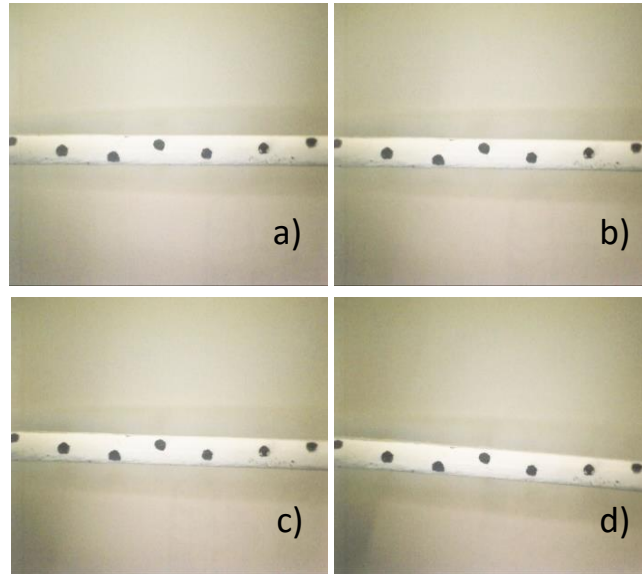


Figura 20 Viga de aço com pontos grandes e afastados. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg

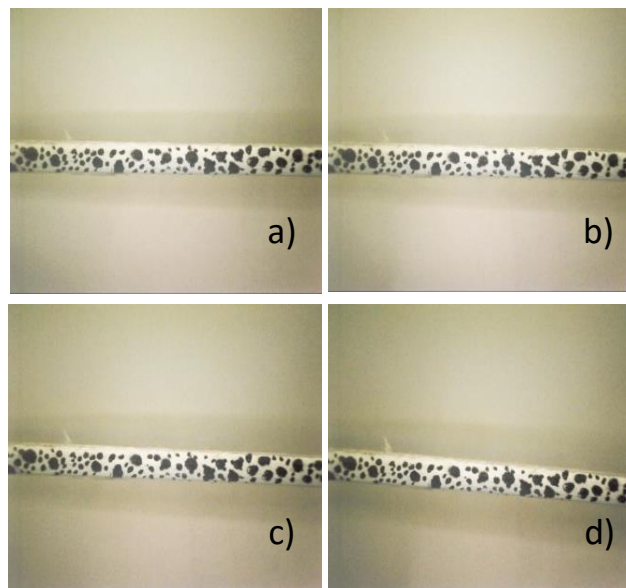


Figura 21 Viga de aço com pontos grandes e pequenos. a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 1Kg; c) viga com carregamento de 2kg; d) viga com carregamento de 5kg

4.2.3 Dispersão aleatória de tinta na viga

No terceiro teste, utilizou-se uma viga de Aço A36 na qual foram gerados pontos aleatórios na superfície do corpo-de-prova, para que tivesse uma intensidade na escala de cinza. Neste teste, foram aplicados, em uma extremidade da viga, carregamentos de 50g, 100g, 200g, 500g, 1 kg, 2 kg e 5 kg, ilustrados na Figura 22. A outra extremidade da viga foi fixada com 57 mm e a câmera capturou um comprimento de 36 mm a partir do orifício executado na viga.

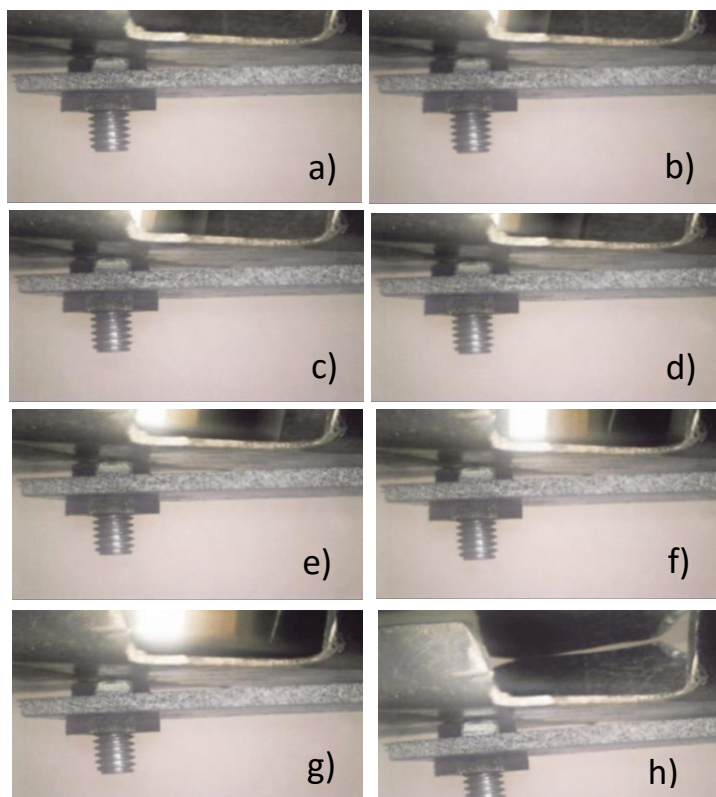


Figura 22 a) imagem de referência; b) viga com carregamento de 50g; c) viga com carregamento de 100g; d) viga com carregamento de 200g; e) viga com carregamento de 500g; f) viga com carregamento de 1kg; g) viga com carregamento de 2kg; h) viga com carregamento de 5kg

4.3 O potencial da técnica DIC comparada com a teoria

Na terceira etapa, foram comparados os resultados obtidos com a Teoria de Elasticidade (Equação 23) e o MEF, a fim de avaliar o potencial do DIC, que serão descritos na secção de resultados. Para validação via MEF, a viga de Aço A36 foi modelada no software comercial Ansys com uma malha de 231387 nós e 51843 elementos do tipo hexaedro de 8 nós cada um. Observa-se, na Figura 23, a região engastada da viga, na Figura 24 a região onde os carregamentos foram aplicados e, na Figura 25, a malha gerada.

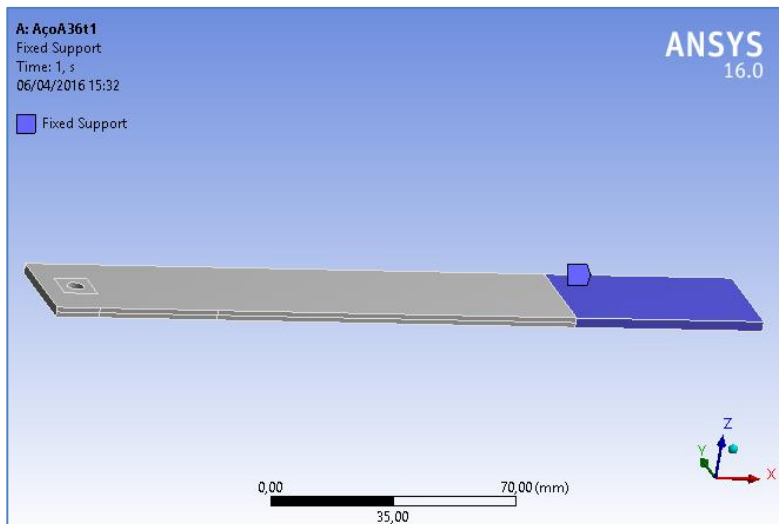


Figura 23 Parte engastada da viga

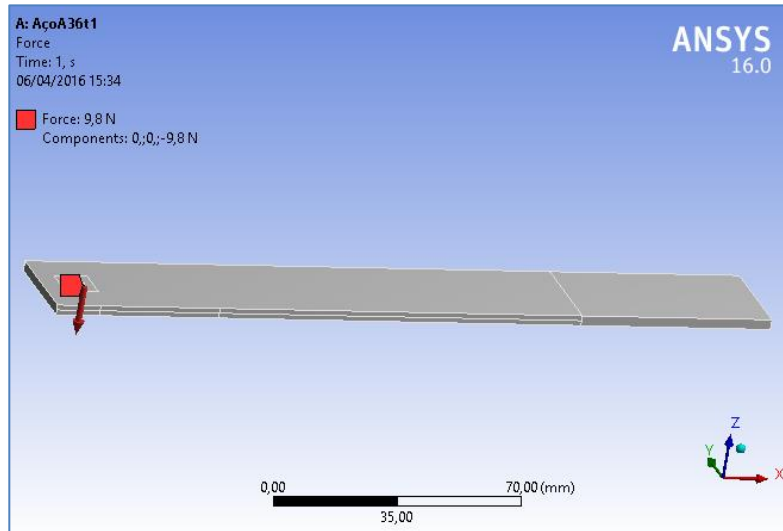


Figura 24 Carregamento de 1kg

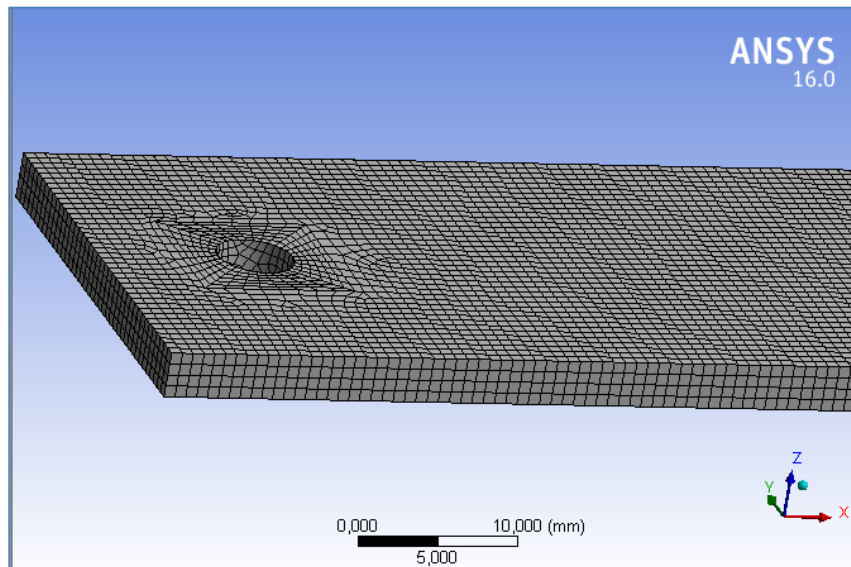


Figura 25 Malha gerada para a viga

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Pontos aleatórios desenhados no papel

Na Figura 26, são ilustrados os resultados do processamento das imagens (imagem de referência e a imagem deformada) com os pontos pretos desenhados no papel pelo software Ncorr, baseada em DIC. Previamente aplicou-se *threshold* do programa *ImageJ*, obtendo um resultado não satisfatório, em decorrência desse procedimento, pelo qual perdeu informação na escala de cinzas, não podendo identificar assim os deslocamentos no eixo y.

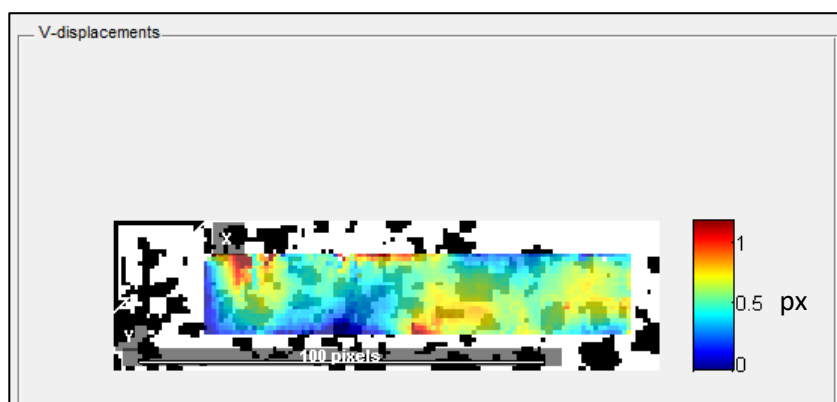


Figura 26 Imagem do papel processada via DIC usando *threshold*

Na Figura 27, são ilustrados os resultados do processamento das imagens originais do papel (imagem de referência e deformada) sem tratamento, obtendo um resultado mais satisfatório, conseguindo identificar em vermelho o deslocamento máximo e em azul o deslocamento mínimo em pixels.

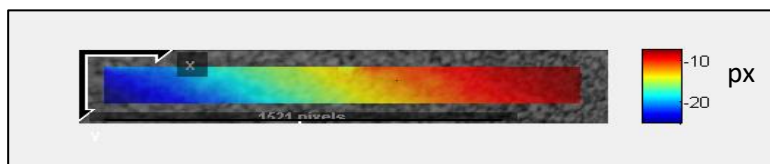


Figura 27 Imagem do papel processada via DIC sem *threshold*

Esses resultados indicam aos usuários da técnica DIC que o processamento utilizando *threshold* não obtém correlação, enquanto aos processamentos das imagens originais obteve-se o maior deslocamento no eixo *y* de 10 pixels do lado direito da folha onde aplicou-se o deslocamento de 1mm.

5.2 Pontos aleatórios desenhados na viga

A fim de conferir a efetividade da técnica DIC, diante dos pontos aleatórios desenhados na viga de Aço A36, com os carregamentos de 1kg, 2kg e 5kg, compararam-se os resultados com a Teoria da Elasticidade.

Na Figura 28, ilustra-se o processamento da imagem de referência (sem carregamento) e a imagem com carregamento de 1kg, aplicado no lado direito da viga (imagem deformada) com os pontos aleatórios pequenos e próximos, de 1 mm de diâmetro e de separação entre eles na viga de Aço A36 pelo software Ncorr, baseado no DIC. Sendo que, os resultados apresentam os deslocamentos na direção *y*. Observam-se na parte esquerda da viga valores mínimos, ilustrados pela cor azul (deslocamento aproximado de 6 pixels) e na parte direita da viga valores máximos de deslocamentos, com aproximadamente 14 pixels, ilustrados pela cor vermelha.

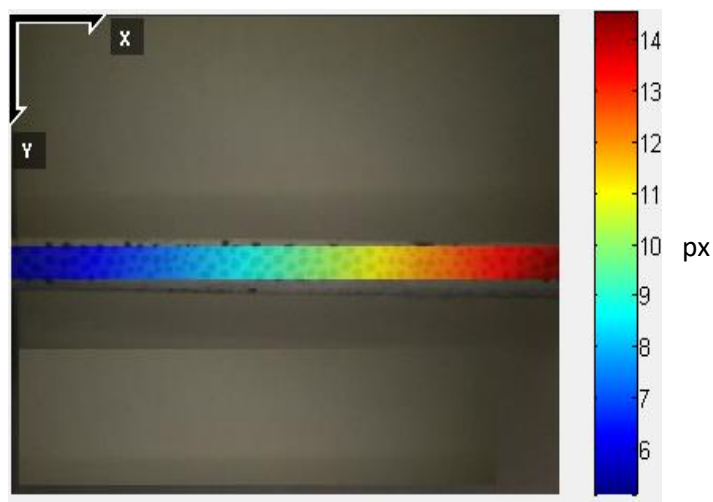


Figura 28 Deslocamentos de 1 kg no Ncorr em pixels

Verifica-se que nos diferentes padrões, feitos manualmente nas cinco vigas, os melhores resultados foram identificados tanto nos pontos pequenos e próximos e grandes e próximos, já que neles há maior informação na escala de cinza na viga, o qual deve ter também a maior aleatoriedade de pontos pretos.

Na Figura 29, ilustram-se os resultados dos deslocamentos obtidos analiticamente, mediante a teoria de elasticidade (Equação 23) e os resultados das análises DIC no Ncorr com o carregamento de 1kg. Observam que o eixo x é dado em pixels e o eixo y em milímetros. Podendo encontrar uma diferença de aproximadamente 0.15 milímetros, ao início entre os resultados, mas perdem a linearidade entre ambas as curvas ao longo do eixo. Os mesmos procedimentos foram aplicados para os carregamentos de, 2kg e 5kg (ANEXO B).

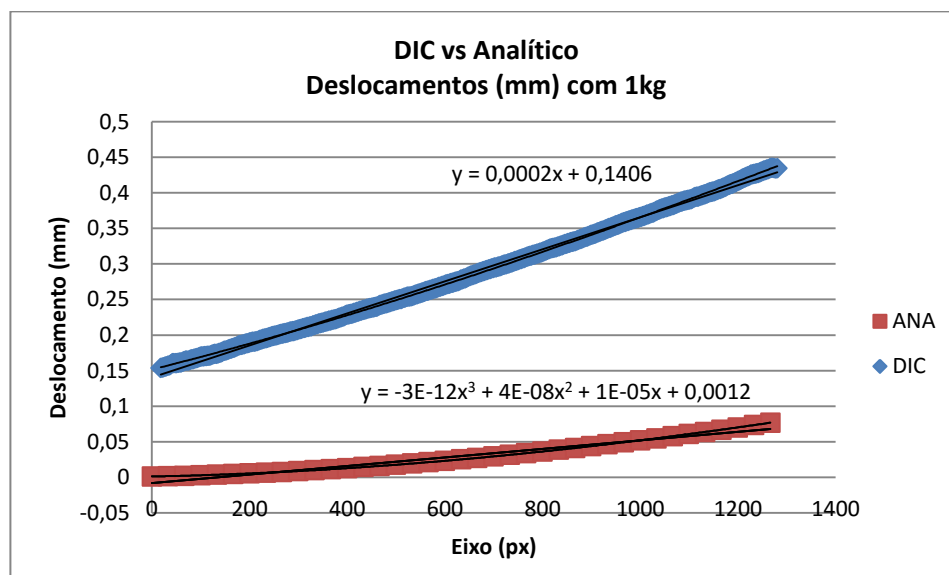


Figura 29 Deslocamentos DIC vs. Analítico

5.3 Dispersão aleatória de tinta na viga

A fim de conferir a efetividade da técnica DIC diante da dispersão aleatória de tinta na viga de Aço A36, com os carregamentos de 50g, 100g, 200g, 500g, 1kg, 2kg e 5kg, comparou os resultados com a Teoria da Elasticidade e o método de Elementos Finitos (MEF).

Na Figura 30, ilustra-se o processamento da imagem de referência (sem carregamento) e a imagem com carregamento de 1kg, aplicado no lado esquerdo da viga (imagem deformada) com a dispersão aleatória de pontos pretos na viga de Aço A36 pelo software Ncorr, baseado no DIC. Sendo que, os resultados apresentam os deslocamentos na direção y. Observa-se, na parte direita da viga, os valores mínimos, ilustrados pela cor azul (deslocamento aproximado de 30 pixels) e na parte esquerda da viga valores máximos de deslocamentos, com aproximadamente 42 pixels, ilustrados pela cor vermelha.

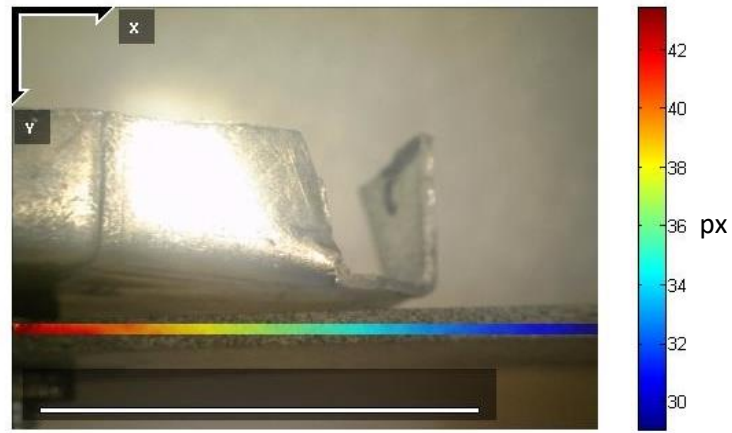


Figura 30 Descolamentos de 1 kg via DIC

Na Figura 31, são ilustrados os resultados dos deslocamentos obtidos analiticamente mediante a teoria de elasticidade (Equação 23) e os resultados das análises DIC com o carregamento de 1kg. Observam que o eixo x é dado em pixels e o eixo y em milímetros. Podendo encontrar uma diferença de aproximadamente 0.3 milímetros entre os resultados e que ambos seguem uma linearidade. Os mesmos procedimentos foram aplicados para os carregamentos de 50g, 100g, 200g, 500g, 2kg e 5kg (ANEXO C), observando que, os resultados mais satisfatórios foram obtidos a partir do carregamento de 1 kg.

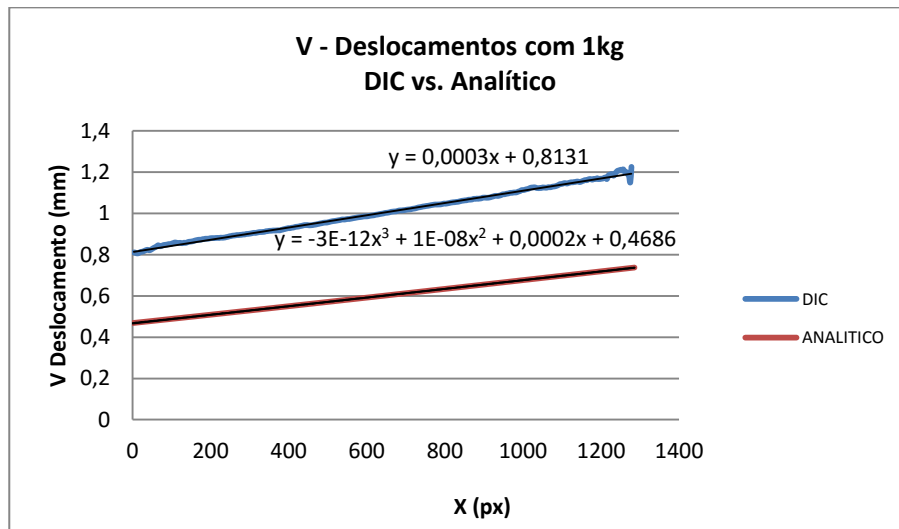


Figura 31 Deslocamentos DIC vs. Analítico

No gráfico da Figura 32, são ilustrados os resultados de deslocamentos de todos os carregamentos obtidos mediante a técnica DIC, podendo-se notar, que, em todos os carregamentos, os deslocamentos são crescentes a partir do aumento da distância do ponto medido até a região de aplicação do carregamento na viga de aço A36.

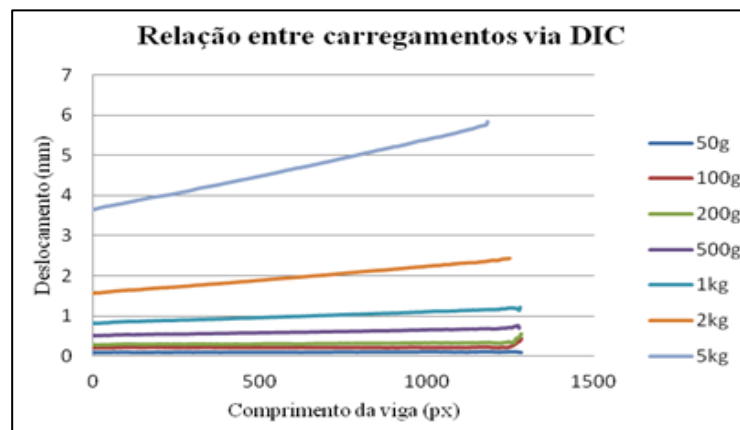


Figura 32 Deslocamentos de todos os carregamentos via DIC

Na Figura 33, são ilustrados os deslocamentos simulados na viga de aço A36 com o carregamento de 1kg por meio do método de Elementos Finitos.

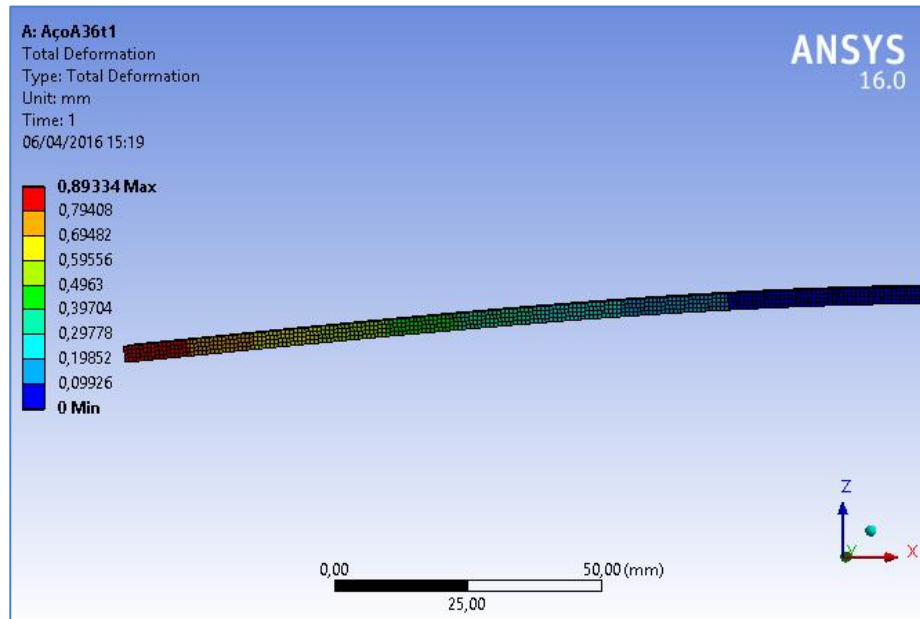


Figura 33 Deslocamentos em cores na viga de aço A36 com o carregamento de 1kg em milímetros

Na Figura 34, ilustra-se o ponto mínimo de deslocamento e na Figura 35, ilustra-se o ponto máximo de deslocamento na viga de aço A36 obtidos da imagem deformada via DIC com o carregamento de 1kg. Ao comparar os resultados dos deslocamentos em milímetros obtidos por meio de Elementos Finitos (MEF) com os resultados de deslocamentos via DIC em milímetros, pode-se identificar uma diferença média de 0,36 mm entre ambos os resultados.

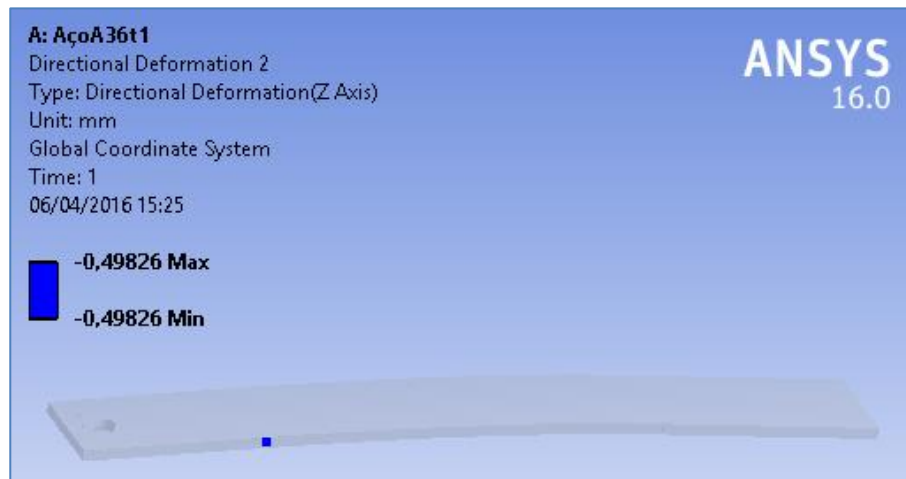


Figura 34 Ponto mínimo de deslocamento



Figura 35 Ponto máximo de deslocamento

6 CONCLUSÕES

A configuração experimental sugerida mostrou-se satisfatória, podendo ser aplicado para medir deslocamentos de vigas em balanço baseado na técnica DIC, sendo realizados vários testes em vigas de aço A36, já que o aparato experimental obteve medidas precisas para resultados da técnica.

A técnica de correlação digital de imagens foi eficaz na identificação dos deslocamentos, na viga de aço, sendo possível trabalhar com vários padrões, entre eles os pontos desenhados e a dispersão de pontos aleatórios. Após realizar esses testes concluiu-se que os melhores resultados foram obtidos com a dispersão de pontos aleatórios de tinta preta na superfície branca da viga com o carregamento de 1 kg. Sendo assim, obteve-se uma diferença de aproximadamente 0.3 milímetros, entre os resultados teóricos (Teoria de Elasticidade) com a DIC e ambos seguem uma linearidade. Esse resultado permite concluir que o padrão ideal é quando existe maior informação na escala de cinza na viga, a qual deve ter também a maior aleatoriedade de pontos pretos próximos entre si.

Enquanto comparado com o método de Elementos Finitos, concluiu-se que a técnica DIC é robusta, caracterizada pela vantagem de não ser uma técnica destrutiva e nem invasiva, conseguindo, dessa forma, medir a deformação vertical do material em estudo, utilizando apenas uma câmera para medições em 2D com um custo benefício baixo. Sendo assim, uma técnica possível de ser aplicada na engenharia civil, engenharia mecânica, ciências dos materiais e na engenharia biomédica. Com isso, pode ser usada e adaptada as mais diversas situações de medição, permitindo o processamento de um número elevado de imagens com rapidez. Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se realizar aplicação da técnica DIC em outros tipos de materiais e compará-las com outras técnicas de medições.

REFERÊNCIAS

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.

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

BARROS, J. A. O. **Conceitos básicos da teoria da elasticidade**. [S.l.]: ISISE, 2004. (Relatórios Técnicos/Científicos).

BLABER, J.; ADAIRI, B; ANTONIOU, A. Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software. **Experimental Mechanics**, Brookfield, v. 55, n. 6, p. 1105-1122, 2015.

BULNES, J. D. El método de correlación cruzada de matrices y la generación de un campo de desplazamientos para pequeñas esferas. **Latin-American Journal of Physics Education**, London, v. 7 n. 3, p. 498-503, Sept. 2013.

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.

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.

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.

GERE, J. M.; TIMOSHENKO, S. P. **Mechanics of materials**. 4. ed. Boston: PWS Publishing Company, 1997. 832 p.

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 & 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.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. 24 p.

NEGAHBAN, K. **Vibrations of cantilever beams: deflection, frequency, and research uses**. Scott Whitney: [s.n.], 1999. Disponível em: <<http://emweb.unl.edu/Mechanics-Pages/Scott-Whitney/325hweb/Beams.htm>>. Acesso em: 14 mar. 2015.

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

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.

SCHWIDER, J. Advanced evaluation techniques in interferometry. In: WOF, E. **Progress in optics**. (Ed.). New York: Elsevier, 1990. p. 271-359.

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.

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

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. 276 p.

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.

VALLEJO, L. et al. Nueva prótesis de maleovestibulopexia. Diseño y análisis experimental en un modelo computarizado 3D basado en elementos finitos. **Acta Otorrinolaringologica Española**, Madrid, v. 66, n. 1, p. 16-27, Jan./Feb. 2014.

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.

XU, L. et al. Measurement of electrostriction in bone using digital image correlation. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 65, p. 3-8, 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.

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.

ANEXO A – Software Ncorr

Uso do software Ncorr

Ncorr é uma ferramenta para correlação de imagens digitais desenvolvido na plataforma MATLAB. O programa Ncorr possui uma interface gráfica acessível e intuitiva, e utiliza algoritmo 2D-DIC (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015). O algoritmo contém ferramentas para a criação e plotagem de imagens. O fluxo de trabalho do Ncorr é ilustrado na Figura 1.

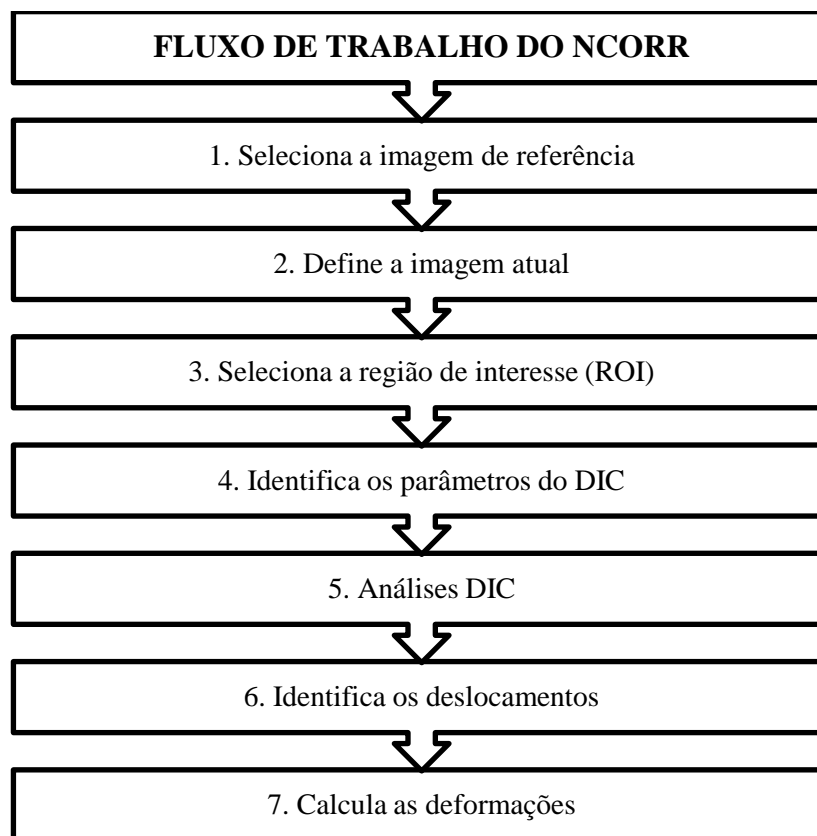


Figura 1 Fluxograma de trabalho do Ncorr

Na primeira etapa, seleciona a imagem de referência, a segunda etapa baseia-se na definição da imagem atual (deformada), na terceira etapa tem-se a seleção de região de interesse (ROI), na quarta etapa identificam-se os parâmetros do DIC, na quinta etapa realiza as análises DIC, a sexta etapa baseia-se na identificação dos deslocamentos e para finalizar na sétima são calculadas as deformações.

A tela do programa, incluindo a imagem de referência e a imagem deformada é representada na Figura 2.

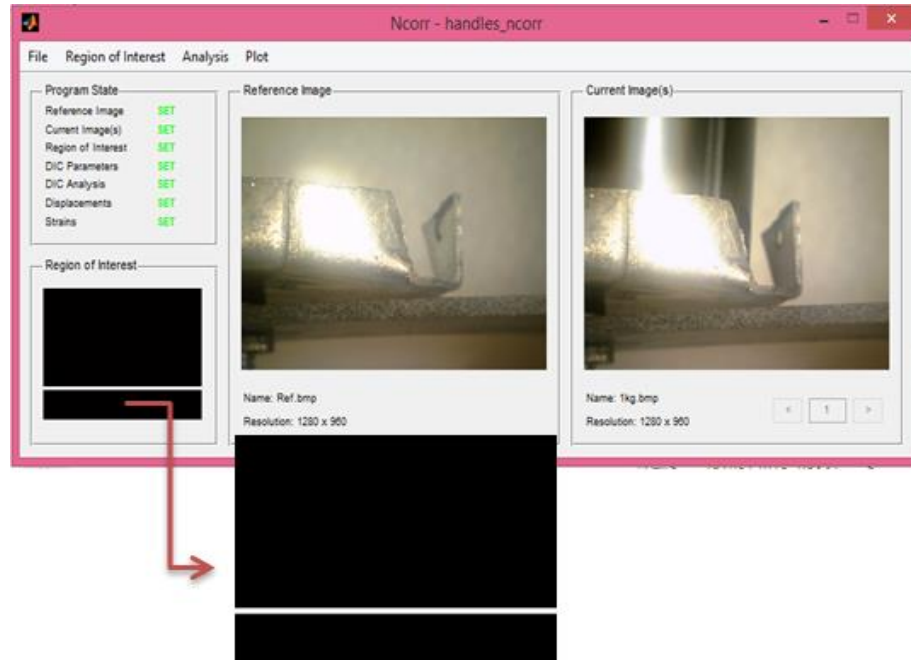


Figura 2 Estado do fluxo de trabalho de Ncorr

A última etapa de processamento das imagens Ncorr é a plotagem dos deslocamentos, que pode ser visualizada na direção x (deslocamento U) e na

direção y (deslocamento V). Para isso, uma escala de cores que é apresentada do menor até o maior deslocamento em pixels, conforme Figura 3.



Figura 3 Plotagem de deslocamentos V no Ncorr

Processamento das imagens

No processamento das imagens foi realizado a leitura das imagens a partir do uso do programa Ncorr® v1.2 (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015) a fim de processar todas imagens, utilizando a plataforma do Matlab® v.2010. Este processo utiliza um programa desenvolvido no Ncorr, que tem como objetivo obter o deslocamento em cada um dos pontos das imagens em estudo, por meio da comparação das imagens coletadas (após aplicação dos carregamentos) com as imagens de referência respectivamente (imagens obtidas das vigas sem carregamento).

Para a estimativa do deslocamento em cada ponto, as imagens devem ser divididas em conjuntos diferentes de forma uniforme, geralmente quadrada,

denominada por sub-região. Cada sub-região será processada para calcular o valor médio da escala de cinza, existente em cada uma delas. Para o processo de correlação da imagem deformada, uma área de análise deve ser definida, a qual é indicada pelo número de pixels em que os centros das sub-regiões se sobrepõem. Para um ponto P qualquer, uma dimensão $(2M + 1) \times (2M + 1)$ de pixels centrados no ponto $P = (X_0, Y_0)$ da imagem de referência será selecionado.

Para avaliar cada uma das sub-regiões da imagem de referência e a imagem deformada, um critério de correlação deve ser programado para a execução dos cálculos. A Figura 4 ilustra a sub-região de referência e a sub-região deformada para a determinação dos deslocamentos de dois pontos distintos utilizando a técnica DIC (ALBA et al., 2010).

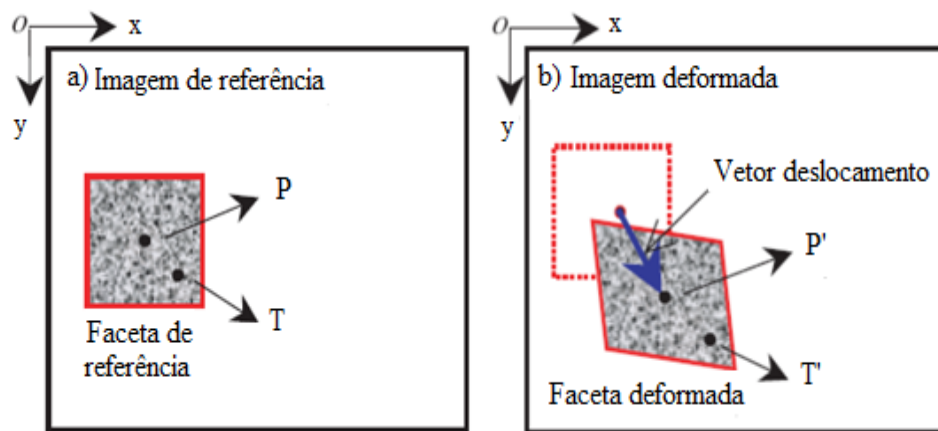
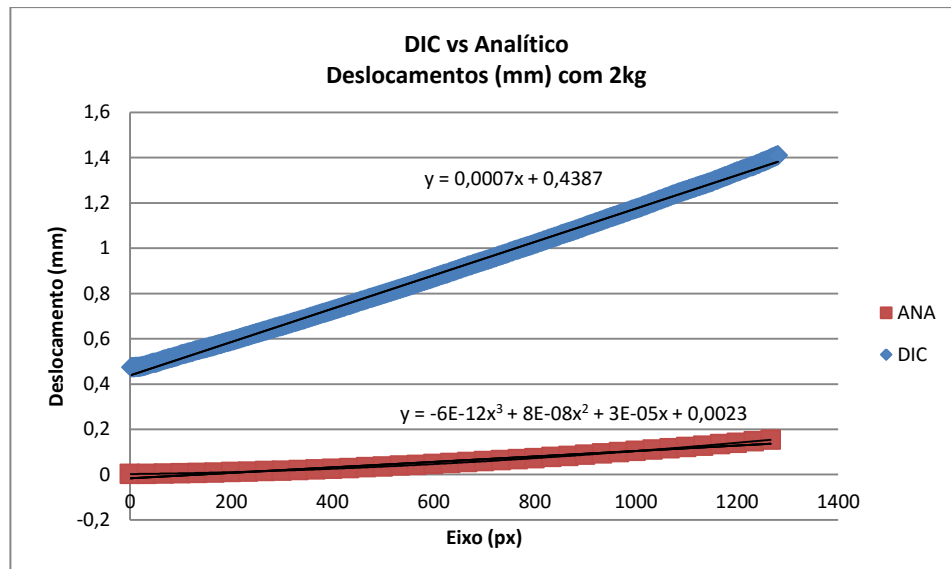


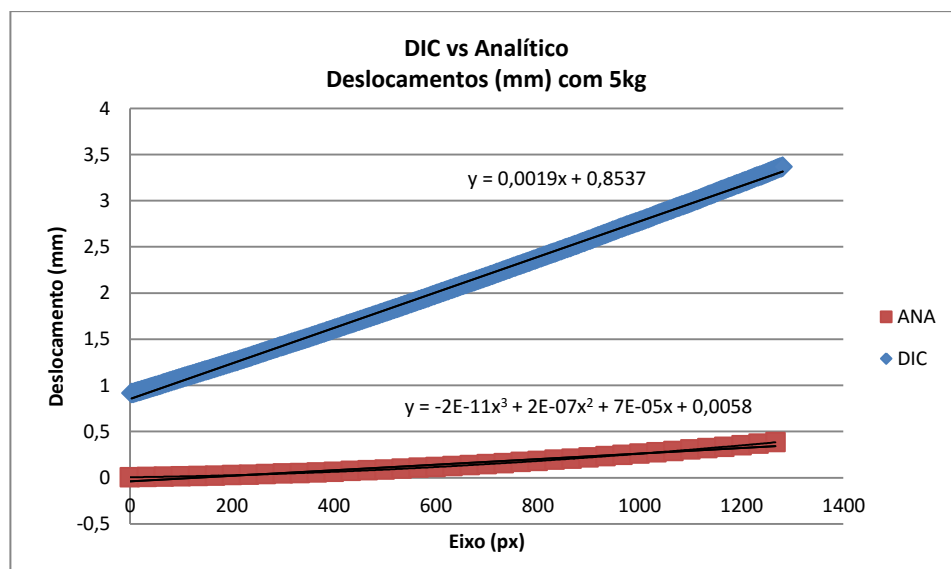
Figura 4 Imagem de referência e a imagem deformada
Fonte: Adaptado de Pan et al.(2009)

ANEXO B – Análises DIC (imagens com desenho de pontos)

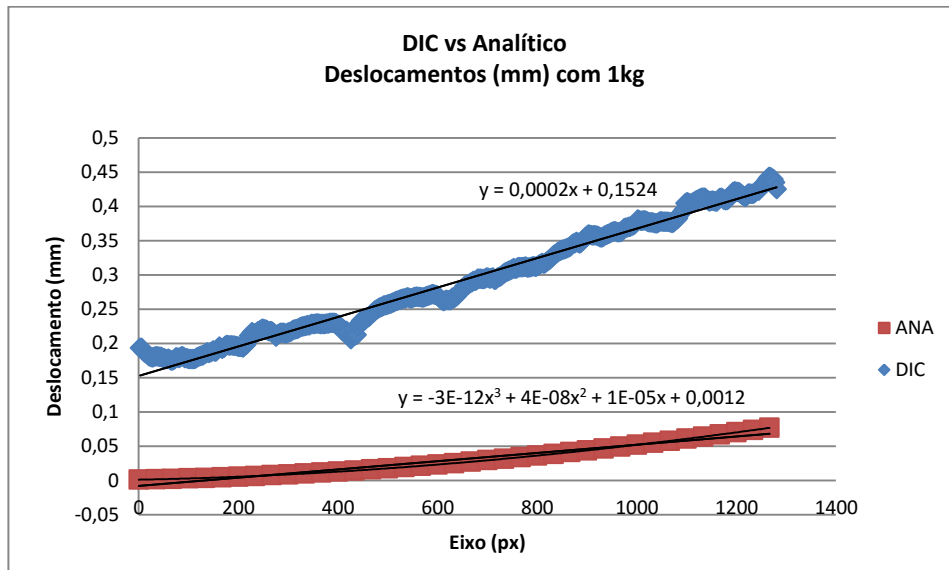
Deslocamentos na viga 1 de aço com o carregamento de 2kg no Ncorr



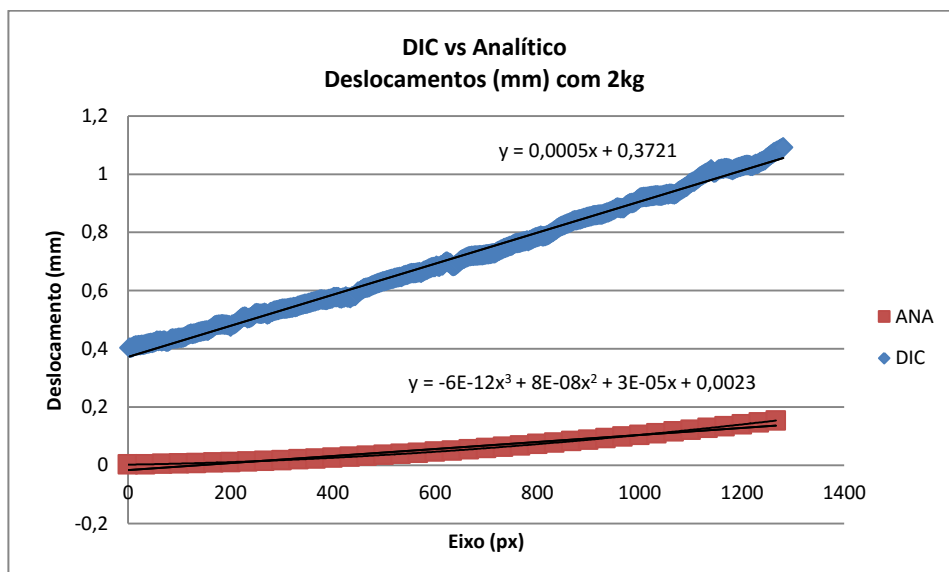
Deslocamentos na viga 1 de aço com o carregamento de 5kg no Ncorr



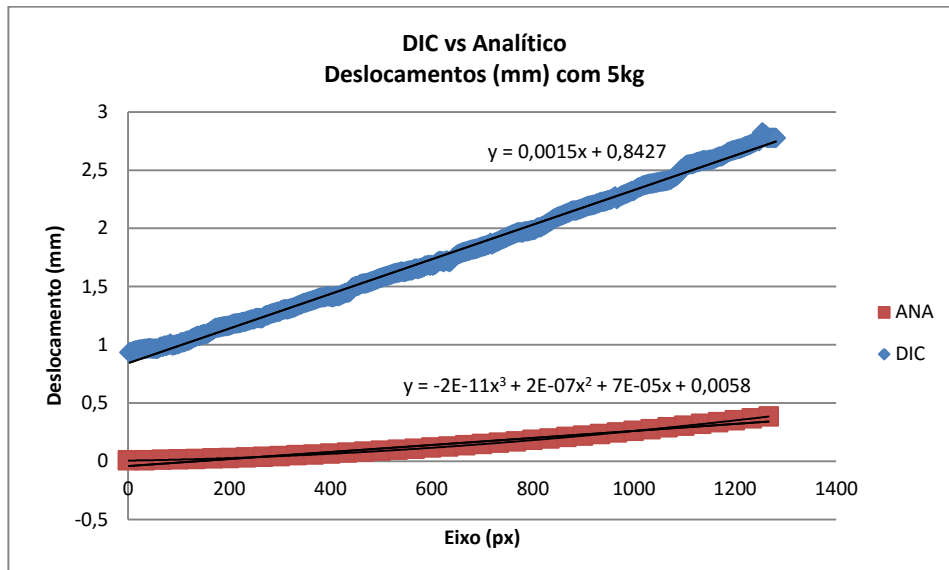
Deslocamentos na viga 2 de aço com o carregamento de 1kg no Ncorr



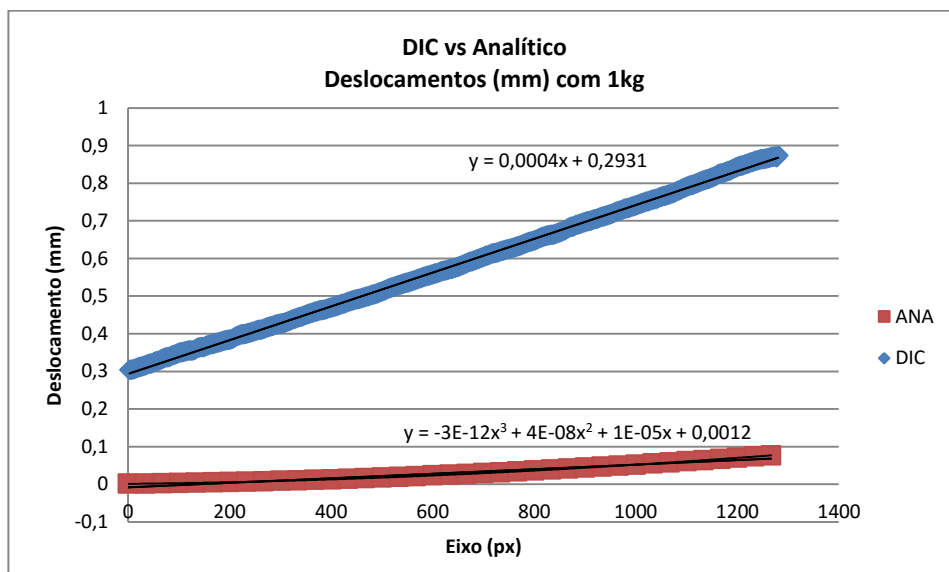
Deslocamentos na viga 2 de aço com o carregamento de 2kg no Ncorr



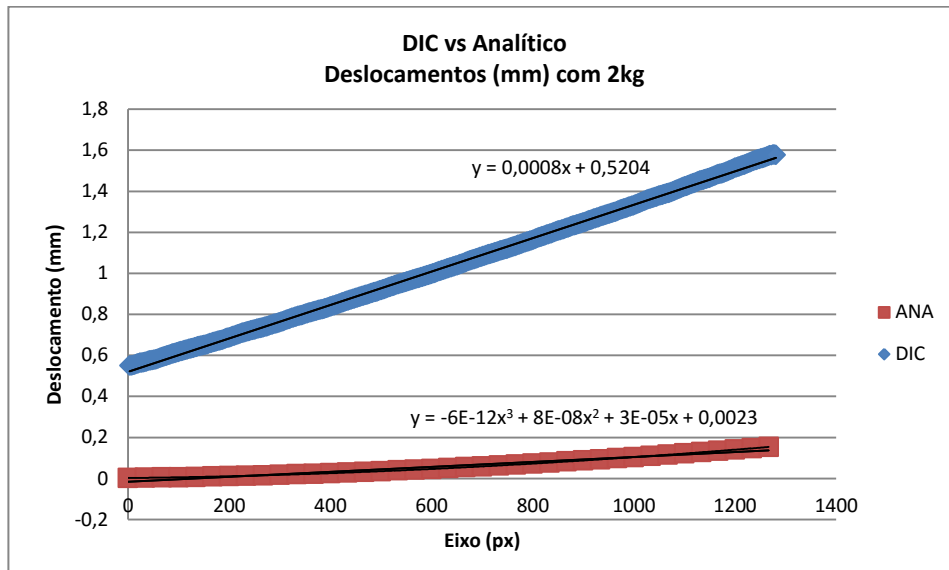
Deslocamentos na viga 2 de aço com o carregamento de 5kg no Ncorr



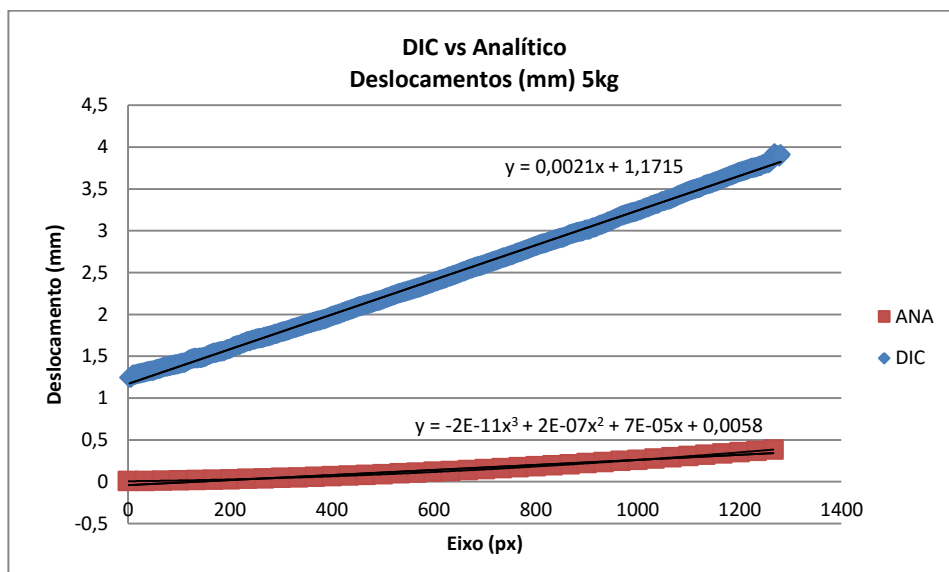
Deslocamentos na viga 3 de aço com o carregamento de 1kg no Ncorr



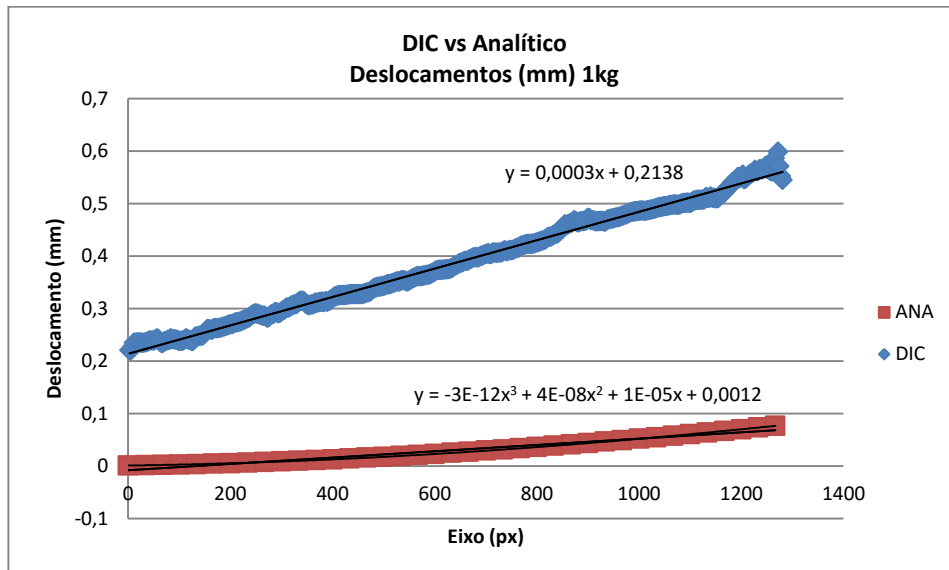
Deslocamentos na viga 3 de aço com o carregamento de 2kg no Ncorr



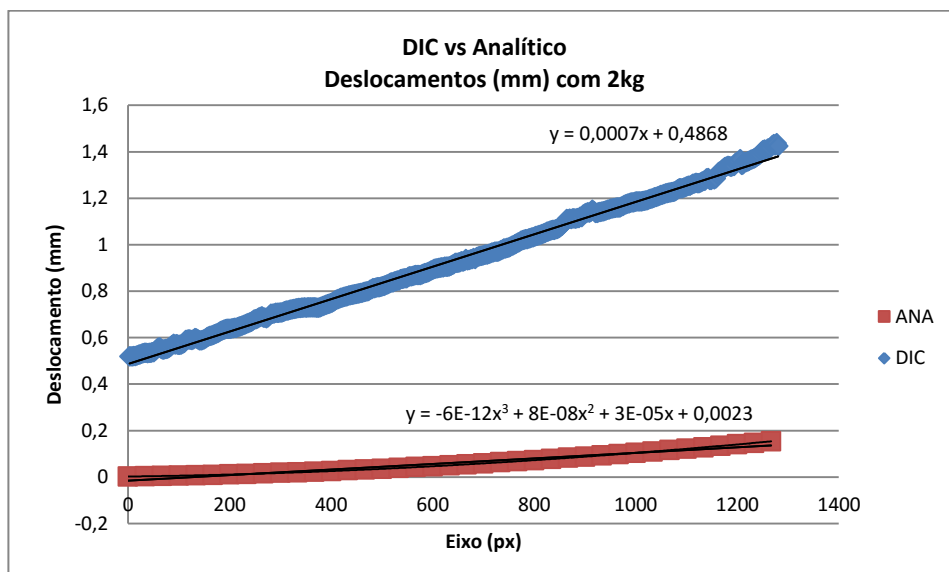
Deslocamentos na viga 3 de aço com o carregamento de 5kg no Ncorr



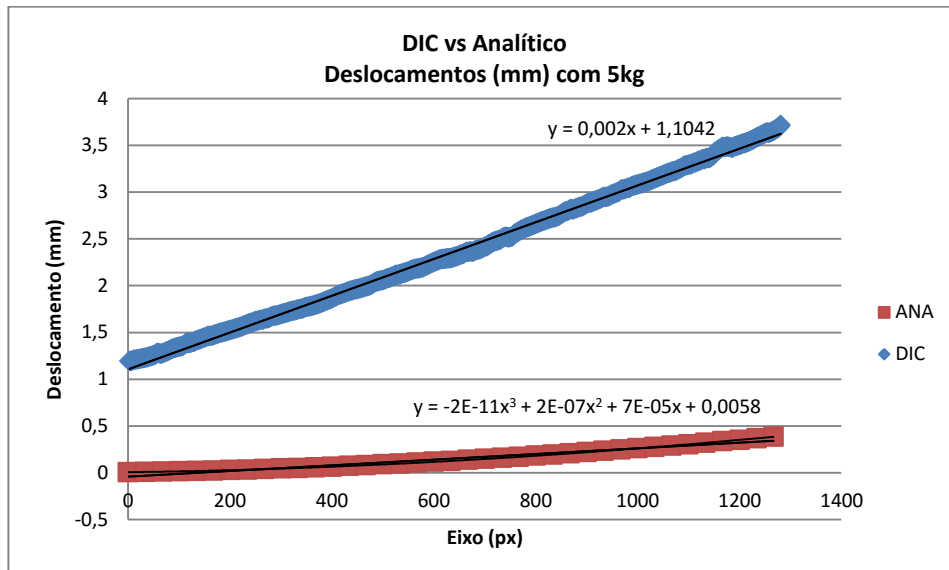
Deslocamentos na viga 4 de aço com o carregamento de 1kg no Ncorr



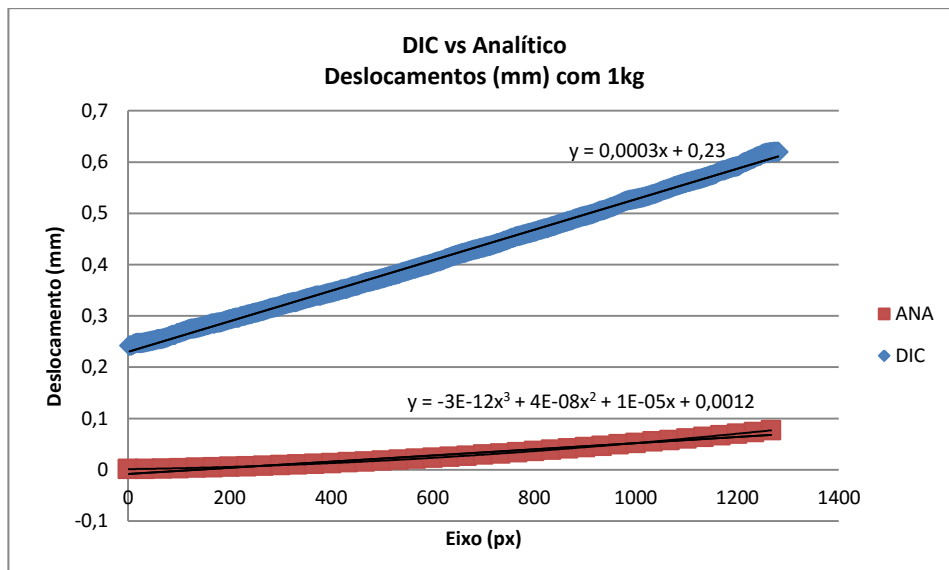
Deslocamentos na viga 4 de aço com o carregamento de 2kg no Ncorr



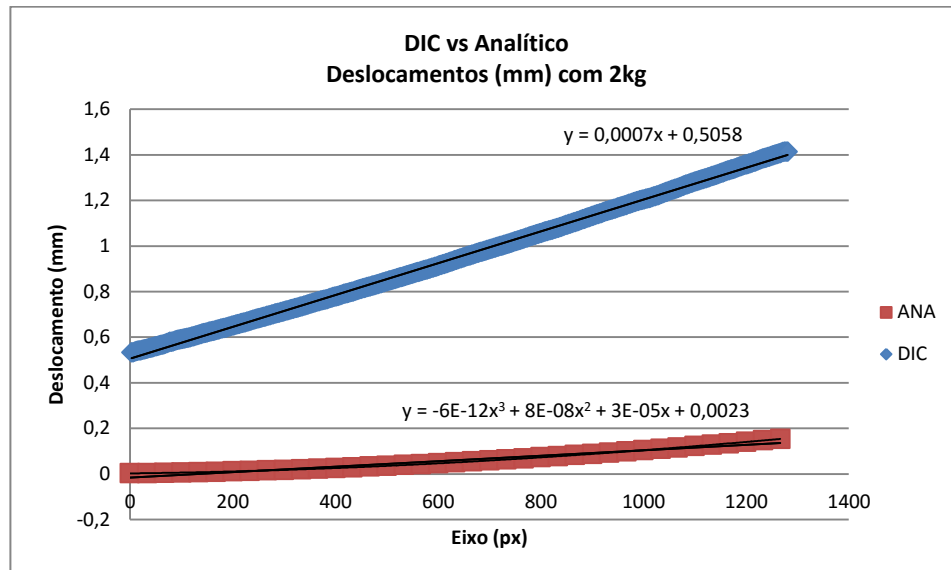
Deslocamentos na viga 4 de aço com o carregamento de 5kg no Ncorr



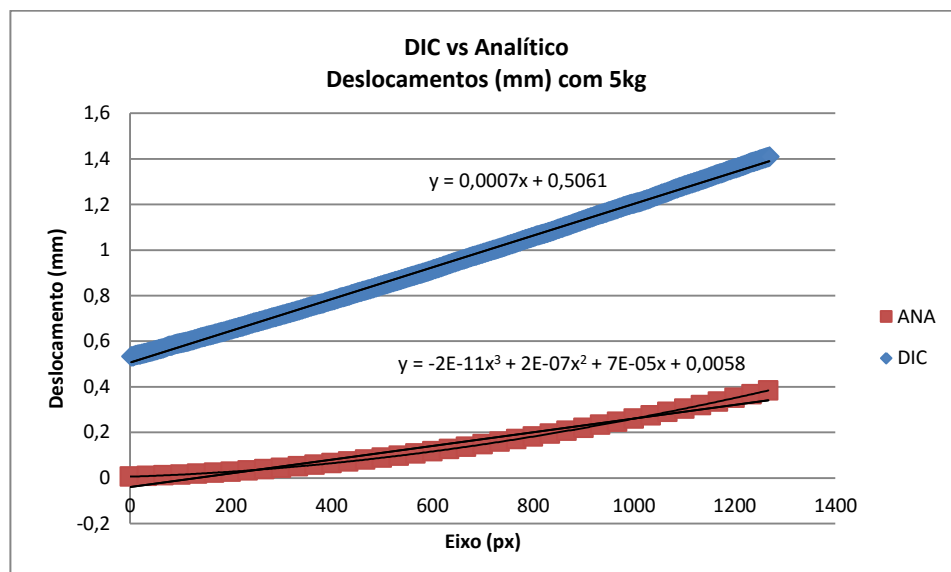
Deslocamentos na viga 5 de aço com o carregamento de 1kg no Ncorr



Deslocamentos na viga 5 de aço com o carregamento de 2kg no Ncorr

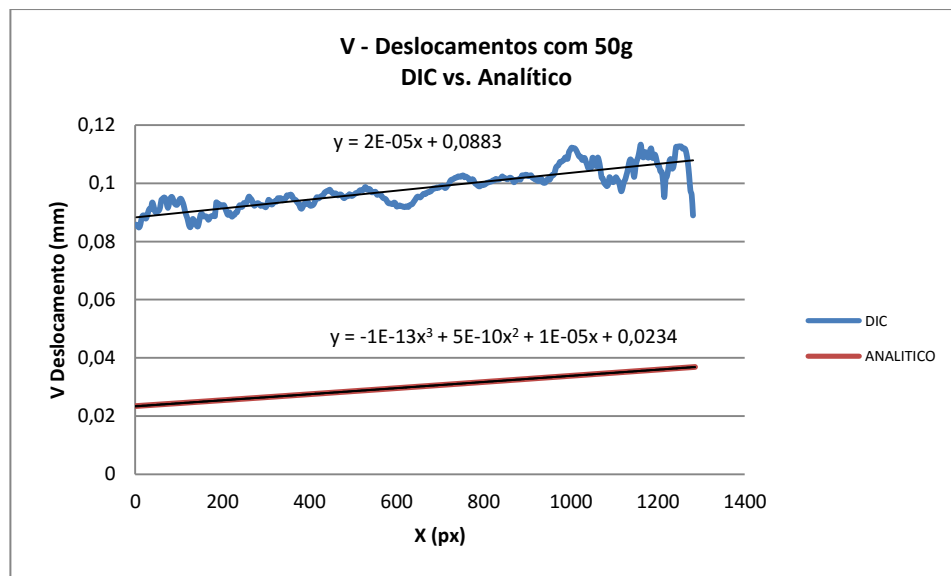
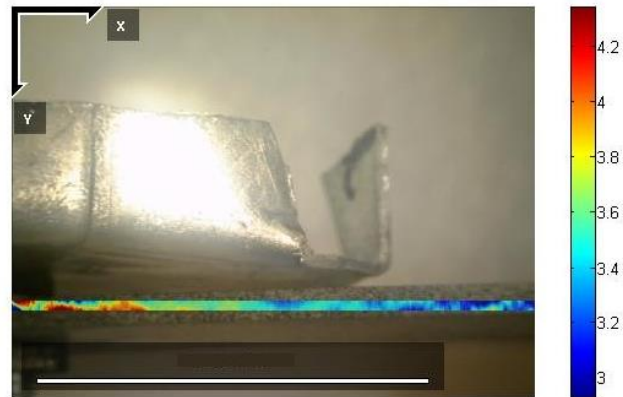


Deslocamentos na viga 5 de aço com o carregamento de 5kg no Ncorr

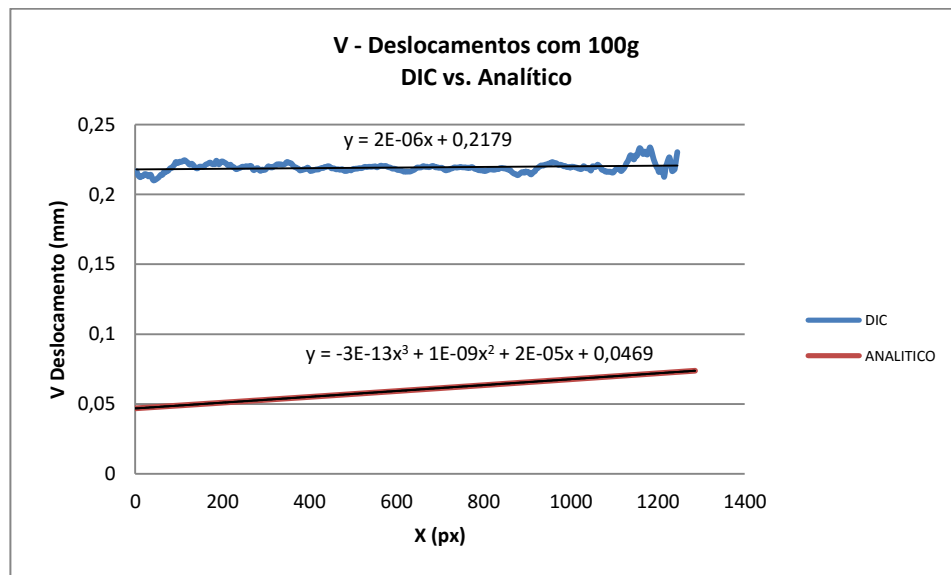


ANEXO C – Análises DIC (imagens com dispersão de tinta)

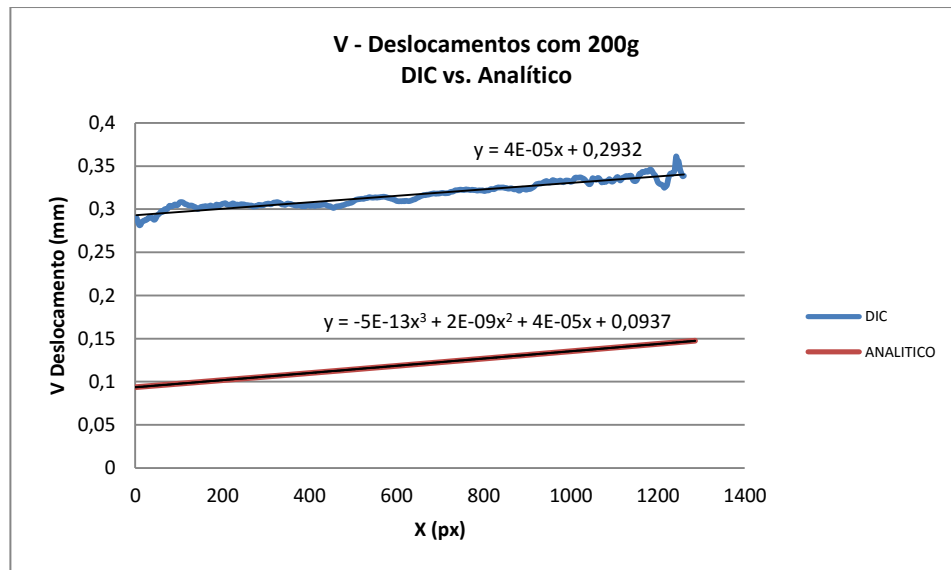
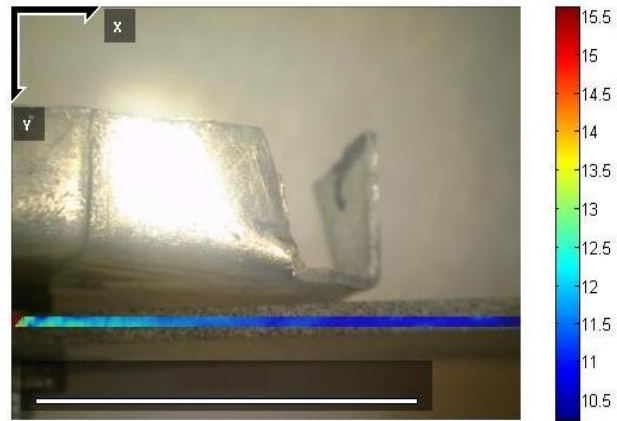
Deslocamentos na viga de aço com o carregamento de 50 g no Ncorr



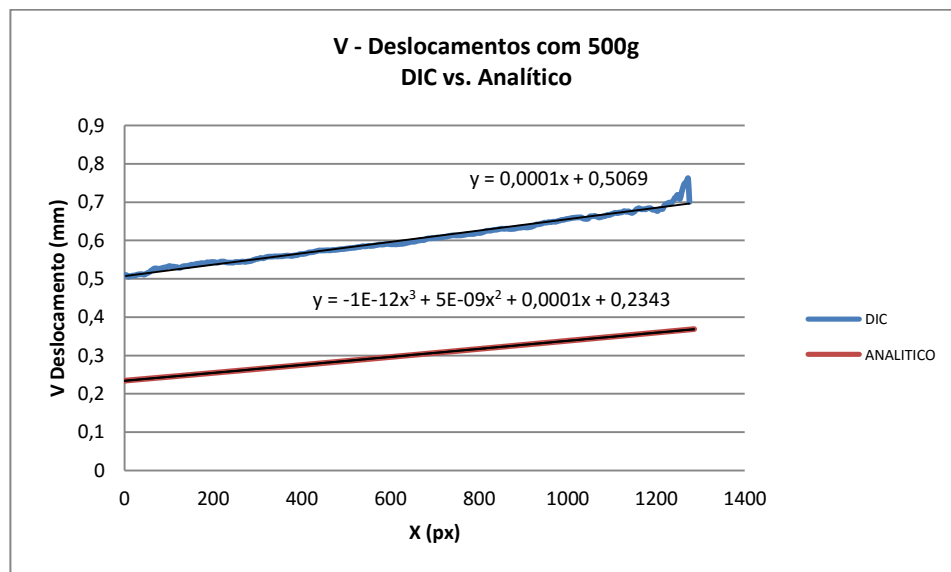
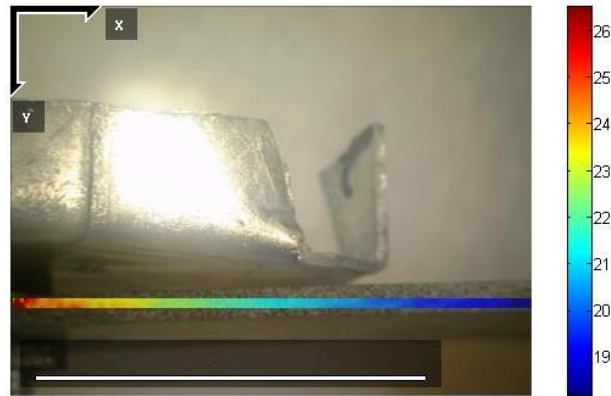
Deslocamentos na viga de aço com o carregamento de 100 g no Ncorr



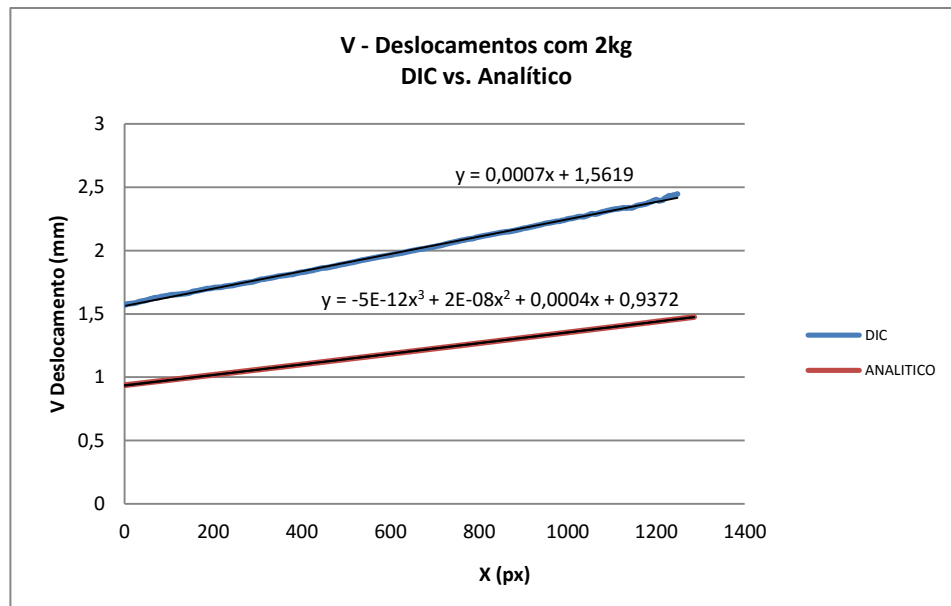
Deslocamentos na viga de aço com o carregamento de 200 g no Ncorr.



Deslocamentos na viga de aço com o carregamento de 500 g no Ncorr



Deslocamentos na viga de aço com o carregamento de 2 kg no Ncorr.



Deslocamentos na viga de aço com o carregamento de 5 kg no Ncorr

