



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Aline Ribeiro Janchikoski

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Aline Ribeiro Janchikoski

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Área de especialização em Conceção e Construção Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:
Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles

Aos meus pais, Paulo e Rosana

À minha irmã, Fernanda

Ao meu avô, Domicio (*in memoriam*)

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e sobretudo aos meus pais, Dr. Paulo e Rosana, por todo o esforço que fizeram para que eu chegasse até aqui, por todo o amor, dedicação e incentivo incondicionais. Mesmo a 8566 km de distância nunca deixaram de me guiar e aconselhar pelo caminho certo, devo tudo isso a vocês.

À minha irmã, Fernanda, por ser esse exemplo de ser humano e quem eu tenho o orgulho de dizer que desde pequena sempre me espelhei. Obrigada pelas inúmeras horas em vídeo chamada me confortando e me ajudando mesmo longe.

Ao meu noivo, Leonardo, que acima de tudo é meu melhor amigo, obrigada por dividir a vida comigo, me aconselhar e apoiar em todos os momentos durante esses anos.

Ao meu “vôzinho”, Nides, por me ensinar desde pequena que o conhecimento é a única coisa que ninguém nos pode tirar nessa vida.

Também agradeço ao meu orientador Dr. José Filipe Meireles por sempre me fazer pensar e questionar sobre o tema do meu projeto de pesquisa, pela sua dedicação e paciência durante este percurso. Seus conhecimentos fizeram grande diferença no resultado final dessa tese.

Este trabalho foi realizado ao abrigo de um projeto que é cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) do Programa Portugal 2020 [Projeto n° 40418, de acrónimo “TOP4IC - *Tooling Optimizing for ICT Systems*”; Referência de Financiamento: POCI-01-0247-FEDER-040418].”

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I declare that I have acted with integrity in the preparation of this academic work and confirm that I have not resorted to the practice of plagiarism or any form of misuse or falsification of information or results in any of the steps leading to its preparation.

I further declare that I am aware of and have respected the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

RESUMO

Este problema de pesquisa envolve a compreensão aprofundada do comportamento das placas de cama de agulhas sob as cargas de teste utilizadas nos testes *ICT* para *PCBs*. Especificamente, busca-se analisar numericamente e experimentalmente como essas placas se deformam em resposta às forças aplicadas pelas agulhas de teste. O objetivo principal é investigar como as cargas de teste utilizadas nos testes *ICT* influenciam o comportamento da placa de cama de agulhas e como essas deformações podem afetar a qualidade dos resultados dos testes nas *PCBs* por meio da análise numérica no *software* *ansys* e experimental através da técnica de correlação de imagens digitais em duas dimensões. Entre os resultados obtidos, a análise numérica mostrou uma deformação máxima de 0,003 mm na direção de x e de 0,001 mm na direção de y. Já na análise experimental observou-se uma deformação máxima de 0,008 mm e de 0,002 mm nas direções x e y, respectivamente. Para melhor compreensão do comportamento da placa de cama de agulhas, verificou-se numericamente uma deformação máxima total de 0,081 mm e uma tensão equivalente máxima de 4.326 MPa. A partir dos resultados quantitativos e qualitativos, concluiu-se que uma análise numérica precisa ser baseada em propriedades alinhadas dos materiais, especialmente em compósitos, onde as propriedades mecânicas em várias direções afetam o comportamento do componente sob carga. A compreensão da deformação na placa de cama de agulhas durante os testes melhora o *design* da placa para minimizar os erros no impacto das agulhas que contactam nas *PCBs*, assegurando que não sofram tensão excessiva, em que a partir da identificação das áreas com deformações anormais é possível corrigir contatos excessivos, garantindo resultados precisos nos testes *ICT* e a detecção eficaz de possíveis defeitos na placa *PCB*. Tendo em vista que a validação completa do estudo é possível por meio da técnica *DIC 2D*, a análise numérica pode servir como ponto de partida para investigar outras condições de teste, da mesma forma, a técnica *DIC 2D* é não destrutiva e relevante para estudar placas de cama de agulhas, permitindo análise do comportamento mecânico sem prejudicar o componente, desta forma é possível verificar as áreas de maior interesse (ou seja, com maiores deformações) durante o funcionamento.

PALAVRAS-CHAVE

PLACA DE CAMA DE AGULHAS, TESTES *ICT*; PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO, TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS 2D, *SOFTWARE* *ANSYS*.

ABSTRACT

This research problem involves gaining an in-depth understanding of the behaviour of needle bed plates under the test loads used in ICT testing for PCBs. Specifically, it seeks to analyse numerically and experimentally how these plates deform in response to the forces applied by the test needles. The main objective is to investigate how the test loads used in ICT testing influence the behaviour of the needle bed board and how these deformations can affect the quality of test results on PCBs by means of numerical analysis in ansys software and experimental analysis using the two-dimensional digital image correlation technique. Among the results obtained, the numerical analysis showed a maximum deformation of 0,003 mm in the x direction and 0,001 mm in the y direction. The experimental analysis showed a maximum deformation of 0,008 mm and 0,002 mm in the x and y directions, respectively. To better understand the behaviour of the needle bed plate, a total maximum deformation of 0,081 mm and a maximum equivalent stress of 4.326 MPa were numerically verified. From the quantitative and qualitative results, it was concluded that a numerical analysis needs to be based on aligned material properties, especially in composites, where mechanical properties in multiple directions affect the behaviour of the component under load. Understanding the deformation in the needle bed plate during testing improves the design of the plate to minimise errors in the impact of needles contacting PCBs, ensuring that they do not suffer excessive stress, whereby by identifying areas with abnormal deformation it is possible to correct excessive contacts, ensuring accurate results in ICT tests and effective detection of possible defects in the PCB plate. Given that complete validation of the study is possible using the 2D DIC technique, the numerical analysis can serve as a starting point for investigating other test conditions. Likewise, the 2D DIC technique is non-destructive and relevant for studying needle bed boards, allowing analysis of the mechanical behaviour without damaging the component, so it is possible to check the areas of greatest interest (i.e., with the greatest deformations) during operation.

KEYWORDS

NAIL BED BOARD, ICT TESTS; PRINTED CIRCUIT BOARDS, 2D IMAGE CORRELATION TECHNIQUE, ANSYS SOFTWARE.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xii
Índice de Gráficos.....	xiii
Lista de Símbolos	xiv
1. Introdução	15
1.1. Preâmbulo	15
1.1.1. Motivação	16
1.2. Objetivos e Metodologia	16
1.2.1. Objetivos Específicos	16
1.2.2. Guia de Leitura	17
2. Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica	18
2.1. Introdução.....	18
2.2. Sistema de Placas de Cama de Agulhas para Testes <i>ICT</i>	18
2.3. Materiais Compósitos.....	24
2.3.1. Papel Fenólico	27
2.4. Técnicas Óticas	30
2.4.1. Técnica de Correlação de Imagem Digital.....	32
2.4.2. Imagem Digital.....	33
2.4.3. Padrão Speckle	34
2.4.4. Princípios da Correlação de Imagens Digitais em 2D.....	35
2.4.5. Sistema de Calibração 2D – DIC.....	37
2.4.6. Algoritmos de Correlação	38
2.5. Método dos Elementos Finitos	39
3. Estudo de Caso	42
3.1. Introdução.....	42
3.2. Análise Numérica.....	43
3.2.1. Geometria.....	44
3.2.2. Implementação da Metodologia e Resultados.....	45

3.3. Análise Experimental.....	54
3.3.1. Instrumentação	54
3.3.2. Metodologia e Resultados.....	57
3.4. Comentários e Síntese do Capítulo	79
4. Discussão dos Resultados	82
5. Considerações finais	87
5.1. Conclusões	87
5.2. Perspetivas e Trabalhos Futuros	88
Anexos.....	90
Anexo A: Desenhos Técnicos	91
Anexo B: Guia para ensaios no <i>software</i> VIC-2D	93
Anexo C: Dados dos Gráficos de Redução de Dados Exx	101
Anexo D: Dados dos Gráficos de Redução de Dados Eyy	106
Referências Bibliográficas.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de testes ICT para PCBs a partir de cama de agulhas (Adaptado de Han & Voloshin, 2004).....	19
Figura 2 – Exemplo de placa de cama de agulhas personalizada com as agulhas já fixadas (An overview of PCB testing and inspection methods, s.d.).....	20
Figura 3 - Tipos de pontas de agulhas disponíveis para os testes eletrônicos (Agulhas de teste ICT / FCT – suprateg, s.d.).....	20
Figura 4 - (a) Modelo físico da placa de cama de agulhas; (b) Modelação 3D simplificada da placa de cama de agulhas.	21
Figura 5 - Modelação 3D da cama de agulhas em estudo (Silva, 2022).	22
Figura 6 - Condições de fronteira aplicados na cama de agulhas (Silva, 2022).....	22
Figura 7 - Aplicação das cargas totais para o cálculo final da deformação da cama de agulhas (Silva, 2022).	23
Figura 8 - Deformação total ocorrida na placa de cama de agulhas (Silva, 2022).	24
Figura 9 - Classificação dos materiais compósitos de acordo com o tipo de reforço utilizado (VENTURA, 2009, p. 13).	25
Figura 10 - Diferentes tipos de reforços em compósitos de matriz polimérica (Adaptado de Das Lala <i>et al.</i> , 2018).....	27
Figura 11 – Etapas iniciais da técnica DIC em que (a) é a imagem de referência, (b) são as delimitações dos subconjuntos e (c) são os pontos de referência de cada subconjunto representado em vermelho (Adaptado de Lepage, 2021).	32
Figura 12 - Etapas finais da técnica DIC em que (a) é a combinação dos subconjuntos deformados com os subconjuntos de referência e (b) é a representação do cálculo dos deslocamentos de cada subconjunto (Adaptado de Lepage, 2021).	33
Figura 13 - Conversão da intensidade incidente em cada pixel da imagem digital para valores discretos. (Adaptado de Rosas, 2019).	34
Figura 14 – Padronização do speckle em que (a) representa um padrão muito espaçado, (b) é a representação do padrão ideal e (c) é um padrão considerado muito denso (Adaptado de Lepage, 2021).	35
Figura 15 – Imagem 2D do plano global da amostra utilizando o plano de imagem frontal (Adaptado de Schreier <i>et al.</i> , 2009).	36
Figura 16 – Representação da calibração DIC através de uma linha em análises 2D. (Adaptado de Lepage, 2021).	37
Figura 17 - <i>Toolbox</i> do <i>software</i> ansys	43
Figura 18 - Esquema de projeto da análise estrutural estática do <i>software</i> ansys	44
Figura 19 - Modelo 3D da placa de cama de agulhas para a análise numérica.....	45
Figura 20 - Propriedades do material da placa de cama de agulhas no <i>software</i> ansys.	46
Figura 21 - Condições de fronteira da placa de cama de agulhas no <i>software</i> ansys.	46
Figura 22 – (a) Força aplicada às agulhas laterais da placa de cama de agulhas (b) Força aplicada às agulhas centrais da placa de cama de agulhas.	47

Figura 23 - Malha tetraédrica quadrada utilizada na simulação numérica da placa de cama de agulhas.....	48
Figura 24 - Resultado da deformação total ocorrida na placa de cama de agulhas.....	49
Figura 25 - (a) Condições de fronteira aplicadas à placa de cama de agulhas; (b) Cargas aplicadas à placa de cama de agulhas.	50
Figura 26 - Resultados obtidos na simulação da deformação total com as condições de fronteira impostas por Silva em 2022.....	51
Figura 27 - (a) Deformação direcional no eixo x da placa de cama de agulhas no ansys; (b) Deformação direcional no eixo y da placa de cama de agulhas no ansys.	52
Figura 28 - Deformação direcional da placa de cama de agulhas no eixo z.	52
Figura 29 - Tensão equivalente de Von Mises encontrada para a placa de cama de agulhas com as cargas de funcionamento impostas.	53
Figura 30 - Deformação direcional da placa em relação ao eixo x, na superfície de aplicação da carga.....	54
Figura 31 - Modelo 3D da prensa de ensaio de provetes em forma de placa retangular.	55
Figura 32 - Célula de carga com capacidade de 10kN (GWMC (10-50kN) - Sensorica, s.d.)	55
Figura 33 - Câmara Basler acA2440-75um (Basler ace aca2440-75um - <i>area scan camera</i> , s.d.)	56
Figura 34 - Lente Fujinon HF50SA-1 2/3" 50mm F1.8 (Fujinon HF50SA-1 2/3" 50mm F1.8 iris manual <i>c-mount lens</i> , 5 megapixel <i>rated</i> , s.d.).....	56
Figura 35 - Luzes de LED MultiLED QX da GSVITEC (MultiLED QX, s.d.)	57
Figura 36 - Modelo físico da placa de cama de agulhas com o <i>speckle</i> utilizado na análise experimental.	58
Figura 37 - Ilustração fora de escala do <i>setup</i> da análise experimental.	59
Figura 38 - (a) Imagem da fixação da placa de cama de agulhas na máquina-ferramenta. (b) Ilustração do local em que a placa está a ser fixa na máquina.	59
Figura 39 - Imagem de referência registada no <i>software</i> VIC-Snap.	60
Figura 40 - Opções de captura de imagens existentes no <i>software</i> VIC-Snap.	61
Figura 41 - Definição do pré-processamento em relação ao tipo de sistema de captura de imagens selecionado.....	63
Figura 42 - Área de configuração de todos os canais disponíveis para serem conectados ao <i>software</i> VIC-Snap.....	64
Figura 43 - Calibração da escala de medição no <i>software</i> VIC 2D a partir de dois pontos.	65
Figura 44 - Escala de calibração em relação à placa de cama de agulhas física e o tamanho na imagem.....	65
Figura 45 - (a) Identificação da área de interesse para simulação da placa no <i>software</i> VIC-2D. (b) Zonas da área de interesse defeituosas que foram removidas.	66
Figura 46 - Sugestão do tamanho do subset e do nível de ruído utilizado no pré-processamento da placa.....	67
Figura 47 - Escolha das opções de tipo de peso dos subsets e critério de correlação que foi utilizado na simulação.....	68
Figura 48 - Definição do tamanho de filtro e tipo de tensor para o pós-processamento.	69
Figura 49 - Imagens de referência utilizadas na correlação entre as outras imagens. (a) Para calcular a variável em relação ao eixo x. (b) Para calcular a variável em relação ao eixo y.....	70
Figura 50 - Ilustração de aplicação de carga experimental na placa de cama de agulhas.	71

Figura 51 - Deformação direcional máxima encontrada para a placa na direção do eixo x.	72
Figura 52 - Deformação direcional máxima encontrada para a placa na direção do eixo y.	73
Figura 53 - Seleção da reta de análise para redução dos dados obtidos a partir da zona de deformações máximas no eixo x.	74
Figura 54 - Seleção das retas de análise para redução dos dados obtidos a partir da zona de deformações máximas no eixo y.	77
Figura 55 - Comparação entre os resultados qualitativos entre as análises para a deformação ocorrida na direção y. A esquerda é o resultado numérico, à direita o resultado experimental.....	84
Figura 56 - Comparação entre os resultados qualitativos entre as análises para a deformação ocorrida na direção x. A esquerda é o resultado numérico, à direita o resultado experimental.....	85
Figura 57 - Desenho técnico da cama de agulhas de papel fenólico.	92
Figura 58 - Relação entre o movimento fora do plano da lente e a distância entre a câmara e a amostra.....	93
Figura 59 - Exemplificação de um histograma e uma barra de foco existente no <i>software</i> Vic-Snap para focagem da imagem.....	94
Figura 60 - À esquerda a focagem está com grande abertura - DOF pequeno e à direita depois de fechar a abertura o plano focal está bem centrado.	95
Figura 61 - Ilustração da barra de ferramentas do software Vic-2D.....	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades elétricas do papel fenólico BSEN60893-3-4-PFCP201 B4B.....	29
Tabela 2 - Propriedades térmicas e mecânicas do papel fenólico BSEN60893-3-4-PFCP201 B4B	30
Tabela 3 - Dados parciais retirados do gráfico de redução de dados em relação à deformação referente ao eixo x.	76
Tabela 4 - Dados parciais retirados do gráfico de redução de dados em relação à deformação referente ao eixo y.	79
Tabela 5 - Afluência entre os resultados obtidos na análise numérica e experimental da placa de cama de agulhas.	84

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama força-curso para diferentes tipos de agulhas (Die Nr. 1 in der Prüftechnik INGUN, s.d.).	23
Gráfico 2 - Gráfico de convergência da simulação da deformação total da placa de cama de agulhas.	49
Gráfico 3 - Curva de Calibração da Célula de Carga para esforço de compressão.....	62
Gráfico 4 - Gráfico dos dados do conversor analógico-digital do <i>software</i> VIC-Snap.	64
Gráfico 5 - Gráfico de redução dos dados de deformação ao longo do eixo x.	75
Gráfico 6 - Gráfico de redução dos dados de deformação ao longo do eixo y.	77

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

CID	Correlação de Imagens Digitais;
DIC	<i>Digital Image Correlation</i> (Correlação de Imagens Digitais);
2D	Duas Dimensões;
3D	Três Dimensões;
CCP	Coeficiente de Correlação de Pearson
CCD	<i>Charged-Coupled Device</i> (Dispositivo Acoplado com Carga);
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de circuito impresso);
MEF	Método dos Elementos Finitos;
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz);
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> (Semicondutor Metal-Óxido Complementar);
ICT	<i>In-Circuit Test</i> (Teste em Circuito);
TTL	Transistor-Transistor Logic;
ACNC	Celulose Nano Cristalina Acetilada;
CNF	Celulose Nano Fibrilada;
MFC	Celulose Micro Fibrilada;
CF	Celulose Cristalina.

Nomenclatura

ρ	Coeficiente de Correlação de Pearson [adimensional];
ρ^2	Coeficiente de Correlação de Pearson ao Quadrado [adimensional];
M_x	Momento por unidade de comprimento paralelamente ao eixo y;
M_y	Momento por unidade de comprimento paralelamente ao eixo x;
h	Espessura da placa [mm];
E	Módulo de <i>Young</i> [MPa];
ν	Coeficiente de Poisson [adimensional];
D	Módulo de rigidez à flexão [Mpa];
w	Pequenas deflexões da placa na direção z;
EI_z	Produto de Rigidez à Flexão [Nm];
I	Momento de Inércia da secção transversal [mm^4];
M	Momento Fletor [Nm];
a	Comprimento da barra [mm].

1. INTRODUÇÃO

1.1. PREÂMBULO

No contexto da indústria eletrônica, a confiabilidade e a qualidade dos produtos desempenham um papel crucial na garantia do desempenho dos dispositivos e sistemas, sendo assim, as placas de circuito impresso são componentes fundamentais neste cenário, uma vez que interconectam e viabilizam o funcionamento de uma variedade de dispositivos eletrônicos. Para assegurar a integridade e a funcionalidade das placas de circuito impresso (*PCB*), testes de produção rigorosos são essenciais, como por exemplo os testes *in-circuit*, que desempenham um papel fundamental na detecção de defeitos nos componentes e nas conexões condutivas das *PCBs*.

A utilização das placas de cama de agulhas nos testes *ICT* (*in-circuit test*) proporciona os contatos elétricos necessários entre os pontos de teste da *PCB* e o sistema de teste a partir de um grande número de agulhas finas e resistentes que são dispostas em uma matriz. A eficácia desse componente depende de uma série de fatores, em especial o comportamento mecânico sob carga, que pode afetar a qualidade dos contatos elétricos e, conseqüentemente, a precisão dos resultados dos testes. Portanto, uma compreensão aprofundada do comportamento mecânico das placas de cama de agulhas é de suma importância para garantir a precisão e a confiabilidade dos dispositivos eletrônicos.

Nesse contexto, o interesse principal da presente dissertação é o estudo do comportamento mecânico das placas de cama de agulhas através da técnica de correlação de imagens digitais. As técnicas óticas, são um conjunto de métodos e tecnologias que utilizam a luz e suas propriedades para realizar análises no campo da engenharia mecânica ao permitir uma análise não-destrutiva, rápida e acurada de componentes, sendo amplamente utilizadas para investigar e monitorar a qualidade de superfícies, analisar a distribuição de tensão e desgaste em materiais e medir pequenas mudanças na forma e na posição de componentes, o que é fundamental para garantir a segurança e a eficiência dos sistemas mecânicos, além de preservar o componente para futuras avaliações.

A técnica *DIC 2D - Digital Image Correlataion* (Correlação de Imagem Digital) emerge como uma ferramenta que analisa e quantifica deformações e tensões superficiais em materiais e estruturas, permitindo medir os parâmetros mecânicos em tempo real. Isso ocorre a partir da marcação da superfície de interesse com um padrão de pontos ou marcas de referência e posteriormente capturar diversas imagens da superfície em diferentes etapas, seja antes da aplicação de carga ou durante o carregamento. Ao comparar as imagens usando algoritmos de correlação, a técnica determina os deslocamentos e deformações ao analisar como os padrões de referência se movem e distorcem, oferecendo uma visão detalhada do comportamento mecânico de materiais e estruturas em escala microscópica ou macroscópica.

Este projeto busca, portanto, investigar a interação mecânica entre a placa de cama de agulhas e a placa de *PCB* durante os testes *ICT*, por meio da utilização da técnica de correlação de imagens digitais em duas dimensões, ao compreender como as cargas aplicadas afetam o comportamento do componente e a distribuição de tensões resultante, contribuindo para o aprimoramento dos testes de *PCB*, promovendo maior precisão na detecção de defeitos e, por conseqüência, aprimorando a qualidade e confiabilidade dos produtos eletrônicos finais.

No decorrer deste trabalho, serão explorados conceitos de mecânica dos sólidos, técnicas de análise de imagem e correlação, bem como simulações computacionais, a fim de obter *insights* importantes sobre o comportamento mecânico do componente estudado e sua influência nos resultados dos testes ICT em placas de PCBs.

1.1.1. MOTIVAÇÃO

A motivação desta tese de mestrado reside na exploração da técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) como uma ferramenta inovadora e tanto para o meu desenvolvimento acadêmico quanto para a Universidade do Minho. A utilização desta técnica representa uma vertente ainda não explorada no contexto da nossa instituição, e a sua aplicação pode abrir novas possibilidades de investigação e contribuir significativamente para o avanço do conhecimento em diversas áreas, desta forma o reconhecimento da necessidade de uma abordagem mais aprofundada e a adaptação dessa técnica à nossa área de estudo requer um Estado da Arte mais abrangente, que aborde os conceitos fundamentais subjacentes.

Além disso, a utilização de uma nova máquina-ferramenta no âmbito desta pesquisa, em que mesma foi projetada inicialmente para o estudo da deformação de placas de cama de agulhas com a utilização da presente técnica, tem o potencial de oferecer contribuições relevantes para este campo, e, como resultado, o núcleo central desta dissertação será dedicado à aplicação da técnica DIC (CID). Os primeiros resultados obtidos serão essenciais para estabelecer uma base sólida e servirão como ponto de partida para investigações mais desenvolvidas e aprofundadas em trabalhos futuros. Esta pesquisa visa, desta forma, não apenas ampliar o conhecimento existente, mas também abrir novas perspectivas e aplicações tanto com a técnica DIC 2D, quanto a DIC 3D, promovendo avanços nesta área.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo geral desta dissertação é avaliar o comportamento mecânico da placa de cama de agulhas com a utilização da técnica ótica de correlação de imagem digital 2D para verificação da deformação ocorrida, sendo possível, a partir dos resultados obtidos, contribuir para a melhoria da capacidade do utilizador final em averiguar possíveis defeitos das placas PCBs durante os testes ICT com o aprimoramento deste componente.

A metodologia utilizada inclui uma revisão sistemática da literatura sobre o comportamento mecânico verificado na placa durante o funcionamento da máquina, e da técnica de correlação de imagens digitais em duas dimensões. Além da utilização do método numérico com a utilização do *software* ansys que opera por meio do método dos elementos finitos (MEF) para encontrar a solução das equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento mecânico do componente e, por fim, o método experimental para validar o estudo numérico a partir do modelo físico da placa de cama de agulhas com a utilização da técnica DIC 2D.

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- DETERMINAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO PARA AS ANÁLISES;
- REALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PLACA DE CAMA DE AGULHAS COM O *SOFTWARE* ANSYS;

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

- UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA *DIC* 2D PARA ANALISAR AS IMAGENS OBTIDAS DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS;
- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DAS DUAS ANÁLISES;
- AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA TÉCNICA *DIC* NA OBTENÇÃO DE INFORMAÇÕES SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS PLACAS;
- APRESENTAÇÃO DAS CONCLUSÕES OBTIDAS COM O ESTUDO.

1.2.2. GUIA DE LEITURA

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos essenciais para elucidar o tema proposto.

O primeiro capítulo apresenta um enquadramento temático da dissertação, os objetivos gerais e específicos do estudo e a metodologia adotada para a execução de cada etapa do projeto.

O segundo capítulo aborda os fundamentos teóricos e as revisões bibliográficas necessárias para resolução e compreensão das análises posteriormente abordadas.

No terceiro capítulo é feito o estudo de caso em que neste é utilizado o *software* ansys para a análise numérica da placa de cama de agulhas, em que são apresentados os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos. Também é abordado a técnica experimental para determinação das deformações da placa que utiliza um sistema de câmaras para análise da correlação entre as imagens capturadas, bem como os instrumentos manuseados.

No quarto capítulo é feita uma reflexão a cerca dos resultados obtidos nos dois tipos de análises para o componente.

No quinto capítulo constam as conclusões obtidas a cerca do desenvolvimento desta dissertação, bem como possíveis temas para abordagem complementar a este projeto.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo estabelecer os fundamentos teóricos e realizar uma revisão bibliográfica abrangente no campo do comportamento mecânico das placas de cama de agulhas utilizadas nos testes *ICT*, em que o objetivo desse teste é verificar a integridade das conexões e a funcionalidade dos componentes eletrônicos na *PCB*. Para compreender esses aspectos e fornecer uma base sólida para a análise e interpretação dos resultados deste estudo, é essencial explorar diversos temas relacionados à mecânica dos sólidos, materiais avançados e técnicas de análise.

Uma placa de cama de agulhas consiste em uma estrutura com um grande número de agulhas ou pinos que são cuidadosamente posicionados de maneira alinhada a um sistema de medição ou teste, desta forma quando a *PCB* é colocada na placa de cama de agulhas, as agulhas fazem contato elétrico com os pontos de teste permitindo que sejam aplicados sinais elétricos para medição da resposta elétrica. Esses pontos de teste incluem pontos de conexão, componentes eletrônicos, trilhas de circuito, entre outros.

Ao longo deste capítulo, será também discutido o uso de técnicas óticas, com foco principal na de correlação de imagens digitais como uma abordagem importante para analisar deformações, deslocamentos e tensões em materiais e estruturas, em especial à placa de cama de agulhas abordada neste projeto. Essa técnica oferece uma visão detalhada do seu comportamento mecânico em níveis microscópicos e macroscópicos.

Serão abordados as características geométricas da placa de cama de agulhas em estudo e o material utilizado na fabricação, da classe dos compósitos. Uma exploração das propriedades mecânicas de materiais compostos será realizada, considerando sua importância no contexto das placas de cama de agulhas.

A teoria das placas, como parte integrante da mecânica dos sólidos, será abordada para entender o comportamento de elementos de placas, considerando aspectos como rigidez, flexibilidade e interações mecânicas, bem como o funcionamento do sistema de placas de cama de agulhas utilizadas para os testes *ICT*.

Por fim, a aplicação do método dos elementos finitos será destacada como uma abordagem poderosa para simular o comportamento mecânico e compreender os resultados e metodologia empregada na análise numérica que será feita no *software* ansys.

Com base no conteúdo exposto e na compreensão crítica da literatura existente, este capítulo visa proporcionar um melhor entendimento para as análises dos capítulos que se seguem.

2.2. SISTEMA DE PLACAS DE CAMA DE AGULHAS PARA TESTES *ICT*

As *PCBs* são testadas a partir da técnica *ICT*, em que nela são verificadas as tensões presentes em diferentes pontos da placa e os sinais transmitidos. A técnica pode ser feita a partir de sondas ou de pinos de testes presentes na cama de agulhas (Antonsson, 2022). O objetivo do teste em circuito é verificar se os componentes estão corretamente montados e se o circuito está a funcionar conforme o esperado, detetando, desta forma, defeitos como curtos-circuitos, circuitos abertos, resistências e capacitâncias fora dos valores esperados, entre outros problemas.

Existem várias configurações que podem ser utilizadas nos testes ICT, como a partir de placas de teste fixas, teste de acesso direto, *pads* de teste, cama de agulhas, entre outros. Na configuração de cama de agulhas, é utilizado um dispositivo de fixação, chamado de placa de cama de agulhas, contendo uma agulha para cada ponto de contato que precisa ser verificado na *PCB*. A placa de circuito impresso é então posicionada e fixada sobre essas agulhas (Antonsson, 2022).

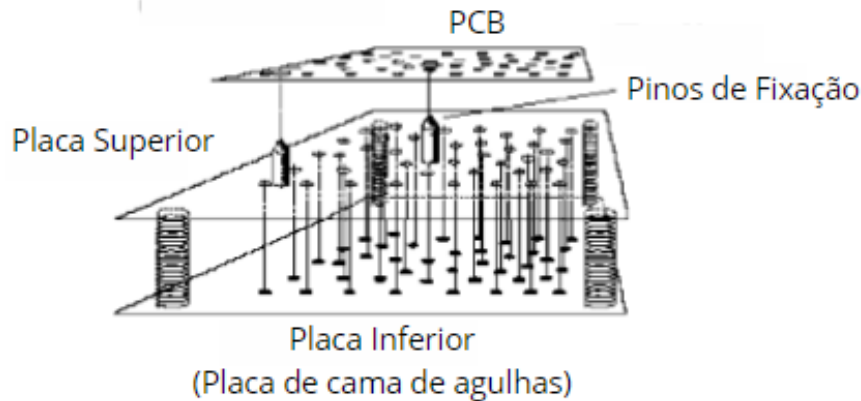


Figura 1 - Sistema de testes ICT para PCBs a partir de cama de agulhas (Adaptado de Han & Voloshin, 2004).

O dispositivo ilustrado na Figura 1 representa um sistema de testes *ICT* em que a placa inferior diferencia-se de acordo com a especificação de *design* de cada *PCB*, e a placa superior suporta a respectiva placa em teste, cujo posicionamento é assegurado através dos pinos de fixação, que restringem os movimentos horizontais da mesma ao longo da placa superior. Inicialmente a *PCB* não está em contacto com os pinos de teste, esta entra em contacto quando é exercida uma carga axial distribuída aplicada à placa superior, esta então desloca-se para baixo entrando em contacto com os pinos (Han & Voloshin, 2004).

Essa configuração de teste é frequentemente utilizada em processos de produção em massa, onde a eficiência e a velocidade são essenciais. Por permitir o acesso aos pontos de forma simultânea, esta abordagem contrasta em relação à sonda, que envolve o movimento de uma sonda ou ponta de teste para fazer contato com cada ponto de teste individualmente (Antonsson, 2022).

As placas a serem estudadas neste projeto consistem em placas de cama de agulhas, estas podem ser tanto retangulares quanto quadradas e possuem uma matriz de pinos. Cada pino é composto por uma agulha fina e alongada que estabelece contacto elétrico com a interface da placa *PCB* que está a ser testada.

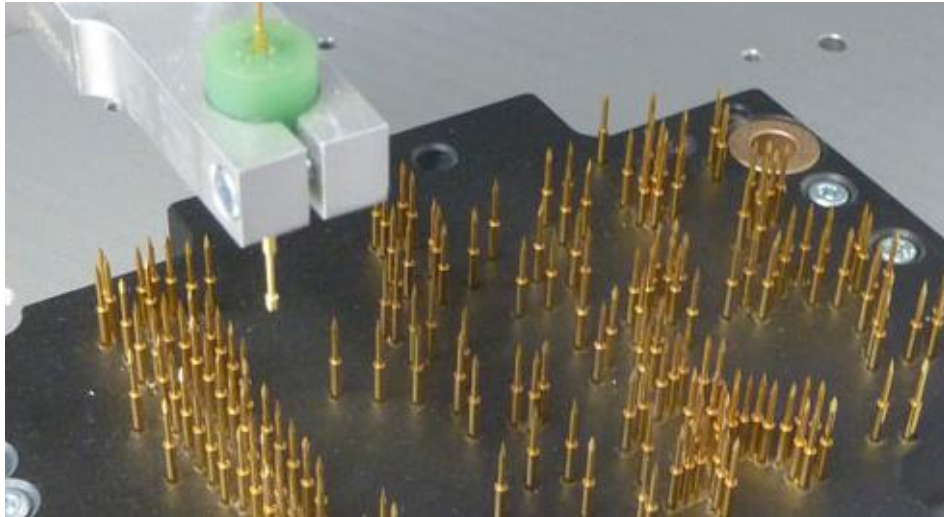


Figura 2 – Exemplo de placa de cama de agulhas personalizada com as agulhas já fixadas (An overview of PCB testing and inspection methods, s.d.).

A principal função da placa de cama de agulha é fornecer um suporte rígido e preciso para as agulhas de teste, assegurando que elas façam contato adequado com os pontos específicos da *PCB*. A Figura 2 exemplifica um modelo físico de cama de agulhas com as agulhas já fixadas e como elas são posicionadas e alinhadas na cama de agulhas para garantir a precisão e a eficácia dos testes *ICT* (Silva, 2022). Cada placa de cama de agulha deve ser projetada de maneira exclusiva para o gabarito de teste da *PCB* a ser testada.



Figura 3 - Tipos de pontas de agulhas disponíveis para os testes eletrônicos (Agulhas de teste ICT / FCT – suprtec, s.d.)

A figura 3 ilustra alguns dos vários tipos de pontas de agulhas de teste disponíveis para o uso nessas placas, cada uma com suas próprias características e aplicações específicas. A magnitude da força utilizada depende do número de pontos de testes e medição na placa de *PCB*, em que os pontos em si servem para enviar sinais de teste a fim de monitorizar o funcionamento do circuito (Bessa, 2021).

O espaçamento entre os pinos também pode variar, dependendo das necessidades do teste. Em alguns casos, os pinos podem estar posicionados em um grau de 2,54 mm, que é um espaçamento padrão comumente utilizado na indústria eletrônica ou em um grau mais fino, para testar *PCBs* com componentes menores e mais densamente compactados. Essas variações procuram que a placa de cama de agulha seja personalizada para cada situação.

O correto fabrico da cama de agulhas implica numa maior fiabilidade dos resultados do sistema de teste, em que as agulhas devem ser posicionadas precisamente perpendiculares à placa e com as devidas coordenadas nos eixos x , y e z . Desta forma os pontos de contacto serão pertinentes às da interface de teste do *PCB* (Bessa, 2021).

O sucesso dos testes depende, em grande parte, das propriedades mecânicas adequadas do material utilizado, já que as placas de cama de agulha devem ser capazes de resistir a cargas mecânicas sem sofrer grandes deformações, possuírem uma flecha controlada e possuírem pontos de contacto coincidentes com os pontos de teste. Durante os testes repetitivos de *PCBs*, as placas de cama de agulhas estão sujeitas a ciclos frequentes de carga e descarga, portanto, é necessário a escolha de materiais que apresentem alta resistência à fadiga, capazes de suportar esses ciclos com repetibilidade.

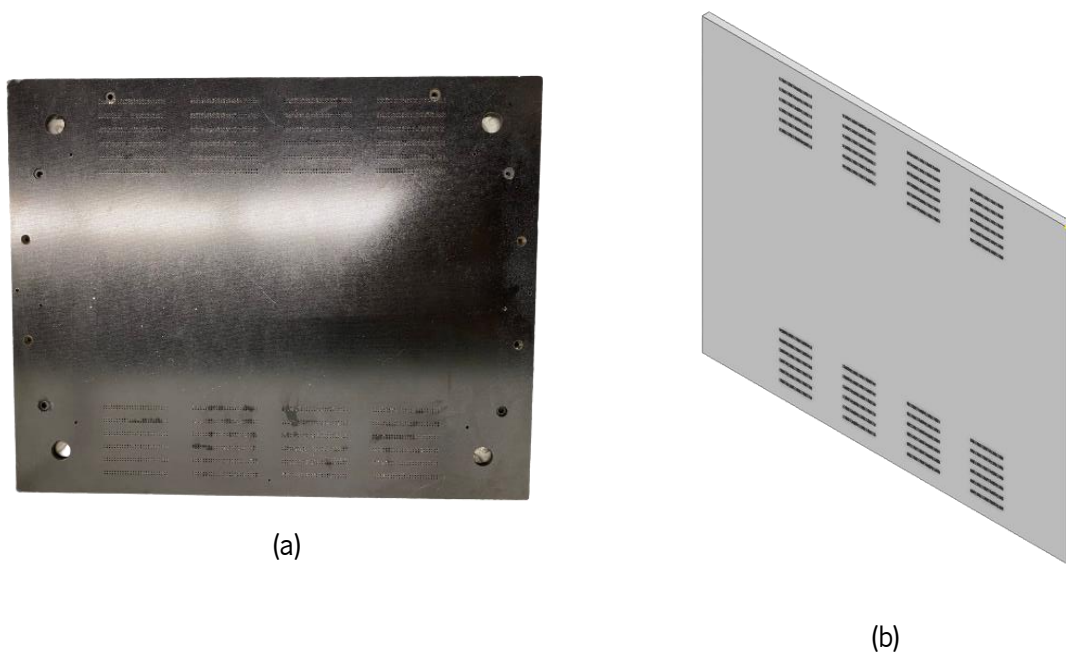


Figura 4 - (a) Modelo físico da placa de cama de agulhas; (b) Modelação 3D simplificada da placa de cama de agulhas.

A geometria da placa de cama de agulhas em estudo neste projeto é retangular e encontra-se ilustrada na Figura 4 (a). O modelo desta placa permite a fixação de 2400 agulhas e o modelo físico é feito a partir de papel fenólico. O desenho técnico da placa da Figura 4 (b) pode ser encontrado em Anexo A. Desenhos técnicos.

A partir de um projeto feito por Silva em 2022, de uma máquina ferramenta para ensaios de cama de agulhas, esta que será utilizada para a realização das análises experimentais, foi realizado um estudo prévio analítico da placa de cama de agulhas da Figura 4 (a) que será validado experimentalmente no presente projeto.



Figura 5 - Modelação 3D da cama de agulhas em estudo (Silva, 2022).

Pelo autor, utilizando o *software* ansys, esta mesma peça foi analisada, em que a partir da geometria simplificada da placa física (Figura 5), em que se realizou um rebaixo de 0,0001 mm na zona dos furos das agulhas para uma correta aplicação da carga sem que haja discrepância da realidade, ou seja, ao separar a zona dos furos na simulação, acarretaria em contactos inexistentes (Silva, 2022).

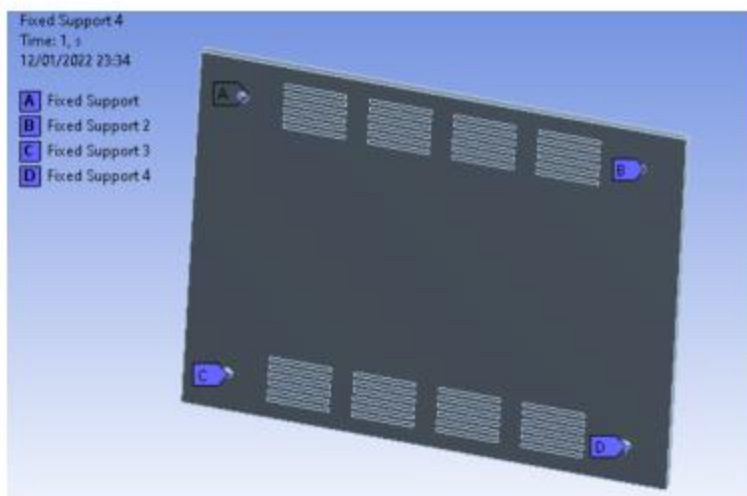


Figura 6 - Condições de fronteira aplicados na cama de agulhas (Silva, 2022).

A partir da Figura 6 é possível observar, a partir da utilização da placa, que a mesma é fixa a partir de quatro furos nas extremidades, e que, com esta condição de fronteira aplicada, a deformação irá ocorrer nos locais das agulhas centrais e a força exercida por essas agulhas durante o teste *ICT* será comprometida. Desta forma, para a simulação foi aplicado um suporte fixo nos quatro tubos que simulam a condição de fixação durante o teste *ICT* (Silva, 2022).

Para a análise foi definido inicialmente que cada retângulo da placa, correspondente à um grupo de 50 agulhas, seriam submetidos à uma carga total de 200N, o que significa que cada agulha exerce uma força de 4N (valor máximo da força crítica aplicada pela agulha em relação ao curso). Para encontrar a deformação final, foi preciso primeiramente encontrar a deformação ocorrida a partir da carga aplicada apenas nas agulhas laterais, resultando em uma deformação de 4,107 mm na zona central (Silva, 2022).

Com a deformação central resultante da carga aplicada às agulhas laterais, as agulhas centrais possuem um novo curso com uma magnitude de força diferente. Ou seja, normalmente uma agulha possuiria um curso de 4,3mm e com a deformação central esse curso passa a ser de 0,193mm (4,3 - 4,107mm) (Silva, 2022).

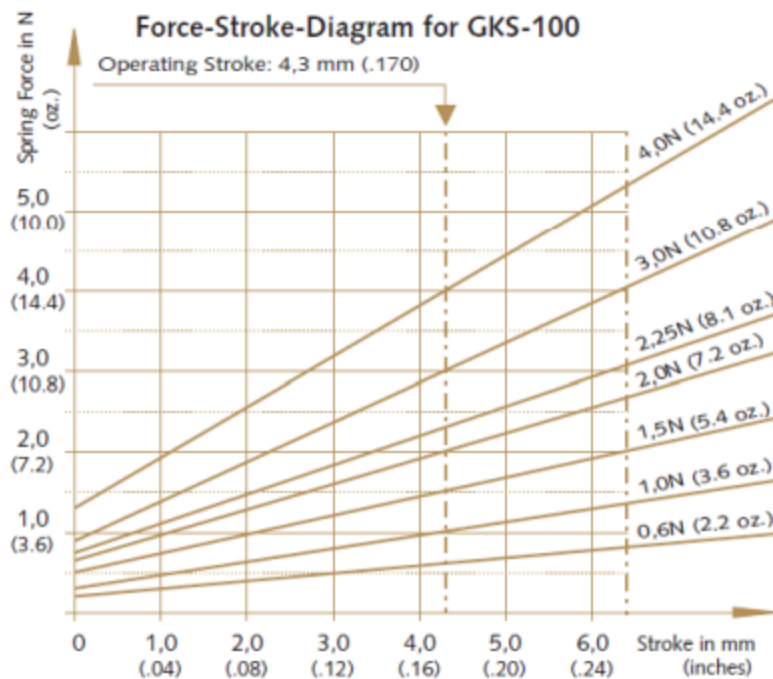


Gráfico 1 - Diagrama força-curso para diferentes tipos de agulhas (Die Nr. 1 in der Prüftechnik | INGUN, s.d.).

Para uma agulha que atinge uma força de 4N é possível verificar o curso da mesma a partir do Gráfico 1, a partir do gráfico retira-se a equação da reta que corresponde à uma força de 4N da agulha (Silva, 2022).

$$y = 0,635x + 1,269 \quad (2.1)$$

Para um curso de 0,193mm a força exercida pela agulha calculada através da equação (2.1) será de 1,392N. Como cada zona dos furos possuem 50 agulhas, cada retângulo central irá possuir uma carga de 69,6N (Silva, 2022).

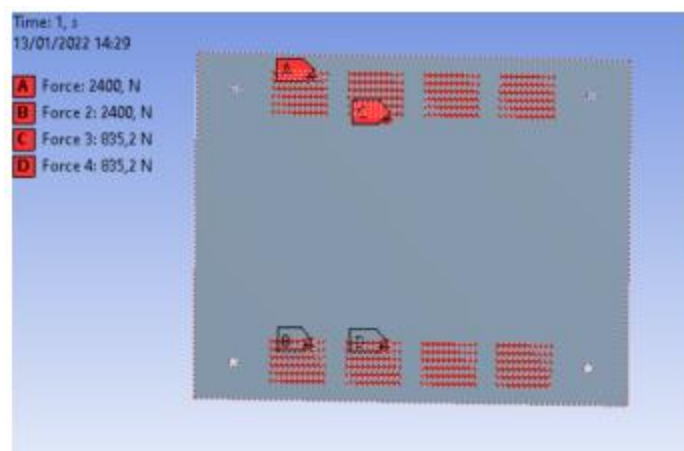


Figura 7 - Aplicação das cargas totais para o cálculo final da deformação da cama de agulhas (Silva, 2022).

A partir da Figura 7 é possível verificar a distribuição das cargas aplicadas, em que nos quatro retângulos externos foi aplicado 200N e as zonas internas 69,6N (Silva, 2022).

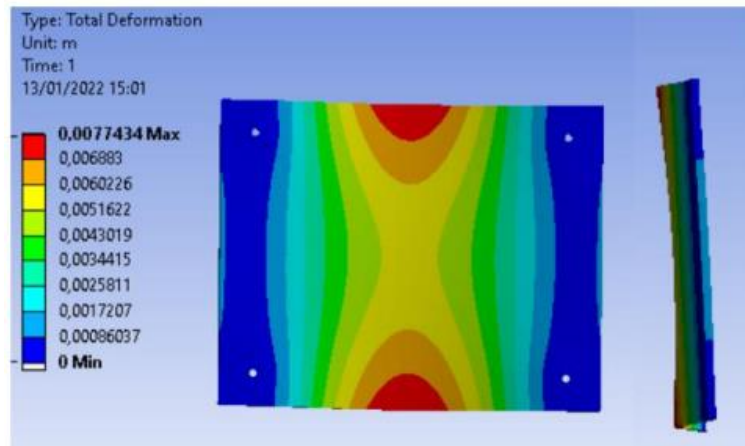


Figura 8 - Deformação total ocorrida na placa de cama de agulhas (Silva, 2022).

Fazendo uma análise da deformação por elementos finitos, como mostra na Figura 8, observa-se que a deformação total ocorrida na placa de cama de agulhas foi de 7,74mm, desta forma a deformação máxima ocorreu nos topos centrais da placa, devido às condições de fronteira impostas (Silva, 2022).

2.3. MATERIAIS COMPÓSITOS

O material da placa de cama de agulhas a ser objeto de estudo é o papel fenólico, o qual se classifica como um compósito, este é caracterizado por uma matriz de resina fenólica combinada com fibras de celulose, atuando estas últimas como reforço do material.

Um material é denominado um compósito quando é formado por dois ou mais materiais heterogêneos, ou seja, que possuam constituintes de fases quimicamente e fisicamente distintas (Ventura, 2009) de modo a conseguir obter propriedades e características que não seriam possíveis pelas fases se usadas individualmente. O início da era moderna dos materiais compósitos na engenharia começou em 1930 quando os engenheiros aeroespaciais começaram a utilizar fibra de vidro para fortalecer materiais metálicos em estruturas aeroespaciais.

Nas décadas de 50 e 60, os compósitos começaram a ser utilizados em uma ampla variedade de aplicações, incluindo construções de barcos, veículos esportivos, equipamentos esportivos, e outros. Neste período, os engenheiros também começaram a explorar novos tipos de materiais, como os compósitos de fibras de carbono, de fibras de vidro e cerâmica, entre outros.

Em 1970 e 1980, estes materiais começaram a ser amplamente utilizados na indústria aeroespacial devido à sua combinação única de propriedades, incluindo resistência mecânica, resistência à corrosão, estabilidade dimensional, e outras. Foi só a partir de 1990 que os compósitos começaram a ser utilizados em aplicações médicas, incluindo implantes, instrumentos cirúrgicos, e outros. Atualmente utilizam-se estes materiais na área da construção, transporte, engenharia aeroespacial, medicina, indústrias química e petroquímica, e muitos outros.

Normalmente o compósito é classificado de acordo com o material da matriz, este pode ser um polímero, metal ou cerâmico e da respectiva fase, esta pode ser de carbono, carboneto de silício, boro, óxido de alumínio ou materiais refratários. As fases, também chamadas de reforços são responsáveis

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D pelas propriedades dos compósitos, já a matriz é responsável por manter os reforços na posição correta e de preencher os espaços vazios da amostra (Ventura, 2009).



Figura 9 - Classificação dos materiais compósitos de acordo com o tipo de reforço utilizado (VENTURA, 2009, p. 13).

A figura 9 representa graficamente os tipos de reforços utilizados nos materiais compósitos, nomeadamente reforços de partículas, por fibras contínuas, *whiskers* ou laminados. No caso das fibras, as orientações podem ser tanto aleatórias quanto alinhadas paralelamente em uma só direção ao eixo longitudinal da fibra (Ventura, 2009).

Os compósitos reforçados com partículas são conhecidos por sua maior resistência e rigidez em comparação com a matriz sozinha e os reforços podem ser de diferentes tipos de materiais, tais como metal, cerâmica ou polímero. Os de fibra contínuas oferecem alta resistência, rigidez e resistência à tração e são amplamente usados em aplicações que exigem alto desempenho estrutural, como componentes aeroespaciais, automotivos e desportivos.

Nos compósitos laminados, os reforços podem ser em forma de fibras contínuas, tecidos ou fitas, e são conhecidos por sua alta resistência e rigidez, além de propriedades anisotrópicas controláveis.

Entre as vantagens verificadas por esta classe de material, é possível listar as principais (Dias *et al.*, 2015):

- MAIOR LEVEZA: OS MATERIAIS COMPÓSITOS SÃO GERALMENTE MENOS DENSOS DO QUE OS MATERIAIS TRADICIONAIS, COMO AÇO OU ALUMÍNIO. ISSO OS TORNA IDEAIS PARA APLICAÇÕES ONDE O PESO É UM FATOR IMPORTANTE, COMO NA AVIAÇÃO E NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL.
- RESISTÊNCIA À CORROSÃO: OS MATERIAIS COMPÓSITOS SÃO RESISTENTES À CORROSÃO, O QUE OS TORNA UMA BOA ESCOLHA PARA APLICAÇÕES EM AMBIENTES AGRESSIVOS, COMO EM AMBIENTES MARINHOS OU INDUSTRIAIS.
- CAPACIDADE DE SUPORTAR GRANDES ESFORÇOS: OS MATERIAIS COMPÓSITOS PODEM SUPORTAR GRANDES ESFORÇOS, O QUE OS TORNA UMA BOA ESCOLHA PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS.
- CAPACIDADE DE SUPORTAR TEMPERATURAS EXTREMAS: OS MATERIAIS COMPÓSITOS PODEM SUPORTAR TEMPERATURAS EXTREMAS, O QUE OS TORNA UMA BOA ESCOLHA PARA APLICAÇÕES EM AMBIENTES QUENTES OU FRIOS.
- COMPLEXIDADE DAS GEOMETRIAS: OS MATERIAIS COMPÓSITOS PODEM SER MOLDADOS EM UMA VARIEDADE DE GEOMETRIAS COMPLEXAS.
- MAIOR RESISTÊNCIA QUE OS MATERIAIS NÃO COMPÓSITOS: OS MATERIAIS COMPÓSITOS SÃO GERALMENTE MAIS RESISTENTES DO QUE OS MATERIAIS NÃO COMPÓSITOS. ISSO OS TORNA UMA BOA ESCOLHA PARA APLICAÇÕES ONDE A SEGURANÇA É IMPORTANTE.
- CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE VIBRAÇÕES: OS MATERIAIS COMPÓSITOS COM MATRIZ POLIMÉRICA, COMO A MATRIZ DE RESINA FENÓLICA, ABSORVEM MAIORES NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM COMPARAÇÃO COM OS MATERIAIS METÁLICOS. ISSO OS TORNA UMA BOA ESCOLHA PARA APLICAÇÕES ONDE O CONFORTO É IMPORTANTE, COMO EM VEÍCULOS E MÁQUINAS.

O material utilizado nesta pesquisa, nomeadamente o papel fenólico, é do tipo que utiliza uma matriz polimérica, a resina fenólica (fenol-formaldeído), em que são endurecidas permanentemente por meio de reações químicas.

Os polímeros representam macromoléculas originadas a partir de unidades repetidas chamadas monômeros, e exibem notáveis características, incluindo resistência à corrosão e à água, flexibilidade e facilidade de produção, colocando-os como promissores candidatos para substituir materiais convencionais. Os polímeros podem ser classificados em biodegradáveis e não biodegradáveis, a resina fenólica é denominada um polímero sintético, ou seja, não biodegradável (Das Lala *et al.*, 2018).

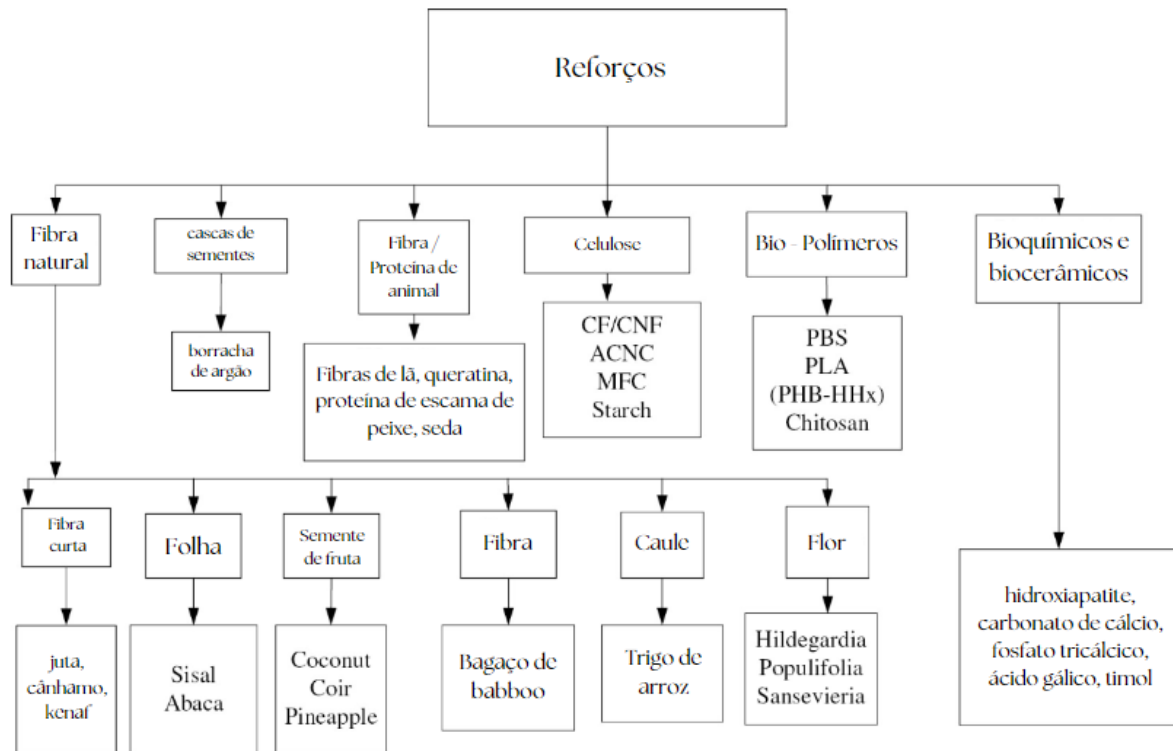


Figura 10 - Diferentes tipos de reforços em compósitos de matriz polimérica (Adaptado de Das Lala *et al.*, 2018).

Em relação aos reforços utilizados, estes são do tipo reforço natural em que a partir da Figura 10 é possível verificar todas as combinações possíveis. Para o papel fenólico é utilizado a celulose como reforço, esta pode ser natural ou modificada. Entre as modificadas existem cinco tipos diferentes (Ganapathy *et al.*, 2022):

- **CF/CNF/MFC:** A CELULOSE NANO FIBRILADA (CNF) E MICRO FIBRILADA (MFC), É UMA ESTRUTURA INTRÍNSECA DA CELULOSE, NA QUAL AS FIBRILAS DE CELULOSE SÃO COMPOSTAS POR CADEIAS POLIMÉRICAS ORGANIZADAS EM UMA MATRIZ. ESSAS FIBRILAS SÃO MUITO FINAS, COM DIMENSÕES NA ESCALA MICRO OU NANOMÉTRICA. JÁ A CELULOSE CRISTALINA (CF) REFERE-SE À ORGANIZAÇÃO ALTAMENTE ORDENADA DAS CADEIAS DE CELULOSE EM UMA ESTRUTURA CRISTALINA, FORMANDO UMA REDE TRIDIMENSIONAL DE LIGAÇÕES DE HIDROGÊNIO.
- **ACNC:** A CELULOSE NANO CRISTALINA ACETILADA (ACNC) PASSA POR UM PROCESSO DE ACETILAÇÃO, NO QUAL GRUPOS ACETIL SÃO INTRODUZIDOS NAS FIBRILAS DE CELULOSE, RESULTANDO EM UMA ESTRUTURA MAIS COMPATÍVEL COM POLÍMEROS E OUTROS MATERIAIS
- **STARCH:** É UM AMIDO, OU SEJA, UM POLISSACARÍDEO PRESENTE EM PLANTAS.

2.3.1. PAPEL FENÓLICO

O papel fenólico é um tipo de material compósito feito de fibras de celulose recobertas com resina fenólica. A história do desenvolvimento do papel fenólico teve início no século XX, quando a resina fenólica foi desenvolvida pela primeira vez, esta resina é uma classe de resinas termo estáveis derivadas do ácido fenólico, ao qual são produzidas pela reação química do ácido fenólico com aldeídos, como formaldeído ou acetaldeído, em presença de ácidos ou catalisadores. São altamente resistentes ao calor, à umidade e à abrasão, possuem também alta resistência mecânica e excelente estabilidade dimensional.

O químico alemão Johann F. W. A. Von Baeyer foi responsável por experimentar a mistura entre fenol e formaldeído em 1872 (Allen & Ishida, 2001), mas foi apenas em 1907 que o belga Leo H. Baekeland patenteou e comercializou a resina, conhecida como *bakelite* (Resende, 2018). A resina fenólica foi inicialmente utilizada como material de revestimento para superfícies, como pisos e mesas, mas rapidamente se tornou uma matéria-prima valiosa para a produção de muitos outros materiais, incluindo o papel fenólico.

A produção dessas resinas é a partir da reação de polimerização entre fenóis e aldeídos, ou seus derivados, gerando uma resina *resol* ou *novalac*. Primeiramente é adicionado formaldeído ao fenol junto de algum catalisador, este pode ser ácido ou básico, a partir dessa mistura há a formação de um pré-polímero em temperaturas mais baixas ou de uma cadeia polimérica (Renda, 2015), dependendo do tipo de catalisador. A resina *novalac*, normalmente mais utilizada no fabrico do papel fenólico, é formada a partir da mistura com catalisadores ácidos, em que o fenol está em excesso em relação ao formaldeído, ocorrendo uma reação de condensação incompleta (Dodiuk, 2022).

A reação de cura ou reticulação é, geralmente, o último passo na produção de resinas fenólicas e outros tipos de resinas poliméricas, e tem grande importância para garantir a qualidade e consistência final (Renda, 2015). Durante esse processo, os pré-polímeros são transformados em cadeias poliméricas mais longas e complexas, geralmente através da reação com agentes químicos como catalisadores ou agentes de reticulação. O resultado final é uma resina polimérica mais densa, mais forte e mais resistente ao impacto, e com características únicas de resistência a altas temperaturas, resistência química e propriedades elétricas

No início da década de 1930, os engenheiros começaram a experimentar a combinação de papel *kraft* e resina fenólica como uma solução para aumentar a resistência mecânica e a resistência à humidade de peças elétricas e eletrônicas, esses experimentos resultaram na criação do papel fenólico, que foi rapidamente adotado como material de base para componentes elétricos e eletrônicos, como terminais, suportes, fios e outros.

Com o tempo, este material tornou-se uma escolha popular para aplicações na área da eletrônica como isolante em equipamentos elétricos, em materiais de construção como revestimento para painéis de madeira, na indústria automóvel como isolante em componentes de carros e até mesmo na indústria aeroespacial como isolante de aviões ou satélites. Na engenharia mecânica é utilizado como material isolante elétrico em transformadores, motores elétricos, no fabrico de peças de alto desgaste ou de fricção constante, como embraiagens e freios, entre outros.

O processo de fabrico do papel fenólico envolve várias etapas, primeiramente ocorre a preparação das fibras de celulose, em que estas são primeiramente tratadas e desfiadas para formar uma massa. A partir dessa etapa a massa é embebida na resina fenólica por 20 segundos, prensada entre dois cilindros e pré-curada em um forno com uma temperatura em torno dos 103°C durante 24 horas. As folhas são então espalhadas uniformemente sobre um molde e secas a uma temperatura elevada para evitar uma retração excessiva, normalmente em torno dos 150°C (Sinha, 2021).

A temperatura desta cura precisa ser cuidadosamente monitorada durante o processo de fabrico para garantir que a resina cure de maneira adequada e que o papel fenólico tenha as propriedades desejadas. Se a temperatura for muito baixa, a resina pode não curar corretamente, o que pode levar a uma redução da resistência mecânica e da resistência à altas temperaturas. Por outro lado, se a temperatura for muito alta, pode haver uma deterioração da resina, o que também pode afetar as propriedades do papel fenólico.

A próxima etapa do processo de fabrico envolve a prensagem da folha já seca para aumentar a densidade e a resistência mecânica. A secagem final da folha é feita a uma temperatura elevada, em

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

torno de 120° a 160°C com uma magnitude entre 16 e 24 MPa por até uma hora, para aumentar a sua resistência à humidade e outros fatores ambientais (Sinha, 2021).

O objetivo da secagem final é remover a humidade residual da folha de papel fenólico e garantir que a resina fique completamente curada e estabilizada antes de ser cortada ou processada e também ajuda a evitar a deformação durante o armazenamento ou uso posterior. Por fim, a folha seca é então cortada, lixada e acabada para melhorar sua aparência e para remover quaisquer imperfeições ou irregularidades.

As folhas são juntas e laminadas, geralmente por meio de prensagem a quente, para formar o papel fenólico da espessura desejada. Este processo é rigorosamente controlado para garantir que o material tenha as propriedades desejadas e ajustado de acordo com as especificações do cliente.

O papel fenólico utilizado na parte experimental deste projeto segue as normas técnicas europeias BS EN 60893-3-4-PFCP201 B4B. A norma BS EN 60893 é uma série de normas europeias que estabelecem os requisitos para a classificação, o desempenho, o ensaio e a avaliação de segurança de materiais compósitos elétricos, incluindo papel fenólico. A norma BS EN 60893-3-4-PFCP201 é uma norma específica da série que se concentra em materiais compósitos de papel fenólico para aplicações em alta tensão, estabelecendo requisitos e critérios rigorosos para as propriedades mecânicas, de estabilidade dimensional e de resistência à humidade do material.

A partir da Tabela 1 é possível verificar as propriedades elétricas do material a ser estudado.

Tabela 1 - Propriedades elétricas do papel fenólico BSEN60893-3-4-PFCP201 B4B

Propriedades Elétricas	Valor Típico
Resistência Elétrica (24h imerso em água) [GΩ]	0,002
Resistência Elétrica (seco) [GΩ]	0,002
Força Elétrica / Rigidez Dielétrica (<i>Flat Rapid</i>) [MV/m]	3
Força Elétrica / Rigidez Dielétrica (<i>Flat Step by Step</i>) [MV/m]	2
Tensão de Rotura (<i>Edge Step by Step</i>) [kV]	12
Índice de Rastreamento [V]	110

A resistência elétrica de um material compósito quando imerso em água refere-se à capacidade do material de resistir à passagem de corrente elétrica após ser submerso em água por um período de 24 horas. Essa propriedade é relevante em aplicações em que os materiais compósitos estão expostos a ambientes húmidos ou submersos. O inverso pode ser explicado para a resistência elétrica quando seco.

A rigidez dielétrica é uma medida da capacidade de um material de resistir a uma rotura dielétrica, ou seja, é a capacidade de um material de suportar uma diferença de potencial elétrico sem se romper ou conduzir eletricidade.

A rigidez dielétrica flat rapid é medida aplicando-se uma tensão elétrica crescente ao material em uma taxa constante até que ocorra uma rotura dielétrica. Nesse método, a tensão elétrica é aumentada rapidamente até que ocorra a rotura dielétrica. Já na rigidez dielétrica *flat step by step*, a tensão elétrica é aumentada gradualmente até que ocorra a rotura dielétrica. Nesse método, a tensão elétrica é aumentada em incrementos pequenos e constantes, e a medida é realizada em cada etapa do aumento da tensão elétrica.

A tensão de rotura *edge step by step* é um método de teste usado para medir a resistência dielétrica de um material isolante e é determinada ao longo de um caminho de ar pré-determinado, que

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

é aumentado gradualmente em etapas até ocorrer a falha dielétrica. Outro método de medição seria ao utilizar o método de rigidez dielétrica *flatwise*, a partir da utilização de uma tensão elétrica contínua em toda a superfície.

O índice de rastreamento é uma medida da capacidade de um material isolante elétrico para resistir à formação de correntes superficiais e é utilizado como um indicador da qualidade do isolamento elétrico. A partir da Tabela 2 é possível conhecer as propriedades térmicas e mecânicas do material.

Tabela 2 - Propriedades térmicas e mecânicas do papel fenólico BSEN60893-3-4-PFCP201 B4B

Propriedades Térmicas e Mecânicas	Valor Típico
Resistência à Flexão [MPa]	180
Resistência ao Impacto / Energia de Impacto [kJ/m^2]	4
Temperatura máxima de uso contínuo [$^{\circ}C$]	100
Temperatura máxima de uso intermitente [$^{\circ}C$]	120

A resistência à flexão é uma propriedade mecânica que mede a capacidade de um material suportar cargas aplicadas em um modo de flexão, ou seja, quando é submetido a forças que o fazem dobrar ou curvar. A propriedade mecânica de energia de impacto, também conhecida como resistência ao impacto, mede a capacidade de um material absorver energia quando submetido a um impacto repentino ou carga de choque. Essa propriedade é importante para avaliar o comportamento de materiais em situações em que ocorrem colisões, batidas ou forças de impacto rápidas.

A propriedade de temperatura máxima de uso contínuo refere-se à temperatura máxima na qual um material pode ser utilizado de forma contínua sem sofrer degradação ou danos significativos em suas propriedades físicas e mecânicas. O mesmo pode ser explicado em situações de utilização temporárias para a propriedade de temperatura intermitente.

Em geral, as propriedades térmicas e mecânicas do papel fenólico tornam-no uma opção versátil e confiável para muitas aplicações na indústria. Algumas propriedades gerais importantes contam com a densidade, de valor típico $1,35 g/cm^3$ e a capacidade de absorção de água, de 210 mg.

2.4. TÉCNICAS ÓTICAS

A história das técnicas óticas remonta à antiguidade, quando os primeiros filósofos gregos começaram a estudar a natureza da luz e desenvolveram algumas das primeiras leis da ótica. No século XIII, Roger Bacon redescobriu as lentes convexas e côncavas, e no século XIV, John Pecham desenvolveu o primeiro método para fabricar lentes de vidro. No século XV, Leonardo da Vinci fez importantes estudos sobre a perspectiva e a refração da luz, e no século XVI, Johannes Kepler desenvolveu as leis da refração da luz. (Vohnsen, 2004).

No século XVII, Isaac Newton propôs que a luz era composta de ondas, e no século XVIII, Thomas Young realizou experiências que comprovaram a teoria de Newton. No século XIX, Augustin Fresnel desenvolveu a teoria ondulatória da luz, e no século XX, Albert Einstein propôs que a luz também tem propriedades de partícula, o que ficou conhecido como teoria quântica da luz (Darrigol, 2012).

A evolução conta com o desenvolvimento de dispositivos como o telescópio e o microscópio, em que estes foram inicialmente desenvolvidos para a observação de objetos distantes ou pequenos, mas

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

rapidamente se expandiram para outras aplicações, como a medição de distâncias, ângulos e velocidades (Las Casas, 2020).

A criação dos primeiros instrumentos óticos de medição é creditada ao astrônomo e matemático alemão Johannes Kepler, que inventou o telescópio em 1611 (Las Casas, 2020), e era utilizado para medir com precisão as distâncias entre os planetas, e também para medir a altura dos edifícios e a distância entre as montanhas.

A partir do século XVII o físico holandês Antonie van Leeuwenhoek desenvolveu o primeiro microscópio simples capaz de ampliar até 200x, posteriormente essa técnica foi estudada e aprimorada para uma resolução de imagens de maior qualidade (Mannheimer, 2002). No século XX, houve um grande desenvolvimento das técnicas óticas, com o advento da fotografia e da cinematografia, que permitiram a captura de imagens em movimento, o que abriu novas possibilidades para o estudo de fenômenos físicos e biológicos.

Em especial a técnica de correlação de imagens digitais, que será abordada neste projeto, teve os primeiros métodos de medição que evoluíram para o conceito de correlação digital de imagens foram discutidos por Doyle e Gruner, destacando o impacto do trabalho de Heinrich Lambert em 1759 intitulado de "*Perpectiva Liberata*" e a implementação prática por Daguerre em 1837 (Blikharskyy et al., 2022b).

A correlação de imagens em si teve a sua primeira utilização datada nos anos 50 por Gilbert Hobrough (Carvalho, 2019) ao comparar diferentes perspectivas por meio de imagens analógicas de fotografias, introduzindo a correspondência de imagem (Blikharskyy et al., 2022b). Com o passar dos anos, Hobrough desenvolveu instrumentos de análises fotográficas utilizados para recolha de dados através da comparação de imagens. Essa técnica teve maior desenvolvimento a partir da criação das câmaras digitais, em 1975 por Steven Sasson Kodak.

Algumas técnicas utilizadas nessa época eram a interferometria *laser*, *speckle laser*, holografia, entre outros. Devido à ocorrerem problemas na parte de pós-processamento dos dados, foi preciso o desenvolvimento de novas ferramentas para a correta extração de informações (Blikharskyy et al., 2022b).

Foi só em 1982, por W. Ranson e W. Peters, propuseram o uso de ondas ultrassônicas para obter "imagens" digitais de campo completo, usando reflexão antes e após o carregamento. A utilização de algoritmos numéricos para o cálculo de deslocamentos através das deformações foi concebida por Sutton em 1983, para análises em duas dimensões. Russel combinou radiografia de raios-X e DIC para medir deformações internas em materiais compósitos. Nos anos 90, houve um foco em medir deformações superficiais em componentes planares, incluindo estudos de processos de craqueamento e análise de desempenho de fratura em diversos materiais (Blikharskyy et al., 2022b).

A análise 3D só foi aprofundada e introduzida na década de 90 por Moriimoto e Fujigaki, e posteriormente foi aprimorada por Yuh J. Chao a partir de um sistema de aquisição de dados em *stereo* e múltiplas câmaras (Las Casas, 2020).

No início dos anos 2000, a técnica DIC expandiu-se para uma variedade de questões de engenharia, em que diversos trabalhos de pesquisa se concentraram em melhorar a precisão do processo de correspondência de imagens e propuseram funções de interpolação *spline* de ordem superior para melhorar a precisão da correspondência. Alguns autores também exploraram a aplicação de funções de forma quadrática para estudar campos de deformação não uniformes (Blikharskyy et al., 2022b).

2.4.1. TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

A correlação de imagem digital é uma técnica ótica não destrutiva para análise de imagens de alta precisão, o qual é utilizada para determinar e medir campos completos de deslocamento e deformações sujeitos à esforços externos. Esta técnica é embasada no processamento digital de imagens e computação numérica (Pan, 2010) e é fundamentada nos princípios da mecânica contínua, em especial a mecânica dos corpos rígidos (Górszczyk *et al.*, 2019).

Este tipo de medição foi inicialmente utilizado na década de 80 por Walter H. Peters e Walter F. Ranson para a medição de deslocamento de uma superfície a partir da técnica de *laser speckle* (“manchas” de luz refletidas na superfície), ao comparar as pequenas sub-regiões entre as imagens. Com o avanço dos estudos nessa área, foi possível aplicar este método para a determinação de diversos parâmetros, como deformações a partir de tensões aplicadas, tensões residuais, tensões superficiais sob solicitações de compressão, propagação de fissura, entre outros (Quanjin *et al.*, 2020).

É possível quantificar os parâmetros de deslocamento em 2D e em 3D. Para o método em três dimensões utiliza-se duas câmaras corretamente posicionadas que ao final obtém-se o campo de deslocamentos tridimensionais da superfície em análise. Isso é possível devido aos parâmetros intrínsecos e extrínsecos calibrados com alvos óticos na câmara (Mühl Castoldi *et al.*, 2017). Já a técnica em duas dimensões correlaciona os pontos deslocados dentro do plano da imagem (Várady, 2016), ou seja, são gerados campos de deformações bidimensionais e a cores a partir da área dos pontos da superfície, em que estes possuem um número definido de *pixels* de câmara.

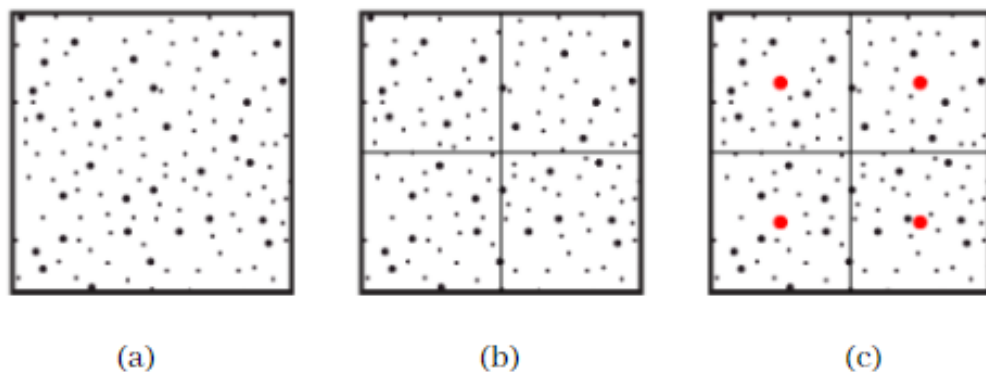


Figura 11 – Etapas iniciais da técnica DIC em que (a) é a imagem de referência, (b) são as delimitações dos subconjuntos e (c) são os pontos de referência de cada subconjunto representado em vermelho (Adaptado de Lepage, 2021).

A correlação de imagens digitais utiliza padrões *speckle* como base de referência para o cálculo do campo de parâmetros desejados, neste caso o parâmetro será a deformação final. Primeiramente é estabelecida a imagem padrão que será comparada com a imagem após deformação/deslocamento, já com o padrão *speckle* imposto (Figura 11 (a)), de seguida é definido um ou mais subconjuntos de pontos a partir da imagem de referência, estas áreas possuem os pontos que serão rastreados (Figura 11. (b)). O deslocamento é calculado através dos pontos a partir de um ponto de referência que não faz parte do padrão *speckle*, e encontra-se localizado no centro de cada subconjunto (Figura 11. (c)).

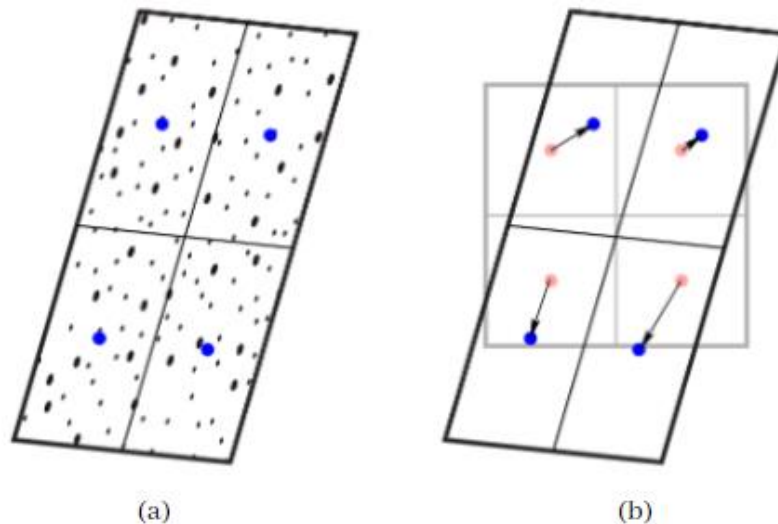


Figura 12 - Etapas finais da técnica DIC em que (a) é a combinação dos subconjuntos deformados com os subconjuntos de referência e (b) é a representação do cálculo dos deslocamentos de cada subconjunto (Adaptado de Lepage, 2021).

Na Figura 11 (c) existem quatro subconjuntos com quatro pontos de referência no total, que resultarão em quatro valores de deslocamentos/deformações calculados. Ao final da deformação, a imagem que contém os subconjuntos deformados é comparada e combinada com os subconjuntos da imagem de referência (Figura 12. (a)). Com a combinação de imagens, a técnica DIC calcula o deslocamento relativo a partir da diferença entre os dois pontos dos subconjuntos, no caso o ponto azul e vermelho (Figura 12. (b)).

O resultado é um deslocamento em forma de vetor. Para casos de duas dimensões pode-se decompor o vetor em um sistema de coordenadas verticais (v) e horizontais (u), já os de três dimensões decompõem-se em três coordenadas (u , v , w).

2.4.2. IMAGEM DIGITAL

Uma imagem digital é uma representação numérica de uma imagem, geralmente armazenada em um arquivo de computador e são compostas por *pixels*, que são pequenos blocos de cor que, juntos, formam uma imagem completa. As imagens digitais em escala de cinza possuem apenas variações de intensidade de branco e preto, elas são usadas nas técnicas de correlação de imagens porque as informações digitais são mais fáceis de serem processadas e detetadas, especialmente quando se trata de detecção de padrões ou comparação de imagens.

A qualidade de uma imagem digital é determinada pela resolução, que é o número de *pixels* presentes na imagem, os quais possuem as suas posições bem definidas através de coordenadas (x,y), e uma intensidade $F(x,y)$ que é uma função bidimensional ao qual corresponde à intensidade luminosa da imagem (Rosas, 2019).

A conversão da intensidade média incidente em cada *pixel* para valores discretos é feita através do processo de quantização (Scuri, 1999). Em quantização, a distribuição contínua de intensidade é dividida em vários intervalos ou "níveis" e, para cada intervalo, é atribuído um valor discreto correspondente, este valor é geralmente a média ou o valor médio da intensidade dentro do intervalo em cada área do *pixel*. Esse processo é repetido para cada pixel da imagem, designado na representação digital da imagem como uma matriz de valores discretos.

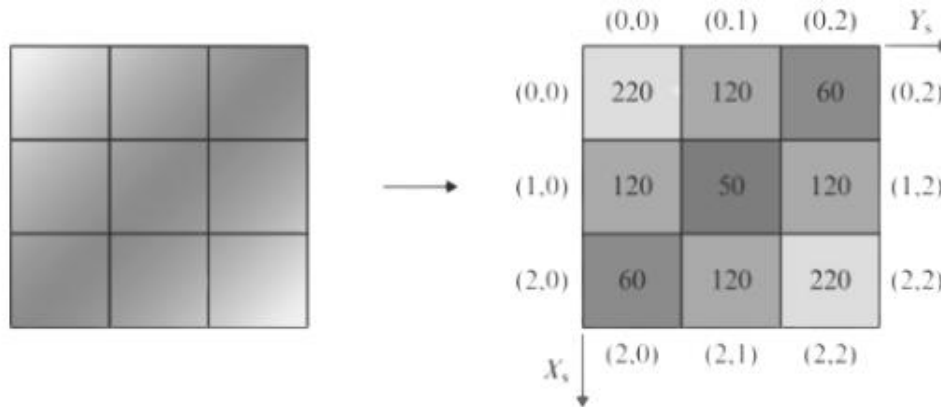


Figura 13 - Conversão da intensidade incidente em cada pixel da imagem digital para valores discretos. (Adaptado de Rosas, 2019).

Na conversão de uma imagem para um formato digital, a quantização é aplicada a cada *pixel* da imagem, com cada *pixel* sendo representado por um valor discreto de intensidade representado graficamente pela Figura 13. A precisão da quantização afeta a qualidade da imagem digital, uma quantização mais fina gera imagens com maior nível de detalhes e precisão, porém também requer mais espaço de armazenamento e largura de banda para transmitir a imagem.

2.4.3. PADRÃO SPECKLE

A qualidade do resultado da técnica DIC depende da qualidade do padrão *speckle*, e as condições para um padrão ideal dependem da superfície da amostra. Portanto, a superfície dever-se-á ter uma textura não periódica e ser isotrópica (Schreier *et al.*, 2009). Ou seja, não possuir repetições regulares e um padrão definido, além de não exibir variações significativas em suas características quando observada de diferentes perspectivas ou ângulos. A isotropia da amostra garante que as propriedades da textura, como densidade, orientação ou estrutura, não mudam de forma aparente ao observar a textura de diferentes direções.

O padrão de manchas ideal deve atender os seguintes requisitos (Lepage, 2021):

- DEVE COBRIR TODA A SUPERFÍCIE DA AMOSTRA;
- O PADRÃO DAS MANCHAS DEVE ESTAR TOTALMENTE ADERIDO À AMOSTRA E DEFORMAR-SE MAIS FACILMENTE DO QUE A AMOSTRA EM SI. HÁ TAMBÉM A POSSIBILIDADE DE UTILIZAR *SPECKLES* RÍGIDOS QUE SE MOVEM COM A DEFORMAÇÃO DA AMOSTRA, NESSE CASO OS ERROS EM RELAÇÃO AO CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS SÃO AINDA MENORES;
- A DENSIDADE DOS PONTOS DEVE SER RELATIVAMENTE ALTA, DE CERCA DE 50%. ISSO SIGNIFICA QUE O TAMANHO DO *SPECKLE* TEM DE ESTAR COM O MÍNIMO DE 5x5 *PIXELS*;
- O PADRÃO DEVE TER UM BOM CONTRASTE EM TONS DE CINZA E TER AS BORDAS SUAVIZADAS.

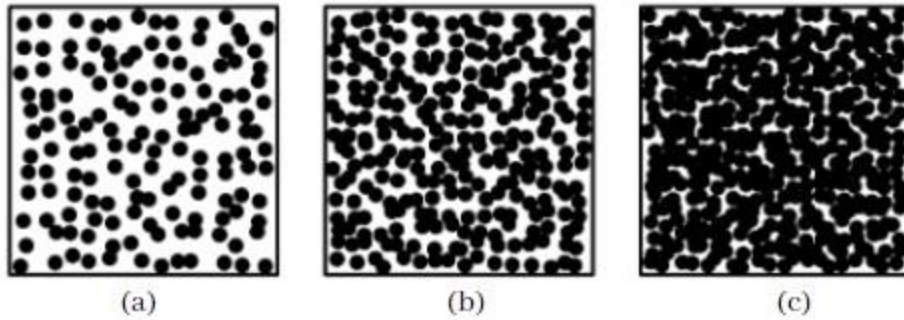


Figura 14 – Padronização do speckle em que (a) representa um padrão muito espaçado, (b) é a representação do padrão ideal e (c) é um padrão considerado muito denso (Adaptado de Lepage, 2021).

Nem sempre a textura da superfície gera um padrão ideal na amostra de maneira natural, sendo preciso a utilização de determinadas técnicas para obtenção de padrões artificiais que cumpram os requisitos listados acima, tais como a utilização de pintura com tintas *spray* ou corantes, partículas de pó, gravação a *laser*, litografia ou utilização de nano partículas. A Figura 14 (b) representa o tipo de padronização ideal para obter bons resultados com a técnica *DIC*.

2.4.4. PRINCÍPIOS DA CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS EM 2D

Normalmente em uma análise em duas dimensões o plano da amostra é paralelo ao plano do sensor de movimento da câmara, e por conta disso assume-se que os movimentos dessa amostra ocorram dentro do plano da amostra em si (Schreier *et al.*, 2009). O processo de amostragem é feito por somente uma câmara CCD que faz apenas análises planares, em situações em que se deseja uma análise espacial deve-se priorizar o uso de duas ou mais câmaras CCD em uma análise em três dimensões ('*Results and Experiences from the Application of Digital Image Correlation in Operational Modal Analysis*', 2013).

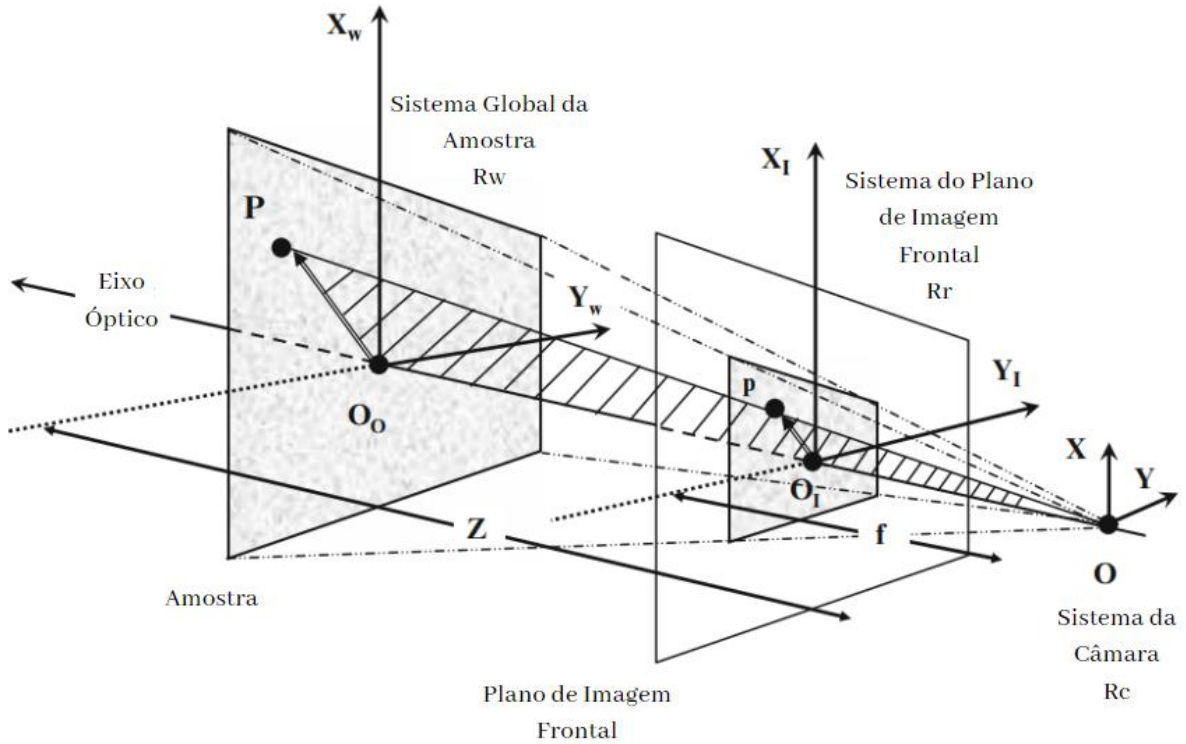


Figura 15 – Imagem 2D do plano global da amostra utilizando o plano de imagem frontal (Adaptado de Schreier *et al.*, 2009).

A partir da Figura 15 observa-se que os pontos da superfície da amostra estão à mesma distância Z do plano do sensor de movimentos da câmara, o que faz com que todos os valores do vetor entre um ponto P genérico e o centroide da superfície do sistema global O_o , estejam em uma certa escala se comparado com o mesmo ponto p e o centroide O_i do sistema do plano da imagem frontal captada pelo sensor da câmara (Schreier *et al.*, 2009).

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left(\frac{fS_x}{Z}\right) \times X_w \\ \left(\frac{fS_y}{Z}\right) \times Y_w \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c_x \\ c_y \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_x X_w \\ S_y Y_w \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c_x \\ c_y \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

Os dois vetores de posição dos pontos genéricos P e p estão no plano do eixo óptico e são correlacionados através de uma transformação matricial [2.2] entre os valores das coordenadas. As coordenadas globais do ponto P encontram-se no sistema de coordenadas X_w, Y_w e Z_w e a posição relativa dentro desse sistema é $(X_w, Y_w, 0)$, já o ponto p possui as coordenadas no mesmo sistema de coordenadas da posição do sensor da câmara, X e Y , na posição (x_s, y_s) (Schreier *et al.*, 2009).

Na matriz de transformação dos pontos assume-se que o ângulo do plano do sensor é dado como

$$\theta = \frac{\pi}{2} = 0^\circ \quad [2.4]$$

Na equação (2.2) a parcela $\frac{f}{Z}$ define um fator de ampliação transversal da imagem. Visto isso, se $f > Z$ for verdadeiro significa que a imagem é fisicamente maior que a amostra e $f < Z$ corresponde a ampliação da imagem. Sendo S_x e S_y , o número de sensores por unidade de comprimento da amostra

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

no sistema do plano de imagem, uma maior ampliação é vista para uma menor quantidade de sensores, válido apenas para o mesmo fator de escala. Assim, a partir da equação (2.4) é possível mensurar quatro parâmetros intrínsecos (S_x , S_y , c_x e c_y) que definem a posição de um ponto genérico de uma amostra em uma imagem 2D digitalizada (Schreier *et al.*, 2009).

2.4.5. SISTEMA DE CALIBRAÇÃO 2D – DIC

A calibração é uma etapa crucial no processo de correlação de imagens digitais, pois determina a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos. O sistema de calibração consiste em ajustar as imagens digitais a uma escala comum e garantir que todas as imagens estejam na mesma referência, pode ser utilizado para realizar uma série de verificações, incluindo a verificação da precisão da posição dos pontos de referência, da resolução espacial, da precisão da escala e da precisão de medição de deslocamento.

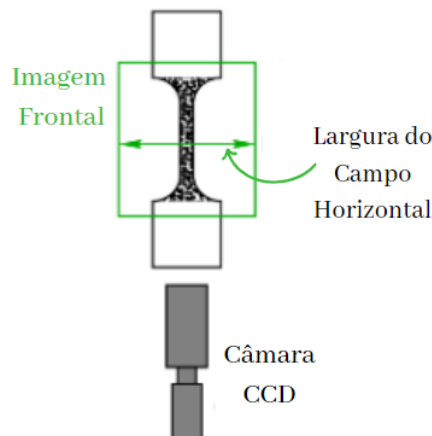


Figura 16 – Representação da calibração DIC através de uma linha em análises 2D. (Adaptado de Lepage, 2021).

Numa análise em duas dimensões a calibração é feita através de uma linha de comprimento. Normalmente essa linha é a largura do campo horizontal da imagem frontal digital ilustrado pela Figura 16, sendo preciso converter a escala desse comprimento de *pixel* para a ampliação da imagem (Lepage, 2021).

A linha conhecida é gravada em várias imagens durante o teste e usada como referência para a correlação. O comprimento da linha é medido em cada imagem e comparado com o comprimento da linha em uma imagem de referência, se a diferença entre os comprimentos for menor que um determinado limite, a calibração é considerada bem-sucedida.

O limite de diferença de comprimento para ser considerada bem-sucedida depende de vários fatores, como a precisão exigida pelo utilizador, a resolução da imagem, a sensibilidade do sistema de captura de imagem e a qualidade do processamento de imagem. No geral, o limite é estabelecido como uma pequena percentagem do comprimento total da linha ou como um valor absoluto em unidades de medida, como milímetros ou *pixels*.

É importante notar que, mesmo se a calibração por linha for considerada bem-sucedida, ainda é possível que os resultados da técnica *DIC* apresentem algum grau de erro nos resultados dos deslocamentos. Uma maneira de prevenir é com a utilização de uma régua de precisão para medição (Lepage, 2021), ou realizar outros tipos de calibrações, como a calibração de resolução espacial e a calibração de escala, para garantir a precisão total dos resultados.

2.4.6. ALGORITMOS DE CORRELAÇÃO

A correlação de imagens digitais pode ser feita de diversas maneiras, para comparar duas imagens e encontrar similaridade entre elas utilizam-se de algoritmos próprios com diferentes processos matemáticos de correlação de imagens. O método de correlação de fase, por exemplo, compara a fase da imagem em vez da amplitude, para encontrar a similaridade. Desta forma, este tipo de algoritmo é muito sensível a pequenas mudanças na fase, mas é menos sensível a mudanças na amplitude.

O método mais utilizado nos algoritmos é o de normalização cruzada, em que as imagens são normalizadas antes da comparação, permitindo uma comparação mais precisa. A correlação normalizada de informação mútua é baseada na teoria da informação e compara a informação mútua entre as imagens para determinar a similaridade. Já a correlação por diferença normalizada compara a diferença entre as imagens e a normaliza com o intuito de tornar a saída independente da escala e do brilho das imagens de entrada (Ferraz, 2013).

Os algoritmos utilizados para o cálculo dos parâmetros de correlação de imagens digitais diferem-se entre si pela quantidade de regiões analisadas, aos quais estabelecem como as grandezas físicas são obtidas (Ferraz, 2013). Existem vários tipos diferentes de algoritmos de correlação, incluindo a correlação de Pearson, a correlação de Spearman, a correlação de Kendall e a correlação parcial.

O *software* VIC – 2D, que será utilizado para cálculo da deformação através da correlação de imagens digitais neste projeto, é uma plataforma de análise de imagens 2D que utiliza o algoritmo de normalização cruzada de Pearson para correlacionar as imagens digitais da amostra antes e após deformação, o resultado é obtido a partir da variação e das diferenças entre os pontos de cor da imagem, através de uma análise estatística.

O *software* permite ao utilizador selecionar uma imagem de referência e uma imagem a ser detetada, e então aplicar o algoritmo de forma automática para produzir uma imagem de saída que mostra a similaridade entre as duas imagens, produzindo mapas de deslocamento ou de deformação que podem ser utilizados para avaliar a resposta mecânica dos materiais ou para analisar o comportamento de objetos em movimento. É útil para aplicações que procuram a medição da similaridade entre duas imagens, como a análise de deformações, a deteção de mudanças, a monitoração de processos e a análise de padrões, sendo também possível a utilização para corrigir distorções, melhorar a qualidade e extrair informações adicionais das imagens.

A correlação de Pearson explora o nível de dependência linear entre duas variáveis quantitativas para determinar se existe uma correlação estatística significativa entre elas, este nível é uma medida comum de associação que varia entre -1 e 1, onde -1 indica uma associação negativa perfeita, 1 indica uma associação positiva perfeita e 0 indica ausência de associação.

As variáveis são normalizadas para que suas médias sejam iguais a zero e suas variâncias sejam iguais a 1, em seguida é transformada a covariância entre as duas variáveis normalizadas e, por fim, é dividida pela multiplicação dos desvios-padrão das duas variáveis normalizadas.

$$\rho(a, b) = \frac{E(ab)}{\sigma_a \sigma_b} \quad (2.5)$$

O coeficiente de correlação de Pearson (CCP) [2.5] é definido por duas variáveis aleatórias a e b de valor médio real igual a zero, em que $E(ab)$ é a parcela da correlação cruzada entre as duas variáveis, σ_a é a variância do sinal a e σ_b é a variância do sinal b (Benesty *et al.*, 2009).

$$\rho^2(a, b) = \frac{E^2(ab)}{\sigma_a^2 \sigma_b^2} \quad (2.6)$$

No geral, é mais conveniente a utilização do coeficiente de correlação de Pearson ao quadrado [2.6] (Benesty *et al.*, 2009). Em que as variâncias de a e b são, respetivamente, $\sigma_a^2 = E(a^2)$ e $\sigma_b^2 = E(b^2)$. O CCP ao quadrado é amplamente utilizado porque fornece uma medida normalizada de associação linear entre as duas variáveis, já que se limita a valores entre 0 e 1, podendo ser interpretado como a percentagem de variação das variáveis explicada pela relação linear entre elas. A comparação entre duas imagens digitais é facilmente feita, independente da escala ou do desvio padrão das intensidades de cor.

A propriedade mais importante do coeficiente de correlação de Pearson ao quadrado é a relação entre a correlação linear entre as variáveis (Benesty *et al.*, 2009).

$$0 \leq \rho^2(a, b) \leq 1 \quad (2.7)$$

A relação entre a intensidade da correlação linear entre as duas variáveis [2.7] é dada pelos números 0 e 1, em que 0 significa que as variáveis não estão correlacionadas, ou seja, são independentes e quanto mais próximo de 1, maior é a correlação entre ambas as variáveis (Benesty *et al.*, 2009). Desta forma, o *software* VIC-2D consegue, a partir das imagens comparar e calcular a relação da correlação entre os pontos ou regiões de interesse e futuramente determinar as deformações ou deslocamentos entre as imagens.

Os valores de correlação mais altos, próximos de 1, indicam as áreas onde a deformação ou deslocamento pode ser determinados com alta precisão, enquanto valores de correlação mais baixos indicam áreas onde a análise é mais desafiadora devido a deformações substanciais, descontinuidades ou ruído. A interpretação destes resultados é de forma qualitativa por meio de mapas/gráficos de cores que indicam as áreas em que há maior confiabilidade nos resultados, e as de menor confiabilidade.

2.5. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é uma técnica numérica usada para resolver equações matemáticas em simulações e análises de problemas de engenharia. É normalmente aplicado em situações de estudo de maior complexidade em que, após a obtenção das soluções individuais para cada elemento, empregam-se os princípios de continuidade para calcular as propriedades de interesse em todo o domínio do componente. O princípio da continuidade é aplicado meticulosamente para garantir a preservação de todas as características geométricas dos elementos finitos, realizando uma interpolação cuidadosa dos resultados entre os elementos adjacentes ao longo da fronteira de contorno.

É possível encontrar vestígios do método dos elementos finitos há muitas décadas, mas é possível datar a sua utilização na década de 1960 pelo professor britânico Ray W. Clough e pelo professor norte americano Olgierd C. Zienkiewicz no contexto da análise de estruturas aeronáuticas, em que este estudo foi formalmente publicado como um livro em 1967 (Rao & Atluri, 1983).

Originalmente o MEF foi criado para o estudo das estruturas de aeronaves, hoje em dia a utilização do algoritmo foi expandida para a resolução de diversos tipos de situações, bem como na mecânica estrutural como na solução de problemas de dinâmica dos fluidos, condução de calor, análise de vibrações, entre outros.

O método dos elementos finitos é uma técnica que visa encontrar a solução de um problema complexo ao substituí-los por um número finito de elementos de soluções bem mais simples, cuja fórmula matemática indica uma resposta bem aproximada ao problema original através de equações diferenciais (Rao & Atluri, 1983). A resolução é feita individualmente para cada elemento, em que este elemento é conectado a outros elementos através das fronteiras de contorno, que formam o domínio da estrutura/componente e a análise final é em torno da solução global dos resultados de todos os elementos existentes.

O processo de cálculo envolve a discretização da região de interesse do problema em vários elementos finitos. Por exemplo, para problemas de área bidimensional a discretização é feita através de pequenos retângulos, podendo também ser feito com elementos triangulares. Outras técnicas, como a discretização usando elementos hexagonais ou octogonais, também podem ser utilizadas, essas técnicas utilizam aproximações polinomiais, como *splines*, para aproximar as soluções das equações diferenciais parciais.

As equações diferenciais parciais são então transformadas em equações algébricas lineares, representando as forças e as deformações nos pontos de contorno de cada elemento. Estas equações algébricas são então resolvidas para os parâmetros desconhecidos a partir de técnicas de solução numérica, podendo ser pelo método de Galerkin, o método de Galerkin limitado e o método dos elementos finitos lineares ou não lineares (Rao & Atluri, 1983).

O uso cada vez maior de computadores tornou possível a realização de análises mais complexas de forma mais rápida e precisa, devido a estes avanços, o método dos elementos finitos é hoje um dos métodos mais utilizados para análise matemática de forma numérica, entre os principais *softwares* para simulação computacional do MEF encontram-se o Ansys, Abaqus, Matlab e o Nastran.

A validação e verificação dos resultados obtidos pelo MEF desempenham um papel crucial na garantia da confiabilidade e precisão das simulações numéricas. A importância desses processos reside na necessidade de assegurar que os modelos e resultados gerados pelo MEF se aproximem da realidade física e correspondam a fenômenos observáveis. Isso é essencial para tomar decisões informadas em projetos de engenharia, pesquisa científica e desenvolvimento de produtos.

Essa validação envolve a comparação dos resultados do MEF com dados experimentais físicos, permitindo identificar discrepâncias, avaliar a capacidade do modelo numérico em registrar o comportamento físico esperado e a identificar eventuais erros ou simplificações nos modelos, incentivando ajustes e refinamentos para melhorar a correlação entre os resultados numéricos e os dados experimentais.

A análise por elementos finitos não se limita apenas à indústria, sendo uma ferramenta essencial também para a pesquisa científica em diversas áreas. Na engenharia mecânica é utilizado para simular o comportamento de estruturas, componentes e sistemas, permitindo prever respostas a cargas mecânicas, térmicas e fluido dinâmicas. Um exemplo notável é a utilização do MEF na área de testes *ICT*, com destaque para a avaliação do comportamento de camas de agulhas utilizadas em testes de placas de circuito impresso.

O MEF é empregado na análise de camas de agulhas para *PCBs* como uma abordagem eficaz para entender como esses componentes interagem com a placa durante os testes de conexão elétrica. A complexidade dos layouts dos *PCBs*, aliada às variáveis geométricas das agulhas e à diversidade das condições de teste, faz com que seja difícil prever com precisão o comportamento dessas camas apenas por meio de métodos analíticos tradicionais.

Através desse método, é possível criar modelos virtuais das camas de agulhas e simular o processo de teste em condições controladas, considerando diversos fatores, como cargas mecânicas,

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D deslocamentos, pressões e reações nos pontos de contato das agulhas com a placa. Essas simulações fornecem *insights* importantes sobre a distribuição de forças, deformações e tensões nas agulhas e na placa durante o teste.

3. ESTUDO DE CASO

3.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo aborda uma análise numérica abrangente do comportamento mecânico da placa de cama de agulhas utilizadas nos testes *ICT* de placas de *PCB*. O principal objetivo é investigar as respostas desenvolvidas e as deformações dessas placas sob as condições de carga impostas. Para atingir esse objetivo, o *software* de simulação ansys será empregue para realizar análises de elementos finitos.

A simulação numérica desempenha um papel fundamental na compreensão do comportamento mecânico complexo das estruturas, permitindo a visualização e análise de fenômenos que muitas vezes são difíceis de serem verificados apenas por meio de métodos analíticos tradicionais. Neste estudo, a análise numérica fornecerá informações identificadas sobre as distribuições de tensões, deformações, essas informações são essenciais para otimizar a conceção do componente, aumentando a confiabilidade dos testes *ICT* e, por consequência, a qualidade das *PCBs* produzidas.

Além da análise numérica, este capítulo também destaca a importância da validação experimental para confirmar a precisão das simulações realizadas. As análises experimentais fornecem dados reais sobre as respostas fornecidas pelas placas de cama de agulhas, permitindo uma comparação direta com os resultados numéricos recebidos pelo ansys. A concordância entre os dados experimentais e os resultados das simulações validará a capacidade do modelo numérico em prever com precisão o comportamento mecânico das placas de cama de agulhas sob condições de teste reais.

No próximo segmento, serão apresentados os detalhes da metodologia de análise numérica empregada, incluindo considerações de modelagem, condições de contorno, propriedades do material e cenários de carga. Posteriormente, serão discutidos os procedimentos de validação experimental e os resultados comparativos entre as análises analíticas e experimentais.

Ainda neste capítulo, será explorado a abordagem experimental da investigação, aprofundando no estudo do comportamento mecânico das placas de cama de agulhas projetadas para testes de *ICT* em placas de *PCB*. Como parte do esforço para compreender a resposta estrutural dessas placas sob diferentes condições de carregamento, conduziu-se uma análise numérica prévia no *software* ansys. Na presente seção, será expandido a abordagem ao empregar uma análise experimental que complementarará e validará os resultados obtidos anteriormente.

A estratégia de validação é baseada na técnica de correlação de imagens digitais em duas dimensões. Essa técnica oferece uma abordagem direta e não invasiva para medir e analisar deformações em uma superfície ao registrar imagens da amostra durante diferentes etapas de aplicação de carga, será capaz de quantificar as deformações ao longo do tempo e correlacioná-las com as tensões e deformações previstas na análise numérica.

A condução dessa análise apresenta desafios distintos e oportunidades significativas, em que o alinhamento preciso da câmara, a seleção adequada das marcas de referência e a consideração das condições de iluminação são aspetos cruciais para garantir a precisão dos resultados.

Serão documentados os pormenores metodológicos da análise experimental, incluindo os procedimentos de preparação da placa, configuração da câmara, aquisição de imagens e processamento de dados. Além disso, será discutido os resultados obtidos, suas implicações para o projeto de placas de cama de agulhas e o impacto na precisão dos testes de *ICT* em placas de *PCB*.

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

Em suma, a análise experimental por meio da técnica *DIC-2D* representa um passo essencial para validar e aprimorar os entendimentos derivados da análise numérica anterior. A combinação dessas abordagens fornecerá uma perspectiva abrangente e confiável do comportamento mecânico das placas de cama de agulhas, enriquecendo a compreensão e contribuindo para a excelência nos testes de *ICT* em placas de *PCB*.

3.2. ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica utilizada para a determinação das deformações ocorridas nas placas de cama de agulhas para testes de *PCB* é a análise estrutural estática, esse tipo de estudo avalia a integridade estrutural dos componentes e pode ser feita no *software* ansys. Para todas as análises dos diferentes materiais será feito a partir da área do *workbench*, esta oferece uma interface gráfica intuitiva para criar, gerenciar e executar simulações em diversas áreas.

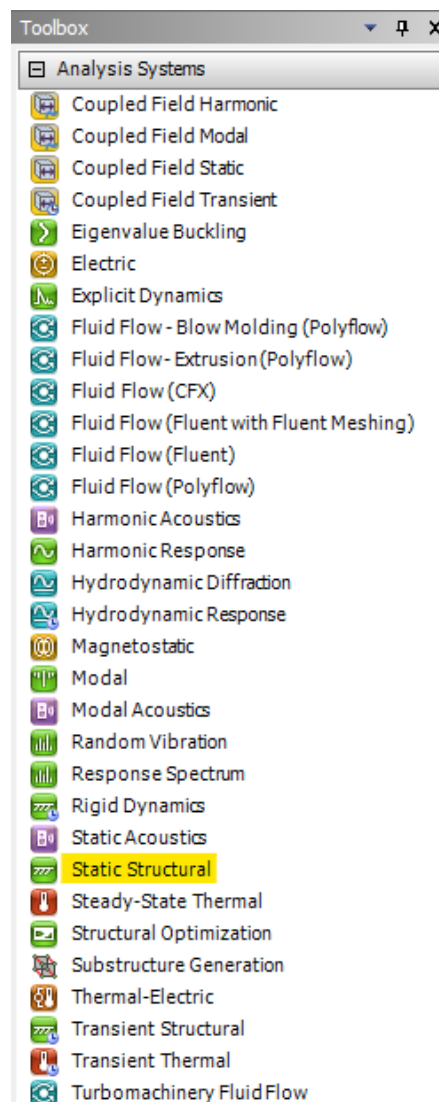


Figura 17 - Toolbox do *software* ansys

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

O *toolbox* ilustrado na Figura 17 oferece um conjunto abrangente de recursos e ferramentas adicionais para a realização das análises, esta área é dividida em módulos independentes, cada um focado em uma área específica, no caso em estudo será utilizado o módulo *static structural* que permite determinar o comportamento de uma estrutura ou componente sob cargas estáticas, determinando os deslocamentos, tensões, deformações e fatores de segurança.

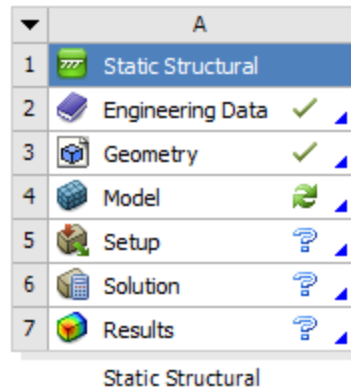


Figura 18 - Esquema de projeto da análise estrutural estática do *software* ansys

Ao selecionar o tipo de análise desejada, neste caso a de análise estrutural estática, é possível verificar um esquema de projeto, ilustrado na Figura 18, em que engloba os passos necessários para a realização do estudo.

O primeiro passo é criar ou importar o modelo o componente, isso envolve a definição da geometria, incluindo dimensões, formas e conexões. Também é necessário atribuir propriedades materiais, como módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*, às partes do modelo. Em seguida, são aplicadas as condições de contorno adequadas ao modelo. Isso inclui a fixação de pontos ou regiões que não podem se mover (restrições) e a aplicação de cargas externas, como forças, momentos ou pressões.

A geração de malha do ansys é feita através da divisão do modelo em pequenos elementos de tamanhos mais pequenos, gerando uma malha. A discretização da geometria é essencial para obter resultados precisos, desta forma o software oferece opções de geração de malha automática ou manual.

Com o modelo preparado e as configurações das propriedades de análise definidas, o ansys utiliza o método de elementos finitos para resolver o sistema de equações que descrevem o comportamento da estrutura e que são baseadas nas leis da física e nas condições de contorno definidas anteriormente. Como resultado, é possível verificar as soluções obtidas em relação aos deslocamentos, tensões, deformações e fatores de segurança.

3.2.1. GEOMETRIA

Como complemento da análise numérica da cama de agulhas feita previamente por Silva em 2022, viu-se a necessidade de refazer a mesma devido à uma nova configuração das condições de fronteira que serão utilizadas na análise experimental, devido à fixação da placa na máquina-ferramenta diferente da prevista pelo mesmo.

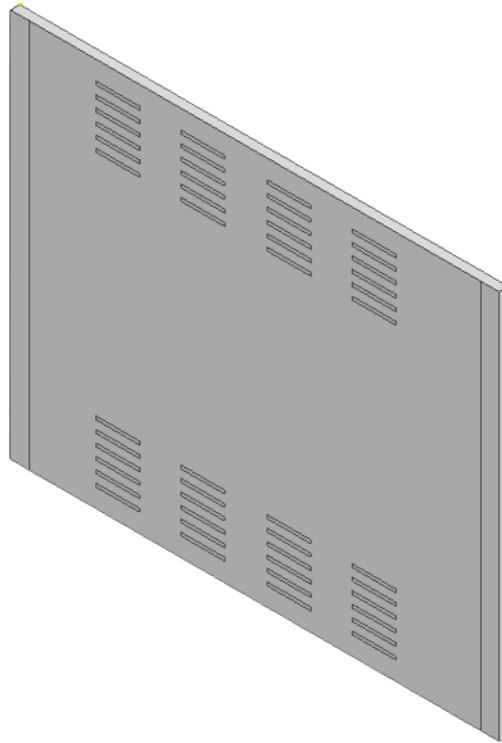


Figura 19 - Modelo 3D da placa de cama de agulhas para a análise numérica.

Desta forma, a geometria da placa para este fim foi simplificada de maneira a obter o modelo 3D. A Figura 19 ilustra uma placa de 494 x 394 mm e 9,5 mm de espessura. As extremidades e a zona de fixação dos pinos das agulhas foram rebaixasadas com 0,0001 mm para a aplicação das forças e restrições no local correto. O desenho técnico da placa de cama de agulhas encontra-se no Anexo A. Desenhos Técnicos.

3.2.2. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA E RESULTADOS

A partir das Tabelas 1 e 2 é possível definidas algumas das propriedades mecânicas do papel fenólico fornecidos pelo fabricante, mas de facto não são suficientes para poder definir completamente o material. A partir disso, foi selecionado o material *PCB laminate, Epoxy/Glass fiber* que possui propriedades muito semelhantes ao do material em estudo, e com os dados das tabelas anteriores foi possível alterar as propriedades já conhecidas do papel fenólico e mantendo as restantes em função do novo material.

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

Density	1,35e-09 kg/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	24370 MPa
Poisson's Ratio	0,16490
Bulk Modulus	12121 MPa
Shear Modulus	10460 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,47e-05 1/°C
Tensile Ultimate Strength	298,00 MPa
Tensile Yield Strength	298,00 MPa
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	0,00048990 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	9,626e+05 mJ/kg·°C

Figura 20 - Propriedades do material da placa de cama de agulhas no *software* ansys.

Os dados utilizados na simulação estão indicados pela Figura 20. É possível notar que, mesmo ao utilizar algumas propriedades mecânicas de um material parecido e já conhecido através de dados experimentais, foram utilizadas as propriedades mecânicas isotrópicas do material.

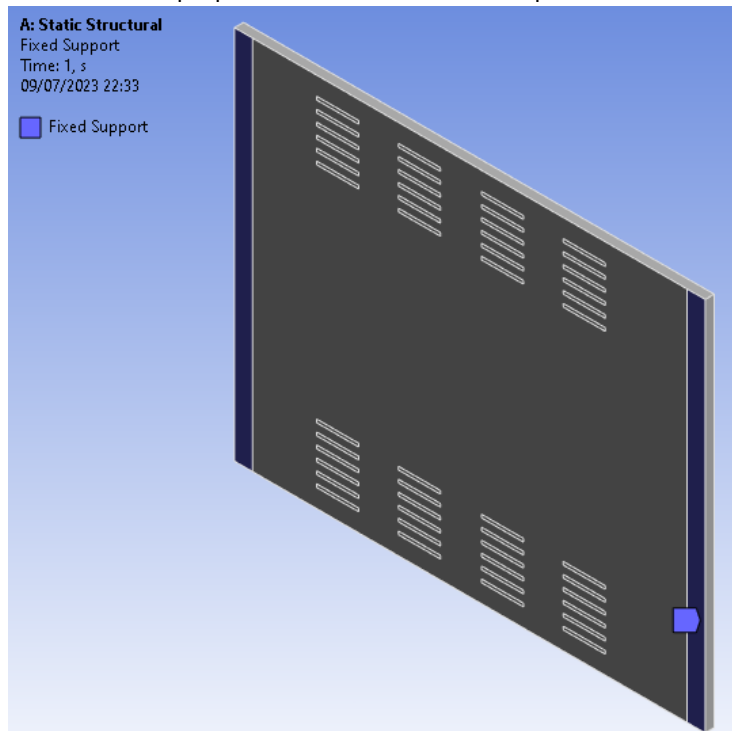


Figura 21 - Condições de fronteira da placa de cama de agulhas no *software* ansys.

A placa encontra-se encastrada nas extremidades e, portanto, as condições de fronteira foram definidas como *fixe*d, ilustrado na Figura 21, e esta restringe o movimento de nós em uma determinada

direção ou direções no modelo de análise, impedindo que se movam ou deformem ao longo dessas direções restritas durante a simulação.

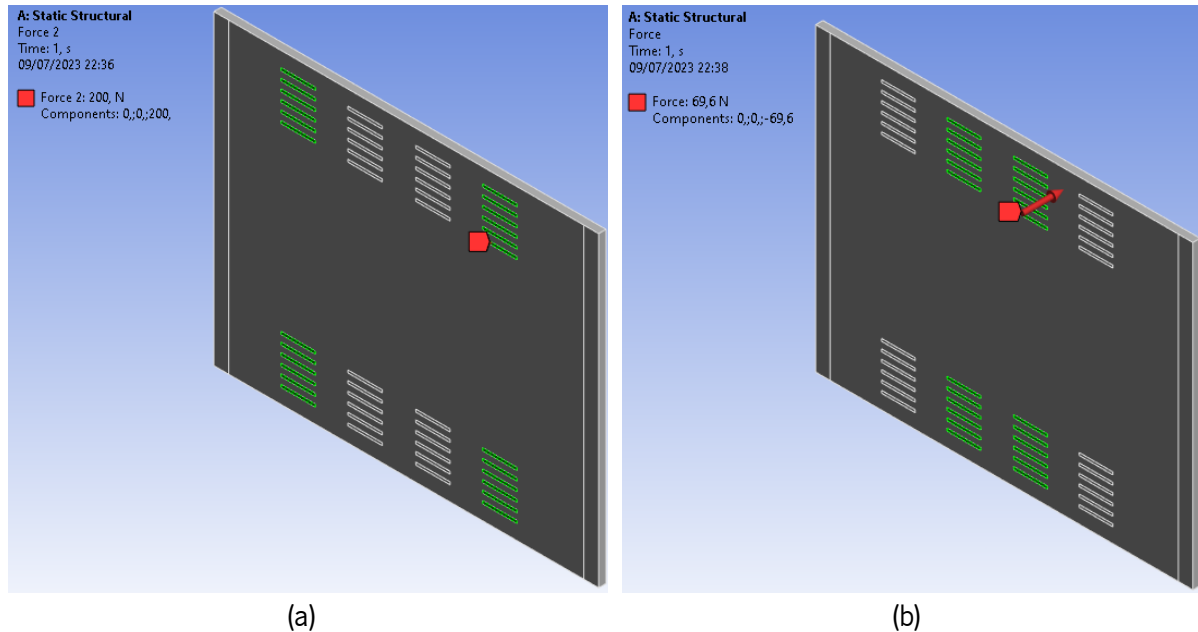


Figura 22 – (a) Força aplicada às agulhas laterais da placa de cama de agulhas (b) Força aplicada às agulhas centrais da placa de cama de agulhas.

As cargas aplicadas serão as mesmas já definidas e estudadas pelo Silva em 2022 que foram apresentadas previamente e ilustradas pela Figura 22.

A simulação foi feita com uma malha tetraédrica quadrática de 4 mm de tamanho, a escolha deste tipo de malha teve-se pela sua flexibilidade geométrica em termos de adaptação às geometrias mais complexas, como por exemplo a capacidade de adaptar e moldar nas áreas dos furos das agulhas, em que estes possuem um tamanho bem reduzido e estão em grande quantidade ao longo da placa.

Uma malha tetraédrica quadrática é um tipo de malha tridimensional que consiste em elementos tetraédricos com nós extras em cada aresta, esses nós extras permitem uma representação mais precisa das curvaturas e variações nas superfícies dos objetos. Ao adicionar mais nós à malha, os elementos tetraédricos podem registar com maior precisão as características geométricas complexas dos objetos, tornando-se particularmente úteis em simulações numéricas e análises de elementos finitos em análises estruturais.

Em comparação com malhas tetraédricas lineares, que possuem apenas um nó em cada vértice do tetraedro, as malhas tetraédricas quadráticas proporcionam uma maior capacidade de representar gradientes e variações de campo mais precisas em um modelo. Isso é especialmente importante em análises onde detalhes sutis das deformações, tensões e fluxos precisam ser capturados, como no exemplo atual em que as deformações esperadas são muito pequenas.

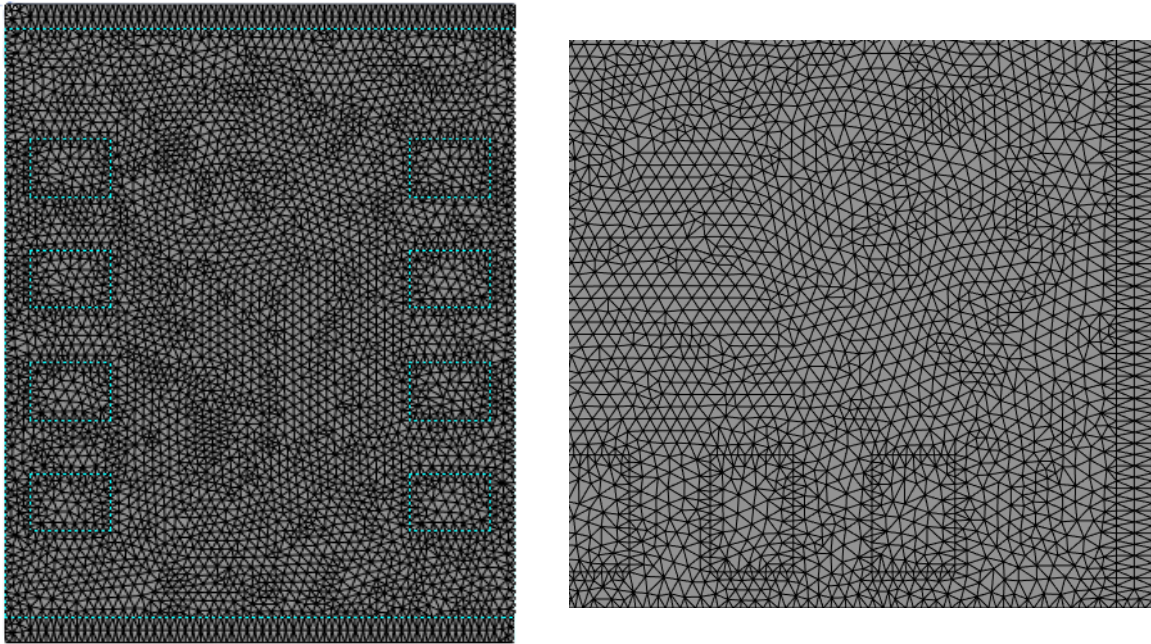
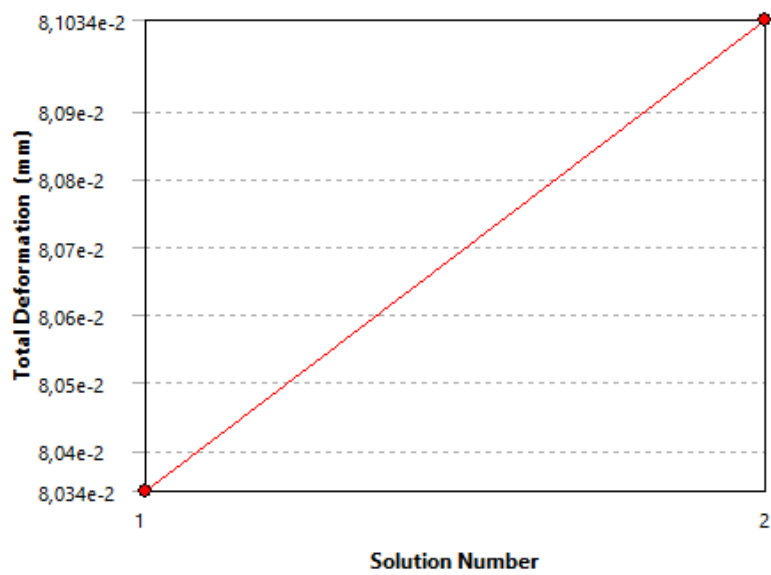


Figura 23 - Malha tetraédrica quadrada utilizada na simulação numérica da placa de cama de agulhas.

Para um tamanho de malha de 4 mm, ilustrada pela Figura 23, esse representou o limite superior viável para ocorrência da convergência, sem que houvesse um aumento excessivo no tempo de pós-processamento.



	Total Deformation (mm)	Change (%)	Nodes	Elements
1	8,034e-002		69953	39073
2	8,1034e-002	0,8598	116631	69072

Gráfico 2 - Gráfico de convergência da simulação da deformação total da placa de cama de agulhas.

Desta forma, o resultado convergiu com 0,9% na simulação da deformação total na segunda iteração ilustrado pelo Gráfico 2. Para os outros resultados a conversão foi de 0,5% para a deformação direcional ao eixo x e de 0,9% para a deformação direcional ao eixo y.

O primeiro resultado da simulação tem como objetivo avaliar a deformação total da placa. Esse resultado será posteriormente comparado com um estudo anterior realizado por Silva em 2022. A comparação permitirá a análise das discrepâncias nos resultados quando a mesma magnitude de carga é aplicada nos mesmos locais, ou seja, nos retângulos que abrigam os orifícios para acomodação das agulhas de teste, mas com as condições de fronteira diferentes (ver Figura 21).

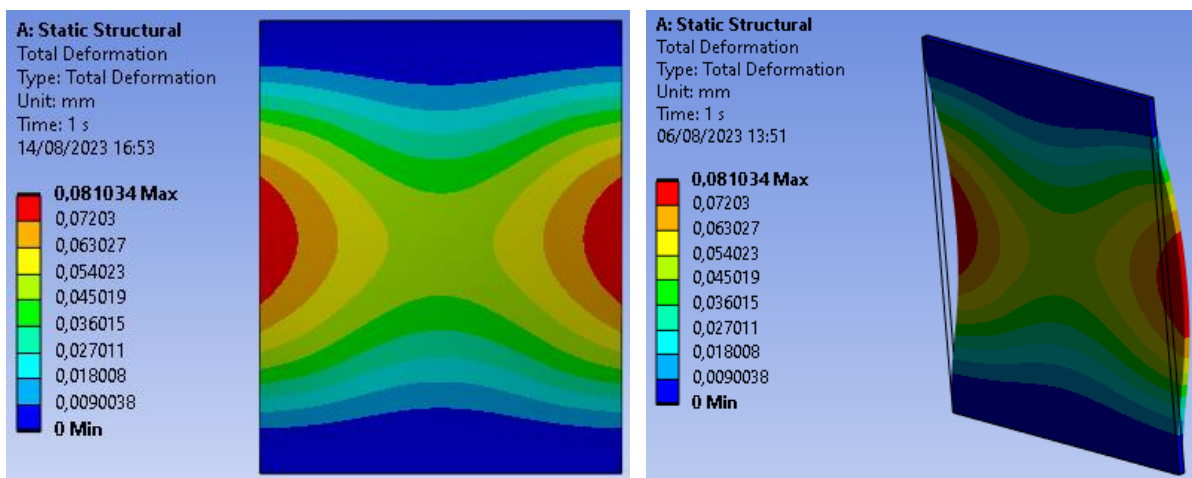


Figura 24 - Resultado da deformação total ocorrida na placa de cama de agulhas.

Para a zona das agulhas laterais representada pelos quatro retângulos laterais foi imposto uma força de 200 N e para as agulhas centrais uma força de 69,6 N (Ver Figura 22). A deformação ocorrida foi de 0,081 mm em que a deformação total máxima ocorre nas zonas laterais centrais da placa, ilustrado pela Figura 24.

A deformação total refere-se à mudança total na forma e no tamanho da placa após a aplicação das cargas, é a soma de todas as deformações em todas as direções, incluindo deformações provenientes de esforços de tração, compressão, cisalhamento e quaisquer outras variações que ocorram.

É observado que o valor medido da deformação total na Figura 8, por Silva em 2022, foi de 7,74 mm, enquanto, em comparação com os resultados obtidos na Figura 24, que foi de 0,08 mm, uma discrepância significativa é evidenciada. Consequentemente, foi conduzida uma simulação utilizando condições de teste iguais aos apresentados nas Figuras 22 e 23, porém aplicando as condições de contorno previamente utilizadas por Silva em 2022, conforme ilustrado na Figura 6.

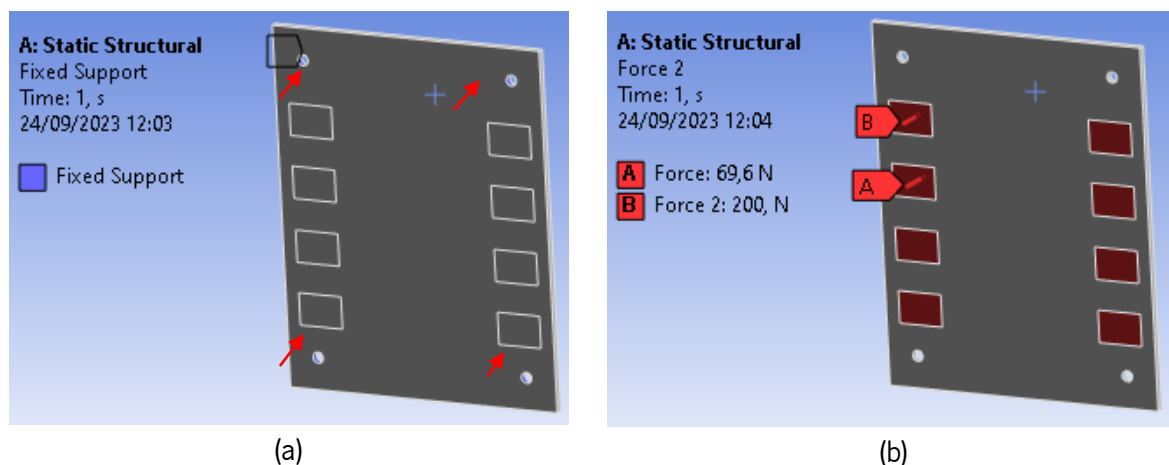


Figura 25 - (a) Condições de fronteira aplicados à placa de cama de agulhas; (b) Cargas aplicadas à placa de cama de agulhas.

Com a condições de teste aplicados, ilustrados pela Figura 25, foi possível verificar os resultados obtidos a partir das mesmas condições de testes impostas na simulação de Silva em 2022.

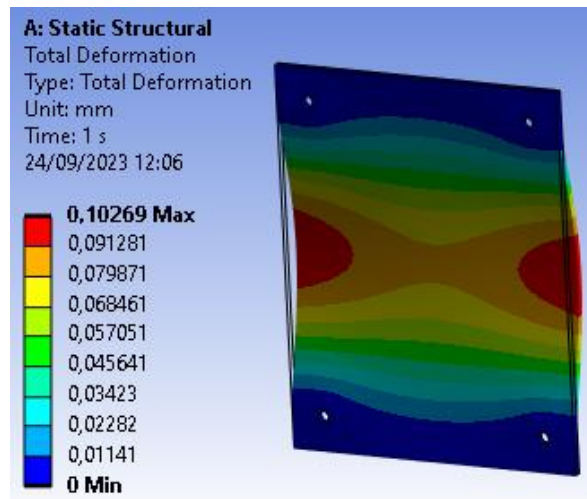


Figura 26 - Resultados obtidos na simulação da deformação total com as condições de fronteira impostas por Silva em 2022.

Ao observar os resultados da Figura 26, é possível verificar que a deformação total com a nova configuração de condição de fronteira foi de 0,1 mm. Ainda sim, há uma grande discrepância entre os resultados obtidos por Silva em 2022.

Ao verificar as cargas aplicadas na Figura 7, a magnitude da carga aplicada nos retângulos da extremidade foi de 2400 N e nos retângulos interiores foi de 835,2 N, estes valores não coincidem com os valores calculados pela equação (2.1) que foi retirada do Gráfico 1, em que constam os valores de carga aplicados de acordo com o tipo da agulha em uso e o respectivo curso durante o teste *ICT*. Desta forma, verificou-se que o resultado analítico obtido por Silva em 2022 foi a partir de outra magnitude de carga, e o mesmo não serve de comparação com o presente estudo.

Os resultados gerados pela técnica de correlação de imagens digitais em duas dimensões são de natureza superficial, o que significa que o *software* de correlação analisa os pontos da superfície da amostra e estabelece correlações entre a imagem deformada e a imagem de referência. Os resultados obtidos podem representar a deformação da amostra apenas ao longo dos eixos x e y, sem levar em consideração a direção z.

Em virtude disso, a deformação total da placa de cama de agulhas não pode ser observada experimentalmente. Para abordar essa limitação, foi necessário realizar simulações para quantificar a deformação direcional ao longo desses dois eixos específicos.

A deformação é uma medida das mudanças relativas nas dimensões de um componente, expressa adimensionalmente como uma fração da mudança em relação às dimensões originais. A deformação total ou deformação direcional obtida pelo ansys representa a variação nas dimensões do componente causada pela carga aplicada e é expressa em unidades de comprimento, indicando a mudança em relação às dimensões originais do componente após a carga. Em outras palavras, o resultado mostrado é do cálculo do deslocamento total ou direcional através da deformação obtida pela carga.

A técnica *DIC-2D* rastreia a deformação superficial do componente devido à aplicação de carga, fornecendo resultados adimensionais em *pixels*. Esses resultados não são diretamente comparáveis aos obtidos pelo ansys, desta forma, para viabilizar a comparação, é essencial aplicar uma escala de medição no pré-processamento do *software VIC-2D*, isso permite correlacionar as imagens e calcular a variação nas dimensões superficiais em relação à imagem de referência após o deslocamento causado pela carga, facilitando a comparação direta entre resultados experimentais e numéricos.

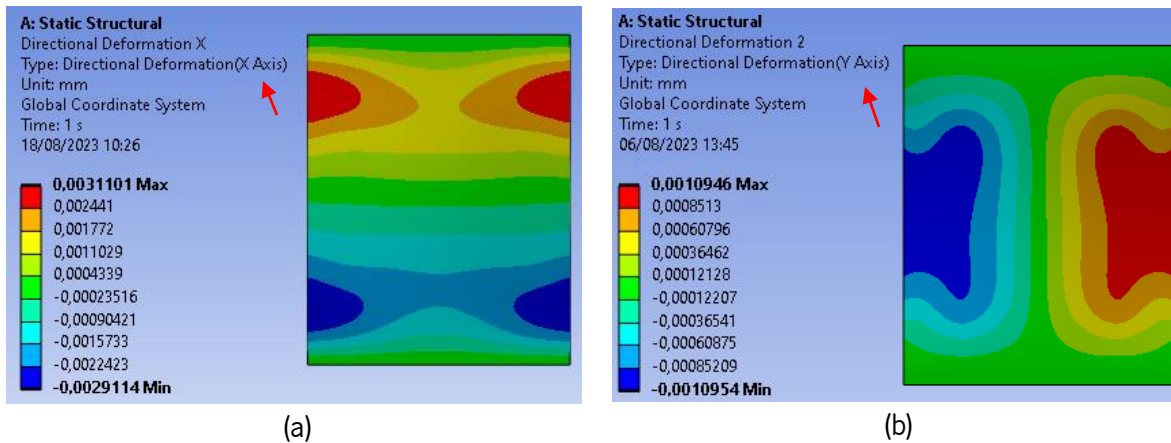


Figura 27 – (a) Deformação direcional no eixo x da placa de cama de agulhas no ansys; (b) Deformação direcional no eixo y da placa de cama de agulhas no ansys.

A partir da Figura 27 (a) e (b) é possível verificar que as deformações direcionais máximas ocorridas nos eixos x e y, a partir da configuração de teste imposta pelas Figuras 21, 22 e 23, foram de 0,003 e 0,001 mm, respetivamente.

A deformação direcional, por outro lado, foca em uma direção específica ou em um conjunto de direções preferenciais, neste caso foi escolhido as direções dos eixos x e y para fins de comparação futura com a análise experimental. No caso da técnica escolhida, é muito utilizada para verificação das deformações em um plano, ou seja, superficial, e, portanto, os resultados no eixo z não serão verificados.

O resultado encontrado, tanto numericamente quanto experimentalmente, é ocasionado a partir do deslocamento da placa no eixo Z ao ser aplicada uma carga perpendicular ao plano da mesma. Desta forma o entendimento do deslocamento transversal é importante para compreender melhor os resultados encontrados nas Figuras 24 e 27.

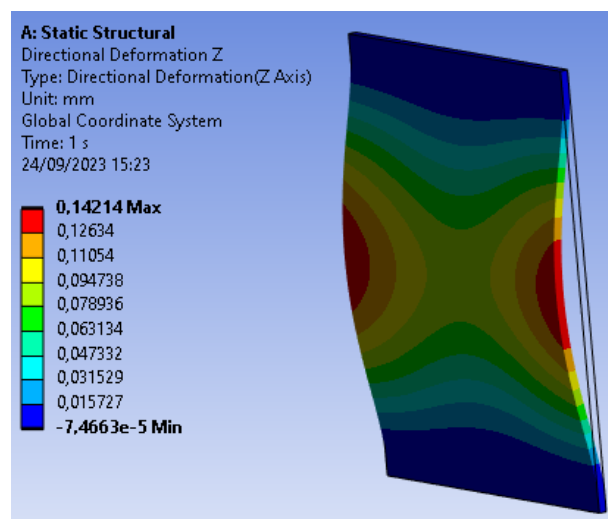


Figura 28 - Deformação direcional da placa de cama de agulhas no eixo z.

A partir da Figura 28 é possível verificar que o deslocamento máximo da placa perpendicularmente ao plano da mesma para a carga de teste aplicada, é de 0,142 mm. Este deslocamento é de pequena magnitude, isso explica os valores baixos dos resultados em relação aos deslocamentos calculados do eixo x e y.

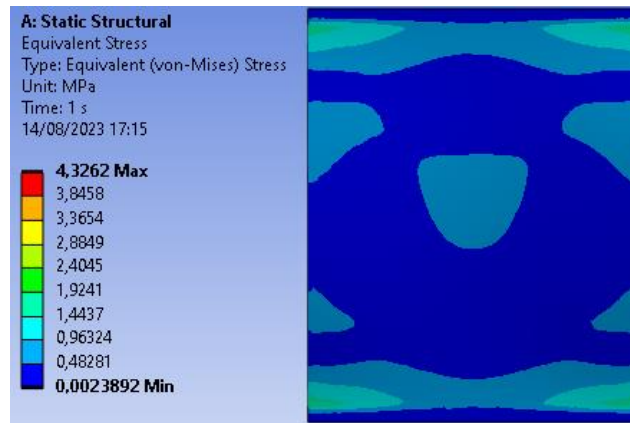


Figura 29 - Tensão equivalente de Von Mises encontrada para a placa de cama de agulhas com as cargas de funcionamento impostas.

A partir das condições de teste impostas pelas Figuras 21 e 22, em que estas serão as mesmas utilizadas na parte experimental, foi realizado uma simulação de tensão equivalente para observar o comportamento do material ao longo do teste *ICT*. Desta forma, ao observar a figura 29, verifica-se que a tensão máxima equivalente encontrada foi de 4,326 MPa.

O critério de Von Mises utilizado na simulação é um critério empregue para avaliar o estado de tensão em um material para avaliar a probabilidade de cedência. Este critério leva em consideração as tensões em várias direções e assume que o material começa a se deformar plasticamente quando a tensão equivalente atinge o valor crítico.

O gráfico de cores ilustrado na Figura 29 permite identificar regiões onde as tensões são maiores e onde estão menos intensas, neste caso a carga imposta não gera tensões além das suportadas pelo material, ou seja, a placa não sofrerá deformação permanente durante as condições do teste *ICT* imposto anteriormente.

A deformação direcional em relação ao eixo x representa o alongamento ou encurtamento do material na direção horizontal, desta forma a tração ocorre quando a força é aplicada em uma direção que tende a alongar o material, e a compressão ocorre quando a força é aplicada em uma direção que tende a encurtar o material.

Ao observar atentamente o resultado qualitativo da Figura 27 (a) é possível notar que a zona em vermelho corresponde à zona da placa em tração e a azul está em compressão. Desta forma é preciso estudar todas as direções da placa para perceber como ocorre a deformação.

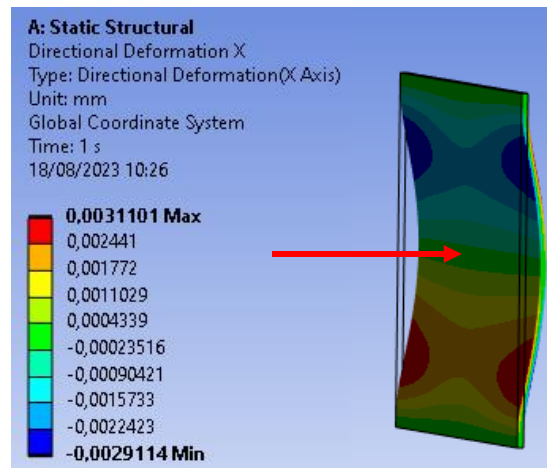


Figura 30 - Deformação direcional da placa em relação ao eixo x, na superfície de aplicação da carga.

A Figura 30 mostra a deformação da placa ao ser aplicada a carga na direção representada pela seta na imagem. Na superfície da placa em que é aplicado a carga, a zona superior sofre compressão e a inferior tração. De maneira análoga, ao analisar a Figura 27 (a), que representa a superfície oposta à aplicação de carga, ocorre o fenómeno inverso, visto que para este tipo de deformação, para ocorrer compressão de um lado da placa, o outro consequentemente se encontra em tração.

A falta de simetria nos resultados está relacionada com a assimetria da carga aplicada, resultando em uma assimetria na distribuição de tensão ao longo da placa, conforme ilustrado na Figura 29 e consequentemente a distribuição da deformação da placa ocorre de maneira diferente ao longo da mesma.

A mesma análise pode ser feita para a deformação direcional em relação ao eixo y, em que na superfície de aplicação de carga, a zona esquerda da placa ocorre tração e a direita compressão, o inverso é visto na Figura 27 (b) em que mostra a superfície oposta à aplicação de carga. As superfícies em estudo na Figura 27 (a) e (b) são as superfícies em estudo na parte da análise experimental deste projeto.

3.3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.3.1. INSTRUMENTAÇÃO

A técnica *DIC* 2D requer a utilização de equipamentos especializados capazes de adquirir imagens de forma precisa e condizente com o resultado final almejado.

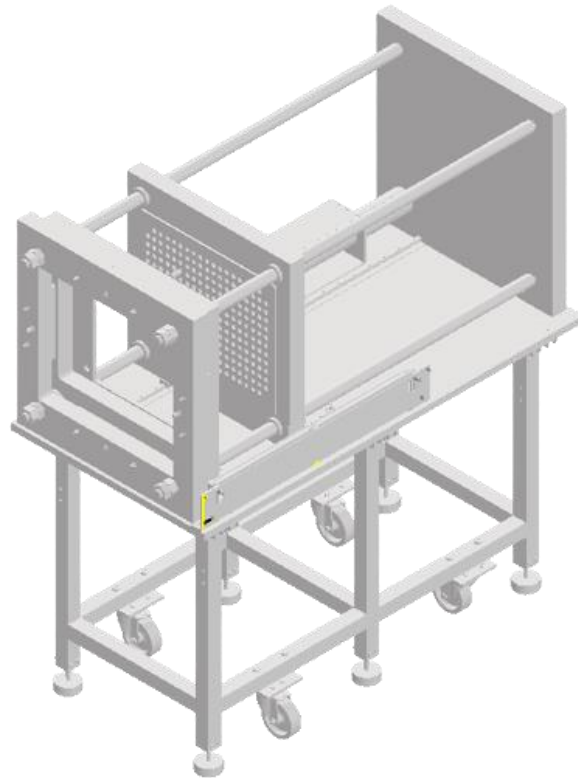


Figura 31 - Modelo 3D da prensa de ensaio de provetes em forma de placa retangular.

Para o ensaio experimental das placas foi utilizado uma prensa, projetada por Silva em 2022, para este fim que se encontra representado na Figura 31.



Figura 32 - Célula de carga com capacidade de 10kN (GWMC (10-50kN) - Sensorica, s.d.)

Uma célula de carga da série GWMC com capacidade de medição de cargas de tração e compressão de até 10kN com erro não superior a $\pm 0,5\%$, representada na Figura 32 (GWMC (10-50kN) - Sensorica, s.d.).



Figura 33 - Câmera Basler acA2440-75um (Basler ace aca2440-75um - *area scan camera*, s.d.)

A captação das imagens do ensaio foi feita por uma câmera Basler acA2440-75 representada pela Figura 33, em que apresenta um sensor CMOS de alta resolução com uma resolução máxima de 2448 x 2048 pixels e uma taxa de quadros elevada. Isso permite capturar imagens nítidas e detalhadas em tempo real e rastrear objetos em movimentos rápidos. Outro aspecto importante é a interface USB 3.0, que permite uma transferência de dados rápida e eficiente entre a câmera e o computador (Basler ace aca2440-75um - *area scan camera*, s.d.).



Figura 34 - Lente Fujinon HF50SA-1 2/3" 50mm F1.8 (Fujinon HF50SA-1 2/3" 50mm F1.8 iris manual *c-mount lens*, 5 megapixel *rated*, s.d.).

Acoplado à câmera foi utilizado a lente Fujinon HF50SA-1 que esta ilustrada na Figura 34. Uma das principais características desta lente é a capacidade de suportar uma classificação de 5 *megapixels*, ou seja, a lente é capaz de entregar imagens nítidas e detalhadas em câmaras com sensores de alta resolução, proporcionando uma qualidade de imagem superior para aplicações que exigem alta precisão e clareza. Possui uma distância focal fixa de 50 mm e uma abertura máxima de F1.8, além de um mecanismo de íris manual que permite ajustes precisos da abertura para controlar a quantidade de luz que entra na câmera (Fujinon HF50SA-1 2/3" 50mm F1.8 iris manual *c-mount lens*, 5 megapixel *rated*, s.d.).



Figura 35 - Luzes de LED MultiLED QX da GSVITEC (MultiLED QX, s.d.)

Para correta iluminação foi necessário utilizar um par de luzes multiLED QT da GSVITEC que possuem lentes adicionais de 15°, 30°, 50° e 60°, fornecendo uma luz branca pulsante e contínua de 12.000 lumens (fluxo luminoso da lâmpada) (MultiLED QX, s.d.). A Figura 35 representa a versão atualizada das luzes QT.

O controle da intensidade da luz durante o experimento foi feito através do controlador MultiLED G8 da GSVITEC, este aparelho além de permitir controlar o brilho da iluminação, oferece suporte a diferentes modos de operação, como modos estáticos, modos de *flash* e modos de pulso (MultiLED G8/GX8 Controller - INDUVID, s.d.). A correlação entre as imagens obtidas durante o ensaio foi feita através do *software* VIC 2D, este permite uma análise de deformações, deslocamentos e outras características de materiais e estruturas sob carga, o guia de teste encontra-se no Anexo B. Guia para ensaios no *software* VIC-2D.

3.3.2. METODOLOGIA E RESULTADOS

Para a correta aplicação da técnica *DIC*, é preciso primeiramente preparar o componente ou a estrutura adequadamente para que o *software* consiga realizar a correlação entre a imagem de referência e a imagem capturada após deformação.



Figura 36 - Modelo físico da placa de cama de agulhas com o *speckle* utilizado na análise experimental.

O primeiro passo foi preparar a placa com a tinta preta para deixar a superfície em análise *matte* e posteriormente feito os *speckles* com *spray* branco para contraste, ilustrado na Figura 36.

O segundo passo foi acoplar a placa à máquina-ferramenta e proceder para os preparativos do *setup* da simulação.

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

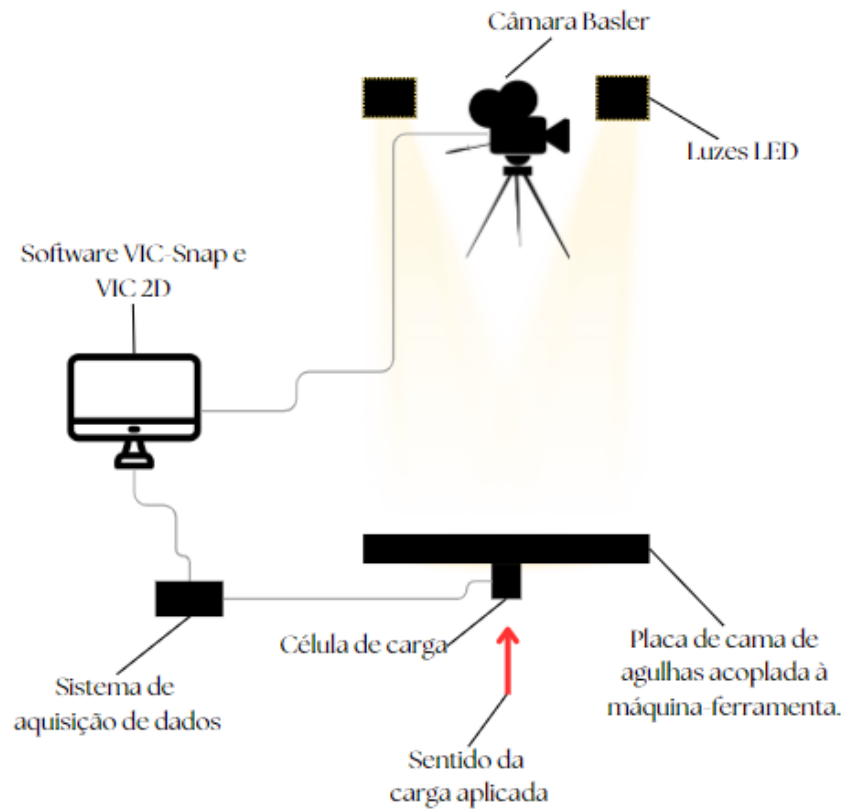


Figura 37 - Ilustração fora de escala do *setup* da análise experimental.

Este está ilustrado na Figura 37, em que foi utilizado uma câmara na mesma altura da placa e à uma distância que fosse suficiente para visualizar toda a zona de interesse em estudo.

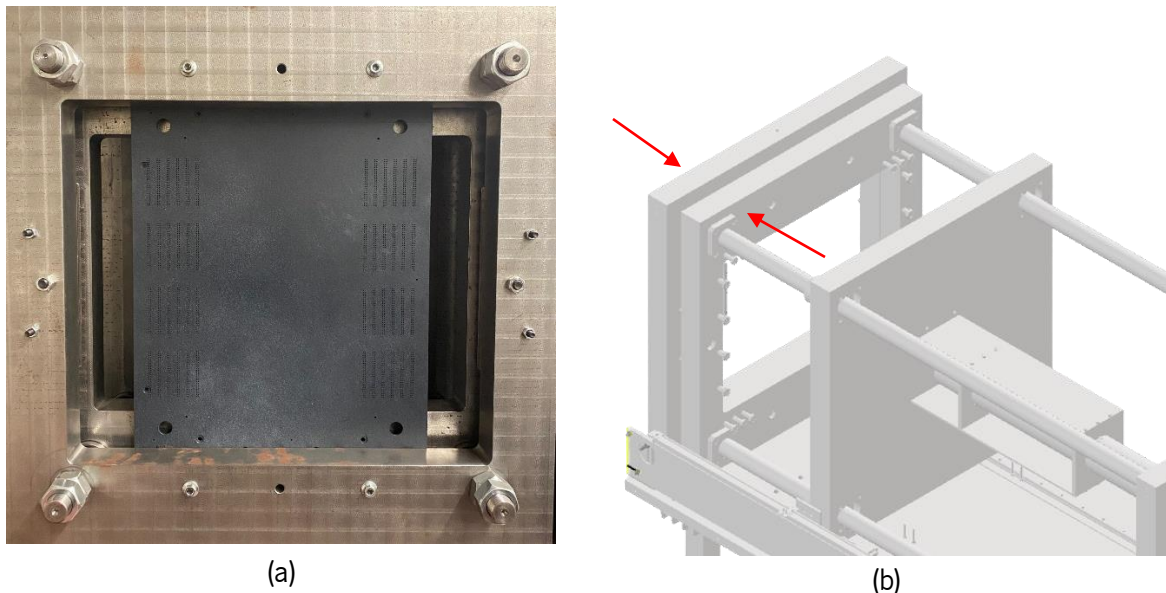


Figura 38 - (a) Imagem da fixação da placa de cama de agulhas na máquina-ferramenta. (b) Ilustração do local em que a placa está a ser fixa na máquina.

Na Figura 38 (a) é possível verificar o ajuste da placa na máquina-ferramenta. A mesma está presa na extremidade entre as duas placas principais da prensa (Figura 38 (b)). Deste modo a placa em si está fixa em todas as direções, mas não encastrada.

Com o *setup* já montado, o próximo passo é verificar as condições do pré-processamento no *software* Vic-Snap, como ajustar a luminosidade e a nitidez. O Vic-Snap é um *software* de aquisição e visualização de imagens projetado especificamente para os *softwares* VIC 2D e VIC 3D.

O ideal é que a amostra tenha uma superfície com textura e bem definidas, nos casos em que isso não é possível, como o da placa de cama de agulhas em estudo, é feita uma pintura para obter os *speckles* necessários. É preciso ter um bom contraste, normalmente se os *speckles* são brancos, o fundo tem que ser preto, e vice-versa.

O espaço de teste deve poder garantir uma iluminação uniforme e controlada, isso ajuda a evitar variações excessivas nos níveis de luz que podem causar reflexos indesejados, afetando a qualidade da correlação final. Para o estudo atual, a simulação foi feita dentro de um laboratório com a ajuda de duas luzes de *LED* que possuem controle de intensidade.

A intensidade de luz selecionada foi de 4%. Essa foi a intensidade mínima para que a câmara conseguisse captar a imagem da amostra, uma intensidade maior só geraria mais reflexo na placa, e isso deve ser evitado.

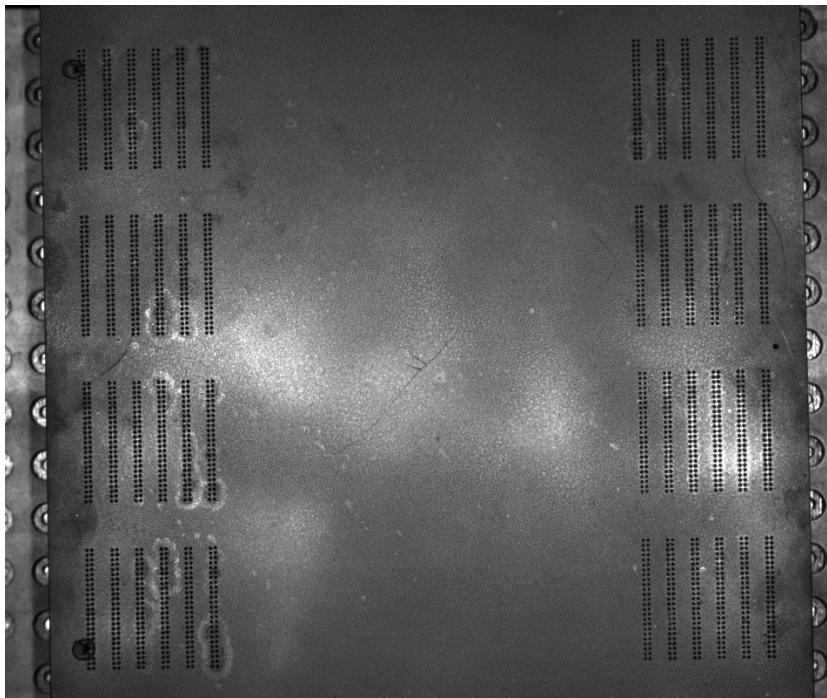


Figura 39 - Imagem de referência registada no *software* VIC-Snap.

A câmara deve mostrar toda a amostra em estudo, com uma distância de segurança para que durante um possível movimento ou expansão do material, seja possível de verificar na imagem. A Figura 39 é a imagem de referência registada, ou seja, a imagem da placa capturada pela câmara sem qualquer carga aplicada.

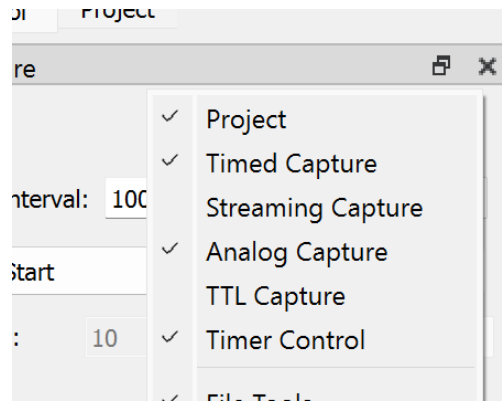


Figura 40 - Opções de captura de imagens existentes no software VIC-Snap.

O próximo passo é escolher o tipo de captura mais adequada para a simulação (Figura 40). O software VIC-Snap oferece cinco opções de captura de imagens: *Timed Capture*, *Streaming Capture*, *Analog Capture*, *TTL Capture* e *Timer Control*.

- O *TIMED CAPTURE* CAPTURA UMA IMAGEM EM UM MOMENTO ESPECÍFICO. ELA PODE SER USADA PARA CAPTURAR IMAGENS DE OBJETOS EM MOVIMENTO OU DE EVENTOS QUE OCORREM EM MOMENTOS ESPECÍFICOS.
- O *STREAMING CAPTURE* CAPTURA IMAGENS CONTINUAMENTE, ATÉ QUE O UTILIZADOR PARE A CAPTURA. ELA PODE SER USADA PARA CAPTURAR IMAGENS DE UM EVENTO QUE OCORRE CONTINUAMENTE OU PARA CAPTURAR IMAGENS DE UM OBJETO EM MOVIMENTO.
- O *ANALOG CAPTURE* CAPTURA UMA IMAGEM A PARTIR DE UMA ENTRADA ANALÓGICA, COMO UM SENSOR DE TEMPERATURA, DE CARGA OU UM DE PRESSÃO. ELA PODE SER UTILIZADA QUANDO A ENTRADA ANALÓGICA É CONHECIDA E O OBJETO EM MOVIMENTO DEPENDE DO VALOR DELA.
- O *TTL CAPTURE* CAPTURA UMA IMAGEM QUANDO UMA LINHA DE ENTRADA DIGITAL É ATIVADA. ELA É UTILIZADA QUANDO EXISTEM EQUIPAMENTOS CONECTADOS QUE ENVIEM E REGISTAM SINAIS ELÉTRICOS TTL.
- O *TIMER CONTROL* PERMITE AO UTILIZADOR DEFINIR UM TEMPORIZADOR PARA A CAPTURA DE IMAGENS.

Para fins de comparação com a simulação numérica feita no capítulo anterior, a captura da imagem deve ser feita com o *analog capture*. Desta forma o sinal de saída da célula de carga é monitorizado para que seja verificado a deformação referente à uma carga específica.

A maioria das células de carga são sensores baseados em extensômetros em configuração de ponte de *Wheatstone*, ou seja, ao aplicar uma força a medição é feita baseada na mudança relativa na resistência, convertendo o sinal obtido pela célula de carga (Morehouse Instrument Company, inc., 2020). A saída do circuito é proporcional à mudança de resistência, o que é então relacionado à força aplicada.

De acordo com o fabricante, a célula de carga utilizada produz uma saída em milivolts (mV), em que a saída nominal é de 2 mV/V, isso significa que para cada unidade de tensão de excitação (em volts) aplicada à célula de carga, ela produzirá um sinal de saída de 2 mV. A não-linearidade da célula de carga, segundo o fornecedor é de $\pm 0,5\%$, ou seja, esta será a diferença entre a curva de calibração real em relação a uma resposta linear ideal dos valores obtidos.

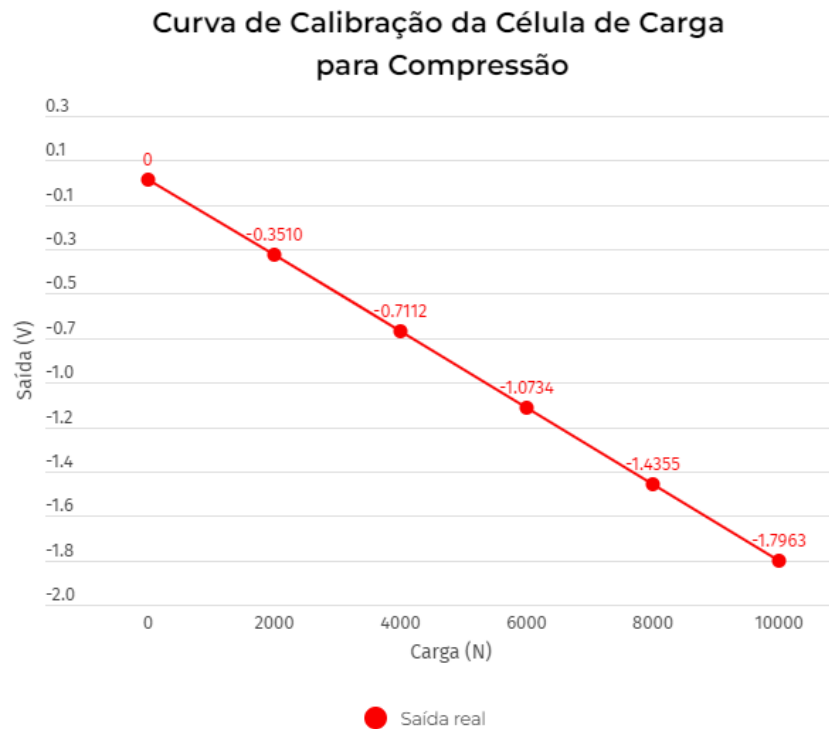


Gráfico 3 - Curva de Calibração da Célula de Carga para esforço de compressão.

A partir do Gráfico 3 é possível verificar que, para as cargas aplicadas, a saída real é uma reta decrescente. De acordo com o gráfico acima, o *output* real para cargas de compressão é de -1,7916 mV/V com uma não-linearidade de -0,46%.

$$\text{Saída} = (\text{Carga} * \text{Factor de Calibração}) / 1000 \quad (3.1)$$

Desta forma, após verificação da correta calibração do equipamento em relação às informações obtidas através do fabricante, utiliza-se a equação (3.1) para calcular a saída esperada para a célula de carga ao aplicar uma carga.

Em que a carga é expressa em newtons (N), o fator de calibração é expresso em milivolts por Newton (mV/N) e 1000 é uma constante usada para converter a saída da célula de carga de milivolts para volts.

$$\text{Fator de Calibração} = (\text{Saída da célula de carga} / \text{Carga aplicada}) \quad (3.2)$$

No caso da célula de carga utilizada, a maior carga lida pela célula é de 10kN, pela curva de calibração resultou em uma saída de -1,7963 mV/V. Desta forma, o fator de carga obtido pela fórmula (3.2) para esta célula de carga é de $-1,7963 \times 10^{-4} \text{ mV/N}$.

Para a análise da placa de cama de agulhas é preciso aplicar uma carga de 200 N, ou seja, de acordo com a fórmula (3.1), o valor de saída esperado será de 0,036 Volts.

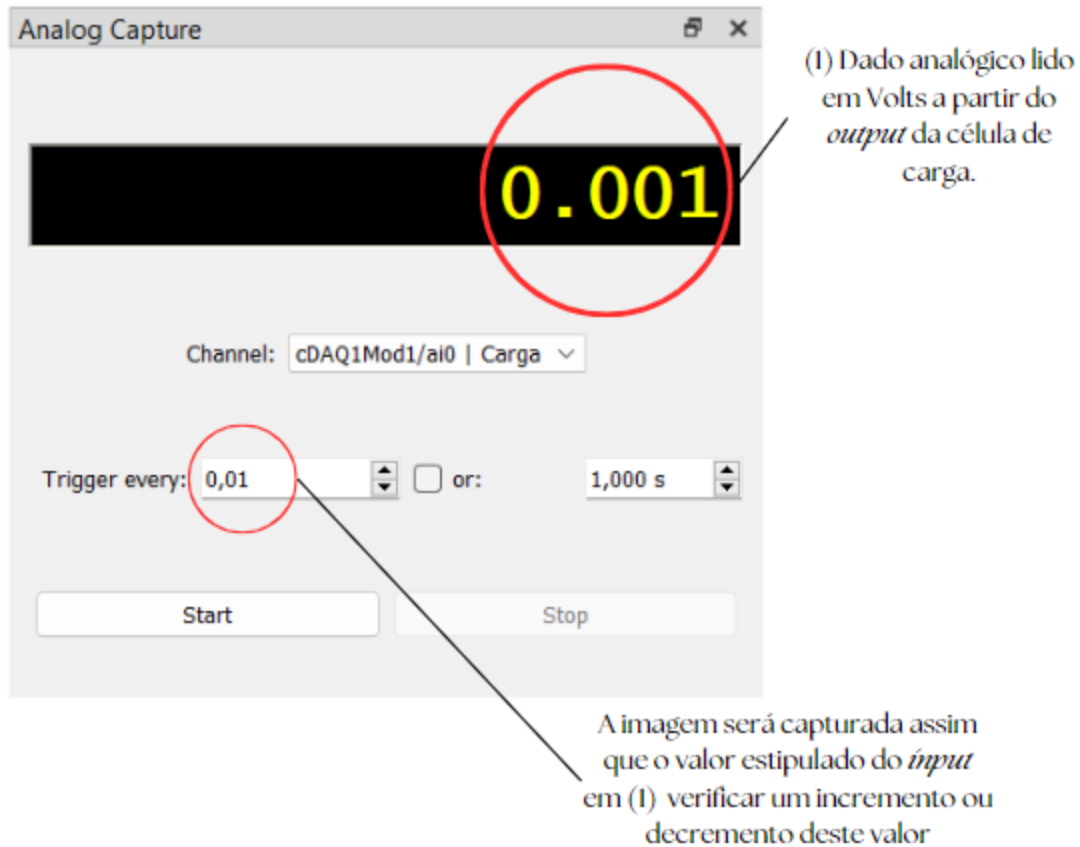


Figura 41 - Definição do pré-processamento em relação ao tipo de sistema de captura de imagens selecionado.

No *software* Vic-Snap ao selecionar a captura analógica, é preciso definir um valor de *input* que servirá de gatilho para a captura das imagens, assim que o dado analógico verificar uma subida ou descida dessa quantidade de valores impostos, será gravado uma imagem da placa sob efeito deste *input*.

A partir da Figura 41 é possível observar em (1) os valores de saída registados pela célula de carga, já em "*trigger every*" será definido o valor do *input* que servirá de gatilho, ou seja, para uma carga de 0,036 V, será colocado um gatilho de 0,01 V, em que a cada 0,01V registados, haverá uma imagem capturada. O mesmo poderia ser feito ao definir um valor de tempo em segundos.

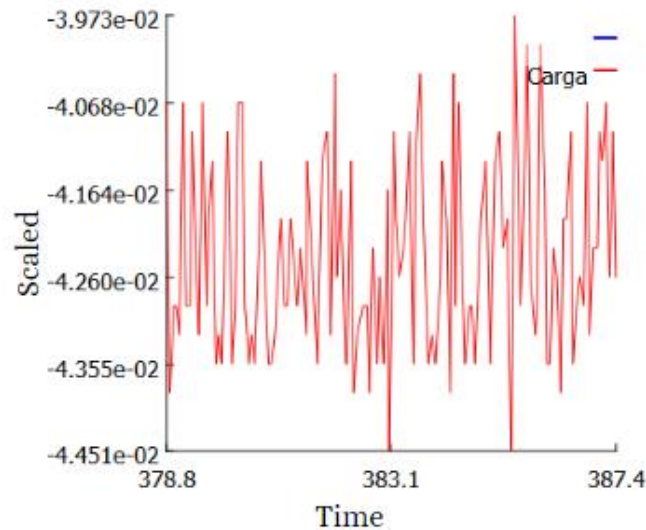


Gráfico 4 - Gráfico dos dados do conversor analógico-digital do software VIC-Snap.

Simultaneamente a isto, é possível verificar um gráfico dos dados analógicos em tempo real, ilustrado pelo Gráfico 4, que é lido a partir do *output* da célula de carga. Nesse caso é possível selecionar os dados do gráfico para Volts em relação ao tempo ou *Scale* em relação ao tempo, a diferença entre os dois gráficos é que o gráfico “Voltage x tempo” mostra a saída da célula de carga em Volts, enquanto o gráfico “Scale x tempo” mostra a saída da célula de carga em escala, que é uma medida da força aplicada à célula de carga.

Ou seja, se mostrar *Scaled* (Escalado) mostrará os valores escalados (newtons/mm/etc.) e se mostrar Voltage (Tensão) mostrará a tensão bruta (-10 a +10 Volts). A razão para esta opção é que se os valores tiverem escalas muito diferentes (por exemplo, se um valor for 5.300N e o outro for 0,3mm) seria difícil vê-los no mesmo gráfico.

Para um único tipo de saída não há diferença entre os gráficos, visto que em *scale* não será feito a conversão dos dados para uma certa escala, pois haverá apenas um tipo de dado. Mas de acordo com o tipo de captura escolhida, nomeadamente o *analog capture*, apenas é lido os valores em escala, ou seja, o gráfico a ser lido será o “*Scale x tempo*”.

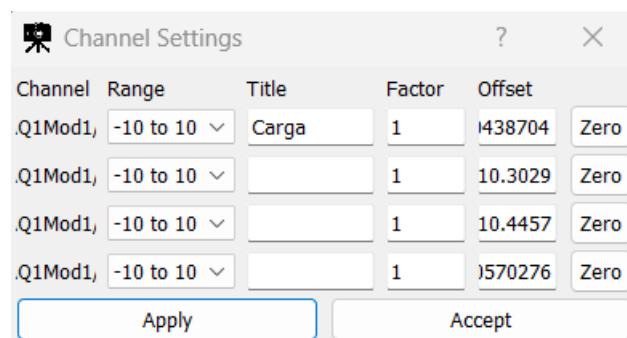


Figura 42 – Área de configuração de todos os canais disponíveis para serem conectados ao software VIC-Snap.

Nesta parte dos dados analógicos existe uma opção de intervalo de valores que pode ser armazenado em cada canal, ilustrado pela Figura 42. Ao todo é possível conectar quatro canais diferentes, com intervalos de valores diferentes, entre eles um valor de -10 a 10 permite que um maior intervalo de valores seja armazenado, o que pode ser útil para *hardwares* com um grande contraste de

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

dados, já o valor -0,5 a 0,5 permite que um intervalo menor de valores seja armazenado e o valor -5 a 5 é um valor intermediário entre os dois primeiros valores.

Para a célula de carga em questão, essa pode ter um grande contraste de dados com valores muito altos e valores muito baixos. Foi definido um intervalo de valores de -10 a 10 que permitirá que o *software* VIC-Snap registre toda essa gama de dados, resultando em uma leitura mais precisa.

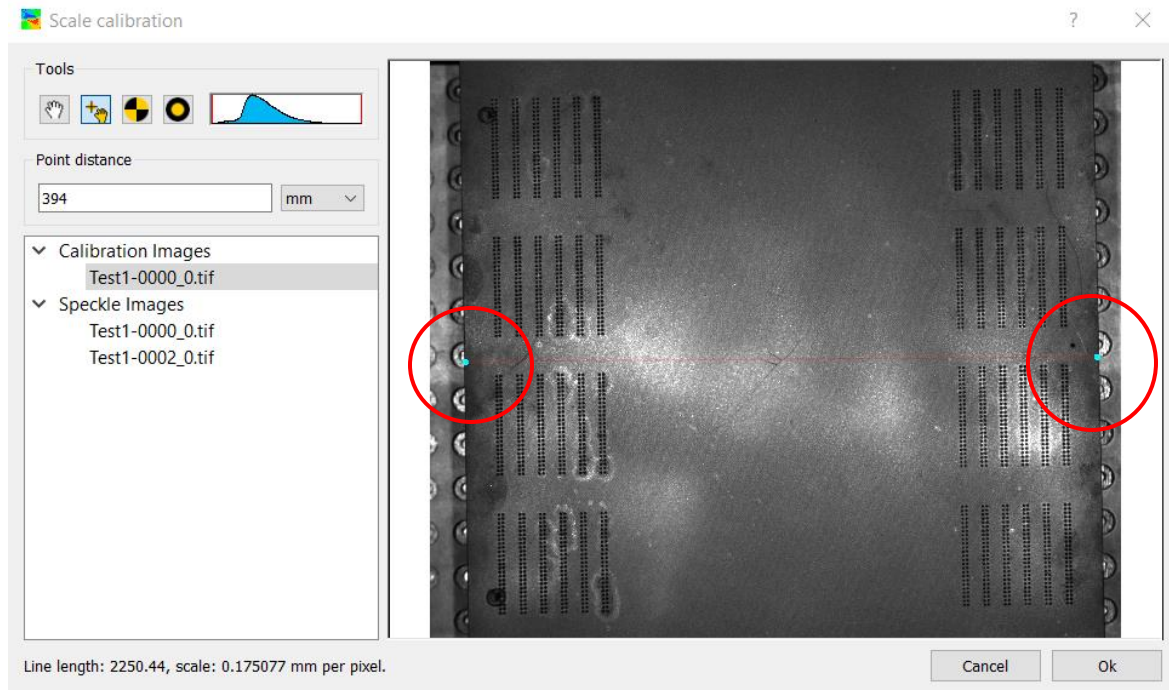


Figura 43 - Calibração da escala de medição no software VIC 2D a partir de dois pontos.

Com as imagens devidamente capturadas de acordo com a simulação desejada, o próximo passo deverá ser importá-las para o *software* VIC-2D. Para obter resultados em escala, primeiramente é preciso calibrar uma escala conhecida, para fazer isso é preciso importar uma imagem em que a referência esteja no mesmo plano da amostra em estudo e selecionar dois pontos na imagem com uma distância conhecida, ilustrado pela Figura 43.

Neste caso, foi utilizado a imagem da placa em que os dois pontos se encontram nas extremidades da placa, ou seja, a distância conhecida da largura da placa é de 394mm.

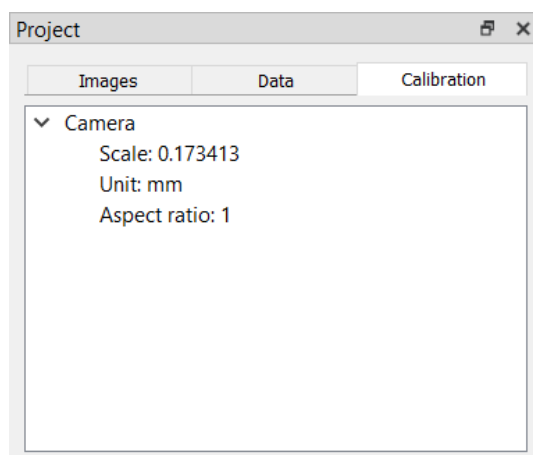


Figura 44 - Escala de calibração em relação à placa de cama de agulhas física e o tamanho na imagem.

A Figura 44 mostra a escala de calibração final. Neste caso, a escala de calibração é de 0,173413, o que significa que um objeto de 1 metro na vida real tem 17,34 centímetros de largura na imagem. O *aspect ratio* é de 1, o que significa que a imagem capturada é quadrada.

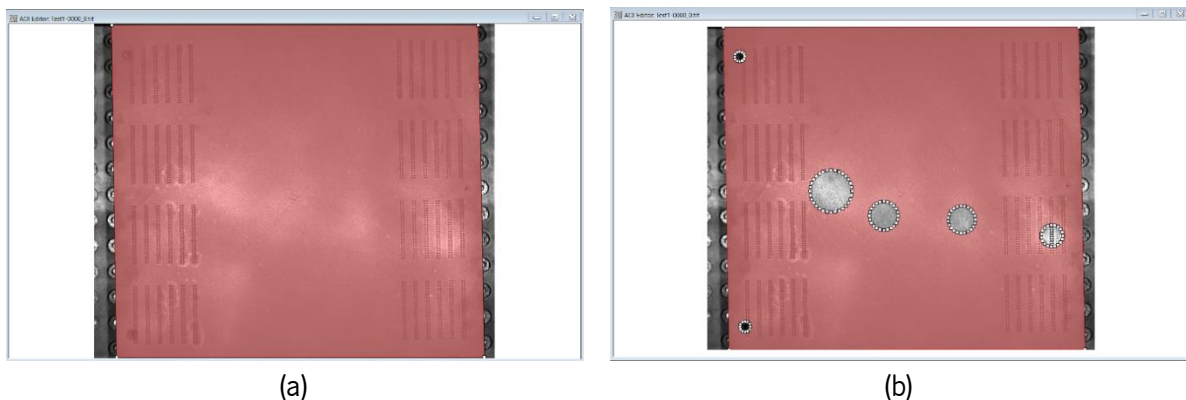


Figura 45 - (a) Identificação da área de interesse para simulação da placa no software VIC-2D. (b) Zonas da área de interesse defeituosas que forma removidas.

O próximo passo é selecionar a área de interesse (Figura 45 (a)), para isso utiliza-se a ferramenta de polígono da seção "*aió tools*".

Como já explicado anteriormente, a superfície da amostra precisa conter alguns requisitos para que os resultados da simulação sejam os mais precisos possíveis. Áreas em que estejam com reflexos fortes de luz ou que possuam furos ou alguma imperfeição podem conter informações erradas/incompletas ou serem difíceis de visualizar e interpretar, tornando mais difícil identificar padrões e tendências na simulação.

Por esses motivos, é importante remover da área de interesse de análise as áreas que contêm furos e reflexos da amostra (Figura 45 (b)), dessa forma o *software* não lê as informações nessas áreas.

No pré-processamento, um *subset size* é o número de *pixels* que são usados para calcular a correlação entre duas imagens. Um tamanho de subconjunto maior leva a uma correlação mais precisa, mas também leva a um tempo de execução mais longo, enquanto um tamanho de subconjunto mais pequeno leva a um tempo de execução mais curto, mas também pode levar a uma correlação menos precisa.

O nível de ruído é a quantidade de ruído que é adicionada às imagens. Um nível de ruído mais alto leva a uma correlação menos precisa, mas também pode levar a uma correlação mais robusta a ruído, já um nível de ruído mais baixo leva a uma correlação mais precisa, mas também pode ser mais sensível a ruído.

O termo "sensível ao ruído" refere-se à capacidade de um método de medição de ser afetado por pequenas variações na entrada. No contexto da análise DIC, o ruído pode ser causado por uma variedade de fatores, incluindo:

- VARIAÇÕES NA ILUMINAÇÃO;
- VARIAÇÕES NA POSIÇÃO DA CÂMARA;
- VARIAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO OBJETO SENDO MEDIDO.

Quanto mais sensível ao ruído um método de medição for, mais propenso será a produzir resultados imprecisos na presença de ruído. O *software* VIC 2D é um método de análise relativamente robusto a ruído, ou seja, é menos propenso a produzir resultados imprecisos na presença de ruído do que outros métodos de análise DIC.

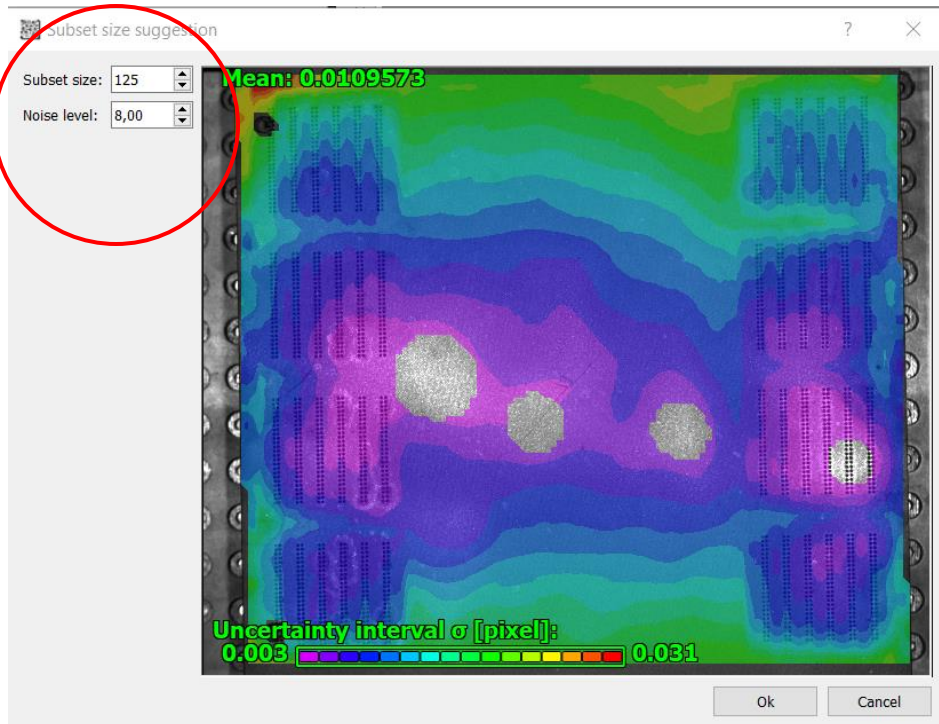


Figura 46 - Sugestão do tamanho do subset e do nível de ruído utilizado no pré-processamento da placa

A partir da Figura 46 é possível verificar estes parâmetros pré-definidos na ferramenta de sugestão (*subset* de 125 e ruído de 8) são suficientes para determinação dos valores mais adequados, pois utiliza uma série de parâmetros para sugerir o tamanho do subconjunto ideal, incluindo:

- O NÍVEL DE RUÍDO NAS IMAGENS;
- O TAMANHO DA IMAGEM;
- O PROPÓSITO DA SIMULAÇÃO;
- O TEMPO DISPONÍVEL PARA EXECUTAR A SIMULAÇÃO.

O *step size* é a distância entre os *subsets*, em que o mesmo deve ser mais pequeno do que o tamanho do *subset*. Um *step size* mais pequeno resultará em uma medição mais precisa do deslocamento, mas também levará mais tempo para calcular, e vice-versa. Neste caso foi utilizado um *step size* de 2, ou seja, que os *subsets* são espaçados em intervalos de dois *pixels*, por exemplo, se o tamanho do *subset* for 125, os *subsets* serão espaçados em intervalos de 250 pixels (125 x 2).

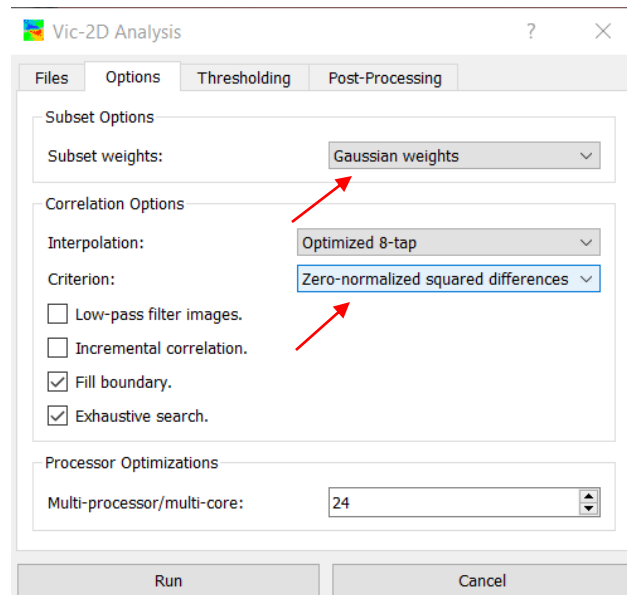


Figura 47 - Escolha das opções de tipo de peso dos subsets e critério de correlação que foi utilizado na simulação.

Outro fator importante a definir são os tipos de *subset weights*, ilustrado pela Figura 47. Os *Gaussian weights* são calculados usando uma distribuição normal, em que dão mais peso/maior importância aos *pixels* que estão perto do centro da correlação, enquanto os *Uniform weights* são iguais para todos os *pixels*. Os Gaussianos podem ajudar a reduzir o ruído nas imagens, já que os *pixels* que estão longe do centro da correlação são mais propensos a ter ruído, então dar menos peso a eles pode ajudar a melhorar a qualidade da imagem.

Já os pesos uniformes podem ajudar a destacar as bordas e detalhes nas imagens, ajudando a aumentar a nitidez da imagem. O peso escolhido para a simulação foi os *Gaussian* com um critério de correlação por diferenças quadradas normalizadas a zero.

O *software* oferece três opções de critério de correlação que fazem a correlação entre dois conjuntos de dados por vez: Por *squared differences*, *normalized square differences* e *zero-normalized square differences*, ilustrado pela Figura 46. O critério de *squared differences* é o mais simples dos três e simplesmente calcula a soma dos quadrados das diferenças dos dois conjuntos de dados. O critério de *normalized square differences* divide os conjuntos de dados pelo tamanho dos dois conjuntos de dados analisados, ajudando a tornar o critério mais independente do tamanho de todos os conjuntos de dados.

Já o critério de *zero-normalized square differences* divide as diferenças dos quadrados pelo tamanho dos dois conjuntos de dados e depois subtrai a média de cada conjunto de dados, dessa forma o critério fica ainda mais independente do tamanho de todos os dos conjuntos de dados e também ajuda a remover qualquer tendência nos dados.

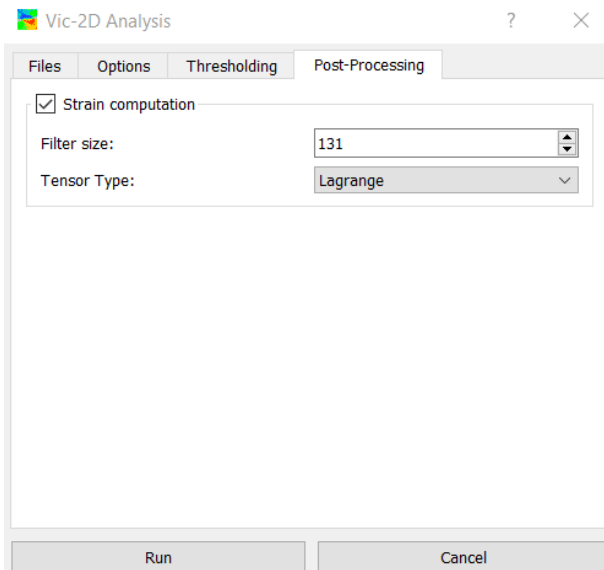


Figura 48 - Definição do tamanho de filtro e tipo de tensor para o pós-processamento.

Na parte de pós-processamento, ilustrado pela Figura 48, é possível escolher o tamanho do filtro utilizado e o tipo de tensor. O tamanho do filtro é o número de *pixels* que são considerados para calcular o deslocamento em cada ponto, dessa forma, um tamanho de filtro maior resultará em uma medição mais precisa do deslocamento, mas também levará mais tempo para calcular e vice-versa. Para escolher o tamanho de filtro é possível ter em atenção que:

- O TAMANHO DO FILTRO DEVE SER MAIOR DO QUE O TAMANHO DOS *SPECKLES*;
- O TAMANHO DO FILTRO DEVE SER SUFICIENTE PARA CAPTURAR OS MOVIMENTOS QUE VOCÊ ESTÁ INTERESSADO EM MEDIR;
- O TAMANHO DO FILTRO DEVE SER PEQUENO O SUFICIENTE PARA SER RÁPIDO O SUFICIENTE PARA SER USADO EM TEMPOREAL.

O tamanho de filtro escolhido foi de 131, em que o mesmo é ligeiramente maior que o tamanho do *subset*, mas não tão grande a ponto de não conseguir captar os movimentos da simulação e tensor de Lagrange. Em relação ao tipo de tensor, existem seis opções: Lagrange, Hencky (logarítmico), Euler-Almansi, Log. Euler-Almansi, *Engineering* e Biot.

Um tensor é uma estrutura matemática que generaliza os conceitos de escalares, vetores e matrizes e podem ser usados para representar quantidades físicas que têm mais de uma dimensão, como a tensão, a deformação e o campo eletromagnético. Os tensores são representados por uma matriz de números em que o número de linhas e colunas da matriz depende da ordem do tensor, sendo essa ordem o número de dimensões da quantidade física que ele representa (Latorre & Montáns, 2014).

Os tipos de tensores apresentados são medidos de deformação que são usadas para descrever a mudança de forma de um corpo sólido, eles são todos definidos em termos da matriz de Euler-Lagrange, que é uma matriz que descreve a mudança de orientação dos eixos de um corpo sólido. O tensor Lagrange é definido como a razão entre a matriz de Euler-Lagrange e a matriz de identidade e é uma medida da deformação relativa, ou seja, ele mede a mudança de forma de um corpo sólido em relação ao seu tamanho original (Latorre & Montáns, 2014).

O tensor Hencky é definido como o logaritmo do tensor Lagrange e é uma medida da deformação inelástica, isso significa que ele mede a mudança de forma de um corpo sólido que é irreversível. O tensor Euler-Almansi é definido como a metade da soma dos quadrados das componentes do tensor

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

Lagrange e é uma medida da deformação de cisalhamento, ou seja, ele mede a mudança de forma de um corpo sólido que é causada por forças que atuam em direções diferentes (Latorre & Montáns, 2014).

O tensor *Engineering* é uma medida de deformação que é usada em engenharia e é definido como a soma dos quadrados das componentes do tensor Lagrange. Já o tensor Biot é uma medida de deformação que é usada em mecânica dos fluidos e é definido como a metade da soma dos quadrados das componentes do tensor Lagrange (Latorre & Montáns, 2014).

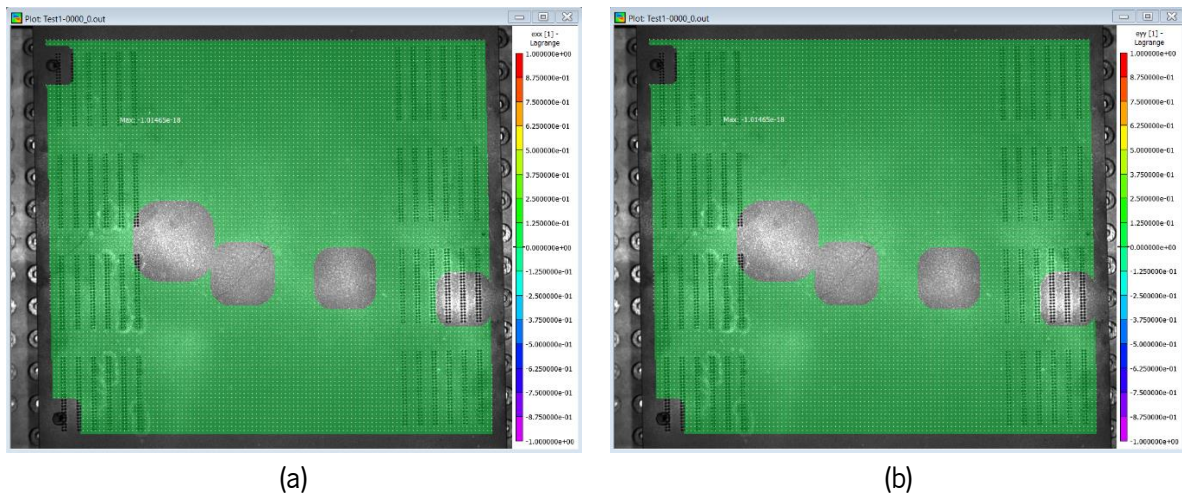


Figura 49 - Imagens de referência utilizadas na correlação entre as outras imagens. (a) Para calcular a variável em relação ao eixo x. (b) Para calcular a variável em relação ao eixo y.

As imagens da Figura 49 (a) e 49 (b) são de referência para a simulação das variáveis exx e eyy , respectivamente, essas variáveis representam a deformação encontrada em relação ao eixo x e y, respectivamente. A imagem de referência é utilizada para correlacionar com as outras imagens de uma série de várias maneiras, como por exemplo ela é utilizada para remover o ruído e as variações entre as imagens ao subtrair a imagem de referência de cada imagem e, em seguida, normalizando as imagens resultantes. A remoção do ruído e das variações ajuda a melhorar a qualidade da imagem final e a facilitar a identificação de padrões nas imagens.

Essas imagens também servem para calcular os fatores de escala para cada imagem. Esses fatores são utilizados para redimensionar as imagens para um tamanho comum, permitindo que as imagens sejam combinadas para criar uma imagem única sem que elas fiquem distorcidas. Em outras palavras, a imagem de referência é calculada como uma média das outras imagens.

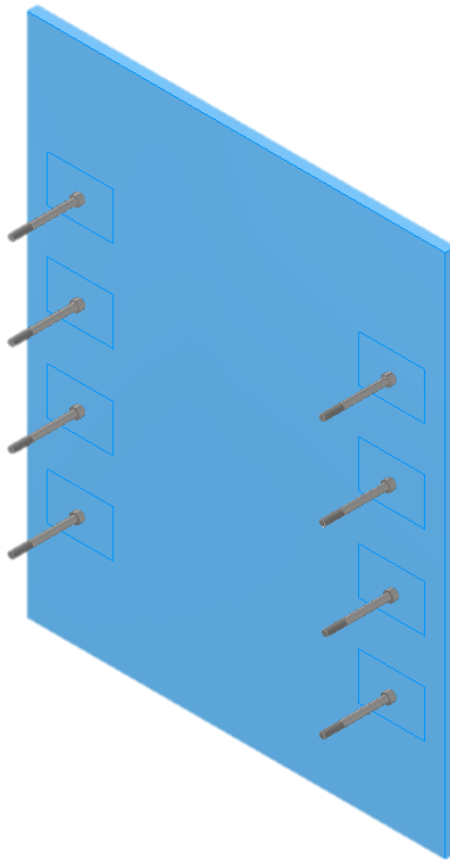


Figura 50 - Ilustração de aplicação de carga experimental na placa de cama de agulhas.

A partir da Figura 50 é possível visualizar um esquema 3D que ilustra a aplicação da carga feita no ensaio experimental. Os parafusos foram alocados de tal maneira que ao entrar em contacto com a placa, a força exercida fosse aplicada o mais próximo possível do centro de cada retângulo em que as agulhas são fixadas, ou seja, dessa forma os parafusos simulam a aplicação de carga de teste das agulhas.

A imagem que foi utilizada para correlação com a imagem de referência é a capturada quando o *output* chegou perto do valor calculado pela fórmula [3.1], ou seja, 0,036V.

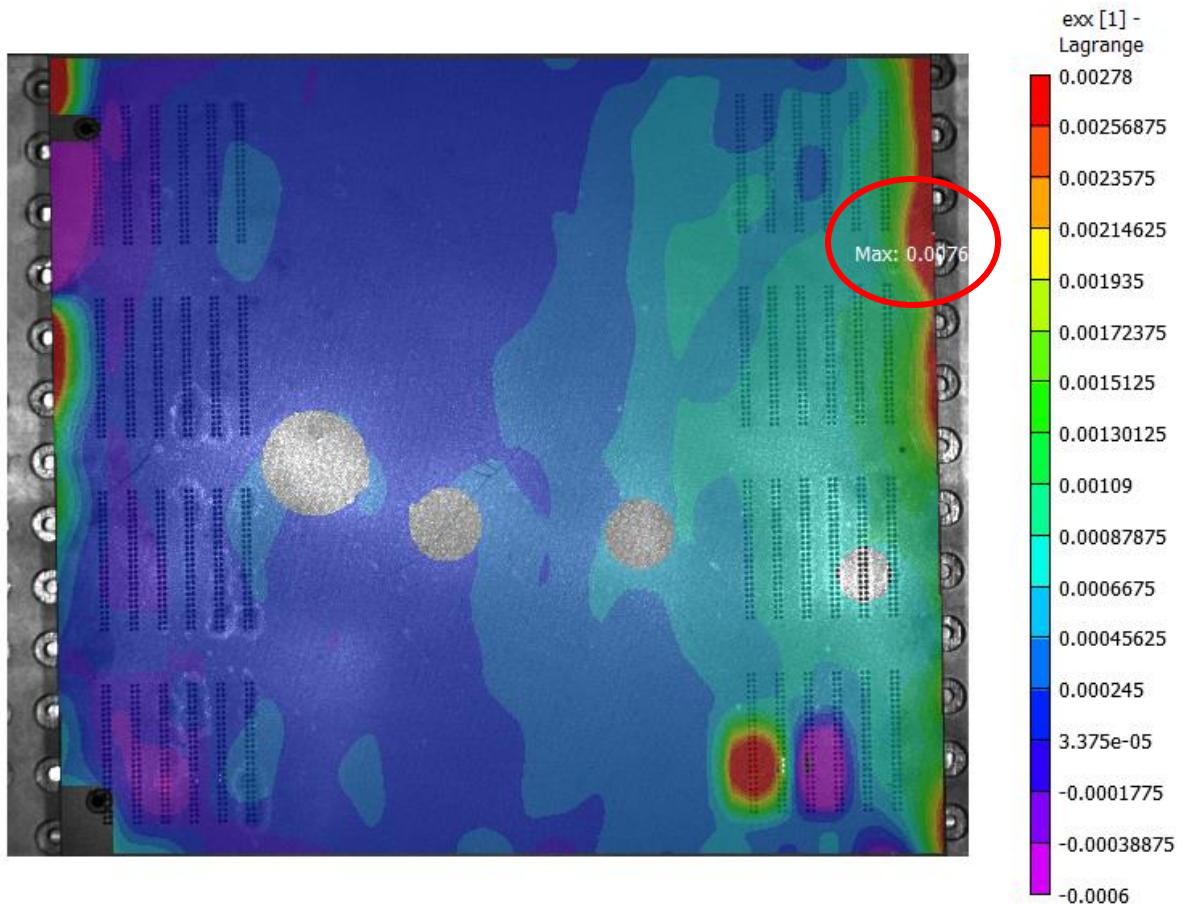


Figura 51 - Deformação direcional máxima encontrada para a placa na direção do eixo x.

A deformação máxima na direção x encontrada foi de 0,008 mm, e está ilustrada pela Figura 51. Desta forma, é possível verificar que a deformação máxima ocorreu na extremidade direita da placa.

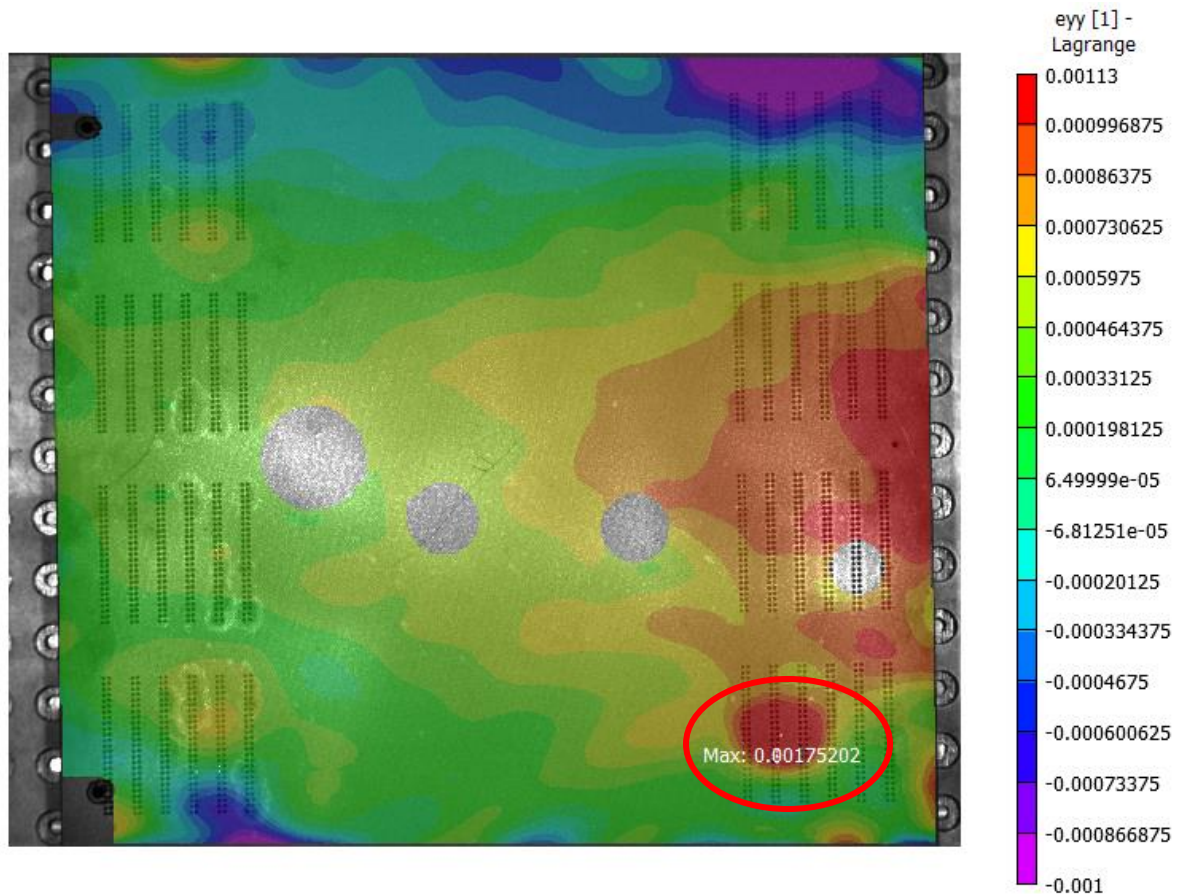


Figura 52 - Deformação direcional máxima encontrada para a placa na direção do eixo y.

A deformação máxima em relação ao eixo y foi de 0,002 mm e ocorreu na extremidade central direita da placa, ilustrado pela Figura 52. Durante a simulação, foram capturadas 14 imagens, em que a carga foi aplicada de maneira crescente até que os dados analógicos atingissem valor próximo de 1,0V.

A partir dos resultados obtidos, é possível verificar pelo gráfico de cores as zonas de maior e menor ocorrência de deformação. O pós-processamento da técnica *DIC* realizada pelo *software* VIC 2D apresenta os resultados separadamente para cada imagem capturada durante o teste, desta forma, uma maneira mais fácil de conseguir ter uma visão global do comportamento do componente durante a deformação, é a redução dos dados de todas as imagens.

Uma maneira eficaz é a utilização de gráficos de redução de dados em que os dados mostrados correspondem à uma zona escolhida para análise, ou seja, neste caso seria um estudo apenas da zona de maior deformação.

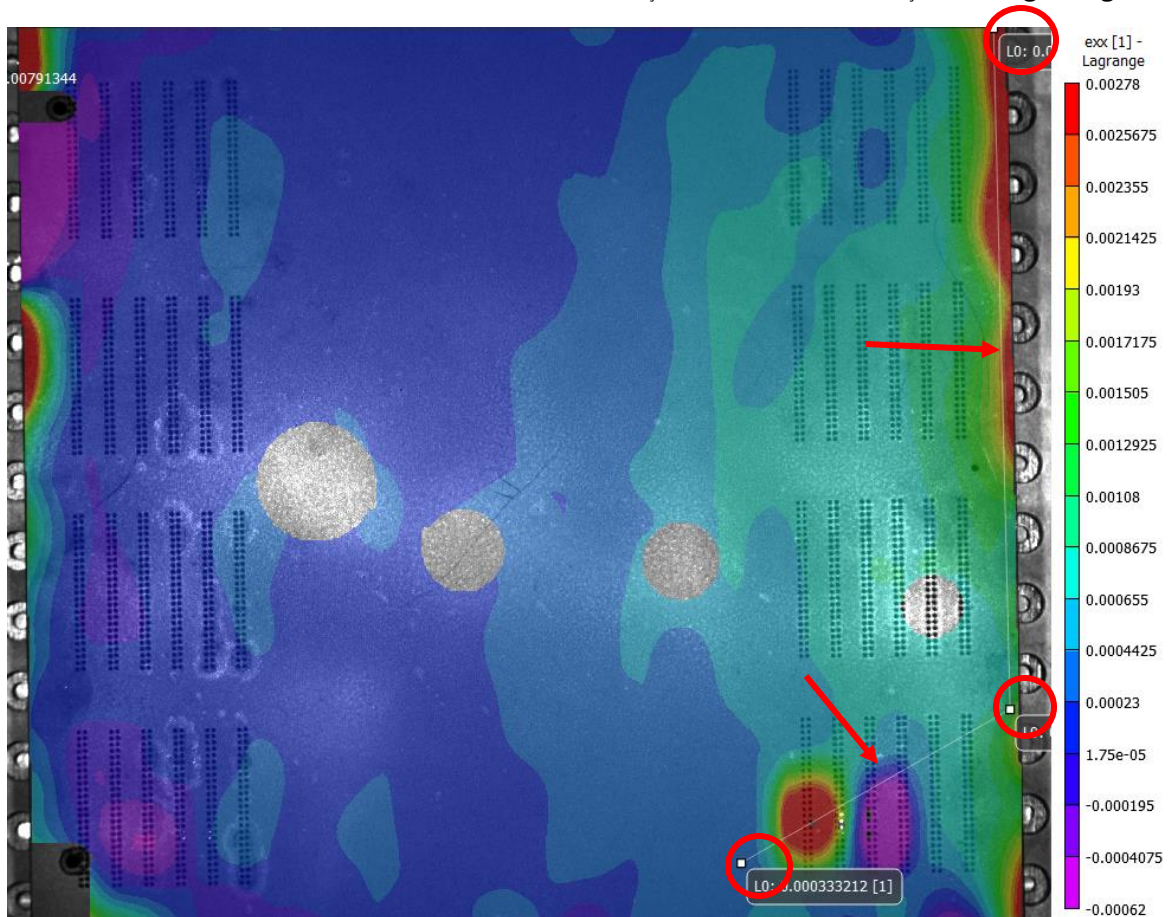


Figura 53 - Seleção da reta de análise para redução dos dados obtidos a partir da zona de deformações máximas no eixo x.

Uma maneira de reduzir os dados obtidos pela simulação é a partir da visualização por meio de gráficos de dados, como os do tipo “*line slices*” que mostra a distribuição de pontos de referência ao longo de uma linha na imagem.

Para os resultados obtidos na simulação, ilustrados pelas Figuras 51 e 52, os pontos em questão foram selecionados por um algoritmo específico para serem representativos da distribuição de pontos de referência na imagem ao longo da reta de análise selecionada.

Primeiramente é preciso selecionar na imagem analisada uma reta em que os dados serão lidos e comparados com a imagem de referência, como é possível observar pelos pontos em destaque na Figura 53. Para os dados referente à deformação ao longo do eixo x, foi desenhada a linha horizontalmente na altura da zona da deformação máxima.

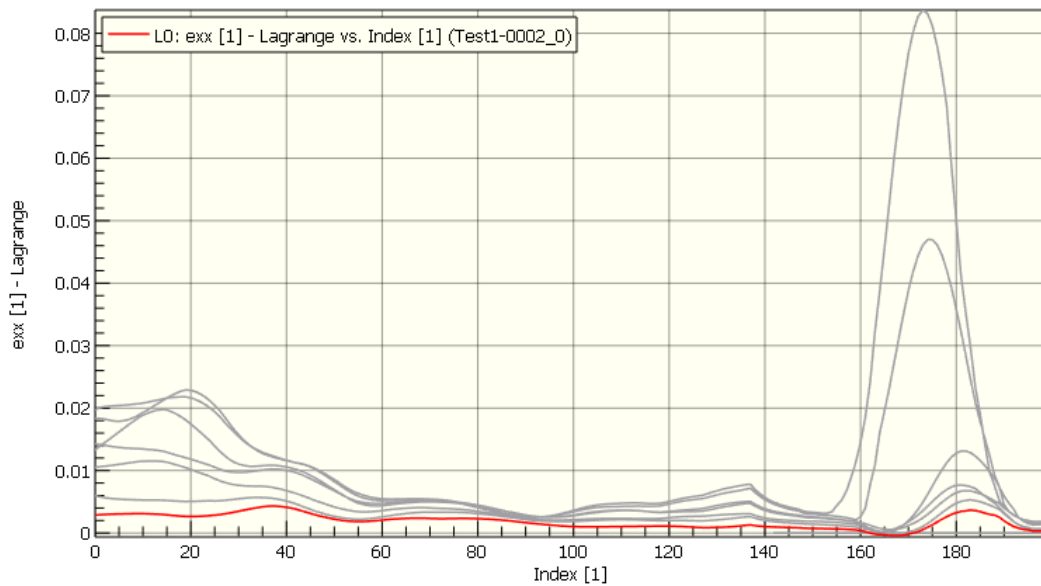


Gráfico 5 - Gráfico de redução dos dados de deformação ao longo do eixo x.

As variáveis em questão são a deformação em x ($exx [1]$) em função do índice dos pontos (Index [1]) da imagem de referência, em que é possível verificar pelo Gráfico 5 no eixo das ordenadas e no eixo das abscissas, respetivamente.

Os resultados do Gráfico 5 foi retirado a partir da seleção da reta de análise ilustrado na Figura 53, e foram obtidos em relação a todas as imagens da simulação. Ou seja, cada curva do gráfico corresponde à uma imagem capturada durante o processo de aplicação de carga, a zona em que as curvas atingem o pico máximo corresponde à zona em que há as maiores deformações, e é esta zona em que é preciso ter em atenção ao analisar uma estrutura ou componente.

Esse tipo de gráfico é usado para visualizar como a deformação varia em relação aos diferentes pontos na superfície da peça. Em outras palavras, ao longo da reta traçada na Figura 53, existem pontos em que o algoritmo lê e compara com a imagem de referência, mostrando como os pontos individuais se movem ou se deformam em resposta à carga aplicada. Pelo gráfico 5 é possível verificar que os pontos do intervalo entre 160 e 190 são os que mais se moveram em relação aos mesmos pontos da imagem de referência.

Foram retirados 200 pontos ao longo da linha selecionada, ao exportar esses dados é possível obter todos os dados relativos ao Gráfico 5. Como a maior concentração de maiores deformações encontra-se entre os pontos 160 e 190, será verificado esse intervalo. É possível encontrar os dados referentes à todos os pontos no Anexo C. Dados dos Gráficos de Redução de Dados Exx.

A Tabela 3 representa os dados obtidos apenas da imagem ilustrada pela Figura 53, ou seja, são os dados da curva em vermelho do Gráfico 5. Em que nesta tabela possuem a localização dos pontos na imagem, representado por X [mm] e Y [mm], o deslocamento desse ponto em relação à x e y, representado por U [mm] e V [mm] respetivamente, e a deformação em x representado por $exx [1]$ – Lagrange.

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

Tabela 3 - Dados parciais retirados do gráfico de redução de dados em relação à deformação referente ao eixo x.

Index [1]	X [mm]	Y [mm]	U [mm]	V [mm]	exx [1] - Lagrange
160	142,123	-125,603	0,0556304	-0,118414	-0,000275222
161	140,391	-126,729	0,0705659	-0,127635	-2,37918e-05
162	138,659	-127,855	0,0741311	-0,131997	0,000203971
163	136,927	-128,981	0,0954588	-0,142342	0,000544914
164	135,194	-130,107	0,155545	-0,162084	0,000990388
165	133,462	-131,233	0,195891	-0,165238	0,00152015
166	131,73	-132,359	0,263536	-0,177701	0,00209671
167					
168	128,266	-134,61	0,436433	-0,23178	0,0033077
169	126,534	-135,736	0,36315	-0,23321	0,00385735
170	124,802	-136,862	0,238147	-0,197307	0,00431528
171	123,07	-137,988	0,172559	-0,171241	0,00464933
172	121,338	-139,114	0,108275	-0,160474	0,0048414
173	119,606	-140,24	0,0791821	-0,148178	0,00487466
174	117,874	-141,365	0,01157	-0,13236	0,00487962
175	116,141	-142,491	0,0125349	-0,131479	0,0046745
176	114,409	-143,617	0,013569	-0,129263	0,00448646
177	112,677	-144,743	0,0148768	-0,127418	0,00413469
178	110,945	-145,869	0,0134634	-0,123543	0,00372798
179	109,213	-146,995	0,0123612	-0,122466	0,00319452
180	107,481	-148,121	0,0173673	-0,127464	0,00276789
181	105,749	-149,246	0,0102001	-0,121108	0,00213843
182	104,017	-150,372	0,0106007	-0,12074	0,00158419
183	102,285	-151,498	0,0096607	-0,121645	0,00122842
184	100,553	-152,624	0,00816821	-0,121436	0,00093826
185	98,8205	-153,75	0,0080445	-0,121678	0,00075733
186	97,0884	-154,876	0,00864542	-0,121967	0,00765421
187	95,3563	-156,002	0,00674703	-0,118849	0,000580319
188	93,6242	-157,127	0,00833472	-0,119677	0,000596084
189	91,8921	-158,253	0,00912082	-0,120247	0,000616531
190	90,16	-159,379	0,00305858	-0,112425	0,000607051

A partir da análise da tabela acima observa-se que a zona a ter em atenção neste caso encontra-se entre o intervalo de medidas [142,1; 90,16] mm no eixo x e [-125,6; -159,379] mm no eixo y.

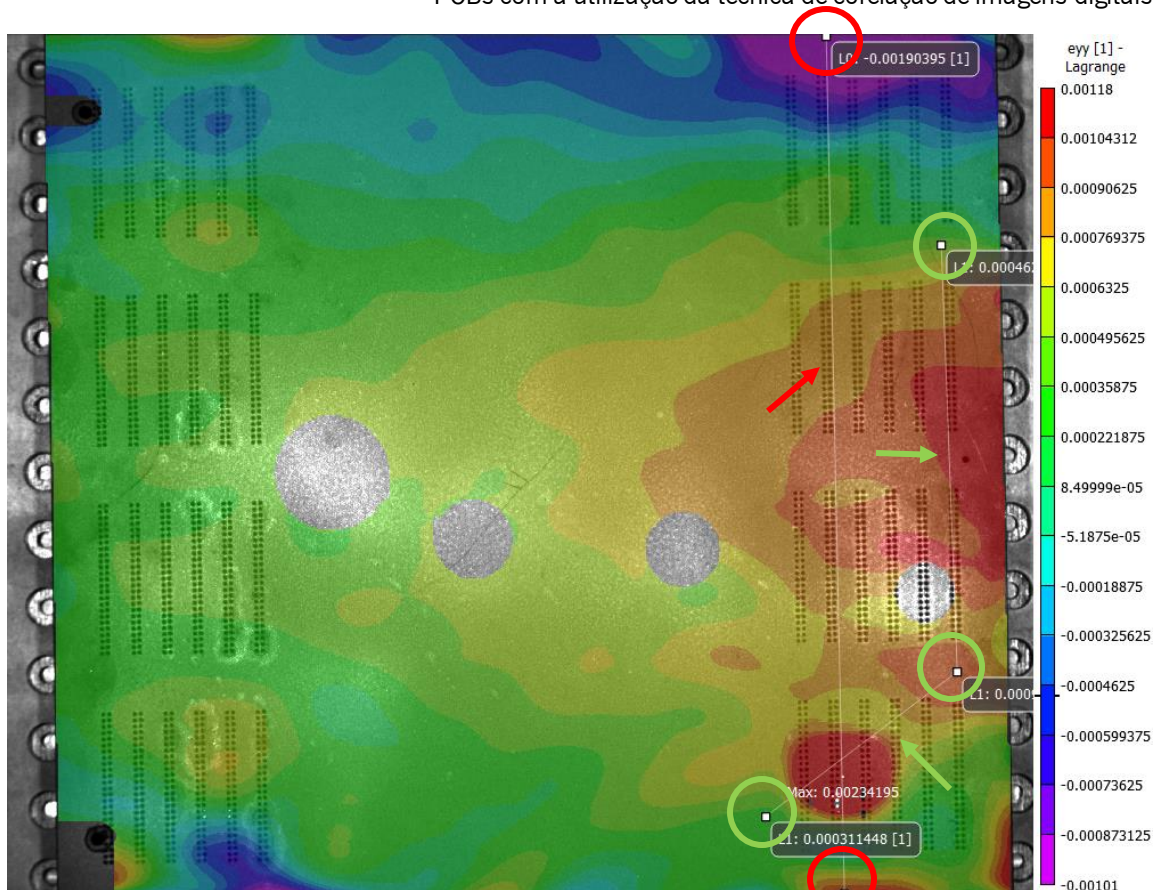


Figura 54 - Seleção das retas de análise para redução dos dados obtidos a partir da zona de deformações máximas no eixo y.

Para verificar a mudança entre os pontos da deformação referente ao eixo y, utiliza-se a variável $eyy [1]$, e a reta em que será feito a análise encontra-se ilustrado na Figura 53. Esta análise, em contrapartida com a anterior, não será feita em relação a todas as imagens da simulação, apenas com a imagem da deformação resultante do valor esperado da carga aplicada com a imagem de referência.

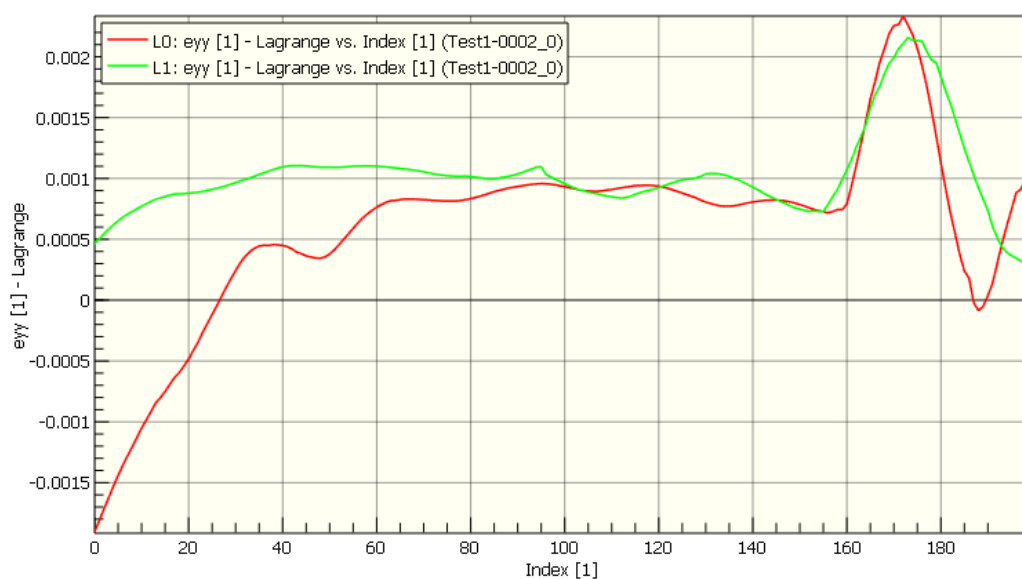


Gráfico 6 - Gráfico de redução dos dados de deformação ao longo do eixo y.

No gráfico 6 é possível verificar uma curva em vermelho que corresponde à linha vertical que passa ao longo do comprimento da placa na altura da zona em que há a deformação máxima e a curva em verde corresponde aos maiores valores de deformação encontradas nas zonas mais afetadas.

A partir da comparação entre as duas curvas das zonas mais afetadas, é possível observar que os pontos que mais se verifica mudança são entre o intervalo de 160 a 185. A leitura dos pontos começa em 0 pelos pontos superiores das retas (Figura 54) e aumenta gradativamente ao longo da reta até atingir a parte inferior da placa. No gráfico 6, é possível ainda observar que após passar pela zona dos pontos em que há maior movimento, a curva em verde tende a zero, e visualmente é possível verificar na Figura 54 que o ponto acaba em uma zona verde, onde não há muita deformação.

O oposto é visto pela curva em vermelho, em que após atingir o pico, tende a zero ao passar pela zona verde e depois volta a subir, desta forma é possível verificar no gráfico de cores ilustrado na Figura 54 em que há uma pequena zona em que se vê uma maior deformação também.

Ao exportar os dados do Gráfico 6, optou-se por verificar os dados relativos à curva verde em que esta possui as maiores deformações. É possível verificar os dados referentes aos 200 pontos no Anexo D. Dados dos Gráficos de Redução de Dados Eyy. Desta forma, a Tabela 4 possui a localização dos pontos na imagem, representado por X [mm] e Y [mm], o deslocamento desse ponto em relação à x e y, representado por U [mm] e V [mm] respetivamente, e a deformação em y representado por ϵ_{yy} [1] – Lagrange.

Tabela 4- Dados parciais retirados do gráfico de redução de dados em relação à deformação referente ao eixo y.

Index [1]	X [mm]	Y [mm]	U [mm]	V [mm]	eyy [1] - Lagrange
160	142,123	-125,603	0,05563	-0,11841	0,003609
161	140,391	-126,729	0,070566	-0,12764	0,003825
162	138,659	-127,855	0,074131	-0,132	0,004036
163	136,927	-128,981	0,095459	-0,14234	0,004076
164	135,194	-130,107	0,155545	-0,16208	0,00409
165	133,462	-131,233	0,195891	-0,16524	0,004013
166	131,73	-132,359	0,263536	-0,1777	0,003848
167					
168	128,266	-134,61	0,436433	-0,23178	0,003299
169	126,534	-135,736	0,36315	-0,23321	0,002942
170	124,802	-136,862	0,238147	-0,19731	0,002553
171	123,07	-137,988	0,172559	-0,17124	0,002165
172	121,338	-139,114	0,108275	-0,16047	0,001775
173	119,606	-140,24	0,079182	-0,14818	0,00141
174	117,874	-141,365	0,01157	-0,13236	0,001086
175	116,141	-142,491	0,012535	-0,13148	0,000807
176	114,409	-143,617	0,013569	-0,12926	0,000582
177	112,677	-144,743	0,014877	-0,12742	0,000425
178	110,945	-145,869	0,013463	-0,12354	0,000266
179	109,213	-146,995	0,012361	-0,12247	0,000141
180	107,481	-148,121	0,017367	-0,12746	0,000107
181	105,749	-149,246	0,0102	-0,12111	0,000106
182	104,017	-150,372	0,010601	-0,12074	0,000125
183	102,285	-151,498	0,009661	-0,12165	0,000135
184	100,553	-152,624	0,008168	-0,12144	0,000149
185	98,8205	-153,75	0,008045	-0,12168	0,000151

A partir da análise acima observa-se que a zona a ter em atenção neste caso encontra-se entre o intervalo de medidas [142,1; 98,8] mm no eixo x e [-125,6; -153,8] mm no eixo y.

3.4. COMENTÁRIOS E SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, realizou-se uma análise numérica detalhada do comportamento mecânico da placa de cama de agulhas utilizada nos testes ICT para placas de PCB. A geometria 3D da placa retangular, composta por oito zonas de furos para encaixe das agulhas de teste, foi modelada e simulada utilizando o software ansys. Através da aplicação de condições de fronteira fixed nas extremidades superiores e inferiores da placa, e da aplicação de cargas nas zonas de furos das agulhas em que as cargas de teste são aplicadas, foi possível verificar a resposta estrutural da placa sob o cenário de carregamento imposto pela geometria do componente.

As cargas aplicadas nas zonas externas e internas das agulhas foram de 200N e 69,6N, respetivamente. A análise revelou um deslocamento total máximo de 0,047 mm, em que essas deformações ocorreram na zona externa central, demonstrando a capacidade da placa de suportar as

cargas de teste sem deformações excessivas. Além disso, as deformações máximas nos eixos x e y foram de 0,003 mm e 0,001 mm, respectivamente, indicando a estabilidade da placa sob as condições de carga impostas.

As diferenças nas distribuições de deformação ao longo dos eixos x e y podem ser influenciadas por vários fatores, como por exemplo o material utilizado, mesmo selecionando outro tipo de material, o mesmo possui propriedades semelhantes e por ser da mesma classe e materiais, os compósitos, o comportamento tende a ser parecido devido ao tipo de matriz e reforço utilizado em ambos os materiais.

As combinações entre as propriedades dos dois materiais resultam em um compósito de propriedades anisotrópicas, ou seja, as propriedades variam em diferentes direções devido à orientação de cada fibra do reforço, resultando em um comportamento diferente para cada situação.

Outro aspecto crucial da análise foi o critério da tensão de Von Mises, um parâmetro que avalia a tensão equivalente considerando os efeitos combinados de tensão normal e corte. Os resultados revelaram uma tensão de Von Mises de 4.326 MPa, demonstrando a distribuição e magnitude das tensões ao longo da estrutura da placa de cama de agulhas.

A tensão máxima encontrada está localizada perto das extremidades em que a placa está fixada, é resultado das condições de contorno. Ao ser fixada nas extremidades, a carga aplicada faz com que a placa experimente momentos fletores e de corte ao longo dessa zona, gerando os valores mais altos de tensão.

A tensão quase nula no centro da placa, em torno de 0,526 MPa está relacionada ao comportamento da placa sob a carga aplicada. A carga ao longo das extremidades laterais provoca uma flexão na placa, e, no centro, a placa tende a curvar-se menos e experimentar tensões menores, isso pode ser visto no gráfico de cores gerado pela deformação total. Isso é conhecido como o efeito do plano neutro, onde as camadas do material na região central da placa estão menos sujeitas a tensões de flexão, e conseqüentemente, a região central apresenta uma tensão mais baixa.

No contexto dos testes *ICT* em placas de *PCB*, esses resultados são de extrema importância. Eles fornecem *insights* importantes sobre a capacidade da placa de cama de agulhas em suportar as cargas dos testes sem comprometer a integridade da estrutura. É importante ressaltar que os resultados desta análise numérica fornecem uma base sólida para a compreensão do comportamento mecânico da placa de cama de agulhas. No entanto, para garantir a validade e precisão desses resultados, é essencial conduzir uma análise experimental para comparar os dados obtidos com as simulações. A integração dessas duas abordagens - análise numérica e validação experimental - culminará em uma abordagem abrangente e confiável para o estudo do comportamento mecânico das placas de cama de agulhas nos testes *ICT*.

Este capítulo também apresentou uma análise experimental detalhada de uma placa de cama de agulhas conduzida no âmbito da correlação de imagens digitais em 2D, a pesquisa em si se concentrou em compreender o comportamento da placa sob carregamento. A metodologia utilizada incluiu a descrição completa das especificações e funções dos instrumentos utilizados, como por exemplo a câmara e lentes necessárias para a captura das imagens, até a máquina-ferramenta que aplicou a carga na placa, além da preparação da superfície do componente em estudo e a fixação do mesmo na máquina-ferramenta.

A metodologia de pré-processamento feita no *software* VIC-Snap foi descrita em detalhes, em que neste caso foi utilizada a captação das imagens por meio de captura analógica. Como o valor de saída desejada da célula de carga era de 0,036 Volts, foi utilizado um *input* de gatilho de 0,01V, dessa forma o *software* conseguiu registrar os valores subsequentes e na ordem de grandeza esperada.

Para a parte de pós processamento no software VIC-2D foi definido o tipo de critério e tensor para cálculo das variáveis de correlação, nomeadamente a deformação em relação aos eixos x e y, e outros parâmetros importantes. Foi selecionado um tensor de Lagrange com um critério de diferenças quadradas normalizadas a zero para avaliação e quantificação da diferença dos pontos, os resultados esperados a partir dessa escolha era o de obter um valor preciso, devido a sensibilidade à pequenas deformações em situações que os deslocamentos obtidos sejam sutis.

Os resultados qualitativos e quantitativos da experiência foram apresentados, destacando as deformações máximas obtidas. A deformação máxima em x foi de 0,008 mm, em que a localização foi do lado superior direito da placa próxima à zona em que a mesma foi fixa, já a deformação máxima em y foi de 0,002 mm na parte central do lado direito.

A partir dos gráficos de resultado dos dados obtidos em cada tipo de deformação (em relação a x ou y), foi possível verificar o nível de deformação em cada ponto de análise para todas as imagens capturadas, ou seja, ao todo foram registadas 14 imagens com as deformações e comportamento tidos sob diferentes valores de carga aplicada. Cada curva dos gráficos 3 e 4 corresponde a uma carga diferente, e cada pico verificado ao longo do gráfico mostra que houve uma diferença muito grande entre os pontos das imagens deformadas com à imagem de referência.

Nestes casos foi possível verificar que quanto maior a carga aplicada, mais distante estão os pontos de correlação em relação à imagem inicial, conseqüentemente maior será a deformação calculada.

Os resultados obtidos nesta análise experimental contribuem para a validação dos resultados previamente obtidos na análise numérica ao comparar as informações derivadas da abordagem numérica com as observações práticas da análise experimental, é possível determinar a confiabilidade e precisão dos modelos teóricos desenvolvidos. A próxima etapa desta pesquisa será dedicada à validação cruzada entre os dois métodos utilizados será explorada no próximo capítulo, onde será destacado as semelhanças, discrepâncias e as possíveis razões subjacentes entre os resultados obtidos.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através deste capítulo, será feita uma análise mais aprofundada e crítica dos resultados obtidos por meio da abordagem experimental e numérica adotadas nos capítulos anteriores. Esta é uma parte importante para a pesquisa, em que será convergida as informações coletadas e exploradas as implicações para uma compreensão abrangente do comportamento mecânico da placa de cama de agulhas sob cargas de funcionamento utilizadas nos testes ICT.

A análise numérica forneceu uma visão teórica detalhada do comportamento do componente sob as condições especificadas, por outro lado, a análise experimental permitiu observar as respostas reais da placa sob a carga. Desta forma, serão investigados os fatores que podem ter contribuído para as discrepâncias entre os resultados numéricos e experimentais, possíveis fontes de erro, as influências das condições experimentais, a precisão dos modelos utilizados e as características intrínsecas dos materiais envolvidos.

Como já visto anteriormente, a análise de correlação de imagem digital em duas dimensões é uma técnica utilizada para medir deslocamentos e deformações nas áreas de interesse ao longo das superfícies de objetos com base nas variações de padrões visuais entre imagens capturadas antes e após a aplicação de uma carga. As deformações, entre outras variáveis, são calculadas tanto na direção x (horizontal) quanto na direção y (vertical) do plano da placa, desta forma, pra poder prever numericamente os resultados obtidos por essa técnica, é preciso selecionar a deformação direcional nas direções desejadas (x e/ou y), visto que não é possível retirar resultados de natureza tridimensional pela técnica DIC 2D.

Foi proposto a utilização de 200N como carga em cada zona de agulhas da placa de cama de agulhas, isso porque cada agulha aplica 4N de força durante o teste ICT, e cada zona de agulhas possuem 50 agulhas, ou seja, cada zona aplica cerca de 200N no teste. A distribuição dessas zonas de agulhas pela placa foi de quatro zonas ao logo das extremidades laterais, fazendo com que a placa fletisse.

A força exercida pela agulha de teste durante os testes ICT é projetada para se ajustar de acordo com o tamanho do percurso que ela percorre. Durante o processo de aplicação de carga na geometria da placa em estudo, a deformação causada pela aplicação das cargas nas quatro zonas de cada canto faz com que o percurso das agulhas das zonas internas diminua. Dessa forma, ao terem o percurso diminuído, a força que cada agulha exerce também diminui, inicialmente para o percurso original da agulha, ela exercia uma força de 4N, ao calcular a força em relação ao novo percurso, cada agulha exerce cerca de 1.392N, totalizando 69,9N em cada zona interna.

Para a simulação numérica foi utilizado diferentes cargas em cada zona a fim de poder simular o comportamento real da placa durante o teste. A máquina ferramenta projetada para realizar os ensaios na placa de cama de agulha fixa o componente entre as duas placas principais, ou seja, não é possível movimentar a placa em nenhuma direção, mas isso não significa que ela esteja totalmente encastrada.

Em outras palavras, a condição de encastramento total é frequentemente uma idealização teórica. Na prática, é difícil ou impossível alcançar uma restrição completa em todas as direções, uma vez que pequenas tolerâncias, deformações elásticas e outras influências podem afetar o comportamento real.

Para simulação numérica, a condição de contorno mais adequada que refletisse com mais proximidade o comportamento real durante os testes experimentais, foi o *fixed* nas extremidades superiores e inferiores da placa. Quando essa condição de contorno é aplicada a um determinado ponto,

aresta ou superfície do modelo, está efetivamente restringindo os movimentos e rotações nessa direção específica, simulando uma situação de encastramento.

A partir dessas constatações, procedeu-se para a simulação dos resultados. Foram retirados quatro resultados diferentes: Deformação direcional nos eixos x, y e z, deformação total e tensão equivalente, que em conjunto oferecem uma visão abrangente e detalhada do comportamento mecânico da placa. Para a deformação máxima em x, obteve-se um valor de 0,003 mm e está localizada nas zonas das extremidades superiores em que a carga está a ser aplicada.

Para a deformação máxima em y, obteve-se um resultado de 0,001 mm, em que ocorre ao longo da parte central direita da placa. Já o deslocamento máximo ocorrido no eixo z, que é o responsável pelas deformações nos outros eixos, foi de 0,142 mm. Por ser um valor muito baixo justifica-se que a deformação em x e y sejam quase imperceptíveis.

O material utilizado é da classe dos compósitos fibrosos, isso significa que ele é composto por duas fases heterogêneas com propriedades mecânicas distintas, denominadas de matriz e reforços. O papel fenólico é feito a partir de uma matriz de resina fenólica com fibras de celulose de reforço.

A observação das deformações assimétricas entre os resultados, sugere fortemente que a orientação das fibras de reforço está desempenhando um papel crítico no comportamento mecânico da placa, além da própria anisotropia do material por conta da estrutura heterogênea. Ou seja, a anisotropia significa que as propriedades mecânicas do material variam em diferentes direções devido à orientação das fibras de reforço, desta forma o comportamento em si é frequentemente complexo e altamente influenciado pela interação entre as fibras e a matriz.

Na simulação numérica, a direção dos reforços envolve a modelagem correta das propriedades mecânicas anisotrópicas do material. A fim de comparações com os resultados obtidos do modelo físico da placa de cama de agulhas, essas propriedades foram definidas a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, estes que não possuíam todas as informações necessárias para uma simulação completa. Com isso foi verificado um material que possuía características mecânicas muito próximas do papel fenólico para complementar as informações faltosas, nomeadamente o "PCB *laminare*, Epoxy/*Glass fiber*, FR-4.0, Epoxy (EP) matrix, *Glass fiber woven fabric*, high loss, PCB *laminare*".

Como já visto anteriormente, os resultados da análise experimental foram obtidos a partir da captura de dados analógicos, estes que eram registados a partir de um gatilho de 0,01V para *output* do sistema de aquisição dos dados da célula de carga. Dessa forma, não foi possível registrar exatamente o valor da carga de interesse, visto que os dados analógicos possuíam uma pequena quantidade de ruído e de facto a contagem não iniciava em 0V, fazendo com que o valor de carga registada mais próximo do esperado fosse de -0,048V, um erro absoluto de 0,012 e de 33,3% de erro percentual.

Mesmo com a determinação de uma *trigger* de 0,01V pra cada incremento ou decremento de carga a fim de registrar as cargas desejadas, não foi possível verificar imagens capturadas para as cargas em questão. Ou seja, a diferença entre a carga registada (por exemplo -0,346V) e a carga desejada (-0,225V) pode ser causada pela forma como a carga está a ser aplicada, dessa forma, quando a carga é aplicada manualmente e não de forma automática, pode haver variações na força, na velocidade e na estabilização da aplicação. Essas variações podem afetar a leitura da carga pelo sistema de aquisição de dados.

A análise experimental resultou em deformações de 0,008 mm na direção x e de 0,002 mm na direção y. A partir da Tabela 5 é possível verificar a afilência entre os resultados obtidos nos dois tipos de análises, em que neste caso os resultados da tabela em relação à análise numérica para a deformação em x e y podem ser verificados na Figura 27 (a) e (b), respetivamente. O mesmo pode ser feito com os resultados experimentais para x e y, a partir das Figuras 51 e 52, respetivamente.

Tabela 5 - Afluência entre os resultados obtidos na análise numérica e experimental da placa de cama de agulhas.

	Deformação na direção x [mm]	Deformação na direção y [mm]	Erro percentual [%]
Análise numérica	0,003	0,008	166,67
Análise experimental	0,001	0,002	100

Apenas ao observar os valores, é possível notar uma discrepância muito grande entre os resultados obtidos das duas análises. O ocorrido pode ser explicado por uma combinação de fatores relacionados à aquisição de dados experimentais, calibração, ruído e a complexidade inerente dos materiais compósitos.

A captura de dados analógicos pode ser suscetível a ruídos e imprecisões. O fato de que a contagem não iniciava em 0V pode indicar que a calibração do sistema de aquisição de dados pode não ter sido feita com precisão, levando a uma subestimação ou superestimação da carga real aplicada à célula de carga e imprecisões nas leituras do *output* da célula de carga.

Ainda em relação aos dados analógicos, essa divergência de valores leva a um erro de *offset* (ou erro de desvio) que podem levar a deslocamentos sistemático nos resultados, ou seja, ao afetar a aquisição dos valores da carga de interesse, afetam as deformações calculadas. Além também da limitação da análise numérica, como das condições de contorno impostas e do comportamento complexo do material devido a anisotropia que a partir da combinação de diferentes camadas e direções de fibras pode levar a respostas não intuitivas.

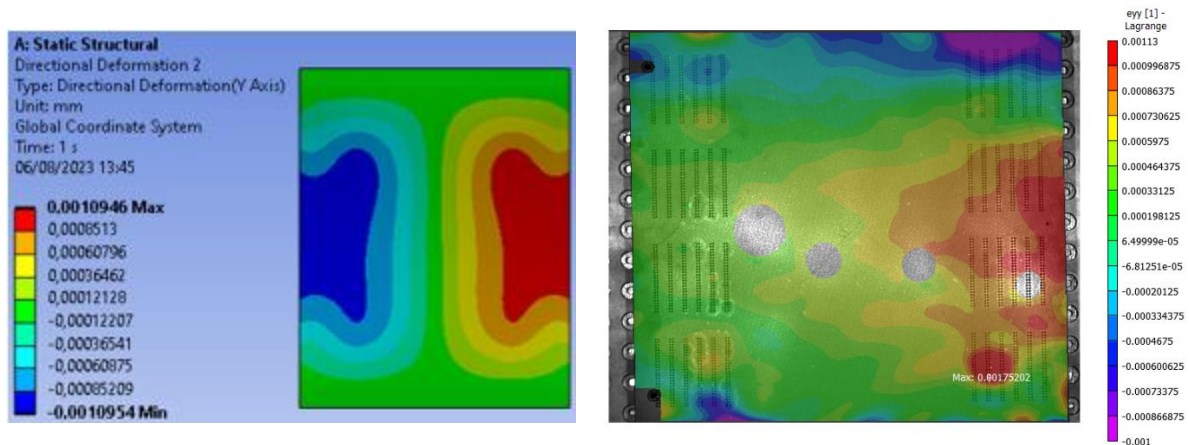


Figura 55 - Comparação entre os resultados qualitativos entre as análises para a deformação ocorrida na direção y. A esquerda é o resultado numérico, à direita o resultado experimental.

É interessante notar a partir da Figura 55 que, apesar da discrepância nos valores das deformações entre as análises, a distribuição das deformações máximas, médias e mínimas ocorrem praticamente na mesma zona. Isso sugere que, embora os valores absolutos possam estar diferentes, a tendência de distribuição e o comportamento relativo do deslocamento da placa são semelhantes entre ambas as análises.

A similaridade nos resultados qualitativos das análises da deformação em y (ver Figura 55), com ambas mostrando a deformação máxima localizada na zona central direita da placa, pode ser explicada pela orientação das fibras no material compósito laminado. Essa observação sugere que as fibras e as

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

camadas de reforços do material estão orientadas de tal forma que proporcionam maior resistência e rigidez na zona esquerda da placa.

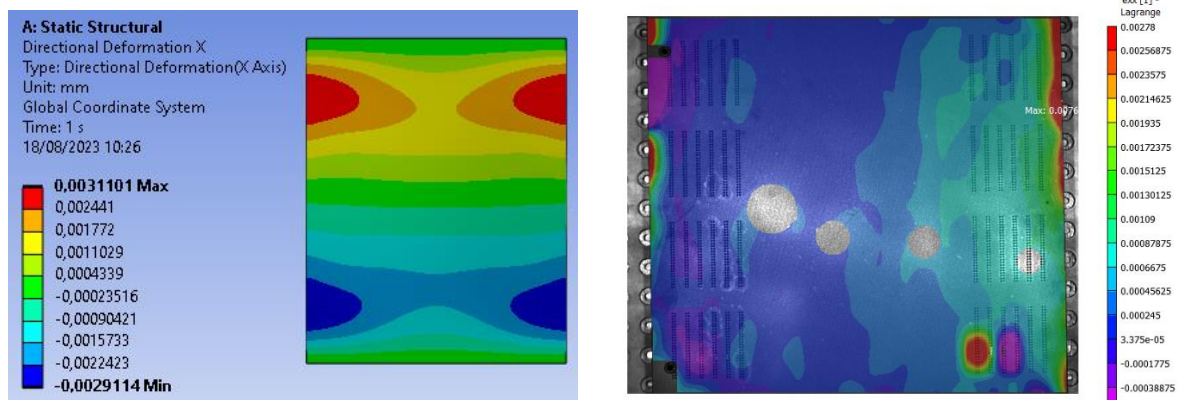


Figura 56 - Comparação entre os resultados qualitativos entre as análises para a deformação ocorrida na direção x. A esquerda é o resultado numérico, à direita o resultado experimental.

Os resultados qualitativos da deformação na direção x, ilustrados pela Figura 56, estão um pouco mais discrepantes entre si, igualmente ao resultado quantitativo visto na Tabela 5. Como já explicado anteriormente, as condições de contorno e anisotropia do material podem afetar em como as deformações são distribuídas ao longo da placa.

Em relação especificadamente ao resultado qualitativo da deformação em x, em ambas as análises, a deformação máxima ocorreu na extremidade superior da placa, próximo à parte “encastrada”. O motivo mais plausível para este comportamento seja a falta de concordância entre as propriedades mecânicas que influenciam nesta direção e que foram impostas na análise numérica, sejam diferentes das presentes no modelo físico.

É possível verificar pelas Tabelas 1 e 2 as propriedades mecânicas obtidas através do fornecedor, estas não possuem informações importantes para esta análise de resultados em si, seria preciso um detalhamento mais completo do comportamento do modelo físico para que os resultados numericamente fossem mais assertivos.

De maneira geral, o material compósito pode ter propriedades mecânicas anisotrópicas diferentes nas direções x e y e possuir as fibras orientadas de forma diferente em ambas direções. Isso pode levar a respostas estruturais distintas e não-lineares em cada direção, mesmo que as condições de carga aplicadas sejam simétricas. Em relação à análise numérica, os modelos numéricos são em 3D e a deformação é calculada em todo o volume do objeto e os resultados incluem heterogeneidades internas que podem afetar as deformações, enquanto com a técnica de correlação de imagens em 2D, a análise é feita na superfície visível da amostra e as heterogeneidades internas podem não ser levadas em consideração.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo geral avaliar o comportamento mecânico da placa de cama de agulhas por meio da técnica ótica de correlação de imagem digital 2D. A partir da simulação numérica foi possível simular o tipo de carregamento que mais se aproximaria do ocorrido fisicamente, ou seja, no caso da geometria da placa de cama de agulha, existem oito zonas de aplicação de carga onde ficam fixadas as agulhas de testes *ICT*. Cada agulha tem a capacidade de aplicar 4N de carga a partir da distância do percurso previsto, e em cada zona existem 50 agulhas, totalizando em uma carga final de 200N por zona. Para uma placa que esteja fixa nas extremidades superior e inferior, ao aplicar a força nas zonas impostas, a placa sofre uma deformação máxima nas zonas centrais das laterais em que há a carga aplicada.

Devido à essa nova configuração de percurso por conta da deformação, cada agulha das zonas centrais acaba por aplicar apenas 1.392N, totalizando 69,6N. Ou seja, para simular as condições de testes mais próximas da realidade, utilizou-se uma carga de 200N nas quatro zonas mais externas, e 69,6N nas quatro zonas internas da placa. Resultando em uma deformação total máxima de 0,081 mm.

Para fins de validação através da análise experimental com a técnica *DIC* 2D, foi retirado resultados das deformações máximas na direção x e y, de 0,003 e 0,001mm, respectivamente. Em relação ao resultado qualitativo dessas deformações, observou-se que a deformação máxima na direção de x aconteceu nas laterais superiores da placa, enquanto na direção y ocorreu na lateral central direita.

A análise experimental por meio da técnica de correlação de imagem digital em duas dimensões rastreia a deformação e o deslocamento com base nos pontos da superfície deformada da amostra, ou seja, limita-se às dimensões x e y, não abordando a dimensão z que é referente à profundidade da placa. Visto isso, a partir da simulação experimental obteve-se 0,008 mm e 0,002 para os valores das deformações em relação à x e y, respectivamente. Ao observar os resultados qualitativos, verifica-se que, por mais que as deformações quantitativas tenham um erro percentual alto de 100% para os valores de y e 166,7% para x, a distribuição dessas deformações seguem um pouco próximas das mesmas zonas da placa, se comparar as duas análises qualitativamente.

A partir desses resultados é possível verificar que os erros presentes entre os resultados podem ser advindos de algumas limitações, como as condições de fronteira aplicadas à simulação numérica. Esta simula que a placa esta encastrada nas duas extremidades, o que de facto não é possível observar concretamente na análise experimental, pois a placa encontra-se fixa, mas o encastramento não ocorre devido à fatores como a presença de folgas, tolerâncias na montagem ou a interação com outros componentes.

Outro aspeto a ter presente é o comportamento do material, a placa de cama de agulhas é feita de material compósito laminado que apresenta propriedades mecânicas anisotrópicas, ou seja, as características mecânicas variam com a direção em que são avaliadas. É essencial considerar os módulos de elasticidade, coeficientes de *Poisson* e resistências à tração e compressão nas diferentes direções do material compósito, pois estas definem como o material irá responder às cargas aplicadas em diferentes orientações.

De acordo com o fabricante, somente algumas propriedades foram fornecidas, e nenhuma delas dizia respeito ao comportamento em relação a diferentes direções. Tendo isso em mente, é possível

afirmar que, apesar dos resultados qualitativos apresentarem semelhanças (especialmente na direção y), existe uma considerável discrepância, sendo visto principalmente na direção x. Essa diferença pode ser explicada pela orientação das fibras de reforço no material compósito, as quais determinam a resistência do material nas direções em que são aplicadas e que não foram devidamente incluídas no modelo numérico.

Outro ponto importante a ser considerado é o valor da carga aplicada que gerou as deformações analisadas experimentalmente. A carga foi aplicada manualmente, o que pode ter contribuído para variações na força, velocidade e precisão da aplicação. Como resultado, os valores registados apresentaram intervalos não consecutivos entre si, indicando que o gatilho de captura de imagem não foi ativado de maneira linear a cada incremento ou decremento de 0,01V. É de se acrescentar que uma automatização do sistema garantiria que a mesma quantidade de carga seria aplicada a cada vez, permitindo um controle maior e resultados mais precisos.

Ao compreender a deformação na placa de cama de agulhas durante os testes, é possível otimizar o *design* e a configuração da placa de cama de agulhas para minimizar qualquer impacto adverso nas PCBs, isso ajuda a garantir que as PCBs não sejam sujeitas a tensões ou deformações excessivas durante os testes, como por exemplo, ao identificar áreas específicas da placa de cama de agulhas que estão sujeitas a deformações anormais durante os testes, é possível detetar e corrigir pontos de contato excessivo, pressões desiguais ou outros fatores que poderiam afetar negativamente as PCBs sendo testadas.

Ao eliminar a possibilidade de deformação indesejada, os resultados dos testes são mais precisos e confiáveis. Isso reduz a chance de resultados falsos ou mal interpretados, permitindo a detecção eficaz de defeitos genuínos.

A técnica de correlação de imagem digital 2D é não destrutiva por natureza, ou seja, ela não interfere fisicamente no componente a ser testado e não compromete a integridade do mesmo durante o processo de medição e análise. Essa característica é altamente relevante para o estudo das placas de cama de agulhas, pois permite examinar o comportamento mecânico e as deformações sem impactar adversamente a funcionalidade da placa ou mesmo das PCBs, oferecendo resultados mais representativos das condições de operação real, pois não requer a criação de protótipos.

A técnica em 2D é computacionalmente mais simples do que a análise em três dimensões, o que pode resultar em tempos de processamento mais curtos e requisitos de recursos menores. Ao limitar a análise experimental a apenas duas dimensões permite focar nas variações mais significativas que ocorrem na superfície da placa, ajudando na identificação das áreas de maior tensão e deformação durante os testes ICT.

5.2. PERSPETIVAS E TRABALHOS FUTUROS

Em termos gerais no que diz respeito a futuros trabalhos, destacam-se as seguintes possíveis atividades a se realizar:

- CONSIDERANDO A IMPORTÂNCIA DA DEFORMAÇÃO NA DIREÇÃO Z PARA A APLICAÇÃO PRÁTICA DAS PLACAS DE CAMA DE AGULHAS NOS TESTES ICT PARA PCBs, UMA EXTENSÃO NATURAL DO ESTUDO SERIA A REALIZAÇÃO DE ANÁLISES EM TRÊS DIMENSÕES. ISSO PERMITIRIA UMA COMPREENSÃO MAIS ABRANGENTE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E UMA SIMULAÇÃO AINDA MAIS PRECISA DAS CONDIÇÕES REAIS DE TESTE;
- DANDO IMPORTÂNCIA AO MATERIAL COMPLEXO UTILIZADO NA PLACA DE CAMA DE AGULHAS EM ESTUDO, É PRECISO CONSIDERAR A INCORPORAÇÃO DE INFORMAÇÕES MAIS DETALHADAS SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS ANISOTRÓPICAS DO MATERIAL, ESTES QUE PODEM LEVAR A RESULTADOS MAIS PRECISOS E REALISTAS.

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas de testes ICT para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

ISSO ENVOLVE TESTES MAIS EXTENSOS NO MATERIAL PARA CONHECER TODAS AS PROPRIEDADES MECÂNICAS NECESSÁRIAS;

- EXPANDIR A ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL COM MAIS CASOS DE TESTE EM QUE HAJA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TESTE, CARGAS APLICADAS E GEOMETRIAS DE PLACAS DE CAMA DE AGULHAS QUE PODEM LEVAR A NOVOS *INSIGHTS* SOBRE OTIMIZAÇÃO DE PROJETOS E CONFIGURAÇÕES DE TESTE;
- INVESTIGAR A APLICABILIDADE DA TÉCNICA *DIC* 2D E RESULTADOS OBTIDOS EM OUTROS CONTEXTOS ALÉM DOS COMPONENTES DE SISTEMAS DE TESTE *ICT* PARA *PCBs*, COMO EM OUTROS DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS, SISTEMAS DE MONTAGEM, OU ATÉ MESMO EM OUTRAS ÁREAS INDUSTRIAIS ONDE A ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO SEJA RELEVANTE.

ANEXOS

ANEXO A: DESENHOS TÉCNICOS

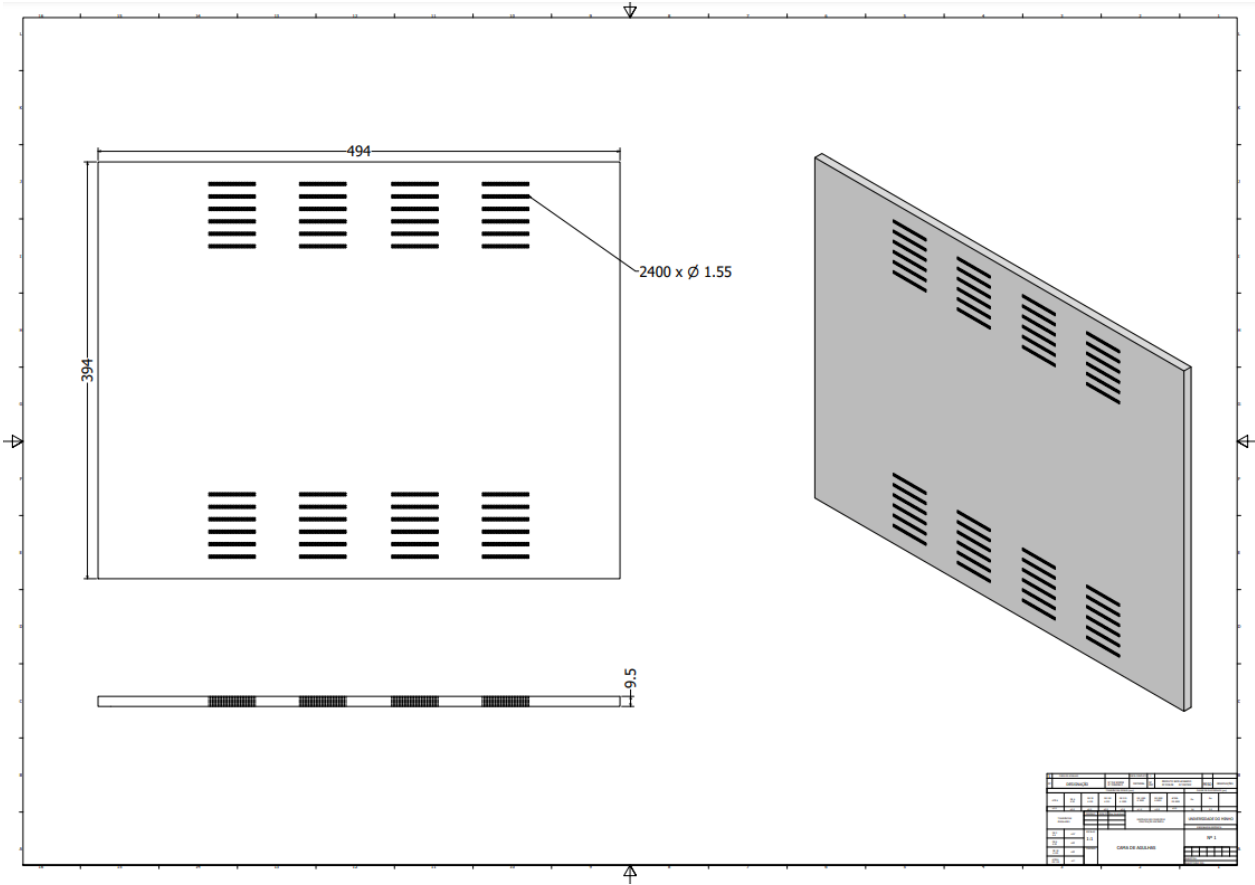


Figura 57 - Desenho técnico da cama de agulhas de papel fenólico.

ANEXO B: GUIA PARA ENSAIOS NO *SOFTWARE VIC-2D*

- PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Primeiramente será preciso começar por preparar a região de interesse da amostra com um padrão de manchas (*speckles*). Uma superfície *matte* é mais adequada para obtenção de melhores resultados, da mesma forma, a tinta dos *speckles* também não deve estar totalmente seca antes de iniciar o ensaio.

- MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

Primeiramente é preciso conectar a célula de carga ao computador que contenha o *software* Vic-Snap, em que para isso é preciso conectar um sistema de aquisição de dados entre a célula de carga e o computador. A partir da Figura 36 é possível verificar a montagem do *setup* final.

O próximo passo é alocar a câmara e o tripé no centro da amostra em estudo, em uma distância que seja possível verificar todo o componente e um pouco do fundo para que, caso haja grandes movimentos, a peça não saia do plano da lente.

A câmara deverá ser conectada ao computador que possua o *software* Vic-2D. Caso o local de ensaios não possua uma boa iluminação, é preciso utilizar luzes LED para iluminar a amostra, essas luzes precisam ser fortes o suficiente para o software captar toda a superfície da amostra, mas não forte o suficiente para que haja focos de luz na peça.

Dica: Não colocar as luzes atrás da câmara ou abaixo do nível da lente, isso gera sombras e uma iluminação não constante ao longo do componente.

- CONFIGURAÇÃO DA CÂMARA

A correlação precisa da imagem 2D depende do facto de a amostra ser plana e paralela ao sensor da câmara; por isso, um alinhamento cuidadoso é fundamental para obter resultados altamente precisos.

O primeiro passo será a seleção da lente. Na correlação 2D, podem ser introduzidos erros quando a amostra está desalinhada ou se move para fora do plano da lente; estes erros são proporcionais a w/Z , em que w é o movimento fora do plano e Z é a distância entre a câmara e a amostra.

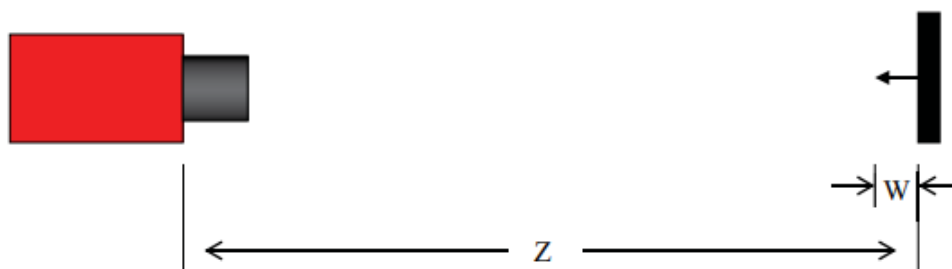


Figura 58 - Relação entre o movimento fora do plano da lente e a distância entre a câmara e a amostra.

O erro pode ser minimizado ao reduzir w e aumentar o Z . Desta forma, o movimento fora do plano pode ser reduzido através da configuração e do procedimento de ensaio e a distância Z pode ser aumentada selecionando uma lente de distância focal longa. Em geral, seleciona-se a lente mais longa disponível que permita colocar a câmara com uma linha de visão para a amostra e, ainda assim, obter imagens de toda a área de interesse.

Uma vez selecionada a lente, a câmara deve ser colocada de modo a captar a imagem de toda a área de interesse, é preciso certificar-se de que haja uma margem para qualquer movimento ou expansão esperados da amostra de teste.

Uma vez estabelecida a distância, é preciso colocar cuidadosamente a câmara na mesma altura e posição lateral que a amostra. Isto pode ser conseguido através da observação cuidadosa ao longo da câmara ou, mais precisamente, ao utilizar uma régua e/ou um nível para verificar a altura e o alinhamento.

Depois de colocar a câmara, o *software* Vic-Snap deverá ser iniciado para a pré-visualização da imagem, os ajustes de altura e inclinação do tripé são utilizados para alinhar o centro da amostra no centro visão da imagem no *software*. É preciso deixar um espaço acima e abaixo da região de interesse para permitir tensões de tração elevadas sem perder partes da área de interesse. Em alguns casos (deformações muito elevadas), a amostra ocupará apenas uma pequena parte do campo, inicialmente.

Quando a câmara tiver sido posicionada, o passo seguinte será definir a focagem, para isso é preciso utilizar o controlo de focagem das lentes para obtenção de uma focagem nítida em toda a amostra. Normalmente, é necessário ampliar a imagem para verificar a focagem; uma ligeira desfocagem pode não ser visível com a imagem ampliada para caber no ecrã.

Amplia-se ao colocar o cursor do rato sobre a imagem no *software* Vic-Snap e ao rodar a roda do rato. Enquanto ampliada, é preciso olhar atentamente para a borda mais distante e mais próxima da amostra para garantir que toda a superfície esteja em foco, antes de prosseguir. Para deslocar uma imagem ampliada, é preciso manter premida a tecla *Shift* (o cursor mudará para o ícone de uma mão) e clicar e arrastar a imagem ao local desejado.

Pode-se também usar a barra de foco no *software* Vic-Snap como uma medida qualitativa de foco ao clicar e arrastar a imagem para seleccionar a área de interesse. Em seguida, é preciso clicar com o botão direito do rato e seleccionar “mostrar análise”, desta forma um histograma e uma barra de foco aparecerão abaixo da imagem.



Figura 59 - Exemplificação de um histograma e uma barra de foco existente no *software* Vic-Snap para focagem da imagem.

Para utilizar esta barra é preciso ajustar a focagem numa direção até a barra de focagem começar a descer; voltar para a outra direção até a barra passar o seu pico e descer novamente; finalmente, voltar ao pico. Para ocultar a barra é preciso clicar com o botão direito do rato e seleccionar “mostrar análise” novamente.

Uma dica: Ao abrir a abertura da lente até ao fim a profundidade de campo se tornará muito pequena, isto irá exagerar quaisquer áreas desfocadas, pelo que pode ser útil definir a focagem desta forma e, em seguida, voltar a colocar a abertura na definição adequada apropriada para o teste.

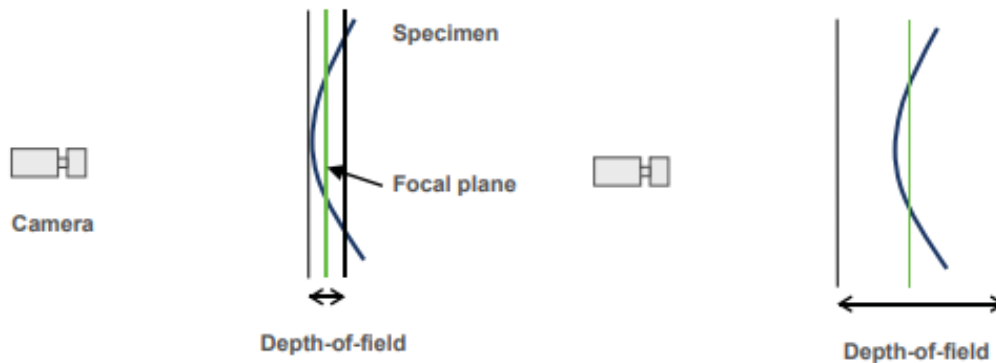


Figura 60 - À esquerda a focagem está com grande abertura - DOF pequeno e à direita depois de fechar a abertura o plano focal está bem centrado.

- ABERTURA E TEMPO DE EXPOSIÇÃO

Ao tornar a imagem nítida através do ajuste da focagem, será também necessário ajustar o brilho da imagem. Existem dois controlos disponíveis para este efeito: A definição da abertura/íris na lente e a definição do tempo de exposição da câmara.

Abrir a abertura permite que mais luz incida no sensor, a configuração da abertura também é chamada de número f ; os números f são normalmente indicados no anel de abertura da lente e vão normalmente de uma definição aberta de 1.4 ou 2.8 a uma definição fechada de 22 ou 32.

Ao utilizar uma abertura maior (número f mais baixo) tornará a imagem mais brilhante, no entanto, também diminuirá a profundidade de campo - a faixa sobre a qual o foco é nítido. Para aplicações Vic-2D típicas, a amostra será quase plana, de modo que não há necessidade prática de uma profundidade de campo significativa.

O tempo de exposição é a quantidade de tempo que o sensor da câmara recolhe a luz antes de ler uma nova imagem, assim, os tempos de exposição mais longos tornam a imagem mais brilhante, mas também podem criar uma desfocagem se ocorrer um movimento significativo durante os tempos de exposição.

O tempo de exposição máximo aceitável dependerá da velocidade do teste; para um teste quase estático típico, serão aceitáveis tempos de exposição até 50-100 ms. Pode fazer-se uma determinação específica ao calcular a velocidade linear da parte do provete que se move mais rapidamente, em termos de píxeis, esta velocidade não deve ser superior a 0,01 píxeis durante o tempo de exposição.

A imagem deve estar tão brilhante quanto possível, sem apresentar qualquer saturação (exibido a vermelho na janela da imagem). Alguns materiais ficam mais claros à medida que se deformam - para estes materiais, a imagem deve estar um pouco mais escura para compensar o aumento de brilho.

- DADOS ANALÓGICOS

Para sistemas equipados com *hardware* de aquisição de dados, vários canais de dados analógicos podem ser adquiridos juntamente com os dados de imagem. Para visualizar os dados analógicos, é preciso clicar no botão “dados analógicos” na barra de ferramentas (Se este botão não estiver presente, a aquisição analógica não está instalada. Se ele estiver presente, mas a cinzento, a aquisição está instalada, mas não está ativa). Aparecerá uma caixa de diálogo mostrando a tensão para cada canal presente no dispositivo (tipicamente, 4 ou 8 canais).

Pode-se fazer duplo clique num título de canal para o remover do ecrã (é preciso fazer duplo clique novamente para o devolver). Também pode-se dimensionar e mudar o nome estes canais ao clicar com o botão direito do rato e selecionar “editar canais”.

É possível introduzir um título, um intervalo e um fator de multiplicação para cada canal, ao selecionar o intervalo adequado isso proporcionará uma maior precisão. Para visualizar os dados escalados é preciso clicar com o botão direito do rato e selecionar “mostrar escala”.

Estes dados são guardados no ficheiro de registo CSV associado ao projeto e terá o mesmo nome que o prefixo do projeto, e para cada conjunto de imagens contém a contagem de imagens, os nomes dos ficheiros, as horas exatas, os dados analógicos não graduados e os dados analógicos graduados.

- REALIZAÇÃO DO TESTE

Antes de começar é preciso ligar as saídas de tensão analógica pretendidas (carga, etc.) às entradas do sistema de aquisição e confirmar que os sinais corretos estão a ser adquiridos, e verificar se existe espaço suficiente na unidade para adquirir tantas imagens quantas as desejadas.

Normalmente, as imagens serão adquiridas manualmente ou em intervalos definidos. Para um teste simples de antes/depois, basta adquirir uma imagem da amostra em seu estado de referência, e outra no teste deformado. No *software* Vic-Snap, as imagens podem ser adquiridas ao clicar no botão “capturar” ou simplesmente ao pressionar a barra de espaço do teclado.

Para um teste contínuo típico pode-se adquirir muitas imagens, na maioria dos casos, é melhor adquirir uma sequência suave de muitas imagens em vez de apenas algumas. Isto porque, quando os movimentos de uma imagem para a seguinte são pequenos, a análise funcionará automaticamente sem intervenção do utilizador; quando os movimentos são grandes, pode ser necessário introduzir uma estimativa inicial.

Para a aquisição temporizada, é melhor iniciar a aquisição e, em seguida, iniciar o teste-as imagens em excesso podem sempre ser descartadas. Não esquecer de monitorizar a imagem durante o teste - alguns materiais podem tornar-se mais claros ou mais escuros, exigindo uma alteração no tempo de exposição.

Para utilizar a captura temporizada, é preciso selecionar “imagens” e depois “captura temporizada” ou utilizar o botão da barra de ferramentas. Seleciona-se um intervalo e, se pretender, um tempo total; clica-se em “iniciar” para começar, desta forma as imagens serão guardadas no intervalo especificado.

- ANÁLISE DA IMAGEM

Para começar, é preciso iniciar o *software* Vic-2D, clicar no botão da barra de ferramentas “*speckle images*” (ou selecionar “*project*” e depois “*speckle images*”, na barra de menu) e navegar até a pasta onde as imagens de teste estão armazenadas. Selecionar as imagens de teste e clicar em “abrir”, a primeira imagem aparecerá em uma janela.

Esta imagem é a imagem de referência; será o estado de referência e todas as deformações e deslocamentos serão relativos a esta imagem. Por predefinição, a primeira imagem na sequência é a referência; se pretender selecionar uma imagem diferente é preciso clicar com o botão direito do rato na imagem na lista de imagens à esquerda, e clicar em “definir imagem de referência”.

Em seguida, selecionar a área de interesse utilizando a ferramenta retângulo ou polígono na barra de ferramentas, clicar uma vez na imagem de referência para definir o primeiro ponto; clicar novamente para definir os pontos subsequentes. Para o polígono, fazer duplo clique para completar o desenho.

Selecionar um subconjunto e um tamanho de passo para a área de interesse, utilizando as caixas de rotação nas ferramentas. O tamanho do subconjunto controla o tamanho da janela de análise *DIC* e

é apresentado no tamanho da caixa amarela do ponto; este deve ser pelo menos tão grande quanto a mancha mais pequena. A predefinição funciona bem na maioria dos testes.

O tamanho do passo controla a densidade dos dados analisados; um tamanho de passo de 5 analisará a cada 5º ponto em cada direção. Um tamanho de passo maior fornece resultados mais rápidos, mas dados mais grosseiros, e um tamanho de passo mais pequeno dará mais pontos, mas demorará mais tempo.

- CALIBRAÇÃO DA ESCALA

Antes de executar a análise, pode-se calibrar a escala de modo a gerar resultados em unidades físicas, se não for calibrada os resultados serão em píxeis. Como esta é uma variável sem dimensão, a deformação não será afetada.

Para calibrar a escala, é necessário ter uma imagem que contenha uma distância conhecida, marcada na amostra ou numa régua, ou um alvo que esteja no mesmo plano que a amostra. Para isso é preciso selecionar o botão "*select project*" e depois "*calibration images*", adicionar esta imagem e depois, selecionar "*calibration*" e depois "*calibrate scale*".

Depois, escolhe-se a ferramenta "selecionar manualmente", clica-se no primeiro ponto e arrasta-se para o segundo ponto, após isto aparecerá uma linha. De seguida, introduz-se o valor da medida na caixa "distância do ponto" e clica-se em "ok". O sistema está agora calibrado e aparecerá uma escala no separador "calibração".

Os dados analisados após este ponto conterão dimensões métricas para além das unidades de píxeis. Se tiver um alvo em elipse adequado - como uma grelha de calibração 3D - pode-se obter uma extração mais precisa utilizando a ferramenta "ajustar ao círculo" para obter uma extração mais precisa, isto permite uma precisão de *subpixel*. Para utilizar, é preciso selecionar a ferramenta, clicar na primeira elipse e arrastar para a segunda.

Quando a seleção da área de interesse e a calibração da escala (se aplicável) estiverem concluídas, é preciso clicar no botão verde "iniciar análise" na barra de ferramentas e clicar no botão "executar" na caixa de diálogo seguinte para analisar. Aparecerá a caixa de diálogo de análise.

Para cada imagem, a caixa de diálogo listará o número de ficheiro, o número de pontos correlacionados, a confiança média de correspondência, o tempo de análise dessa imagem e o tempo de análise restante para as outras imagens. Também poderá ver uma pré-visualização dos resultados ao clicar com o botão direito do rato no gráfico para selecionar diferentes variáveis.

Se nenhum ponto for retornado, isso poderá indicar um problema com as imagens (sem padrão de manchas; padrão muito grosseiro, esparso ou escuro), também pode indicar que é necessária uma estimativa inicial manual. Para selecionar um bom ponto inicial de estimativa, seleciona-se uma área com boa definição e contraste para permitir uma estimativa automática bem-sucedida.

O subconjunto de pontos de estimativa deve ser semelhante nos subconjuntos de referência e deformados. Além disso, deve-se selecionar um ponto de estimativa com baixa deformação e que esteja numa área de pouco movimento; isto é, num ensaio de tração, este seria o lado da amostra mais próximo do suporte fixo.

Ao passar o rato sobre o ponto de estimativa que foi colocado é possível ver se as suposições iniciais foram todas encontradas, se não disser 100%, então o ponto de estimativa não foi encontrado para todas as imagens. Neste caso, é preciso clicar com o botão direito do rato na suposição inicial e clicar em "editar suposições".

- VISUALIZAÇÃO E REDUÇÃO DE DADOS

Para visualizar os dados é preciso clicar em “fechar” na caixa de diálogo de análise quando estiver concluído, os novos dados serão apresentados no separador “dados” à esquerda, e de seguida clicar duas vezes no ficheiro para o visualizar. Pode-se utilizar a roda do rato para aumentar e diminuir o zoom, e clicar e arrastar para deslocar a imagem.

Ao clicar com o botão direito do rato é possível selecionar diferentes variáveis. Estas que serão:

- X [PÍXEL] - LOCALIZAÇÃO X DO PONTO NA IMAGEM (EM PÍXEIS);
- Y [PÍXEL] - LOCALIZAÇÃO Y DO PONTO NA IMAGEM (EM PÍXEIS);
- U [PÍXEL] - DESLOCAMENTO X (HORIZONTAL) DESTE PONTO (EM PÍXEIS);
- V [PÍXEL] - DESLOCAMENTO Y (VERTICAL) DESTE PONTO (EM PÍXEIS);
- SIGMA [PÍXEL] - O INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A LOCALIZAÇÃO DA CORRESPONDÊNCIA (EM PÍXEIS);
- EXX [1] - A DEFORMAÇÃO EM X;
- EYY [1] - A DEFORMAÇÃO EM Y;
- EXY [1] - A DEFORMAÇÃO DE CORTE;
- E1 [1] - A DEFORMAÇÃO PRINCIPAL MAIOR;
- E2 [1] - A DEFORMAÇÃO PRINCIPAL MENOR;
- GAMA [1] - O ÂNGULO DA DEFORMAÇÃO PRINCIPAL, EM RADIANOS.

Utilizar o conjunto de ferramentas, “ferramentas de plotagem”, à esquerda para editar os limites de eixo e de contorno. Pode-se redimensionar automaticamente os limites de contorno, ou desmarcar a caixa “redimensionamento automático” e introduzir manualmente os limites, para definir a escala de contorno para abranger os limites de todas as parcelas é preciso ativar a escala automática e a opção “aumentar apenas o intervalo”.

Para salvar os gráficos como imagens, é preciso clicar com o botão direito do rato no gráfico e selecionar “salvar”; ou, clicar com o botão direito do rato em qualquer gráfico no *software* Vic-2D e selecionar “copiar” para copiar a plotagem para a área de transferência. Para animar as imagens, utiliza-se a barra de ferramentas “animação”. Em alternativa, os vídeos podem ser exportados ao clicar com o botão direito do rato no gráfico e selecionado “exportar vídeo”.

- CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO

No *software* Vic-2D, a deformação é calculada automaticamente no momento da análise, mas para recalcular a deformação - com um algoritmo ou tamanho de filtro diferente – é preciso selecionar “data”, depois “opções de pós-processamento” e por fim “calcular deformação”.

Estão disponíveis várias opções, mas a mais comumente utilizada é o tamanho do filtro, pode ser necessário aumentar este valor para determinar a deformação quando estas são muito pequenas. Para obter uma melhor resolução espacial e ver claramente as concentrações de deformação, utiliza-se valores mais pequenos.

É possível calcular a deformação para todos os ficheiros clicando em “iniciar”, como alternativa, também é possível ajustar as configurações e ver o efeito em um único arquivo ao clicar em “pré-visualizar”.

Após a conclusão do cálculo da deformação, haverá novas variáveis de deformação no conjunto de dados; para visualizar é preciso clicar com o botão direito do rato no gráfico de contorno. Por predefinição, verá a deformação nos eixos x e y (exx, eyy) e a deformação de corte (exy), bem como a primeira e segunda deformação principal (e1, e2) e o ângulo de deformação principal (gama).

- REDUÇÃO DE DADOS

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

O *software* Vic-2D fornece uma série de recursos para reduzir os dados da nuvem de pontos inicial. Para exportar apenas estatísticas agregadas, é possível selecionar “dados” e depois “exportar estatísticas”, selecionar os arquivos e variáveis para exportação; o resultado será um arquivo CSV.

As ferramentas para análise e extração de dados estão localizadas na barra de ferramentas “*inspector*” e também podem ser selecionadas clicando em “*plot*” e “*inspector*” na barra de menu principal.

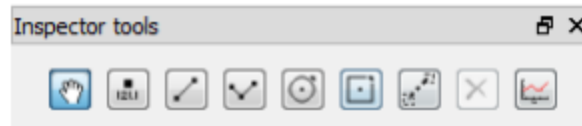


Figura 61 - Ilustração da barra de ferramentas do software Vic-2D

Da esquerda para a direita, as ferramentas são:

- PERCORRER/SELECIONAR: PERCORRE A IMAGEM DE CONTORNO, QUANDO AMPLIADA; SELECIONA PONTOS DE EXTRAÇÃO EXISTENTES. PARA SELECIONAR UM ITEM, CLICAR NA PEQUENA PEGA QUADRADA;
- INSPECIONAR PONTO: SELECIONAR ESTA FERRAMENTA E CLICAR PARA ANALISAR UM ÚNICO PONTO. O VALOR DA VARIÁVEL DE CONTORNO ATUALMENTE SELECIONADA, NO PONTO SELECIONADO, É APRESENTADO;
- INSPECIONAR LINHA: SELECIONAR ESTA FERRAMENTA E CLICAR UMA VEZ PARA INICIAR UMA LINHA; CLICAR NOVAMENTE PARA TERMINAR. O VALOR É APRESENTADO EM CADA NÓ;
- INSPECIONAR POLILINHA: SELECIONAR ESTA FERRAMENTA E CLICAR PARA CRIAR NÓS DE LINHA; CLICAR DUAS VEZES PARA TERMINAR. O VALOR É APRESENTADO EM CADA NÓ;
- INSPECIONAR CÍRCULO: SELECIONAR ESTA FERRAMENTA E CLICAR PARA DEFINIR UM CENTRO; CLICAR NOVAMENTE PARA DEFINIR UM CENTRO. O VALOR NO CENTRO É APRESENTADO;
- INSPECIONAR RETÂNGULO: SELECIONAR ESTA FERRAMENTA E CLICAR PARA DEFINIR UM CENTRO; CLICAR NOVAMENTE PARA DEFINIR UM RETÂNGULO. O VALOR NO CENTRO SERÁ EXIBIDO;
- EXTENSÓMETRO: SELECIONAR ESTA FERRAMENTA E CLICAR EM DOIS PONTOS; ESTA FERRAMENTA MOSTRA A EXTENSÃO (VARIÇÃO DO COMPRIMENTO DIVIDIDA PELO COMPRIMENTO INICIAL) ENTRE OS DOIS PONTOS;
- APAGAR: SELECIONAR ESTA FERRAMENTA E CLICAR NUM PONTO/LINHA/ÁREA EXISTENTE PARA O REMOVER;
- EXTRAIR: CLICAR PARA ABRIR A CAIXA DE DIÁLOGO “EXTRAÇÃO”.

Quando uma ferramenta é selecionada, pode colocá-la no gráfico ao clicar:

- PARA A FERRAMENTA DE PONTO, CLICAR UMA VEZ PARA COLOCAR O PONTO;
- PARA AS FERRAMENTAS CÍRCULO, RETÂNGULO, EXTENSÓMETRO E LINHA, CLICAR UMA VEZ PARA COLOCAR O PRIMEIRO PONTO E NOVAMENTE PARA DEFINIR A FORMA.

Quando uma ferramenta estiver colocada, pode utilizar a ferramenta “percorrer/selecionar” para mover ou para ajustar os pontos de controlo. Para ver uma parte 2D dos dados, abra um gráfico de contorno 2D, depois selecionar a ferramenta “inspeção linha” na barra de ferramentas e em seguida, selecionar uma linha clicando em dois pontos finais.

Em seguida, clicar no botão “extrair” na barra de ferramentas. Terá agora um gráfico de extração, com o menu no lado esquerdo do ecrã, selecionar “*line slices*” no menu pendente e em seguida, selecionar as variáveis para os eixos X e Y e premir o botão “aplicar” para cada uma delas. Aparecerá um gráfico de dados ao longo da linha; pode-se selecionar os dados a desenhar a partir de qualquer uma das variáveis disponíveis.

Nas ferramentas de extração, as definições permitem formatar o gráfico com o separador “estilos”, e separador “*line slices*” permite ao utilizador selecionar os ficheiros que são mostrados neste gráfico de

linhas, bem como opções de formato adicionais para as linhas. Para guardar esta extração de um ou vários ficheiros de dados (formato csv), é preciso em “exportar”.

Para guardar uma imagem do gráfico, clicar em “guardar gráfico” ou clicar com o botão direito do rato no gráfico e copiá-lo para a área de transferência.

Para extrair dados para um único ponto ou área, em vários ficheiros de dados, clicar nos ícones de ponto, disco ou retângulo nas ferramentas enquanto visualiza um gráfico, de seguida clicar no gráfico para seleccionar o ponto ou a região a analisar. Em seguida, clicar no botão “extrair” na barra de ferramentas.

Os dados médios são extraídos automaticamente, bem como o círculo localizado definido pelo utilizador (identificado como C0), os dados médios são a média de toda a área de interesse. Mais uma vez, as variáveis podem ser seleccionadas para cada linha ao seleccionar "novo" para adicionar várias variáveis ou conjuntos de dados ao mesmo gráfico.

Também pode-se representar os dados diretamente em relação aos dados analógicos com esta interface, o menu suspenso também terá uma opção para dados analógicos se tiver importado os dados para o projeto.

Para introduzir dados de tensão e tempo, seleccionar “projeto” e depois “dados analógicos” na barra de menus. Por fim, seleccionar o ficheiro de registo CSV para o projeto; este aparecerá em “dados analógicos” no separador do projeto, fazer duplo clique no ficheiro para o visualizar como uma folha de cálculo. É possível utilizar os dados analógicos como eixo X ou Y no gráfico “*extract sequence data*” (Extrair dados de sequência), isso é útil para plotagem, ou seja, carga vs. deformação.

ANEXO C: DADOS DOS GRÁFICOS DE REDUÇÃO DE DADOS EXX

Index [1]	X [mm]	Y [mm]	U [mm]	V [mm]	exx [1] - Lagrange
0	186,881	176,78	0,060765	0,205277	0,005728
1	186,934	174,714	0,061935	0,209135	0,005859
2	186,987	172,649	0,065157	0,21135	0,005915
3	187,041	170,584	0,068714	0,215318	0,005971
4	187,094	168,519	0,072358	0,219899	0,006026
5	187,148	166,454	0,075494	0,224167	0,006076
6	187,201	164,389	0,077956	0,227998	0,006119
7	187,255	162,323	0,079886	0,231782	0,006157
8	187,308	160,258	0,081371	0,235317	0,006189
9	187,361	158,193	0,082613	0,238536	0,006214
10	187,415	156,128	0,083789	0,241531	0,006235
11	187,468	154,063	0,084992	0,244346	0,006249
12	187,522	151,998	0,086465	0,247165	0,006273
13	187,575	149,933	0,088434	0,250114	0,006283
14	187,628	147,867	0,090946	0,253482	0,006276
15	187,682	145,802	0,093928	0,257	0,006195
16	187,735	143,737	0,097009	0,260448	0,006114
17	187,789	141,672	0,100074	0,263941	0,006042
18	187,842	139,607	0,103214	0,26766	0,005968
19	187,896	137,542	0,106612	0,27153	0,005889
20	187,949	135,476	0,110104	0,275653	0,005805
21	188,002	133,411	0,11355	0,279869	0,00572
22	188,056	131,346	0,116656	0,283954	0,005635
23	188,109	129,281	0,11928	0,287249	0,005531
24	188,163	127,216	0,121297	0,289354	0,00539
25	188,216	125,151	0,122588	0,290197	0,005271
26	188,269	123,086	0,123563	0,289693	0,00518
27	188,323	121,02	0,124606	0,288364	0,00511
28	188,376	118,955	0,125691	0,286698	0,005071
29	188,43	116,89	0,12683	0,285014	0,005058
30	188,483	114,825	0,128365	0,283547	0,005063
31	188,537	112,76	0,130446	0,282398	0,00508
32	188,59	110,695	0,132802	0,281481	0,005097
33	188,643	108,629	0,135583	0,280849	0,005116
34	188,697	106,564	0,13823	0,280121	0,005125
35	188,75	104,499	0,140196	0,279642	0,005119
36	188,804	102,434	0,141096	0,279716	0,005071
37	188,857	100,369	0,141298	0,280482	0,004993
38	188,91	98,3037	0,140934	0,281834	0,004893
39	188,964	96,2386	0,140676	0,283649	0,004769
40	189,017	94,1734	0,141098	0,285083	0,00462
41	189,071	92,1083	0,142427	0,285555	0,004442

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

42	189,124	90,0431	0,144329	0,284527	0,004236
43	189,178	87,978	0,14607	0,282007	0,004007
44	189,231	85,9128	0,14749	0,278239	0,003774
45	189,284	83,8477	0,148107	0,273777	0,003563
46	189,338	81,7825	0,147916	0,269235	0,00335
47	189,391	79,7173	0,147202	0,265017	0,003147
48	189,445	77,6522	0,146344	0,261057	0,002962
49	189,498	75,587	0,145368	0,257338	0,002805
50	189,551	73,5219	0,144756	0,25354	0,002662
51	189,605	71,4567	0,144508	0,249583	0,002545
52	189,658	69,3916	0,144496	0,245574	0,002459
53	189,712	67,3264	0,144866	0,241887	0,002419
54	189,765	65,2613	0,145517	0,238536	0,002418
55	189,819	63,1961	0,146466	0,235463	0,002444
56	189,872	61,131	0,14725	0,232824	0,00249
57	189,925	59,0658	0,147601	0,230365	0,002551
58	189,979	57,0007	0,147466	0,227724	0,002639
59	190,032	54,9355	0,146933	0,224647	0,002726
60	190,086	52,8703	0,146098	0,220912	0,0028
61	190,139	50,8052	0,145434	0,216549	0,002862
62	190,192	48,74	0,145277	0,211816	0,00292
63	190,246	46,6749	0,14586	0,206978	0,002969
64	190,299	44,6097	0,147308	0,202291	0,003009
65	190,353	42,5446	0,149428	0,197869	0,003039
66	190,406	40,4794	0,151885	0,193794	0,003048
67	190,46	38,4143	0,154108	0,189939	0,003034
68	190,513	36,3491	0,155857	0,186003	0,00303
69	190,566	34,284	0,15684	0,181736	0,003027
70	190,62	32,2188	0,157008	0,177197	0,003024
71	190,673	30,1537	0,156548	0,172493	0,003015
72	190,727	28,0885	0,155964	0,167952	0,002995
73	190,78	26,0234	0,155485	0,163884	0,002965
74	190,833	23,9582	0,155317	0,160416	0,002925
75	190,887	21,8931	0,155609	0,157278	0,002862
76	190,94	19,8279	0,156198	0,15408	0,002791
77	190,994	17,7627	0,156921	0,150473	0,002718
78	191,047	15,6976	0,157671	0,146349	0,002645
79	191,1	13,6324	0,158305	0,141899	0,00257
80	191,154	11,5673	0,158778	0,137549	0,002494
81	191,207	9,50213	0,159222	0,133731	0,002419
82	191,261	7,43698	0,159629	0,130329	0,002346
83	191,314	5,37182	0,160023	0,127091	0,002274
84	191,368	3,30667	0,16029	0,123531	0,002203
85	191,421	1,24152	0,160477	0,119119	0,002138
86	191,474	-0,82365	0,160706	0,113539	0,002083
87	191,528	-2,88879	0,161033	0,107035	0,002042

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

88	191,581	-4,95393	0,161321	0,100177	0,002017
89	191,635	-7,0191	0,161409	0,093691	0,002003
90	191,688	-9,08424	0,161296	0,088045	0,001999
91	191,741	-11,1494	0,161228	0,083362	0,002002
92	191,795	-13,2145	0,160991	0,079379	0,002006
93	191,848	-15,2797	0,160851	0,075429	0,002015
94	191,902	-17,3449	0,160947	0,071331	0,002027
95	191,955	-19,41	0,161356	0,066923	0,002039
96	192,009	-21,4752	0,162321	0,06212	0,002053
97	192,062	-23,5403	0,163691	0,057082	0,002066
98	192,115	-25,6055	0,165223	0,051979	0,002078
99	192,169	-27,6706	0,166747	0,046892	0,002084
100	192,222	-29,7358	0,168146	0,041836	0,002084
101	192,276	-31,8009	0,169289	0,036818	0,002079
102	192,329	-33,8661	0,170111	0,031783	0,002068
103	192,382	-35,9312	0,170365	0,026704	0,00205
104	192,436	-37,9964	0,169942	0,021505	0,00203
105	192,489	-40,0616	0,168161	0,016768	0,002015
106	192,543	-42,1267	0,164893	0,01279	0,001999
107	192,596	-44,1919	0,160701	0,010901	0,001984
108	192,65	-46,257	0,156378	0,010379	0,001971
109	192,703	-48,3222	0,154526	0,009558	0,00196
110	192,756	-50,3873	0,155066	0,004246	0,001949
111	192,81	-52,4525	0,154827	0,002941	0,001948
112	192,863	-54,5176	0,153846	0,009798	0,001953
113	192,917	-56,5828	0,153308	-0,01654	0,001971
114	192,97	-58,6479	0,153783	-0,02336	0,001997
115	193,023	-60,7131	0,154641	-0,03002	0,002021
116	193,077	-62,7782	0,15452	-0,03542	0,00204
117	193,13	-64,8434	0,153287	-0,03848	0,002053
118	193,184	-66,9085	0,151398	-0,04046	0,00205
119	193,237	-68,9737	0,149389	-0,04205	0,002038
120	193,291	-71,0388	0,147536	-0,0436	0,002019
121	193,344	-73,104	0,14621	-0,04519	0,001991
122	193,397	-75,1692	0,145243	-0,04735	0,001999
123	193,451	-77,2343	0,144509	-0,0502	0,002013
124	193,504	-79,2995	0,143862	-0,05351	0,002029
125	193,558	-81,3646	0,143028	-0,05696	0,002048
126	193,611	-83,4298	0,14159	-0,06021	0,002067
127	193,664	-85,4949	0,139169	-0,0629	0,002084
128	193,718	-87,5601	0,135746	-0,06513	0,002109
129	193,771	-89,6252	0,131801	-0,06722	0,002139
130	193,825	-91,6904	0,128002	-0,06967	0,00217
131	192,354	-92,9536	0,124052	-0,07261	0,002033
132	190,622	-94,0795	0,121087	-0,07588	0,001907
133	188,89	-95,2053	0,121964	-0,07742	0,001816

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

134	187,157	-96,3312	0,120803	-0,08298	0,001749
135	185,425	-97,457	0,117849	-0,08635	0,001702
136	183,693	-98,5829	0,1166	-0,09089	0,001665
137	181,961	-99,7087	0,116341	-0,09386	0,001638
138	180,229	-100,835	0,117479	-0,09757	0,00162
139	178,497	-101,96	0,116104	-0,10031	0,001602
140	176,765	-103,086	0,111875	-0,10108	0,001527
141	175,033	-104,212	0,107646	-0,10136	0,001541
142	173,301	-105,338	0,102768	-0,10189	0,001537
143	171,569	-106,464	0,098238	-0,10272	0,001523
144	169,836	-107,59	0,093887	-0,10381	0,001501
145	168,104	-108,716	0,089301	-0,10454	0,001471
146	166,372	-109,841	0,084153	-0,10465	0,001428
147	164,64	-110,967	0,083473	-0,10594	0,001396
148	162,908	-112,093	0,081448	-0,10627	0,001329
149	161,176	-113,219	0,080221	-0,10748	0,001267
150	159,444	-114,345	0,079004	-0,10965	0,001123
151	157,712	-115,471	0,0778	-0,1114	0,000978
152	155,98	-116,597	0,074531	-0,11045	0,000767
153	154,248	-117,722	0,070843	-0,11168	0,000558
154	152,515	-118,848	0,066866	-0,11022	0,000244
155	150,783	-119,974	0,063687	-0,11085	2,06E-05
156	149,051	-121,1	0,061272	-0,11188	-8,99E-05
157	147,319	-122,226	0,058851	-0,11349	-0,00025
158	145,587	-123,352	0,056584	-0,11495	-0,00033
159	143,855	-124,478	0,056231	-0,11616	-0,00036
160	142,123	-125,603	0,05563	-0,11841	-0,00028
161	140,391	-126,729	0,070566	-0,12764	-2,38E-05
162	138,659	-127,855	0,074131	-0,132	0,000204
163	136,927	-128,981	0,095459	-0,14234	0,000545
164	135,194	-130,107	0,155545	-0,16208	0,00099
165	133,462	-131,233	0,195891	-0,16524	0,00152
166	131,73	-132,359	0,263536	-0,1777	0,002097
167					
168	128,266	-134,61	0,436433	-0,23178	0,003308
169	126,534	-135,736	0,36315	-0,23321	0,003857
170	124,802	-136,862	0,238147	-0,19731	0,004315
171	123,07	-137,988	0,172559	-0,17124	0,004649
172	121,338	-139,114	0,108275	-0,16047	0,004841
173	119,606	-140,24	0,079182	-0,14818	0,004875
174	117,874	-141,365	0,01157	-0,13236	0,00488
175	116,141	-142,491	0,012535	-0,13148	0,004675
176	114,409	-143,617	0,013569	-0,12926	0,004486
177	112,677	-144,743	0,014877	-0,12742	0,004135
178	110,945	-145,869	0,013463	-0,12354	0,003728
179	109,213	-146,995	0,012361	-0,12247	0,003195

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

180	107,481	-148,121	0,017367	-0,12746	0,002768
181	105,749	-149,246	0,0102	-0,12111	0,002138
182	104,017	-150,372	0,010601	-0,12074	0,001584
183	102,285	-151,498	0,009661	-0,12165	0,001228
184	100,553	-152,624	0,008168	-0,12144	0,000938
185	98,8205	-153,75	0,008045	-0,12168	0,000757
186	97,0884	-154,876	0,008645	-0,12197	0,007654
187	95,3563	-156,002	0,006747	-0,11885	0,00058
188	93,6242	-157,127	0,008335	-0,11968	0,000596
189	91,8921	-158,253	0,009121	-0,12025	0,000617
190	90,16	-159,379	0,003059	-0,11243	0,000607
191	88,4279	-160,505	0,006368	-0,1178	0,000614
192	86,6958	-161,631	0,000997	-0,11017	0,000608
193	84,9637	-162,757	-0,00215	-0,11097	0,00059
194	83,2316	-163,883	0,003058	-0,11834	0,000565
195	81,4995	-165,008	-0,0037	-0,1102	0,000528
196	79,7674	-166,134	-0,0026	-0,11287	0,000486
197	78,0353	-167,26	-0,00362	-0,1123	0,000444
198	76,3032	-168,386	-0,00484	-0,11122	0,000401
199	74,9641	-168,788	-0,0059	-0,11023	0,000388

ANEXO D: DADOS DOS GRÁFICOS DE REDUÇÃO DE DADOS EYY

Index [1]	X [mm]	Y [mm]	U [mm]	V [mm]	eyy [1] - Lagrange
0	186,881	176,78	0,060765	0,205277	-0,00179
1	186,934	174,714	0,061935	0,209135	-0,00186
2	186,987	172,649	0,065157	0,21135	-0,00188
3	187,041	170,584	0,068714	0,215318	-0,00188
4	187,094	168,519	0,072358	0,219899	-0,00186
5	187,148	166,454	0,075494	0,224167	-0,00183
6	187,201	164,389	0,077956	0,227998	-0,00179
7	187,255	162,323	0,079886	0,231782	-0,00174
8	187,308	160,258	0,081371	0,235317	-0,0017
9	187,361	158,193	0,082613	0,238536	-0,00166
10	187,415	156,128	0,083789	0,241531	-0,00163
11	187,468	154,063	0,084992	0,244346	-0,0016
12	187,522	151,998	0,086465	0,247165	-0,00159
13	187,575	149,933	0,088434	0,250114	-0,00158
14	187,628	147,867	0,090946	0,253482	-0,00154
15	187,682	145,802	0,093928	0,257	-0,00149
16	187,735	143,737	0,097009	0,260448	-0,00143
17	187,789	141,672	0,100074	0,263941	-0,00136
18	187,842	139,607	0,103214	0,26766	-0,00128
19	187,896	137,542	0,106612	0,27153	-0,0012
20	187,949	135,476	0,110104	0,275653	-0,0011
21	188,002	133,411	0,11355	0,279869	-0,00099
22	188,056	131,346	0,116656	0,283954	-0,00086
23	188,109	129,281	0,11928	0,287249	-0,00074
24	188,163	127,216	0,121297	0,289354	-0,0006
25	188,216	125,151	0,122588	0,290197	-0,00047
26	188,269	123,086	0,123563	0,289693	-0,00035
27	188,323	121,02	0,124606	0,288364	-0,00024
28	188,376	118,955	0,125691	0,286698	-0,00016
29	188,43	116,89	0,12683	0,285014	-8,00E-05
30	188,483	114,825	0,128365	0,283547	-2,16E-05
31	188,537	112,76	0,130446	0,282398	2,91E-05
32	188,59	110,695	0,132802	0,281481	8,13E-05
33	188,643	108,629	0,135583	0,280849	0,000132
34	188,697	106,564	0,13823	0,280121	0,000181
35	188,75	104,499	0,140196	0,279642	0,000226
36	188,804	102,434	0,141096	0,279716	0,000274
37	188,857	100,369	0,141298	0,280482	0,000326
38	188,91	98,3037	0,140934	0,281834	0,000389
39	188,964	96,2386	0,140676	0,283649	0,000473
40	189,017	94,1734	0,141098	0,285083	0,000581
41	189,071	92,1083	0,142427	0,285555	0,000708
42	189,124	90,0431	0,144329	0,284527	0,000845

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

43	189,178	87,978	0,14607	0,282007	0,000985
44	189,231	85,9128	0,14749	0,278239	0,001126
45	189,284	83,8477	0,148107	0,273777	0,001257
46	189,338	81,7825	0,147916	0,269235	0,001374
47	189,391	79,7173	0,147202	0,265017	0,001478
48	189,445	77,6522	0,146344	0,261057	0,001569
49	189,498	75,587	0,145368	0,257338	0,001649
50	189,551	73,5219	0,144756	0,25354	0,001714
51	189,605	71,4567	0,144508	0,249583	0,001762
52	189,658	69,3916	0,144496	0,245574	0,001794
53	189,712	67,3264	0,144866	0,241887	0,00181
54	189,765	65,2613	0,145517	0,238536	0,001811
55	189,819	63,1961	0,146466	0,235463	0,001806
56	189,872	61,131	0,14725	0,232824	0,001799
57	189,925	59,0658	0,147601	0,230365	0,0018
58	189,979	57,0007	0,147466	0,227724	0,00181
59	190,032	54,9355	0,146933	0,224647	0,001829
60	190,086	52,8703	0,146098	0,220912	0,001851
61	190,139	50,8052	0,145434	0,216549	0,001877
62	190,192	48,74	0,145277	0,211816	0,001901
63	190,246	46,6749	0,14586	0,206978	0,00192
64	190,299	44,6097	0,147308	0,202291	0,001935
65	190,353	42,5446	0,149428	0,197869	0,001951
66	190,406	40,4794	0,151885	0,193794	0,001964
67	190,46	38,4143	0,154108	0,189939	0,001979
68	190,513	36,3491	0,155857	0,186003	0,001992
69	190,566	34,284	0,15684	0,181736	0,002
70	190,62	32,2188	0,157008	0,177197	0,001998
71	190,673	30,1537	0,156548	0,172493	0,001988
72	190,727	28,0885	0,155964	0,167952	0,001971
73	190,78	26,0234	0,155485	0,163884	0,001953
74	190,833	23,9582	0,155317	0,160416	0,00194
75	190,887	21,8931	0,155609	0,157278	0,001939
76	190,94	19,8279	0,156198	0,15408	0,001949
77	190,994	17,7627	0,156921	0,150473	0,001972
78	191,047	15,6976	0,157671	0,146349	0,002003
79	191,1	13,6324	0,158305	0,141899	0,002035
80	191,154	11,5673	0,158778	0,137549	0,002066
81	191,207	9,50213	0,159222	0,133731	0,002098
82	191,261	7,43698	0,159629	0,130329	0,002131
83	191,314	5,37182	0,160023	0,127091	0,002165
84	191,368	3,30667	0,16029	0,123531	0,002205
85	191,421	1,24152	0,160477	0,119119	0,002247
86	191,474	-0,82365	0,160706	0,113539	0,002288
87	191,528	-2,88879	0,161033	0,107035	0,002324
88	191,581	-4,95393	0,161321	0,100177	0,002351

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

89	191,635	-7,0191	0,161409	0,093691	0,002369
90	191,688	-9,08424	0,161296	0,088045	0,00238
91	191,741	-11,1494	0,161228	0,083362	0,002386
92	191,795	-13,2145	0,160991	0,079379	0,002392
93	191,848	-15,2797	0,160851	0,075429	0,002396
94	191,902	-17,3449	0,160947	0,071331	0,002398
95	191,955	-19,41	0,161356	0,066923	0,002391
96	192,009	-21,4752	0,162321	0,06212	0,002361
97	192,062	-23,5403	0,163691	0,057082	0,002306
98	192,115	-25,6055	0,165223	0,051979	0,002243
99	192,169	-27,6706	0,166747	0,046892	0,002203
100	192,222	-29,7358	0,168146	0,041836	0,002181
101	192,276	-31,8009	0,169289	0,036818	0,002168
102	192,329	-33,8661	0,170111	0,031783	0,002163
103	192,382	-35,9312	0,170365	0,026704	0,002166
104	192,436	-37,9964	0,169942	0,021505	0,002175
105	192,489	-40,0616	0,168161	0,016768	0,002183
106	192,543	-42,1267	0,164893	0,01279	0,002177
107	192,596	-44,1919	0,160701	0,010901	0,002168
108	192,65	-46,257	0,156378	0,010379	0,002155
109	192,703	-48,3222	0,154526	0,009558	0,002142
110	192,756	-50,3873	0,155066	0,004246	0,002125
111	192,81	-52,4525	0,154827	-0,00294	0,002105
112	192,863	-54,5176	0,153846	-0,0098	0,002081
113	192,917	-56,5828	0,153308	-0,01654	0,00205
114	192,97	-58,6479	0,153783	-0,02336	0,002011
115	193,023	-60,7131	0,154641	-0,03002	0,00196
116	193,077	-62,7782	0,15452	-0,03542	0,001898
117	193,13	-64,8434	0,153287	-0,03848	0,001831
118	193,184	-66,9085	0,151398	-0,04046	0,001771
119	193,237	-68,9737	0,149389	-0,04205	0,001717
120	193,291	-71,0388	0,147536	-0,0436	0,001662
121	193,344	-73,104	0,14621	-0,04519	0,001596
122	193,397	-75,1692	0,145243	-0,04735	0,001543
123	193,451	-77,2343	0,144509	-0,0502	0,001521
124	193,504	-79,2995	0,143862	-0,05351	0,001526
125	193,558	-81,3646	0,143028	-0,05696	0,001552
126	193,611	-83,4298	0,14159	-0,06021	0,001595
127	193,664	-85,4949	0,139169	-0,0629	0,001651
128	193,718	-87,5601	0,135746	-0,06513	0,001718
129	193,771	-89,6252	0,131801	-0,06722	0,001783
130	193,825	-91,6904	0,128002	-0,06967	0,001836
131	192,354	-92,9536	0,124052	-0,07261	0,001863
132	190,622	-94,0795	0,121087	-0,07588	0,001875
133	188,89	-95,2053	0,121964	-0,07742	0,001877
134	187,157	-96,3312	0,120803	-0,0829786	0,00187

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

135	185,425	-97,457	0,117849	-0,08635	0,001852
136	183,693	-98,5829	0,1166	-0,09089	0,001832
137	181,961	-99,7087	0,116341	-0,09386	0,001798
138	180,229	-100,835	0,117479	-0,09757	0,001765
139	178,497	-101,96	0,116104	-0,10031	0,00173
140	176,765	-103,086	0,111875	-0,10108	0,001685
141	175,033	-104,212	0,107646	-0,10136	0,001648
142	173,301	-105,338	0,102768	-0,10189	0,001599
143	171,569	-106,464	0,098238	-0,10272	0,001559
144	169,836	-107,59	0,093887	-0,10381	0,001525
145	168,104	-108,716	0,089301	-0,10454	0,001493
146	166,372	-109,841	0,084153	-0,10465	0,001475
147	164,64	-110,967	0,083473	-0,10594	0,001437
148	162,908	-112,093	0,081448	-0,10627	0,001423
149	161,176	-113,219	0,080221	-0,10748	0,001419
150	159,444	-114,345	0,079004	-0,10965	0,001436
151	157,712	-115,471	0,0778	-0,1114	0,001497
152	155,98	-116,597	0,074531	-0,11045	0,001608
153	154,248	-117,722	0,070843	-0,11168	0,001804
154	152,515	-118,848	0,066866	-0,11022	0,001999
155	150,783	-119,974	0,063687	-0,11085	0,002237
156	149,051	-121,1	0,061272	-0,11188	0,002517
157	147,319	-122,226	0,058851	-0,11349	0,002794
158	145,587	-123,352	0,056584	-0,11495	0,003065
159	143,855	-124,478	0,056231	-0,11616	0,003364
160	142,123	-125,603	0,05563	-0,11841	0,003609
161	140,391	-126,729	0,070566	-0,12764	0,003825
162	138,659	-127,855	0,074131	-0,132	0,004036
163	136,927	-128,981	0,095459	-0,14234	0,004076
164	135,194	-130,107	0,155545	-0,16208	0,00409
165	133,462	-131,233	0,195891	-0,16524	0,004013
166	131,73	-132,359	0,263536	-0,1777	0,003848
167					
168	128,266	-134,61	0,436433	-0,23178	0,003299
169	126,534	-135,736	0,36315	-0,23321	0,002942
170	124,802	-136,862	0,238147	-0,19731	0,002553
171	123,07	-137,988	0,172559	-0,17124	0,002165
172	121,338	-139,114	0,108275	-0,16047	0,001775
173	119,606	-140,24	0,079182	-0,14818	0,00141
174	117,874	-141,365	0,01157	-0,13236	0,001086
175	116,141	-142,491	0,012535	-0,13148	0,000807
176	114,409	-143,617	0,013569	-0,12926	0,000582
177	112,677	-144,743	0,014877	-0,12742	0,000425
178	110,945	-145,869	0,013463	-0,12354	0,000266
179	109,213	-146,995	0,012361	-0,12247	0,000141
180	107,481	-148,121	0,017367	-0,12746	0,000107

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

181	105,749	-149,246	0,0102	-0,12111	0,000106
182	104,017	-150,372	0,010601	-0,12074	0,000125
183	102,285	-151,498	0,009661	-0,12165	0,000135
184	100,553	-152,624	0,008168	-0,12144	0,000149
185	98,8205	-153,75	0,008045	-0,12168	0,000151
186	97,0884	-154,876	0,008645	-0,12197	0,00016
187	95,3563	-156,002	0,006747	-0,11885	0,000156
188	93,6242	-157,127	0,008335	-0,11968	0,000149
189	91,8921	-158,253	0,009121	-0,12025	0,00014
190	90,16	-159,379	0,003059	-0,11243	0,000127
191	88,4279	-160,505	0,006368	-0,1178	0,000107
192	86,6958	-161,631	-0,001	-0,11017	8,68E-05
193	84,9637	-162,757	-0,00215	-0,11097	5,88E-05
194	83,2316	-163,883	0,003058	-0,11834	2,92E-05
195	81,4995	-165,008	-0,0037	-0,1102	-5,95E-06
196	79,7674	-166,134	-0,0026	-0,11287	-4,66E-05
197	78,0353	-167,26	-0,00362	-0,1123	-9,18E-05
198	76,3032	-168,386	-0,00484	-0,11122	-0,00014
199	74,9641	-168,788	-0,0059	-0,11023	-0,00016

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, D. D. (2013, 1 DE MAIO). *FLEXURAL TEST METHOD STANDARDS FOR COMPOSITE MATERIALS*. COMPOSITESWORLD. [HTTPS://WWW.COMPOSITESWORLD.COM/ARTICLES/FLEXURAL-TEST-METHOD-STANDARDS-FOR-COMPOSITE-MATERIALS](https://www.compositesworld.com/articles/flexural-test-method-standards-for-composite-materials) [ACESSO EM: 2023-11-10]

AGULHAS DE TESTE ICT / FCT – SUPRATEC. (S.D.). SUPRATEC. [HTTP://SUPRATEC.COM.BR/AGULHAS-DE-TESTE-ICT-FCT/](http://supratec.com.br/agulhas-de-teste-ict-fct/) [ACESSO EM: 2023-11-10]

ALLEN, D. J., & ISHIDA, H. (2001). THERMOSETS: PHENOLICS, NOVOLACS, AND BENZOXAZINE. IN *ENCYCLOPEDIA OF MATERIALS: SCIENCE AND TECHNOLOGY* (PP. 9226–9229). ELSEVIER. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/B0-08-043152-6/01662-4](https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01662-4) [ACESSO EM: 2023-03-13]

ALMEIDA, N. E. S. (2022, 3 DE FEVEREIRO). *DEFORMAÇÃO E DESLOCAMENTOS NA FLEXÃO*. SÃO PAULO, BRASIL. [HTTPS://EDISCIPLINAS.USP.BR/PLUGINFILE.PHP/7524157/MOD_RESOURCE/CONTENT/4/EDFRMFLEX-M_20220203_IPAD200.PDF](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7524157/mod_resource/content/4/EDFRMFLEX-M_20220203_IPAD200.PDF) [ACESSO EM: 2023-11-10]

AN OVERVIEW OF PCB TESTING AND INSPECTION METHODS. (S.D.). RAPID PCB ASSEMBLY PROTOTYPES - PROTO-ELECTRONICS. [HTTPS://WWW.PROTO-ELECTRONICS.COM/BLOG/AN-OVERVIEW-OF-PCB-TESTING-AND-INSPECTION-METHODS](https://www.proto-electronics.com/blog/an-overview-of-pcb-testing-and-inspection-methods) [ACESSO EM: 2023-11-10]

ANTONSSON, T. (2022). *AUTOMATION OF PRINTED CIRCUIT BOARD TESTING ON A BED-OF-NAILS TESTBENCH* [MASTER'S THESIS, UPPSALA UNIVERSITY]. [HTTPS://WWW.DIVA-PORTAL.ORG/SMASH/GET/DIVA2:1689699/FULLTEXT01.PDF](https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1689699/fulltext01.pdf) [ACESSO EM: 2023-02-27]

BASLER ACE ACA2440-75UM - AREA SCAN CAMERA. (S.D.). BASLER AG. [HTTPS://WWW.BASLERWEB.COM/EN/PRODUCTS/CAMERAS/AREA-SCAN-CAMERAS/ACE/ACA2440-75UM/](https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca2440-75um/) [ACESSO EM: 2023-07-11]

BENESTY, J., CHEN, J., HUANG, Y., & COHEN, I. (2009). PEARSON CORRELATION COEFFICIENT. IN *NOISE REDUCTION IN SPEECH PROCESSING* (PP. 1–4). SPRINGER BERLIN HEIDELBERG. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/978-3-642-00296-0_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0_5) [ACESSO EM: 2023-06-24]

BESSA, R. F. C. (2021). *DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO PARA O FABRICO DE CAMAS DE AGULHAS PARA O TESTE DE PCBs* [MASTER'S THESIS]. REPOSITÓRIUM – UNIVERSIDADE DO MINHO. [HTTP://HDL.HANDLE.NET/1822/76929](http://hdl.handle.net/1822/76929) [ACESSO EM: 2023-02-27]

Converting an mv/v load cell signal into engineering units: Why this may be the most accurate and cost-effective way to use a calibration curve | morehouse instrument company, inc. (2020, 27 de janeiro). Morehouse Instrument Company, Inc. <https://mhforce.com/mv-v-load-cell-span-errors/> [ACESSO EM: 2023-11-10]

DARRIGOL, O. (2012). *HISTORY OF OPTICS FROM GREEK ANTIQUITY TO THE NINETEENTH CENTURY*. OXFORD UNIVERSITY PRESS, INCORPORATED.

DAS LALA, S., DEOGHARE, A. & CHATTERJEE, S. (2018). *EFFECT OF REINFORCEMENTS ON POLYMER MATRIX BIO-COMPOSITES – AN OVERVIEW*. SCIENCE AND ENGINEERING OF COMPOSITE MATERIALS, 25(6), 1039-1058. [HTTPS://DOI.ORG/10.1515/SECM-2017-0281](https://doi.org/10.1515/SECM-2017-0281) [ACESSO EM: 2023-02-27]

DIAS, E. D., FERNANDES, L. S., RODRIGUES, M. L., BATISTA, M. R. P., SILVA, R. S. M. D., JUNIOR, W. D. S., & DIACENCO, A. A. (2015). MATERIAIS COMPÓSITOS. *REVISTA CIENTÍFICA UNIVERSITAS - FEPI*. [HTTP://REVISTA.FEPI.BR/REVISTA/INDEX.PHP/REVISTA/ARTICLE/DOWNLOAD/292/229](http://revista.fepe.br/revista/index.php/revista/article/download/292/229) [ACESSO EM: 2023-02-27]

DIE NR. 1 IN DER PRÜFTECHNIK / INGUN. (S.D.). INGUN PRÜFMITTELBAU GMBH. [HTTPS://INGUN.COM/](https://ingun.com/) [ACESSO EM: 2023-11-10]

DE CARVALHO, B. L. V. (2019). ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES UTILIZANDO TÉCNICAS DE VISÃO COMPUTACIONAL [DISSERTAÇÃO NÃO PUBLICADA]. ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA.

DODIUK, H. (2022). HANDBOOK OF THERMOSET PLASTICS: VOL. 2. PHENOL-FORMALDEHYDE RESINS (4A ED.). ELSEVIER. [HTTPS://BOOKS.GOOGLE.PT/BOOKS?ID=JF8BEAAAQBAJ&PRINTSEC=FRONTCOVER&HL=PT-PT#V=ONEPAGE&Q&F=FALSE](https://books.google.pt/books?id=JF8BEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-PT#v=onepage&q&f=false) [ACESSO EM: 2023-03-13]

FERRAZ, D. H. S. (2013). OBTENÇÃO DE CAMPOS DE DESLOCAMENTOS E DEFORMAÇÕES ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS [PUBLISHEDVERSION, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS]. [HTTP://WWW.REPOSITORIO.UFAL.BR/HANDLE/RIUFAL/3484](http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/3484) [ACESSO EM: 2023-06-24]

FUJINON HF50SA-1 2/3" 50MM F1.8 IRIS MANUAL C-MOUNT LENS, 5 MEGAPIXEL RATED. (S.D.). RMA ELECTRONICS, INC. [HTTPS://WWW.RMAELECTRONICS.COM/FUJINON-HF50SA-1/](https://www.rmaelectronics.com/fujinon-hf50sa-1/) [ACESSO EM: 2023-07-11]

GANAPATHY, V., MUTHUKUMARAN, G., SUDHAGAR, P. E., RASHEDI, A., NORRRAHIM, M. N. F., ILYAS, R. A., GOH, K. L., JAWAID, M., & NAVEEN, J. (2022). MECHANICAL PROPERTIES OF CELLULOSE-BASED MULTISCALE COMPOSITES: A REVIEW. *POLYMER COMPOSITES*. [HTTPS://DOI.ORG/10.1002/PC.27175](https://doi.org/10.1002/pc.27175) [ACESSO EM: 2023-02-27]

GÓRSZCZYK, J., MALICKI, K., & ZYCH, T. (2019). APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC) METHOD FOR ROAD MATERIAL TESTING. *MATERIALS*, 12(15), 2349. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/MA12152349](https://doi.org/10.3390/ma12152349) [ACESSO EM: 2023-05-26]

GWMC (10-50kN) - *SENSORICA*. (S.D.). *SENSORICA*. [HTTPS://WWW.SENSORICA.ES/PRODUCTO/CELULAS-DE-CARGA/GWMC-10-50KN/](https://www.sensorica.es/producto/celulas-de-carga/gwmc-10-50kn/) [ACESSO EM: 2023-07-11]

HAN, L., & VOLOSHIN, A. (2004). STATISTICAL ANALYSIS FOR TEST LANDS POSITIONING AND PCB DEFORMATION DURING ELECTRICAL TESTING. *MICROELECTRONICS RELIABILITY*, 44(5), 853–859. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.MICROREL.2003.12.002](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2003.12.002) [ACESSO EM: 2023-02-27]

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2023). *FIBRE-REINFORCED PLASTIC COMPOSITES – DETERMINATION OF FLEXURAL PROPERTIES* (BS EN ISO 14125:1998). BSI.

LAS CASAS, R. (2020). PRIMEIROS TELESCÓPIOS. CADERNOS DE ASTRONOMIA, 1(1), 91–98. [HTTPS://DOI.ORG/10.47083/CAD.ASTRO.V1N1.30856](https://doi.org/10.47083/cad.astro.v1n1.30856) [ACESSO EM: 2023-05-07]

LATORRE, M., & MONTÁNS, F. J. (2014). ON THE INTERPRETATION OF THE LOGARITHMIC STRAIN TENSOR IN AN ARBITRARY SYSTEM OF REPRESENTATION. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURES*, 51(7-8), 1507–1515. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.IJSOLSTR.2013.12.041](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.12.041) [ACESSO EM: 2023-07-24]

LEPAGE, W. A PRACTICAL GUIDE TO DIC. AVAILABLE ONLINE: [HTTP://DIGITALIMAGECORRELATION.ORG](http://digitalimagecorrelation.org) (ACCESSED ON 29 JANUARY 2023). THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION (CC BY 4.0) LICENSE ([HTTPS://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)) [ACESSO EM: 2023-05-26]

MANNHEIMER, W. A. (2002). *MICROSCOPIA DOS MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO*. E-PAPERS SERVIÇOS EDITORIAIS. [HTTPS://WWW.ACADEMIA.EDU/40075794/MICROSCOPIA_DOS_MATERIAIS_UMA_INTRODUÇÃO_SOCIEDADE_BRASILEIRA_DE_MICROSCOPIA_E_MICROANÁLISE](https://www.academia.edu/40075794/MICROSCOPIA_DOS_MATERIAIS_UMA_INTRODUÇÃO_SOCIEDADE_BRASILEIRA_DE_MICROSCOPIA_E_MICROANÁLISE) [ACESSO EM: 2023-05-07]

MA SUTTON, W., WOLTERS, W., PETERS, W., RANSON, W., & McNEILL, S. (1983). IMAGE VISION COMPUTING: VOL. 1. DETERMINATION OF DISPLACEMENTS USING AN IMPROVED DIGITAL CORRELATION METHOD (3A ED.). ELSEVIER. [HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/ABS/PII/0262885683900641](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0262885683900641) [ACESSO EM: 2023-11-10]

MÜHL CASTOLDI, N., BRESOLIN, F. L., & VASSOLER, J. (2017). A NUMERICAL-EXPERIMENTAL METHODOLOGY TO CHARACTERIZE THERMOPLASTIC MATERIALS SUBMITTED TO LARGE STRAINS. IN 24TH ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. ABCM. [HTTPS://DOI.ORG/10.26678/ABCM.COBEM2017.COB17-1329](https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2017.cob17-1329) [ACESSO EM: 2023-05-26]

MULTILED G8/GX8 CONTROLLER - INDIVID. (S.D.). INDIVID. [HTTPS://WWW.INDIVID.COM/EN/PRODUKT/MULTILED-G8-CONTROLLER/](https://www.individ.com/en/produkt/multiled-g8-controller/) [ACESSO EM: 2023-07-11]

MULTILED QX. (S.D.). HOME. [HTTPS://WWW.GSVITEC.COM/MULTILED-QT765879EA](https://www.gsvitec.com/multiled-qt765879ea) [ACESSO EM: 2023-07-11]

PAN, B. (2010). RECENT PROGRESS IN DIGITAL IMAGE CORRELATION. *EXPERIMENTAL MECHANICS*, 51(7), 1223–1235. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S11340-010-9418-3](https://doi.org/10.1007/s11340-010-9418-3) [ACESSO EM: 2023-11-10]

PETERS, W. H., & RANSON, W. F. (1982). DIGITAL IMAGING TECHNIQUES IN EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS. *OPTICAL ENGINEERING*, 21(3). [HTTPS://DOI.ORG/10.1117/12.7972925](https://doi.org/10.1117/12.7972925) [ACESSO EM: 2023-11-10]

PORTO EDITORA – HISTÓRIA DA MICROSCOPIA NA INFOPÉDIA [EM LINHA]. PORTO: PORTO EDITORA. [CONSULT. 2023-03-15 14:46:43]. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.INFOPIEDIA.PT/\\$HISTORIA-DA-MICROSCOPIA](https://www.infopedia.pt/$historia-da-microscopia) [ACESSO EM: 2023-11-10]

QUANJIN, M., REJAB, M. R. M., HALIM, Q., MERZUKI, M. N. M., & DARUS, M. A. H. (2020). EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TENSILE TEST USING DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC) METHOD. *MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS*, 27, 757–763. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.MATPR.2019.12.072](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.072) [ACESSO EM: 2023-05-26]

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

RAO, S. S., & ATLURI, S. N. (1983). THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING. JOURNAL OF APPLIED MECHANICS, 50(4A), 914. [HTTPS://DOI.ORG/10.1115/1.3167179](https://doi.org/10.1115/1.3167179) [ACESSO EM: 2023-07-02]

RENDA, C. G. (2015). ESTUDO DA RESINA FENÓLICA FENOL/FORMALDEÍDO E SUA APLICAÇÃO COMO MATRIZ NA PREPARAÇÃO DE NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS CONTENDO NANOTUBOS DE CARBONO [PUBLISHEDVERSION, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS]. [HTTPS://BDTD.UNIFAL-MG.EDU.BR:8443/HANDLE/TEDE/606](https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/te/de/606) [ACESSO EM: 2023-03-13]

RESENDE, M. I. F. P. (2018). DESENVOLVIMENTO DE UMA RESINA FENOL-FORMALDEÍDO PARA IMPREGNAÇÃO DE PAPEL KRAFT PARA PRODUÇÃO DE LAMINADOS DE ALTA PRESSÃO [MASTER'S THESIS]. REPOSITÓRIO ABERTO DA UNIVERSIDADE DO PORTO. [HTTPS://HDL.HANDLE.NET/10216/114017](https://hdl.handle.net/10216/114017) [ACESSO EM: 2023-03-13]

RESULTS AND EXPERIENCES FROM THE APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION IN OPERATIONAL MODAL ANALYSIS. (2013). ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA, 10(5). [HTTPS://DOI.ORG/10.12700/APH.10.05.2013.5.10](https://doi.org/10.12700/APH.10.05.2013.5.10) [ACESSO EM: 2023-06-13]

ROSAS, J. D. L. (2019). IMPELENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NO PLANO PELA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM [PUBLISHEDVERSION, INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO]. [HTTPS://RECIPP.IPP.PT/HANDLE/10400.22/15024](https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/15024) [ACESSO EM: 2023-06-09]

SCHREIER, H., ORTEU, J.-J., & SUTTON, M. A. (2009). IMAGE CORRELATION FOR SHAPE, MOTION AND DEFORMATION MEASUREMENTS. SPRINGER US. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/978-0-387-78747-3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3) [ACESSO EM: 2023-06-13]

SCURI, A. E. (1999). FUNDAMENTOS DA IMAGEM DIGITAL [TECGRAF DA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO]. [HTTPS://WWW2.TECGRAF.PUC-RIO.BR/FTP_PUB/CURSO-CGI/NOTAS_DE_AULA/SCURI.PDF](https://www2.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/curso/cgi/notas_de_aula/scuri.pdf) [ACESSO EM: 2023-11-10]

SILVA, J. C. L. D. (2022). *PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÃO DE CAMA DE AGULHAS* [DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, UNIVERSIDADE DO MINHO]. REPOSITÓRIUM.

SINHA, A. S. K. (2021, 1 DE DEZEMBRO). A NOVEL MANUFACTURING PROCESS OF PAPER COMPOSITE USING RECYCLED OLD NEWSPAPER SHEETS AND PHENOL FORMALDEHYDE RESIN. QUARTERLY JOURNAL OF INDIAN PULP AND PAPER TECHNICAL ASSOCIATION, 33(2), 5. [HTTPS://IPPTA.CO/WP-CONTENT/UPLOADS/2022/01/2021_ISSUE_2_IPPTA_ARTICLE_01-P-13-17.PDF](https://ippta.co/wp-content/uploads/2022/01/2021_ISSUE_2_IPPTA_ARTICLE_01-P-13-17.pdf) [ACESSO EM: 2023-03-13]

TIMOSHENKO. (2010). THEORY OF PLATES & SHELLS. MC GRAW HILL INDIA.

VÁRADY, F. C. A. F. (2016). UM AMBIENTE COMPUTACIONAL DE ALTO DESEMPENHO PARA CÁLCULO DE DESLOCAMENTO USANDO CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS [PUBLISHEDVERSION, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS]. [HTTP://WWW.REPOSITORIO.UFAL.BR/HANDLE/RIUFAL/1502](http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/1502) [ACESSO EM: 2023-05-26]

VENTURA, A. M. F. M. (2009). OS COMPÓSITOS E SUA APLICAÇÃO NA REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS. IN CIÊNCIA & TECNOLOGIA DOS MATERIAIS (21A ED.)

Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de placas de cama de agulhas para
PCBs com a utilização da técnica de correlação de imagens digitais 2D

VOHNSEN, B. (2004). A SHORT HISTORY OF OPTICS. *PHYSICA SCRIPTA*, T109, 75. [HTTPS://DOI.ORG/10.1238/PHYSICA.TOPICAL.109A00075](https://doi.org/10.1238/physica.topical.109A00075) [ACESSO EM: 2023-05-07]