



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS

CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MACLEANE FERREIRA LEITE MONTEIRO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO POLI(ÁCIDO LÁCTICO) EM
AMOSTRAS IMPRESSAS EM 3D PARA APLICAÇÃO EM IMPLANTES
ORTOPÉDICOS**

MOSSORÓ/RN

2021

MACLEANE FERREIRA LEITE MONTEIRO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO POLI(ÁCIDO LÁCTICO) EM
AMOSTRAS IMPRESSAS EM 3D PARA APLICAÇÃO EM IMPLANTES
ORTOPÉDICOS**

Trabalho de conclusão do curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia apresentado à Universidade Federal Rural do Semi-Árido, para obtenção do diploma de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes.

Co-orientador: Prof. Dr. Diego Ariel de Lima.

MOSSORÓ/RN

2021

MACLEANE FERREIRA LEITE MONTEIRO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO POLI(ÁCIDO LÁCTICO) EM
AMOSTRAS IMPRESSAS EM 3D PARA APLICAÇÃO EM IMPLANTES
ORTOPÉDICOS

Trabalho de conclusão do curso
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia
apresentado à Universidade Federal Rural
do Semi-Árido, para obtenção do diploma
de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira
de Codes.

Co-orientador: Prof. Dr. Diego Ariel de
Lima.

APROVADO EM: 19/11/2021

BANCA EXAMINADORA

RODRIGO NOGUEIRA DE
CODES:62534670344

Assinado de forma digital por RODRIGO
NOGUEIRA DE CODES:62534670344
Dados: 2021.11.20 12:18:01 -03'00'

Prof.: Dr. Rodrigo Nogueira de Codes

Orientador

Diego Ariel

Assinado de forma digital por
Diego Ariel
Dados: 2021.11.20 14:42:00 -03'00'

Prof.: Dr. Diego Ariel de Lima

Co-orientador

ZOROASTRO TORRES
VILAR:04417246475

Assinado de forma digital por
ZOROASTRO TORRES VILAR:04417246475
Dados: 2021.11.20 13:25:56 -03'00'

Prof.: Dr. Zoroastro Torres Vilar

Examinador

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M813a Monteiro, Macleane Ferreira Leite.
Análise do comportamento mecânico do Poli(Ácido Láctico) em amostras impressas em 3D para aplicação em implantes ortopédicos. / Macleane Ferreira Leite Monteiro. - 2021.
41 f. : il.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes.
Coorientador: Diego Ariel de Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2021.

1. Impressora 3D. 2. Poli(Ácido Láctico) PLA. 3. Correlação Digital de Imagens (CDI). 4. Ensaios mecânicos. 5. Ortopedia. I. Codes, Rodrigo Nogueira de, orient. II. Lima, Diego Ariel de, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva

CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me abençoou e mostrou a oportunidade da realização desse trabalho com uma equipe maravilhosa.

Ao professor Dr. Rodrigo Nogueira de Codes pela oportunidade e orientação concedida.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA – Campus Mossoró) pela disponibilidade de estrutura que incentiva as pesquisas acadêmicas.

A meu Pai e minha Mãe que sempre fazem de tudo para a minha formação.

A minha família e amigos por todo apoio moral que é dado.

Aos colegas que sempre estavam dispostos ajudar, em especial a Anderson Ramon Santos Vitorino de Oliveira, que esteve comigo durante toda a jornada.

Ao médico ortopedista Dr. Diego Ariel de Lima que apoio, incentivou e mostrou a oportunidade de pesquisa.

Ao técnico Dr. Antônio Fabrício de Almeida, do Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFERSA, pelo auxílio e ensinamento passado.

A todos os outros colaboradores que contribuíram de forma direta e indireta na minha formação pessoal e acadêmica.

RESUMO

A impressora 3D é um equipamento capaz de desenvolver e fabricar peças por meio da modelagem em um software apropriado, onde a imaginação é o limite de criação. Um dos materiais utilizados por essas impressoras é o Poli(Ácido Lático) ou PLA, polímero biodegradável e com capacidade infinita de criação se usado nesse equipamento, porém, ainda se sabe pouco sobre as suas características mecânicas e se o seu uso tem aplicações em diferentes áreas de estudo. Partindo dessa idéia, esse trabalho tem o intuito de realizar ensaios de resistência estática e rigidez, onde corpos de prova impressos submetidos à tração e à compressão e analisar os resultados com o método de Correlação Digital de Imagens (CDI). Além da análise mecânica do material, o trabalho também tem o questionamento se é possível utilizar a impressora com esse polímero para aplicação na medicina, mais especificamente no setor ortopédico.

Palavras-chave: Impressora 3D. Poli(Ácido Lático) PLA. Correlação Digital de Imagens (CDI). Ensaios mecânicos. Ortopedia.

ABSTRACT

The 3D printer is equipment capable of developing and manufacturing parts by modeling them in appropriate software, where imagination is the limit for creation. One of the materials used by these printers is Poly(lactic acid) or PLA, a biodegradable polymer with infinite capacity for creation if used in this equipment, however, little is known about its mechanical characteristics and whether its use has applications in different Study areas. Based on this idea, this work aims to perform static strength and stiffness tests, where printed specimens are subjected to traction and compression, and analyze the results with the Digital Image Correlation (CDI) method. In addition to the mechanical analysis of the material, the work also has the question of whether it is possible to use the printer with this polymer for application in medicine, more specifically in the orthopedic sector.

Keywords: 3D Printer. Poly(Lactic Acid) PLA. Digital Image Correlation CDI. Mechanical tests. Orthopedics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema final da cirurgia de reconstrução do ligamento cruzado anterior.	15
Figura 3 Parafuso de interferência de polímero.	16
Figura 2: Parafuso de interferência de titânio.	16
Figura 4: Imagem de como é feita a análise da correlação digital de imagens.	17
Figura 5: CORRELI_Q4 iniciado no MATLAB 2014 ^a	18
Figura 8: Corpo de prova de Compressão modelado no Inventor.	19
Figura 6: Dimensões corpo de prova de Microtração.	19
Figura 7: Dimensões corpo de prova de Compressão.	19
Figura 9: Corpo de prova de Microtração modelado no Inventor.	20
Figura 10: Impressora Ender 3 Pro.	20
Figura 12: Corpo de Prova de Microtração enumerado.	21
Figura 11: Corpo de Prova de Microtração texturizado.	21
Figura 13: Ensaio de microtração em andamento.	22
Figura 14: Processo de corte da imagem.	23
Figura 15: Resultado da análise do 1º Ensaio de Microtração.	23
Figura 16: Resultado da análise do 3º Ensaio de Compressão.	24
Figura 17: Escolha de Gauges para o 5º Ensaio de Compressão.	25
Figura 18: Imagem anterior à ruptura do material, no instante 140s.	27
Figura 19: Imagem da ruptura do material, no instante 145s.	27
Figura 20: Resultado dos Corpos de Microtração.	28
Figura 21: Tensão x Deformação Gauge em MT1.	28
Figura 22: Tensão x Deformação Gauge em MT2, MT3, MT4 e MT5, sucessivamente.	29
Figura 23: Campos de Deformação na direção 11 do ensaio C5.	31
Figura 24: Campos de Deformação na direção 22 do ensaio C5.	31
Figura 25: Campo de deslocamentos na direção 1 do ensaio C5.	32
Figura 26: Campo de deslocamentos na direção 2 do ensaio C5.	32
Figura 27: Mapa de Erro do ensaio C5.	33
Figura 28: Gráfico de Tensão x Deformação Gauge no ensaio C5.	33
Figura 29: Tensão x Deformação Gauge em Compressão 1, 2, 3 e 4, sucessivamente.	34
Figura 30: 1º Corpo de prova de Compressão.	34
Figura 31: 2º Corpo de prova de Compressão.	35
Figura 32: Localização dos Gauges no 5º ensaio de compressão.	35
Figura 33: Comparação entre a primeira e última foto cortada do 4º Ensaio de Compressão.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões dos corpos de prova de Microtração.....	26
Tabela 2: Dados referentes aos ensaios de microtração.....	29
Tabela 3: Fator de conversão para Microtração.	30
Tabela 4: Dimensões dos corpos de prova de Compressão.	30
Tabela 5: Modulo de Elasticidade nos Ensaio de Compressão.	36
Tabela 6: Fator de conversão para Compressão.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1. IMPRESSORA 3D	13
3.1.1. Tipos de Impressora 3D.....	13
3.2. Poli(Ácido Láctico) ou PLA	14
3.2.1. Cirurgia de Reconstrução do Ligamento Cruzado Anterior.....	15
3.2.2. Parafuso de Interferência.....	16
3.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA ESTÁTICA E RIGIDEZ.....	16
3.4. Correlação Digital de Imagens (CDI).....	17
3.4.1. Software utilizado	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1. Fabricação dos corpos de prova.....	19
4.2. Realização dos ensaios de Microtração e Compressão.....	21
4.3. Correlação Digital de Imagens (CDI).....	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1. Ensaio de Microtração	26
5.2. Ensaio de Compressão	30
6. CONCLUSÕES	38
7. REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

Dentre as mais recentes inovações tecnológicas, têm-se a criação da Impressora 3D, máquinas de pequeno porte que são capazes de fabricar diversos objetos. Ela é muito utilizada na fabricação de decorações e brinquedos, porém essas criações representam muito pouco com relação às potencialidades dessa máquina. A matéria prima utilizada são filamentos de polímeros, onde os mais utilizados são o Poli(Ácido Láctico), ou PLA, e o Acrilonitrilabutadieno, ou ABS. Esse filamento é aquecido até uma temperatura definida pelo usuário, sendo que essa temperatura é suficiente para tornar o material maleável e moldável. Assim ele é disposto em camadas até que se tenha o objeto desejado (3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2021).

Tendo em vista o potencial de criação e o material que é utilizado nas Impressoras 3D, o mundo de possibilidades de inovação e testes com as peças modeladas são imensuráveis, porém, mesmo com tantos avanços, ainda se sabe pouco sobre o PLA.

O Poli(Ácido Láctico) é um polímero derivado de fontes agrícolas e com um imenso potencial de substituir os derivados de petróleo, que são agressivos ao meio ambiente. Mas nos dias atuais o seu uso ainda é restrito a algumas atividades, pois esse material do modo como é obtido é frágil e termicamente sensível, então os estudiosos buscam uma forma de mudar suas características mecânicas por meio da aditivação ou reticulação (PEREIRA; MORALES, 2014). Embora o que foi citado, o PLA possui uma alta capacidade biodegradável e não é tóxico, tornando-o assim um material propício a uma utilização do ponto de vista ambiental (RODRIGUES, 2012).

As fabricantes do material para uso em impressoras fixam a ideia de ele ser um material de fácil manuseio, pois as suas características permitem a utilização do mesmo ao ar livre e sem a necessidade de uma mesa aquecida, entretanto esses e outros fatores podem ser responsáveis por modificar a estrutura do mesmo, piorando ainda a sua qualidade e suas propriedades mecânicas. O fato de ser facilmente modelável em temperaturas relativamente baixas, se comparada a outros materiais, o torna interessante na utilização de criação em impressoras (3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2021).

Devido à limitação de estudos que há a cerca desse material, o seguinte trabalho pretende elaborar e analisar corpos de provas em ensaios de resistência mecânica, sendo que esses são impressos com determinados parâmetros que tornem o material viável para usos diversos.

Para a identificação dos parâmetros do comportamento mecânico do material, utilizou-se o método da Correlação Digital de Imagens (CDI), método de análise de deformação com a utilização de uma imagem em comparação a anterior, ou seja, ele analisa o deslocamento espacial que há entre pixels. Sendo assim considerando um método óptico de Extensometria e em ascendência atualmente (DANTAS, 2019).

Tendo em mãos os dados a serem estudados, pretende-se realizar uma análise mais específica para a utilização do polímero citado na fabricação de elementos utilizados em cirurgias ortopédicas, podendo se estender a outros campos da medicina. Por exemplo, a cirurgia de Ligamento Cruzado Anterior (LCA), que utiliza um parafuso de material polimérico, porém com um preço elevado, tornando a operação cara.

A cirurgia de reconstrução do LCA é uma operação comum na humanidade, isso devido à facilidade que temos em romper esse ligamento. A ruptura pode ocorrer no âmbito caseiro até em cenários de acidentes mais graves, como por exemplo, lesões em esporte ou impactos em automóveis. A cirurgia é baseada na substituição do ligamento rompido por um enxerto retirado de outra região do corpo. O mesmo é fixado com o auxílio de um parafuso de interferência, sendo fabricado em Titânio ou Polímero Biodegradável (ORTHOINFO, 2021).

Então entra a questão, é possível fabricar parafusos de interferência com a impressora 3D, mantendo as necessidades mecânicas que os atuais de alto custo contêm? Para solucionar esse problema o comportamento mecânico do material será analisado.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

- O presente trabalho tem por objetivo principal analisar os ensaios mecânicos experimentais de resistência estática e rigidez, realizados conforme a NBR 15743-7 em corpos de prova fabricados em impressora 3D com filamentos de Poli(Ácido Láctico).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fabricar peças em impressoras 3D seguindo as definições em normas;
- Realizar ensaios mecânicos de tração e compressão, com os dados sendo analisados em meios computacionais;
- Identificar e analisar os parâmetros do comportamento mecânico do material.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse tópico do trabalho, será abordado o embasamento teórico a ser considerado em relação à elaboração dos ensaios e como analisar os dados, além de que retrata o material de estudo.

3.1. IMPRESSORA 3D

Partindo do princípio de funcionamento de uma impressora comum, Hausman e Horne (2014) argumentam que as impressoras 3D têm a funcionalidade bem semelhante, pois ambas são equipamentos capazes de tornar documentos de meio eletrônico em material físico. A diferença é que a 3D não utiliza tinta e cria objetos tridimensionais.

A diversificação de cultura e pensamentos torna o mundo moderno cada vez mais exigente em relação a detalhes e características específicas acerca de objetos e peças. Com a existência da Impressora 3D a capacidade de modificação de um objeto ou até mesmo a criação dele fica simples e rápida, sendo que qualquer pessoa pode realizar a edição de arquivos a serem impressos, essa é uma das vantagens citadas por Hausman e Horne (2014). Outra seria a possibilidade dela criar objetos de geometria complexa, redução de perda de material durante a produção e peças mais leves que as fabricadas em metal, por exemplo.

Já Seguin (2011) explicita algumas desvantagens que existem nessas impressoras, como por exemplo, o alto custo de aquisição e o fato delas não possuírem capacidade de produção com metal, serem limitadas aos termoplásticos.

Dentre os materiais mais utilizados por essas impressoras é válido destacar o Poli(Ácido Láctico), que é um polímero facilmente extraído de meio vegetal. Seu fácil manuseio e baixo custo atraem muito os olhares dos usuários de impressoras 3D, principalmente os iniciantes que não têm tanto conhecimento dos cuidados a serem tomados durante as impressões (3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2021).

3.1.1. Tipos de Impressora 3D

Hausman e Horne (2014) dividem as impressoras 3D de acordo com a maneira de impressão delas:

- Fotopolimérica: Ela utiliza polímeros com capacidade de transição entre o estado líquido e sólido rapidamente, em outras palavras, são materiais facilmente moldáveis. Ela utiliza luz UV focada para passar o material do estado líquido para o sólido.

- Granular: Que é uma técnica onde material plástico, ou até mesmo cerâmico, é utilizado na forma de um pó granular. Onde esses grãos podem ser unidos por meio de uma cola ou então com a implantação de um laser que leva o material ao ponto de fusão.
- Laminação: Essa impressora utiliza o corte de chapas do material e dispõem essas de maneira a ficar com o formato do objeto a ser impresso, as chapas são unidas com a utilização de tipo de cola.
- Modelagem por Deposição Fundida: Entre as impressoras a mais conhecida e utilizada, onde a primeira foi criada no final de 1980 por Stratasys. Ela utiliza o método de deposição de termoplásticos por um bico, criando camada por camada até formar o objeto a ser impresso.

3.2. Poli(Ácido Lático) ou PLA

O Poli(Ácido Lático) é um polímero composto basicamente de moléculas de ácido lático, onde é retirado de fontes renováveis e é um ácido orgânico. A extração desse composto é feita principalmente do amido de milho e do bagaço da cana-de-açúcar, podendo ser sintetizada de modo químico ou biológico. Dentre as principais características que esse polímero possui, as que tornam compreensíveis a idealização desse projeto são as de biocompatibilidade e biodegradabilidade, sendo essa segunda a capacidade que o material tem em se degradar no meio em que está situado, onde essa degradação pode variar de seis meses até dois anos (LASPRILLA, 2011).

O avanço tecnológico e as pesquisas científicas na área possibilitam que materiais poliméricos com características biodegradáveis sejam objetivos de desejo, além de ser capaz de substituir outros polímeros derivados de petróleo, esse material tem uma utilidade infinita no quesito de tornar o mundo um lugar menos poluído. E o PLA é um desses polímeros muito promissor, pois é totalmente extraído do meio agrícola (RAY; RAMONTJA, 2009).

Outra área de grande atuação dos polímeros é na medicina, onde é utilizado como material descartável e biodegradável em meio interno ao corpo ou até mesmo no exterior em aplicações de tratamento pós-cirúrgico. Em pesquisa de busca de caracterização do material, Dantas (2019) realizou ensaios de tração de corpos de prova utilizando a norma ASTM D3039-14, além de um pouco de estudo com relação aos parâmetros de impressão utilizados e como isso podem afetar as propriedades do material, inclusive uma de suas conclusões é que o ensaio de tração foi fundamental e trouxe resultados muito satisfatórios para a pesquisa. Realizou, também, análises gráficas e encontrou dados válidos sobre o módulo de elasticidade do material, onde encontrou um valor entre 2,42 à 2,50 GPa, e uma tensão de ruptura média de 32,74 MPa (DANTAS, 2019).

3.2.1. Cirurgia de Reconstrução do Ligamento Cruzado Anterior

O ligamento cruzado anterior possui diversas funcionalidades, entre elas está o ato de controle para que a patela não se desloque livremente, forçando-a a fazer apenas o deslocamento que nos possibilita andar. A sua ruptura é comumente encontrada na humanidade, porém são os atletas os principais alvos desse problema. Dentre as principais causas de lesão, podem-se citar paradas bruscas, mudança de sentido de movimento e apoiar os pés de maneira errada após um salto (ORTHOINFO, 2021). A boa notícia é que a cirurgia de reconstrução deste ligamento existe, por outro lado, ela possui um custo elevado pelo fato dos equipamentos e material utilizados serem caros.

A cirurgia de reconstrução é baseada na idéia de pegar algum outro tecido do seu corpo que possua função e propriedades semelhantes ao do ligamento rompido, então no osso da tíbia e da patela é feito um furo de espessura levemente superior à circunferência do parafuso de interferência a ser utilizado. Logo após o enxerto é colocado e o parafuso faz pressão no canal prendendo o enxerto aos ossos. Após a cirurgia de reconstrução, a reabilitação é necessária para que os ossos possam se regenerar e durante a restauração unam-se ao novo ligamento. Com o uso de parafusos bioabsorvíveis não se faz necessário que ocorra uma cirurgia de remoção dos mesmos, pois eles se degradam no tempo certo da osteossíntese, procedimento de calcificação dos ossos (ORTOPEDIABR, 2021).

O parafuso utilizado nesse procedimento é chamado de Parafuso de interferência, comumente fabricado em titânio, mas também se utiliza polímeros que possuem a característica de biodegradação na fabricação, dentre esses polímeros o PLA também é bastante utilizado (SMITH & NEPHEW COMÉRCIO DE PRODUTOS MÉDICOS LTDA., 2016).

Figura 1: Esquema final da cirurgia de reconstrução do ligamento cruzado anterior.



Fonte: ORTOPediaBR, 2021.

3.2.2. Parafuso de Interferência

Como dito anteriormente, o parafuso de interferência é produzido em polímeros, mas a utilização de aço cirúrgico também é evidente no mercado e os preços entre os produtos são até semelhantes, porém a presença de um material metálico dentro do organismo demonstra a necessidade de realização de uma nova cirurgia para a retirada do mesmo, pelos motivos do material causar desconforto e complicações futuras (MedicalExpo, 2021).

Figura 3: Parafuso de interferência de titânio.



Fonte: MedicalExpo, 2021

Figura 2 Parafuso de interferência de polímero.



Fonte: MedicalExpo, 2021

Quando se compara o PLA em relação ao metal utilizado para a fabricação de implantes ortopédicos, podem-se listar as vantagens e desvantagens oferecidas pelo polímero. Dentre as vantagens, tem-se a facilidade em ser degradado após o osso realizar o processo de regeneração e ligar-se ao novo material que representa o novo ligamento. Contudo o parafuso de PLA atualmente comercializado é bem caro, deixando a cirurgia com custo elevado. A outra vantagem do PLA é a facilidade de se encontrar o ácido da sua base na natureza e ela ser proveniente de uma fonte renovável (MedicalExpo, 2021).

Nas Figuras 2 e 3, têm-se dois modelos de parafuso de interferência, sendo um de titânio (Figura 2), o metal mais utilizado para fabricação deles, e o outro de PLA (Figura 3), ambos os parafusos são da mesma fabricante (*Tulpar Medical Solutions*) que fica situada na Turquia. Inclusive, todos os parafusos de interferência utilizados no Brasil são importados (MedicalExpo, 2021).

3.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA ESTÁTICA E RIGIDEZ

A Norma Regulamentadora NBR 15743-7 de 2017, que seleciona ensaios e relata as informações necessárias para a eficácia e segurança de implantes ortopédicos fabricados em polímeros absorvíveis, em sua Tabela D.3 mostra algumas outras normas relacionadas a ensaios de desempenho mecânico a resistência estática e rigidez. Dentre o

que é mostrado destacam-se os ensaios mais conhecidos nessa área, o de Tração e Compressão que são descritos nas normas internacionais ASTM D1708-18 que retratam os ensaios de tração com especificação para corpos de provas em geometrias pequenas, sendo assim um método eficaz para materiais frágeis (ASTM, 2018).

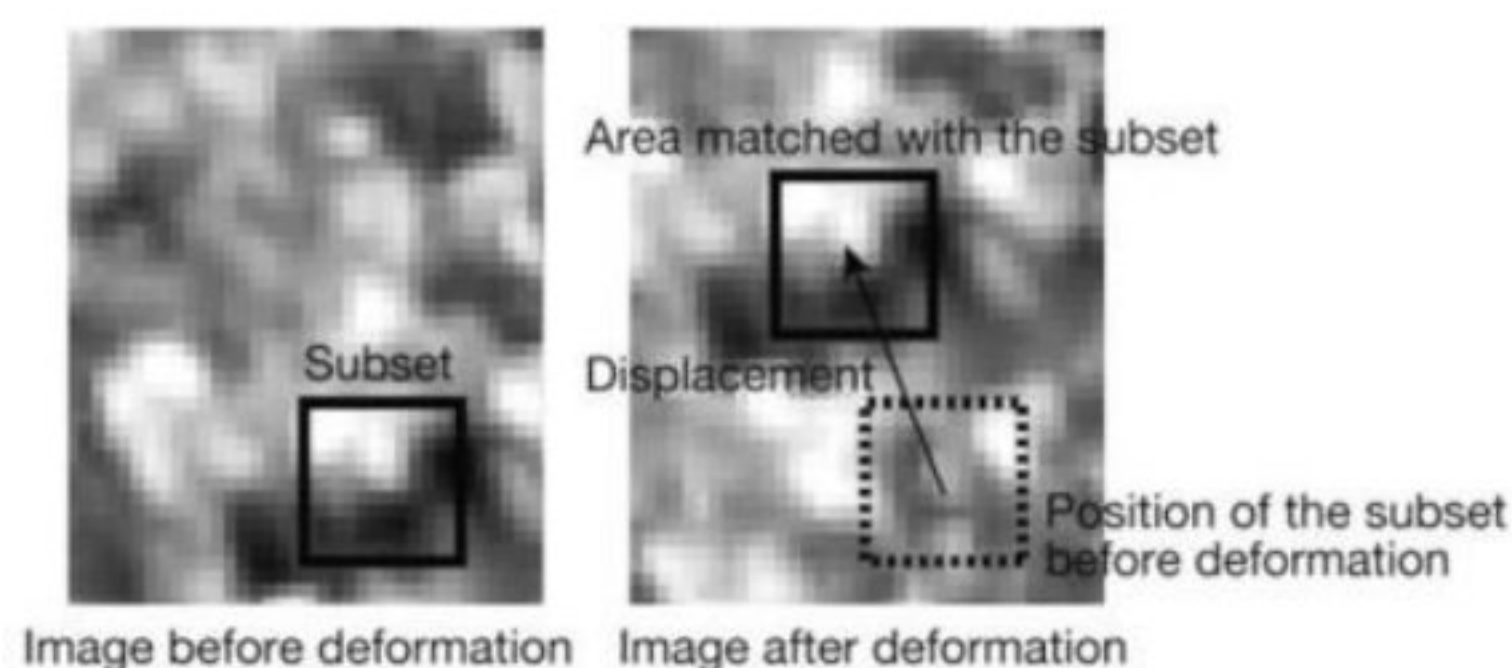
Em norma citada anteriormente é possível obter todos os dados referentes a um ensaio de Microtração, aonde o nome vem do tipo de corpo de prova, que tem dimensões bem menores a corpos do ensaio mostrado na norma ASTM D638-14, onde essa especifica as dimensões de corpos e outros parâmetros para uso em ensaios de tração para material polimérico convencional (ASTM, 2014).

Já para os ensaios de compressão, utilizou-se um corpo de prova com geometria prismática, na tentativa de obter melhores resultados para a análise de Correlação Digital de Imagens.

3.4. Correlação Digital de Imagens (CDI)

Os métodos mais usuais de estudo da Extensometria são um pouco menos eficazes para corpos de prova de materiais não metálicos. Como solução para esse problema surgiu a Correlação Digital de Imagens, que é um processo baseado no deslocamento espacial de pixels, ou seja, são obtidos os campos de deslocamento e deformação ao longo da superfície útil do corpo de prova, onde ao longo do ensaio eles são calculados em relação à imagem de referência, antes de qualquer carregamento (Yoneyama; Murasawa, 1994).

Figura 4: Imagem de como é feita a análise da correlação digital de imagens.



Fonte: Yoneyama; Murasawa, 1994.

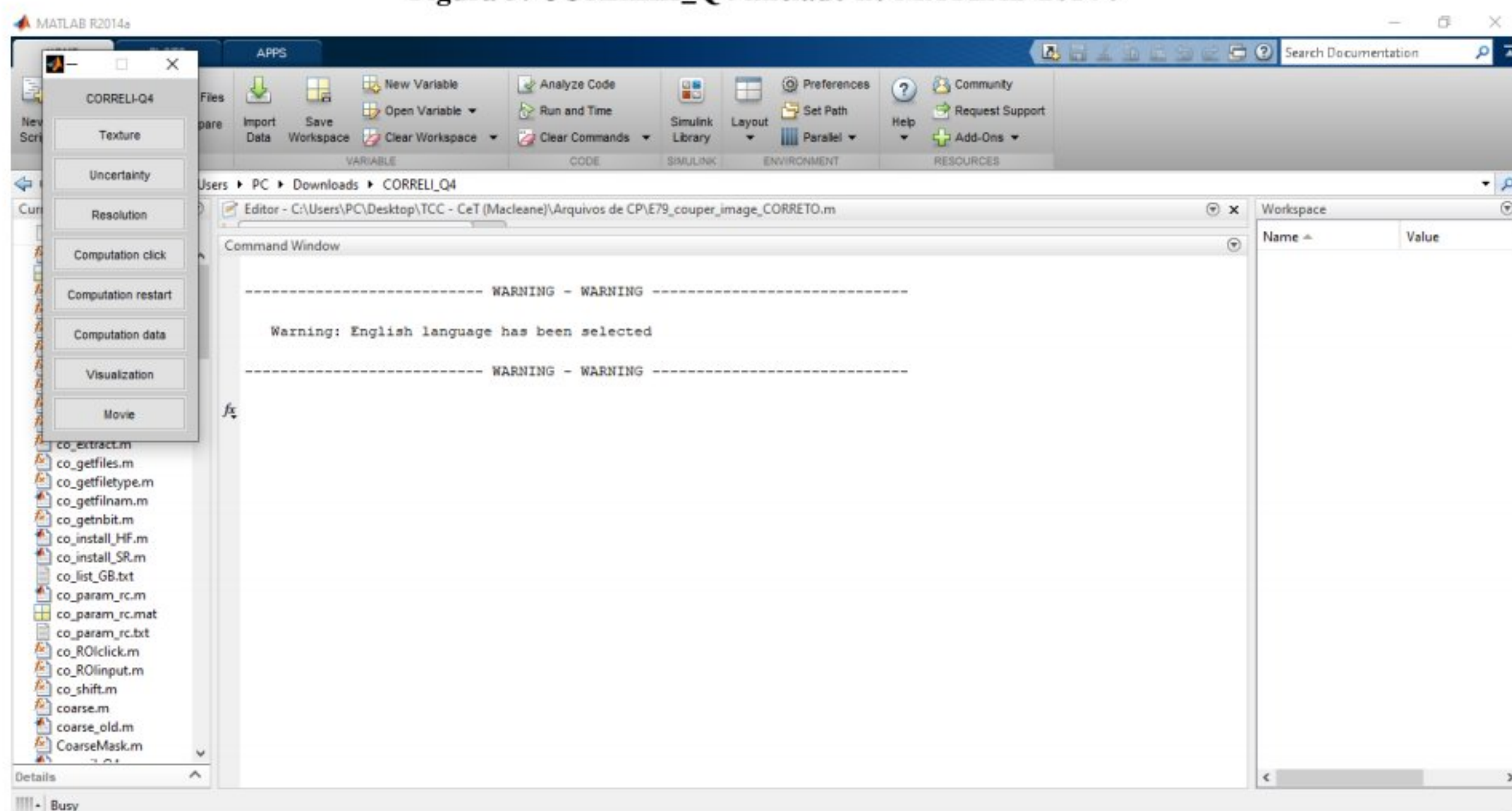
3.4.1. Software utilizado

Para as análises das imagens obtidas, utiliza-se o software MATLAB, que é bem conhecido quando se trata de cálculo numérico de precisão, além de ser um dos programas mais utilizados mundialmente. O programa conta com uma quantidade de funcionalidades muito abrangente, como por exemplo, criação de matrizes, tabelas,

gráficos 2D/3D e implementação de fotos a serem utilizadas em análises dentro do mesmo. Sendo essa última o maior interesse do trabalho em questão, pois é a partir dela que se utiliza o método da CDI (MATLAB, 2021).

Dentro do MATLAB, programou-se a pasta CORRELI_Q4 que é um conjunto de algoritmos de programação que realizam todos os cálculos referentes ao método da CDI. Nele são calculados os campos de deslocamento ou deformação em comparação com a imagem de referencia, que é a imagem do corpo de prova sem aplicação de nenhuma força. Esse conjunto de algoritmos foi desenvolvido no LMT-Cachan por HILD(2002) e HILD e ROUX (2006).

Figura 5: CORRELI_Q4 iniciado no MATLAB 2014^a.



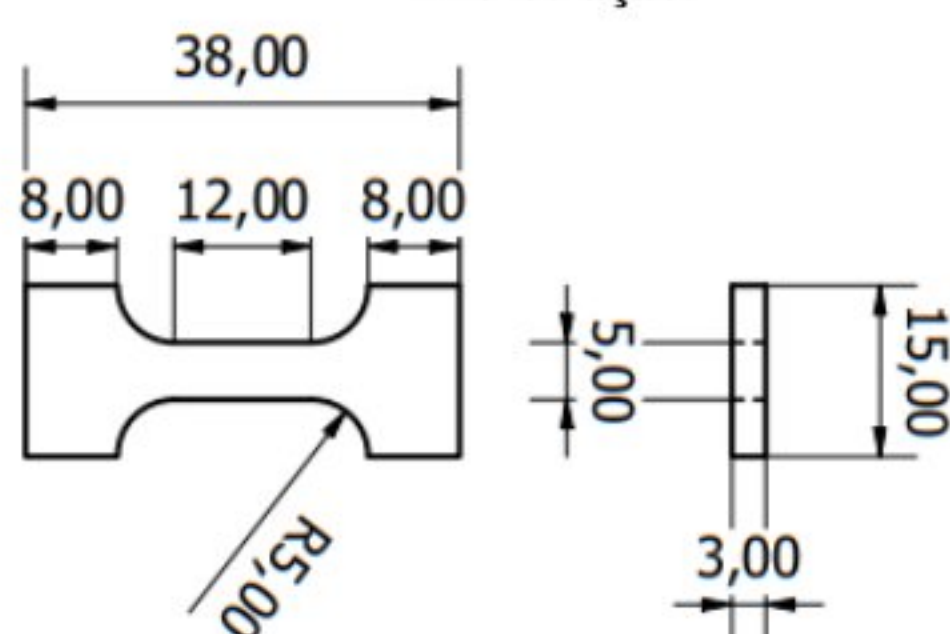
Fonte: Autoria própria.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Fabricação dos corpos de prova

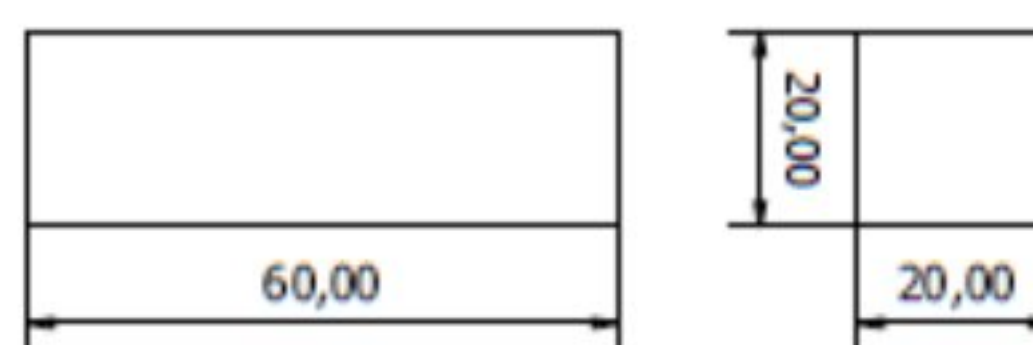
Seguindo o dimensionamento descrito na norma ASTM D1708, obtiveram-se as seguintes dimensões para os ensaios de microtração e compressão, respectivamente:

Figura 6: Dimensões corpo de prova de Microtração.



Fonte: Autoria própria.

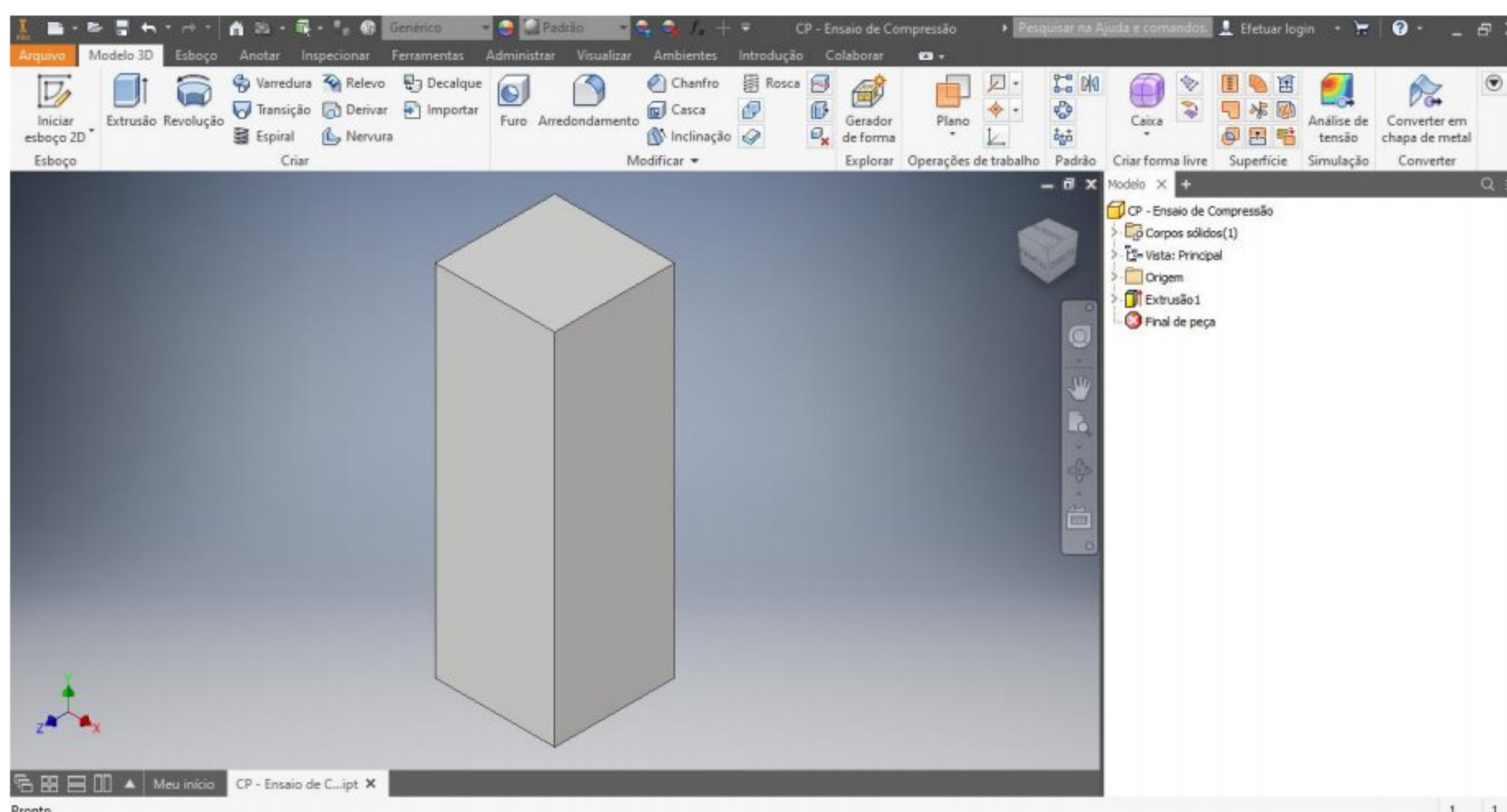
Figura 7: Dimensões corpo de prova de Compressão.



Fonte: Autoria própria.

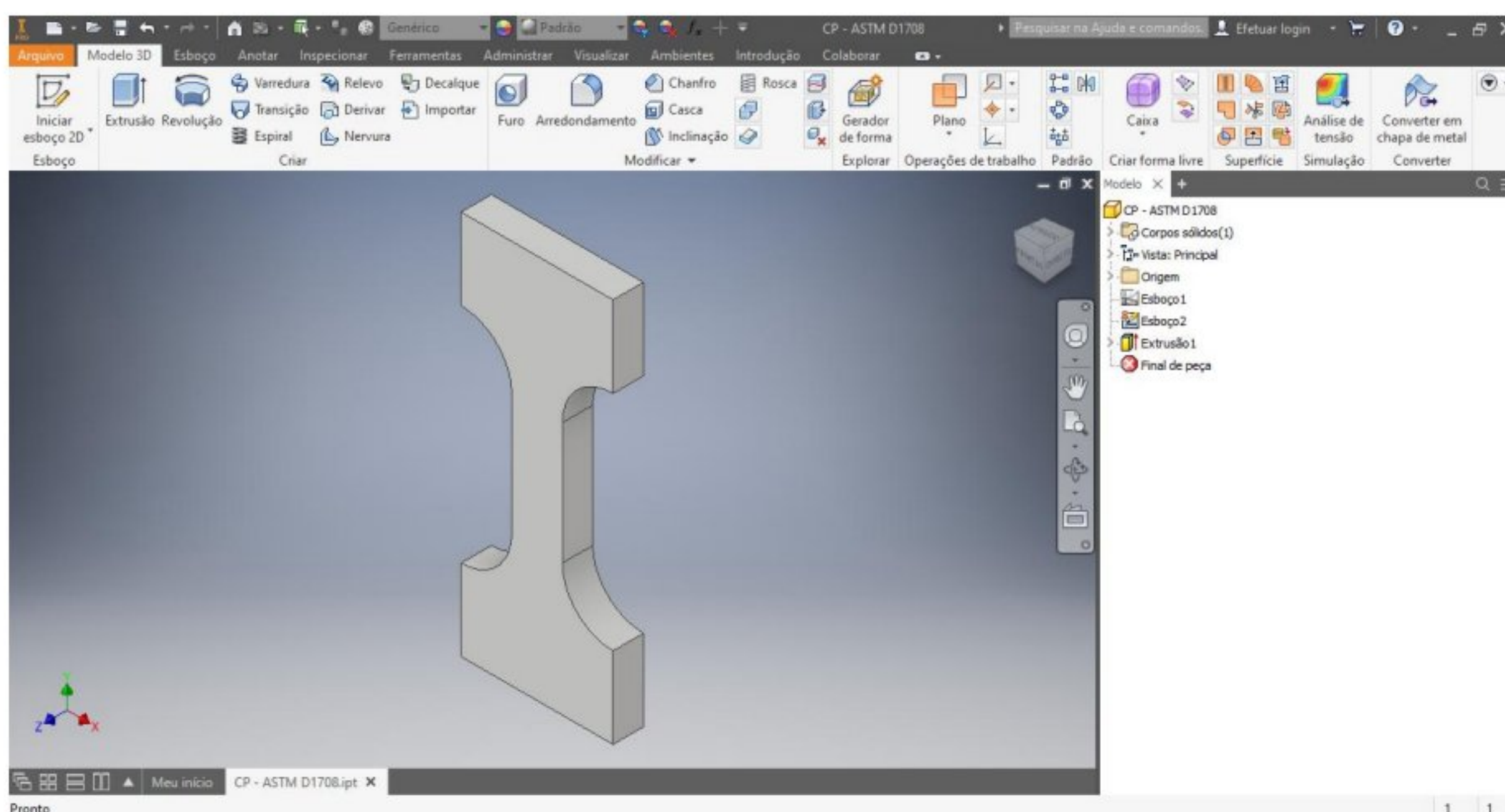
Em seguida foi realizada a modelagem dos corpos de prova no software Autodesk Inventor Professional 2019. Com as peças modeladas, o arquivo é salvo na extensão .STL que é utilizada no fatiador CURA 3D que é o software de impressão 3D utilizado para comandar o equipamento.

Figura 8: Corpo de prova de Compressão modelado no Inventor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9: Corpo de prova de Microtração modelado no Inventor.



Fonte: Autoria própria.

A impressora utilizada foi uma Ender 3 Pro, fabricada pela 3D LAB, empresa especializada na fabricação e comercialização de Impressoras 3D. Os parâmetros de Impressão utilizados foram os seguintes:

- Filamento PLA de cor Branca com espessura de 1,75mm;
- Orientação de impressão: Concêntrica;
- Temperatura de impressão de 215°C;
- Temperatura da mesa: 60°C;
- Distância de retração: ExtrusorDirect 4mm – ExtrusoraBowden 9mm;
- Velocidade de retração: ± 45 mm/s;
- Velocidade de ventoinha: 100% (255PWM).

Figura 10: Impressora Ender 3 Pro.



Fonte: 3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2021.

4.2. Realização dos ensaios de Microtração e Compressão

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos, que fica localizado no Centro de Engenharias da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Mossoró, onde se utilizou a máquina EMIC DL-10000 de 100kN.

Ao todo foram realizados 5 ensaios de Microtração e 5 de Compressão. Antes dos ensaios foram realizadas as medições das dimensões de todos os corpos de prova e suas numerações para identificação. As velocidades de deslocamento da travessa móvel da máquina foi de 0,02mm/s para a microtração e 0,006mm/s para compressão. Para o cálculo dessa velocidade, utiliza-se o comprimento útil da peça já fixada na máquina de ensaios e a derivada da deformação em relação ao tempo (velocidade de deformação), que foi pré-definida como 10^{-3} /s para o ensaio de microtração e 10^{-4} /s para a compressão. Em todos os ensaios os comprimentos úteis foram de $L_0 = 24$ mm (microtração) e $L_0 = 60$ mm (compressão).

$$\mu = \dot{\epsilon} \times L_0$$

$$\mu_{MT} = \dot{\epsilon} \times L_0 = 10^{-3} \times 24 = 0,024 \text{ mm/s}$$

$$\mu_{Comp.} = \dot{\epsilon} \times L_0 = 10^{-4} \times 60 = 0,006 \text{ mm/s}$$

O valor da velocidade de deformação foi diferente em cada ensaio para obter uma quantidade de fotos ideal para as análises de correlação de imagens.

Figura 11: Corpo de Prova de Microtração enumerado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12: Corpo de Prova de Microtração texturizado.



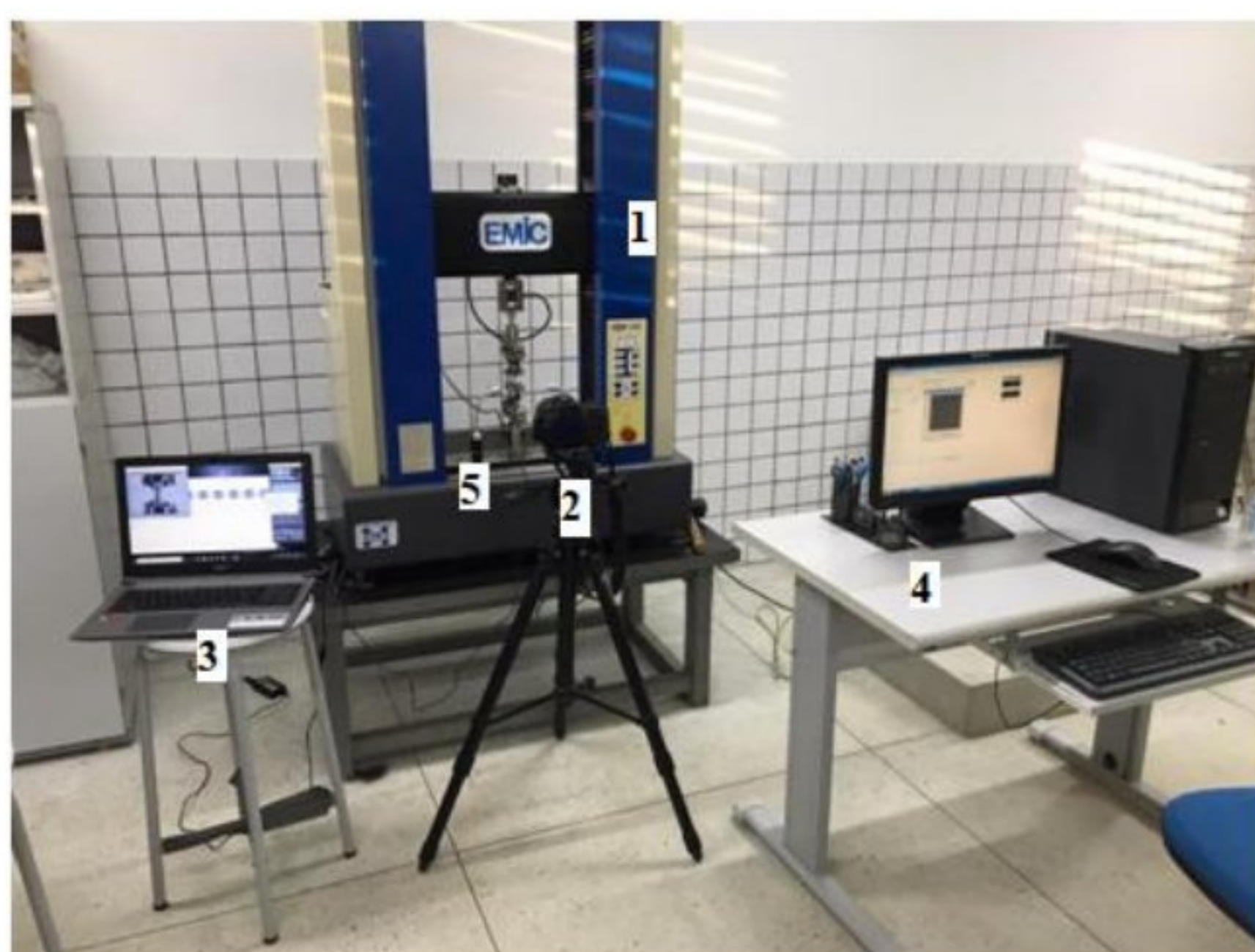
Fonte: Autoria própria.

Após as medições necessárias, os corpos de prova têm um de seus lados texturizados, que é a aplicação de uma camada forte de tinta preta e uma leve camada de branco na tentativa de obter uma tonalidade cinza com gotículas pequenas capazes de serem observadas pelas lentes da câmera utilizada, como demonstrando na Figura 12. Com a finalização e secagem da textura, o corpo de prova está pronto para ser fixado na máquina de ensaios universal de maneira que a parte pintada fique de frente para o usuário da máquina, onde vai ser posicionada a máquina fotográfica para aplicar a técnica da Correlação Digital de Imagens.

4.3. Correlação Digital de Imagens (CDI)

Para a parte de correlação de imagens, os instrumentos necessários foram uma câmera digital Canon EOS 60D com uma lente Canon Macro 100mm 1:2,8 em um tripé regulável, um notebook com entrada USB e capacidade para armazenamento de imagens, além de possuir o software EOS Utility. Para uma melhor adequação do nível de cinza, foram utilizadas luminárias de LED voltadas para o corpo de prova na máquina. É necessária a presença do computador para programar a captura de uma nova foto a cada 5 segundos e para armazenamento das fotos em tempo real.

Figura 13: Ensaio de microtração em andamento.



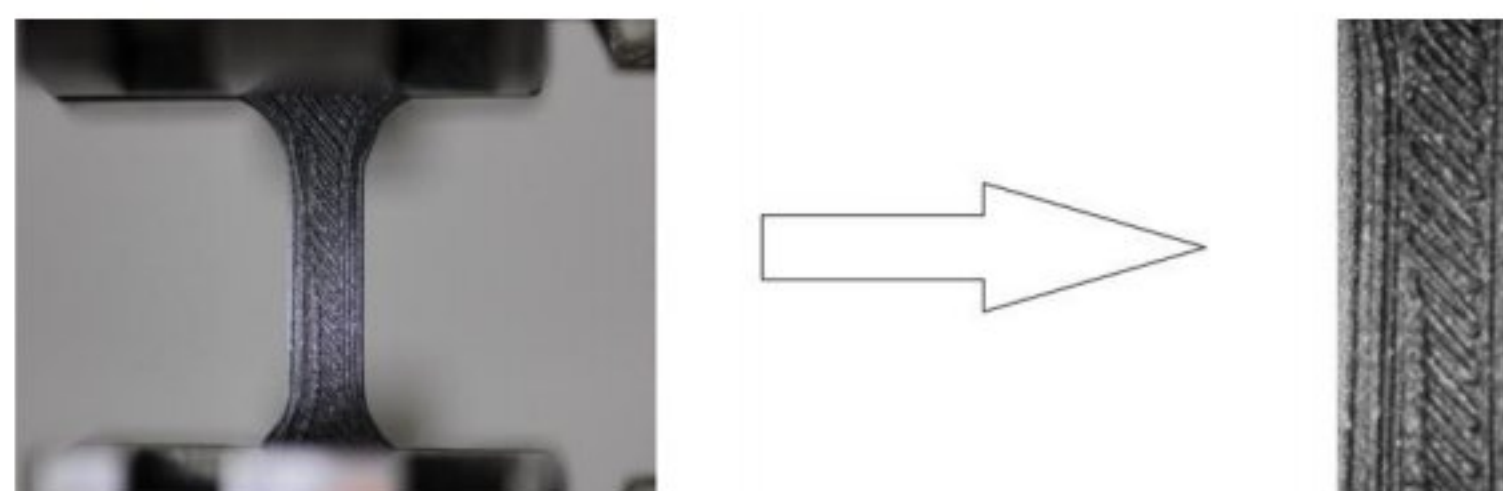
Legenda:

1. EMIC DT 10000
2. Câmera Canon EOS 60D, equipada com a Lente Canon Macro 100mm 1:2,8 em seu tripé.
3. Notebook
4. Computador Desktop
5. Luminárias de LED

Fonte: Autoria própria.

As imagens são cortadas de maneira a ficar apenas a parte comprimento útil do corpo de prova que está texturizado. Para isso utiliza-se outro algoritmo que corta todas as imagens de uma pasta, que no caso corresponde a um ensaio.

Figura 14: Processo de corte da imagem.



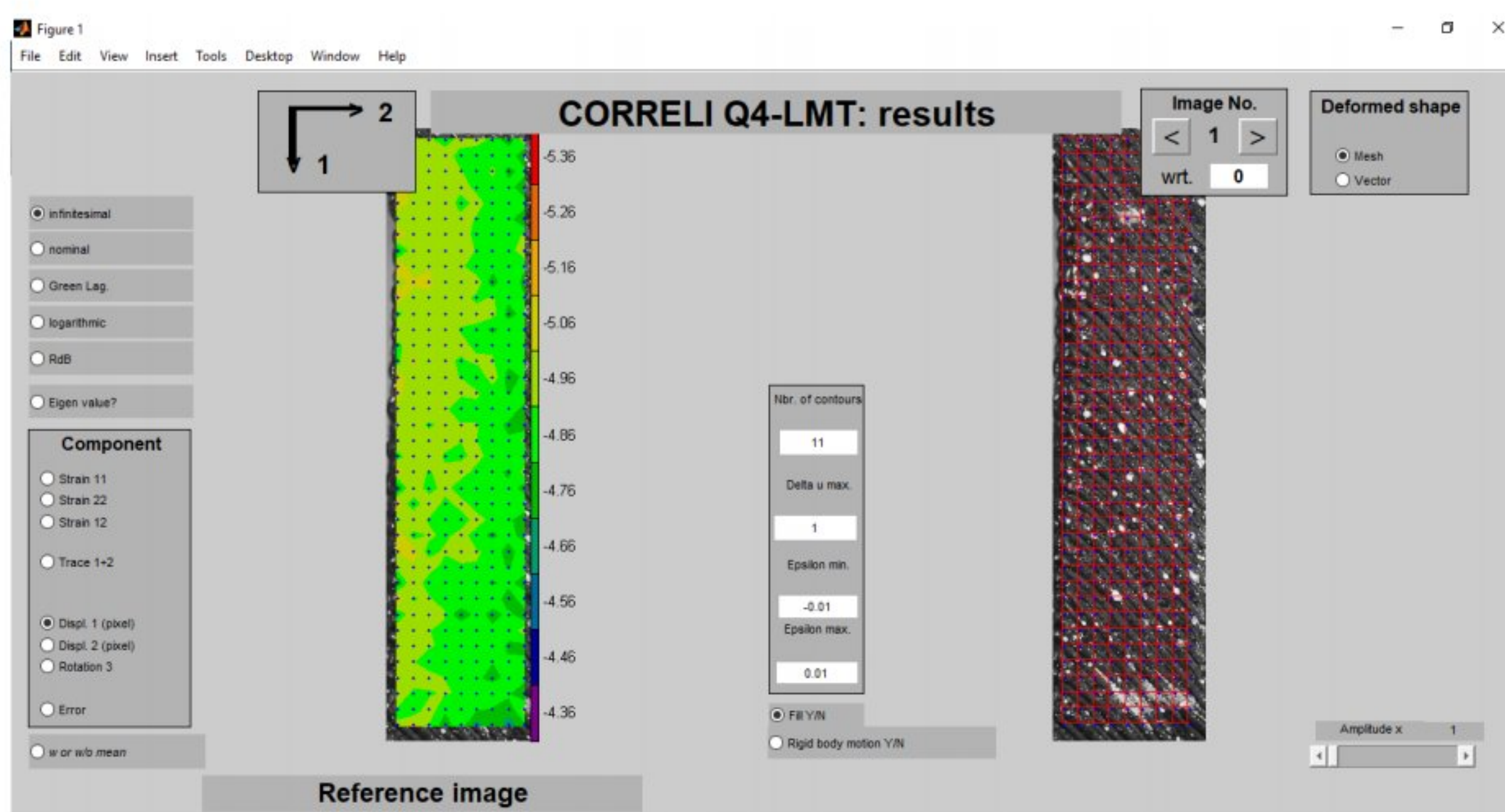
Fonte: Autoria própria.

Com as imagens cortadas, o próximo passo é utilizar o CORRELI_Q4 para fazer uma análise prévia das imagens, selecionando assim a Região de Interesse (ROI). Essa serve para se testar se a textura da peça está com qualidade, a quantidade de pixels (px) que cada Zona de Interesse (ZOI) vai ter e define o quão refinada serão as análises. Essas zonas geralmente é de 32px ou 64px. Como é de interesse do usuário que a análise seja da maior área possível do corpo de prova, o mesmo deve selecionar como ROI toda a imagem cortada.

Após decidir a ZOI mais adequada, é realizada a análise com a função *Computation Click*, onde são realizados os cálculos dos campos de deslocamento e deformação que o material sofre, sendo que é possível realizar uma escolha entre analisar todas as fotos em relação à primeira, imagem de referência, ou relacionar à foto a atual em comparação com a imediatamente anterior.

Por fim, o programa apresenta uma tela que é possível visualizar no plano as deformações e deslocamentos nas duas direções e a rotação.

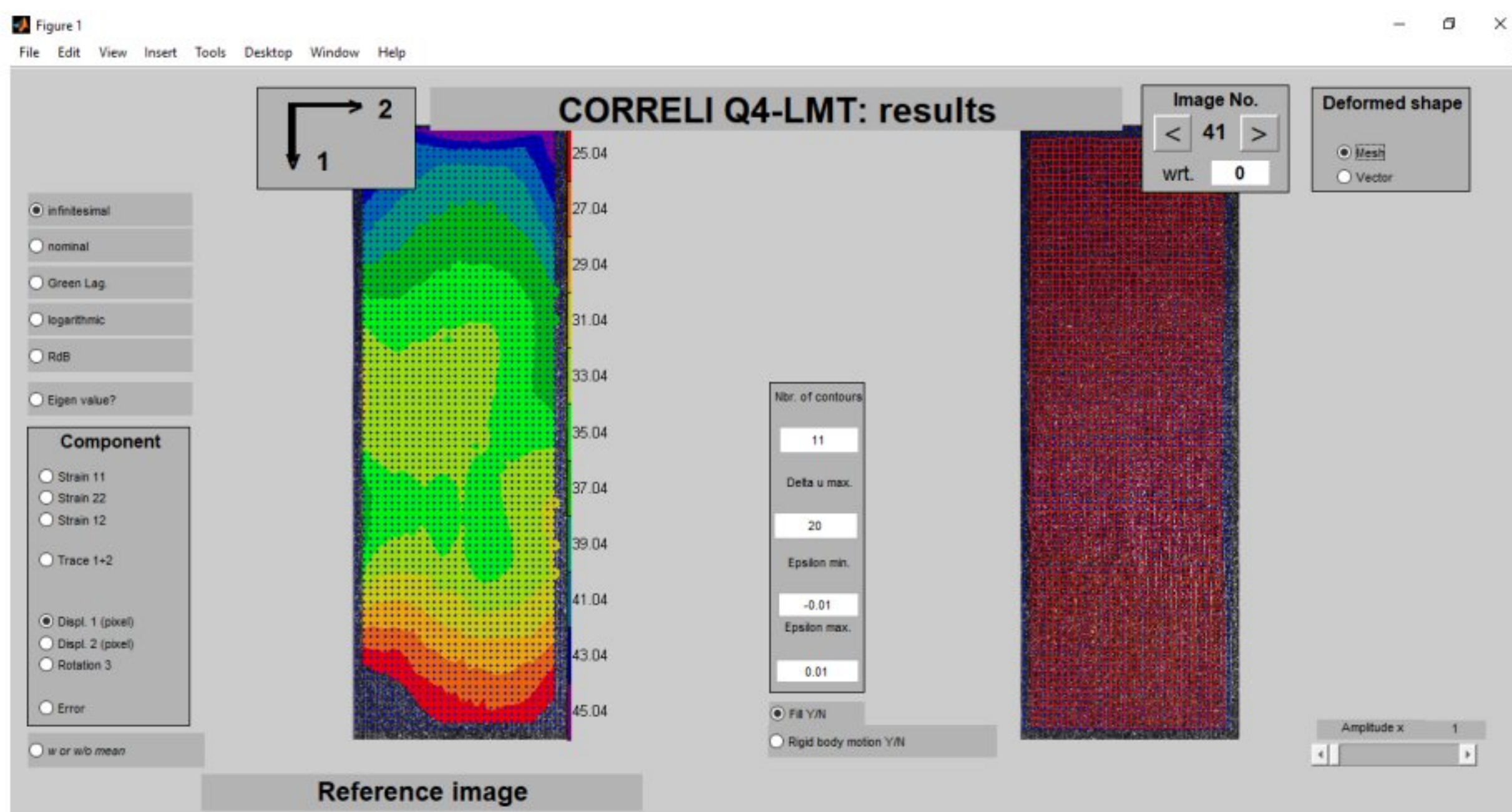
Figura 15: Resultado da análise do 1º Ensaio de Microtração.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 15, do lado direito tem-se umas linhas vermelhas sobre todo o corpo, essa é a malha de análise. Cada quadrado pequeno desse tem 32x32 pixels de dimensões, ou seja, essas foram as ZOI que foram atribuídas por toda a superfície útil do corpo de prova. Nesse menu da esquerda, pode-se escolher o modelo de cálculo e a apresentação de quais resultados: deslocamento (*Displ.*), deformação (*Strain*) ou rotação (*Rotation*), contando ainda com uma opção de analisar o mapa de erros sobre o cálculo realizado. O mapa de erros é dado em porcentagem.

Figura 16: Resultado da análise do 3º Ensaio de Compressão.



Fonte: Autoria própria.

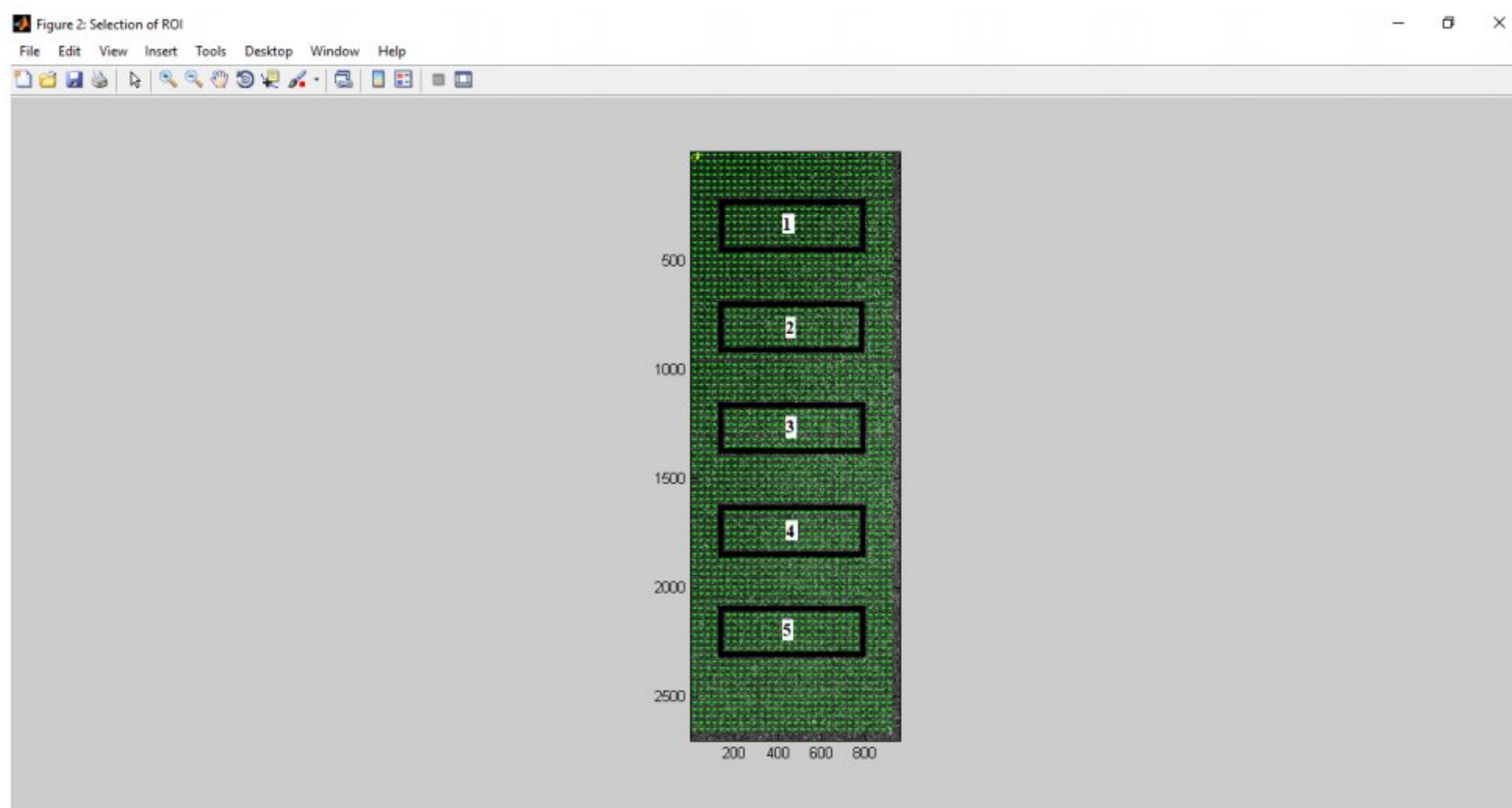
Na Figura 16, o corpo de prova tem uma largura bem superior à da Figura 14, com isso, a malha possui bem mais elementos no ensaio de compressão. No centro há um painel de controle das escalas de cores mostradas na imagem da esquerda, onde “delta u max” representa a variação de deslocamento que existe no corpo de prova, enquanto que os épsilon são as quantidades máximas e mínimas de deformação.

Nessa imagem tem-se uma escala de cores, onde cada faixa de cor é um nível de deslocamentos, valores dados em pixel. Portanto, é necessária a obtenção de um Fator de Conversão (F_c) de pixel para milímetros.

Para realizar as análises de deformação, faz-se necessária a definição de uma área específica para medição dos dados, de modo prático seria uma área de aplicação de um StrainGauge, que é um extensômetro capaz de medir deformações pontuais, contudo, no método de Correlação Digital de Imagens utiliza-se o Gauge óptico (sem contato). Trata-se de uma área da figura cortada onde a deformação será medida pontualmente e salva em um arquivo (.txt). A escolha do Gauge pode ser feita de forma a suprir as necessidades do usuário e analisar o máximo possível da área do material.

Para uma análise mais precisa, os Gauges de microtração escolhidos foram próximo à área de ruptura do material. Já para os ensaios de compressão, realizou-se a escolha de 5 Gauges distribuídos de forma simétrica sobre a superfície texturizada do material, para analisar o comportamento da deformação sobre toda a peça. Na Figura 17 é possível observar a interface de escolha do Gauge e a localização de cada um para os ensaios de compressão, sendo que todos os 5 corpos de prova foram analisados da mesma forma.

Figura 17: Escolha de Gauges para o 5º Ensaio de Compressão.



Fonte: Autoria própria.

A partir da escolha descrita na Figura 17 e com os valores de força fornecidos pela máquina de ensaios universal, obtém-se os dados necessários para utilizar no Excel e plotar os gráficos Tensão x Deformação. Com esses gráficos foi possível selecionar apenas os dados referentes à Zona Elástica do material e realizar o ajuste linear deles. Esse ajuste vai gerar uma equação da reta do tipo $Y(x) = A \cdot x + B$, onde o A é o valor do módulo de elasticidade do material em questão. Além da equação, também é gerado o coeficiente de determinação (R^2), que diz o quanto os dados estão coerentes com a regressão linear. Ele varia de 0 a 1, sendo que os melhores resultados estão em 0,97 a 0,99.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse tópico são apresentados os resultados para os dois tipos de ensaios e são identificados os parâmetros do comportamento mecânico do PLA.

5.1. Ensaio de Microtração

Para os ensaios de Microtração, denominou-se para cada amostra o código MT e o número do ensaio, por exemplo, MT1. Na Tabela 1 são apresentadas as dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração.

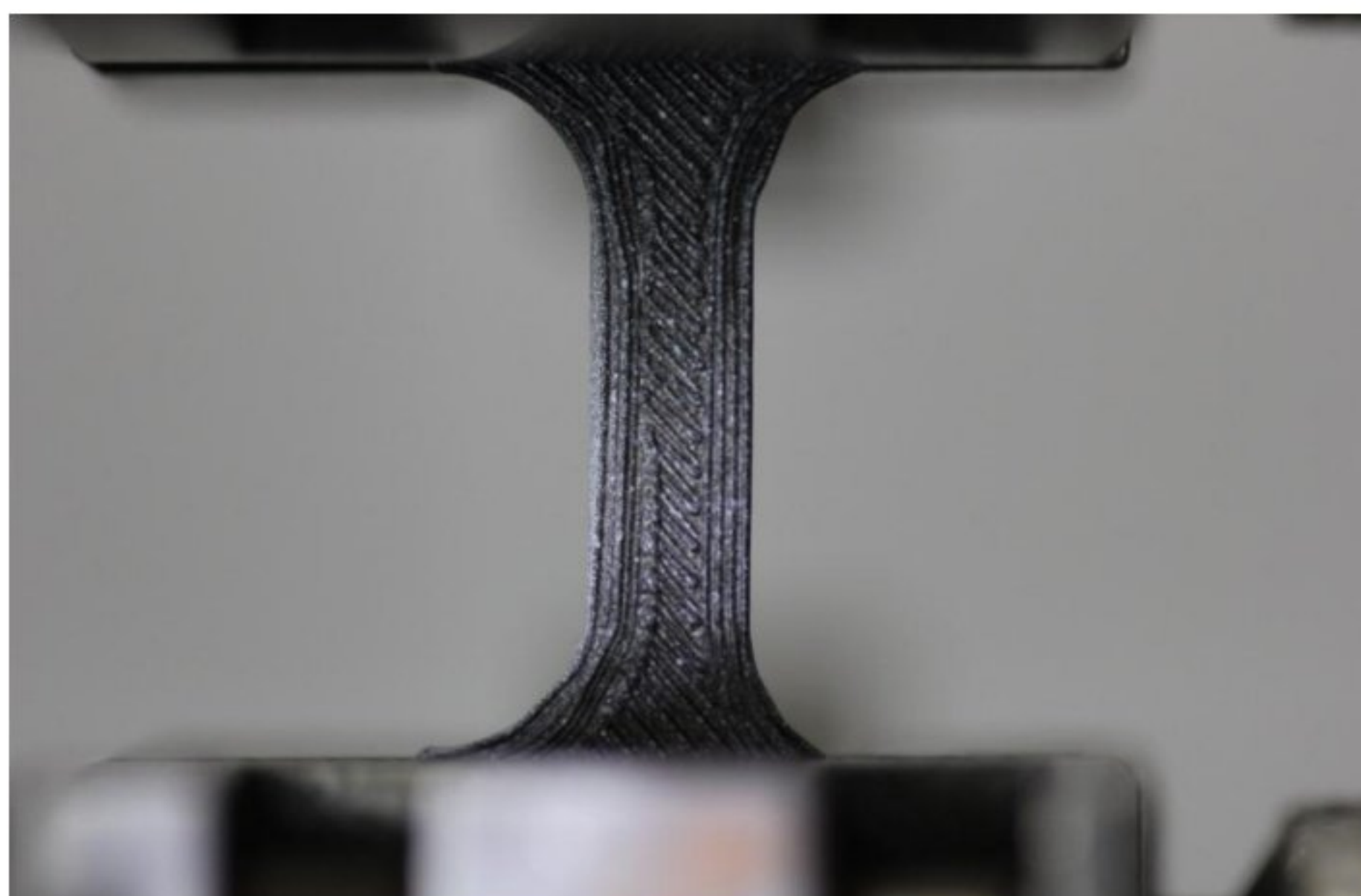
Tabela 1: Dimensões dos corpos de prova de Microtração.

	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5
Largura (mm)	5	5,5	5,15	5,05	5,25
Comprimento (mm)	38	38,6	38,05	37,9	38
Espessura (mm)	2,7	2	2,95	3,25	3,2
Área da Secção (mm²)	13,5	11	15,19	16,41	16,8
Tempo de ensaio (s)	190	225	245	235	140

Fonte: Autoria própria.

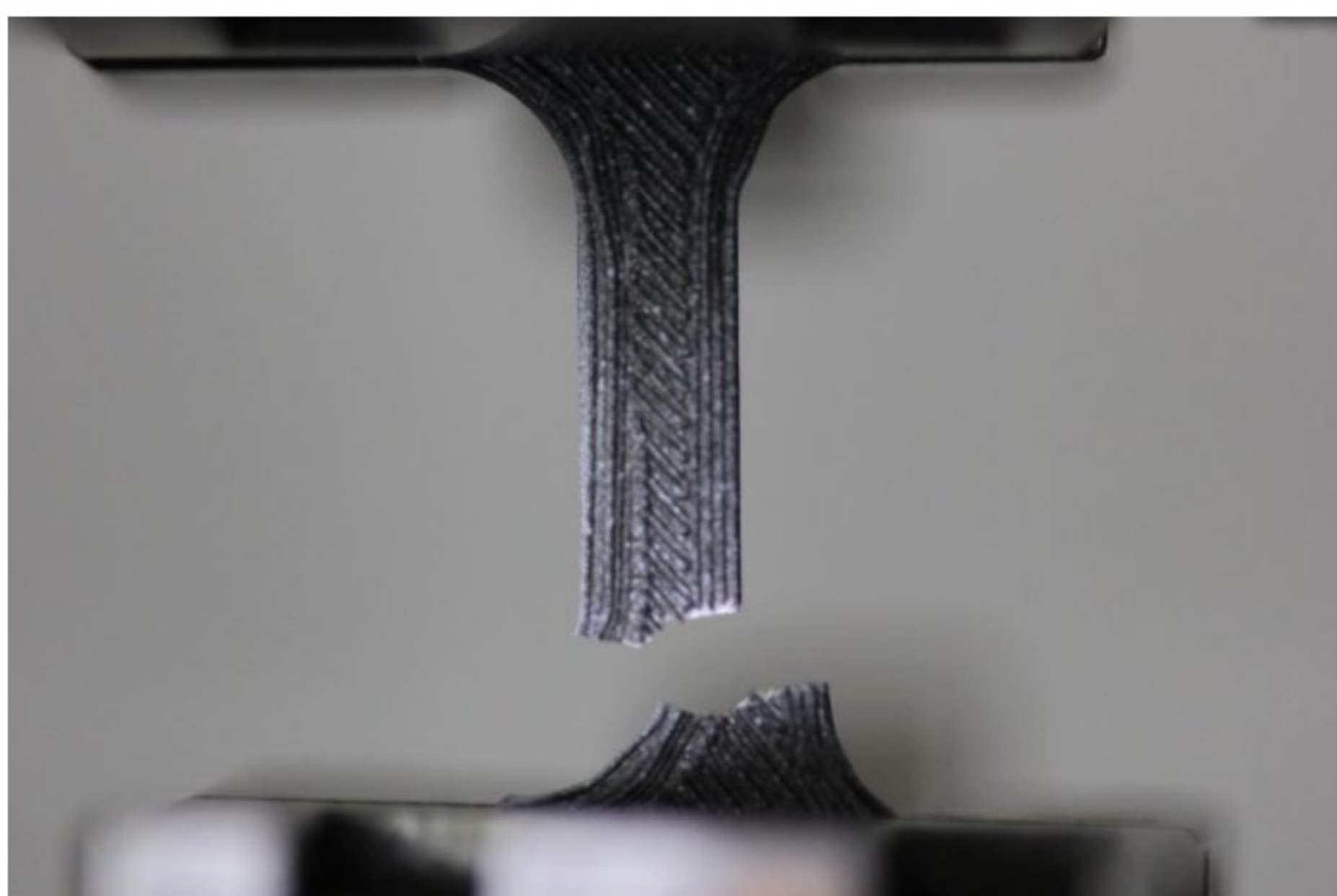
Todos os corpos de prova descritos na Tabela 1 chegaram ao rompimento e apresentam uma região de ruptura com características frágeis, o que já era esperado para esse material impresso em 3D, levando em consideração outros trabalhos que foram tomados como referencia. Nota-se isso pelo fato de não ter encurtamento da secção transversal (estricção) e as rupturas serem de forma brusca. A Figura 18 mostra as imagens anteriores à ruptura e a imagem da Figura 19 mostra a ruptura do material para o 3º ensaio realizado. O mesmo tipo de ruptura se aplica aos demais corpos de prova.

Figura 18: Imagem anterior à ruptura do material, no instante 140s.



Fonte: Autoria própria.

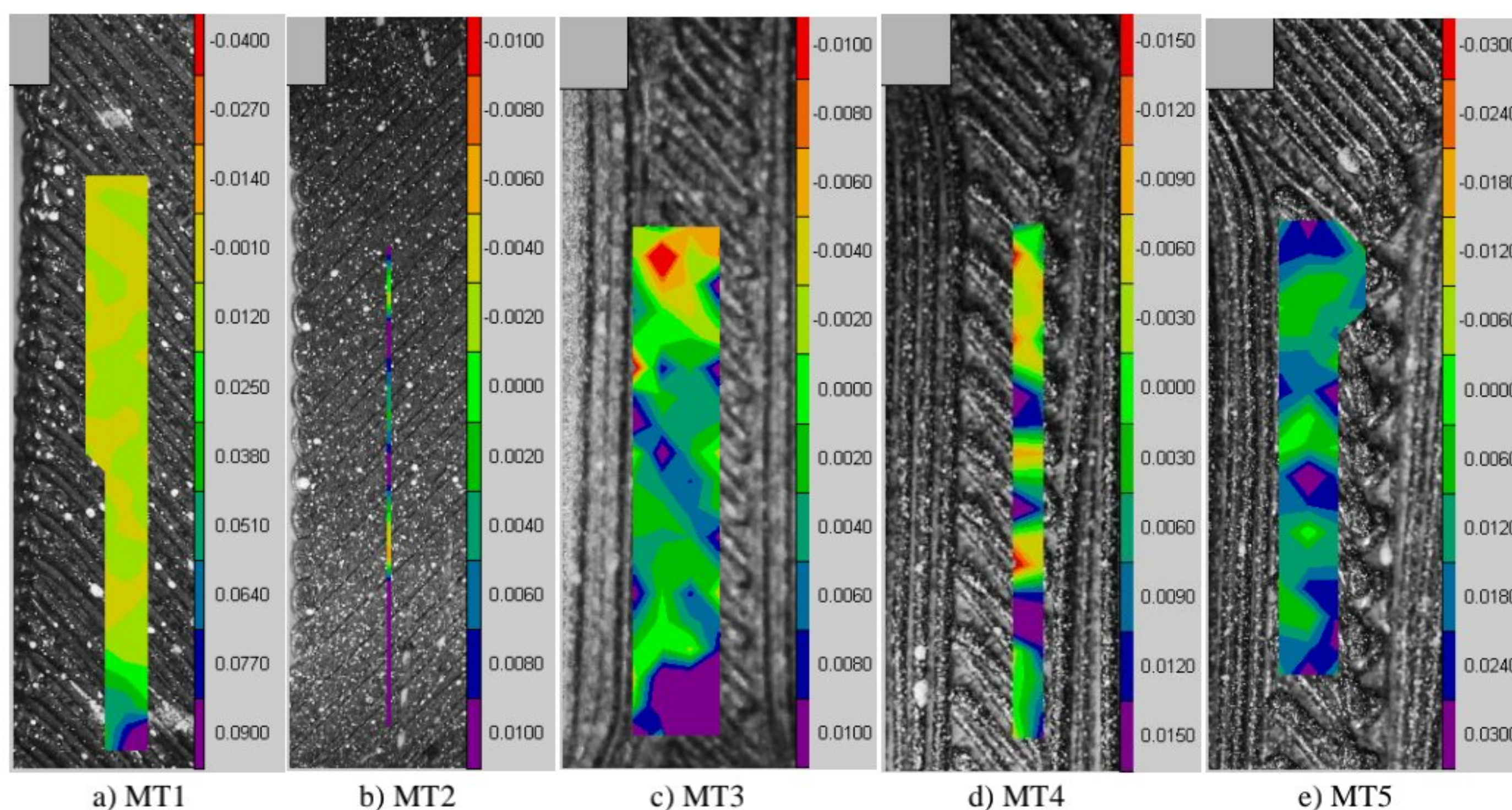
Figura 19: Imagem da ruptura do material, no instante 145s.



Fonte: Autoria própria.

O fato de a ruptura ter saído da região central da amostra não afeta a análise da mesma, ação que poderia tornar o ensaio descartado em outros métodos de análise de extensometria, essa é mais um das vantagens do método de Correlação Digital de Imagens e o que o torna mais viável para utilização nesse trabalho. A partir da análise desenvolvida no MATLAB, os resultados de campos de deformação nos corpos de prova são apresentados na Figura 20.

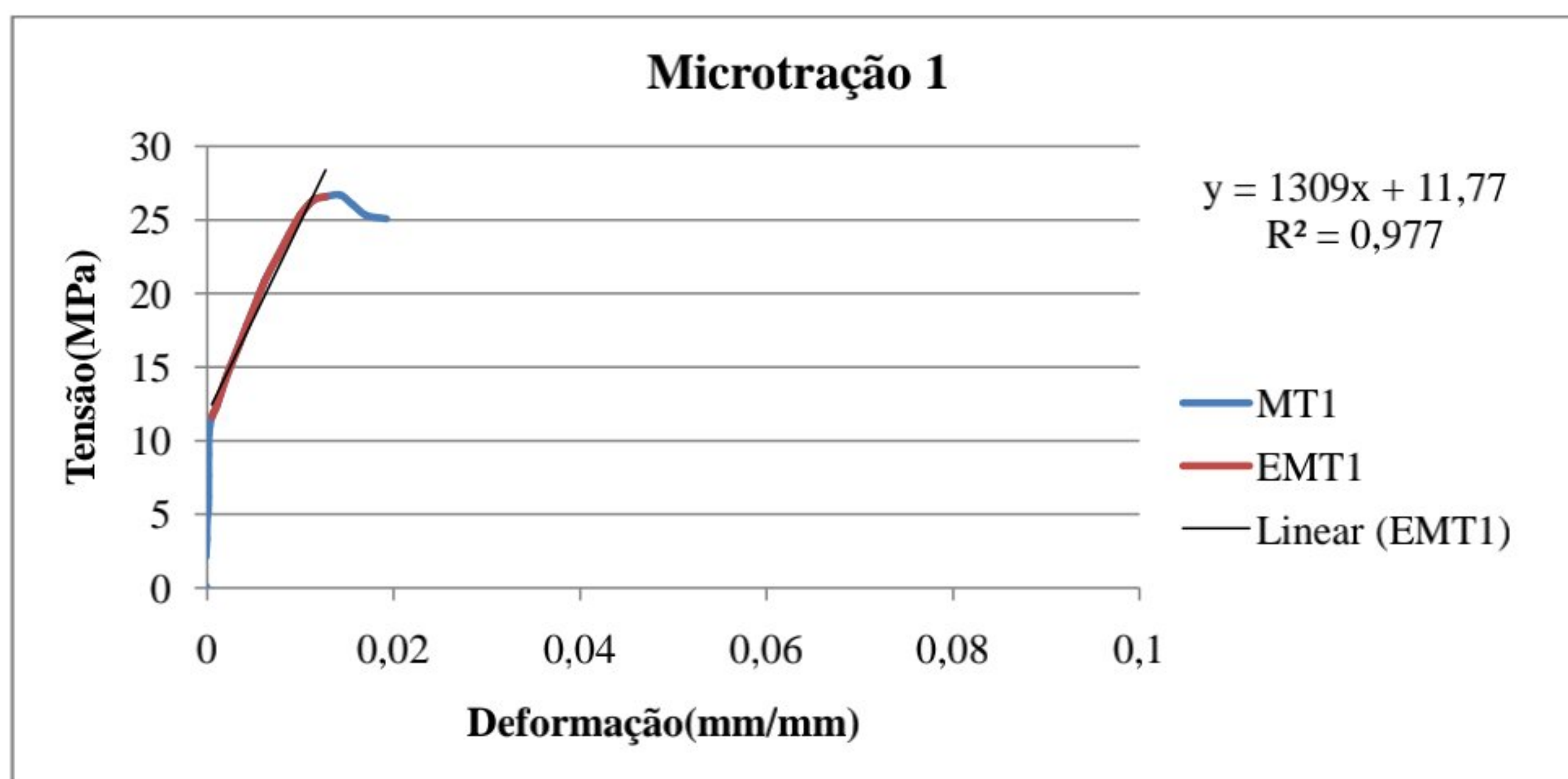
Figura 20: Resultado dos Corpos de Microtração.



Fonte: Autoria própria.

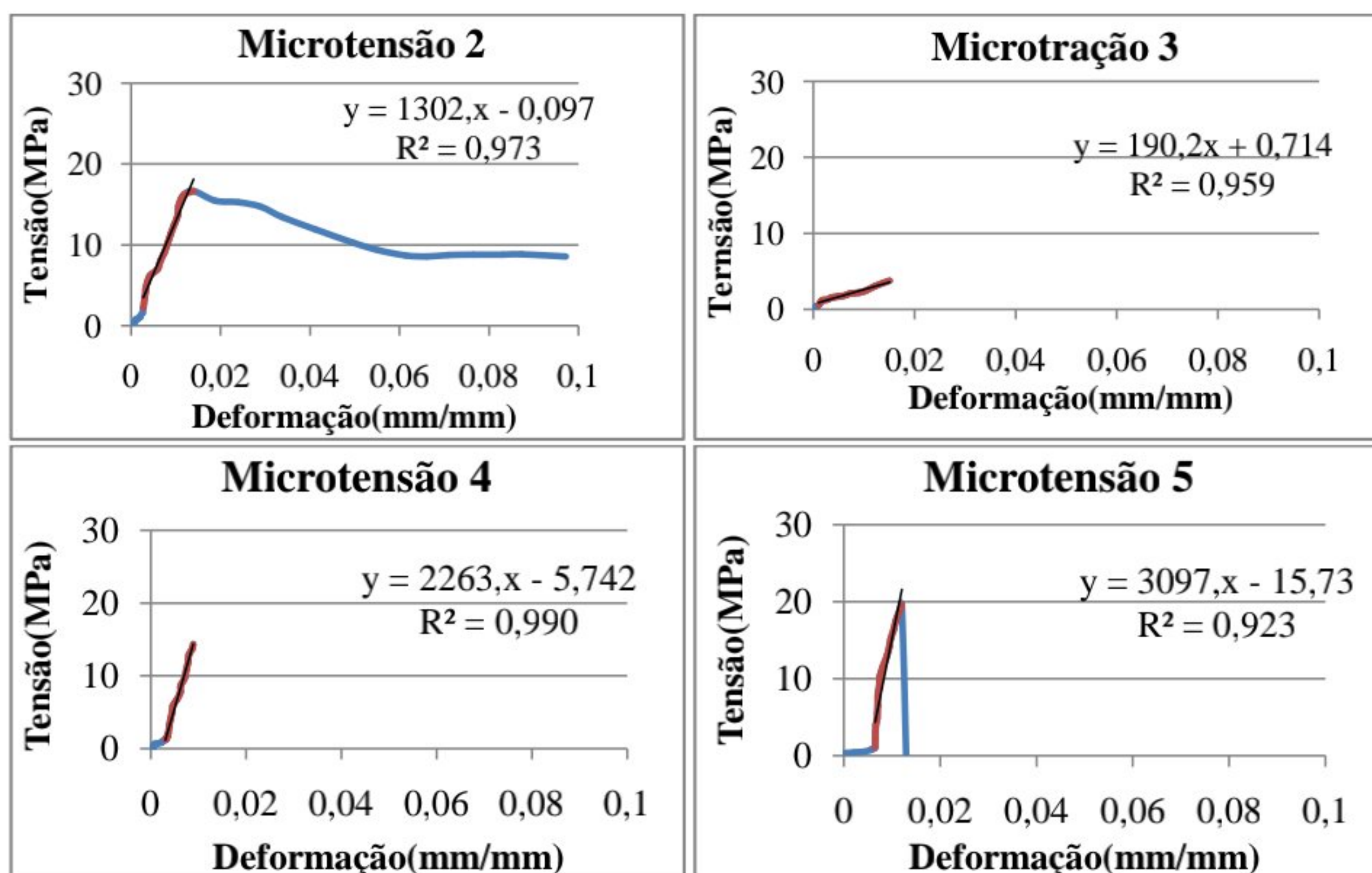
Cada corpo de prova apresenta campos de deformações de diferentes espessuras, sendo que essa dimensão de resultado é obtida pelo fato do corpo se deslocar durante o ensaio e a escolha de ZOI (32x32 px) ser grande para a largura do corpo de prova. A Figura 21 mostra o gráfico de tensão x deformação do 1º ensaio de Microtração, onde os dados de tensão são provenientes da máquina e os de deformação são obtidos pelo Gauge Óptico. A linha de tonalidade vermelha mostra a Zona Elástica, que foi chamada de EMT1, para o ensaio em questão.

Figura 21: Tensão x Deformação Gauge em MT1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 22: Tensão x Deformação Gauge em MT2, MT3, MT4 e MT5, sucessivamente.



Na Figura 22 o melhor coeficiente de ajuste linear é apresentado no 4º ensaio (Microtração 4), e o seu módulo de elasticidade é de 2,26 GPa, algo bem próximo do que foi encontrado em estudos realizados por outros pesquisadores. Também é válido destacar que não houve pré-carga na máquina, então é normal o gráfico apresentar um pequeno ajuste antes de começar a zona elástica.

Com base nos gráficos obtidos, nota-se que para corpos de prova bem parecidos, em ensaios realizados sob as mesmas circunstâncias, os resultados podem sair diferentes de acordo com a impressão particular de cada corpo. Contudo ainda é possível observar que apenas o MT3, que não apresentava falhas visíveis, teve uma ruptura muito acentuada e deu um valor extremamente baixo, cerca de 10x menor que os demais, sendo assim desconsiderado para efeitos de cálculo. Para o resultado final, realizou-se um cálculo médio a respeito do módulo de elasticidade e tensões que a Microtração obteve. A Tabela 2 apresenta todos esses resultados.

Tabela 2: Dados referentes aos ensaios de microtração.

	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5	Média	Desvio padrão
Módulo de Elasticidade (MPa)	1309	1302	190,2	2263	3097	1992,75	863,53
Tensão de Escoamento (MPa)	26,57	16,65	3,78	14,33	19,63	19,295	5,313
Tensão Máxima (MPa)	26,69	16,65	3,78	14,33	19,63	19,325	5,367
Tensão de Ruptura (MPa)	25,07	8,55	3,780	14,33	19,63	16,895	7,083

Fonte: Autoria própria.

Ao final desses ensaios, obteve-se um módulo de elasticidade de 1,99 GPa, com um desvio padrão de 863,53 MPa que pode ser considerado relativamente alto, esse resultado foi obtido com a retirada do ensaio 3 pelo motivo já citado. Se a pesquisa for aprimorada com a implantação de um estudo mais específico acerca dos mais diversos tipos de impressão existentes e controle de seus parâmetros, acredita-se que se poderá obter melhores resultados, porém o valor obtido é semelhante ao que foi apresentado por Dantas (2019).

Com base nos dados da Tabela 2, o material é interessante para aplicação em casos onde o esforço máximo submetido à peça esteja próximo a 15 MPa, devido a média da tensão de escoamento apresentada pelas amostras ter sido de 19,295 MPa.

O tipo de deposição das camadas do material pode afetar principalmente no módulo de elasticidade, pois há maneiras de deixar a orientação das fibras dele na direção do carregamento axial e verificar se efetivamente há melhora na rigidez. Um estudo da impressão em diversas direções é interessante para saber se há anisotropia no material.

Para esses ensaios as imagens foram cortadas padronizadas em 300x1200 pixel, então para o fator de conversão utiliza-se a seguinte formula:

$$Fc = \frac{\text{Largura do CP}}{300}$$

Tabela 3: Fator de conversão para Microtração.

	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5
Fator de Conversão (mm/px)	0,0166	0,0183	0,0172	0,0168	0,0175

Fonte: Autoria própria.

5.2. Ensaio de Compressão

Para os ensaios de compressão os corpos de provas ficaram com suas dimensões mais próximas umas das outras e foi medido o demonstrado na Tabela 4. Devido à impressão, uma lateral da peça possui uma qualidade bem superior as demais, então se fez a escolha dessa face para texturização e ser a superfície útil analisável.

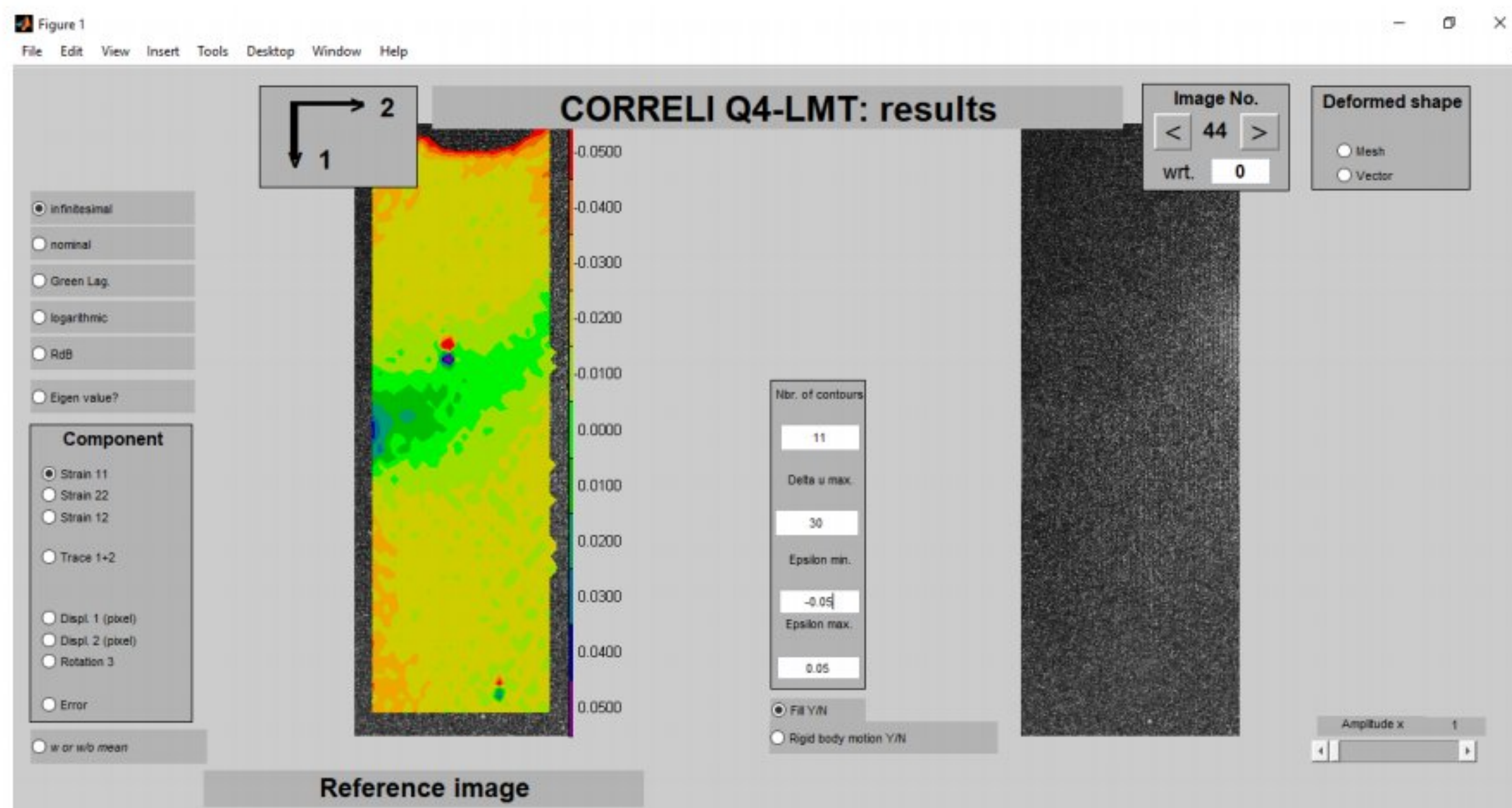
Tabela 4: Dimensões dos corpos de prova de Compressão.

	C1	C2	C3	C4	C5
Largura (mm)	18,45	18,5	20	20	20
Profundidade (mm)	20	20	18,25	18,55	18,6
Altura (mm)	59,8	59,65	59,9	59,7	59,4
Área da Secção (mm²)	369	370	365	371	372
Tempo de ensaio (s)	145	95	205	120	220

Fonte: Autoria própria.

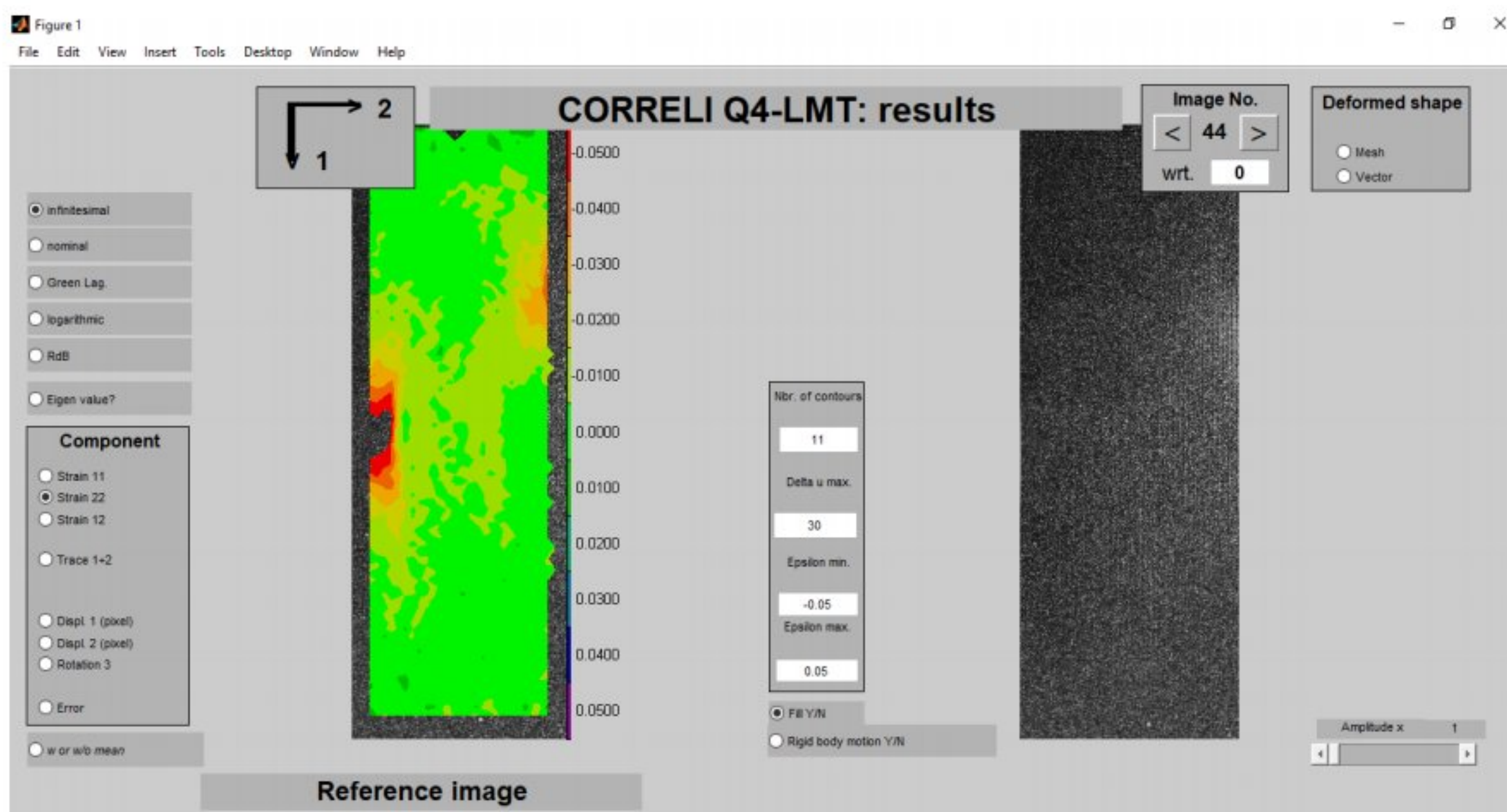
Os resultados obtidos no MATLAB estão descritos a seguir e se repete para todos os demais corpos de prova.

Figura 23: Campos de Deformação na direção 11 do ensaio C5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Campos de Deformação na direção 22 do ensaio C5.

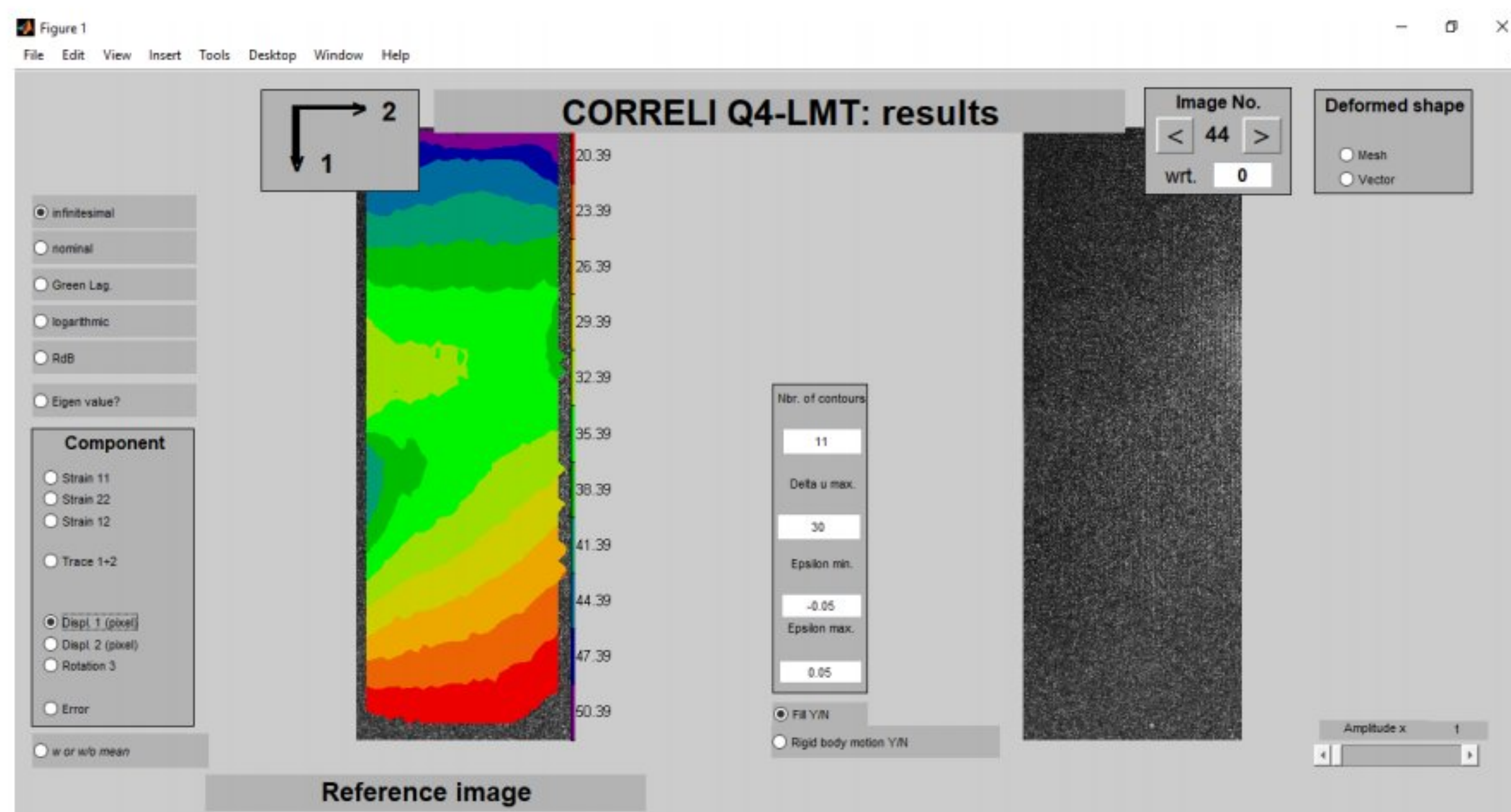


Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 apresenta ao longo da maior (tom bege claro) parte do corpo de prova uma deformação negativa (de compressão) de 3%, em alguns trechos nas extremidades de 4% (bege mais escuro). Apresenta também um trecho verde com deformação zero e um pequeno trecho à esquerda ao meio com deformações positivas, que podem ser atribuídos a defeitos na impressão, como lacunas e ausência de material, uma vez que os campos de deformação são medidos apenas da superfície do corpo de prova e não do seu interior. A deformação na direção 22 (Figura 24) não teve o comportamento padrão nos ensaios de compressão de tracionar suas laterais. Nesse caso há uma deformação negativa nas

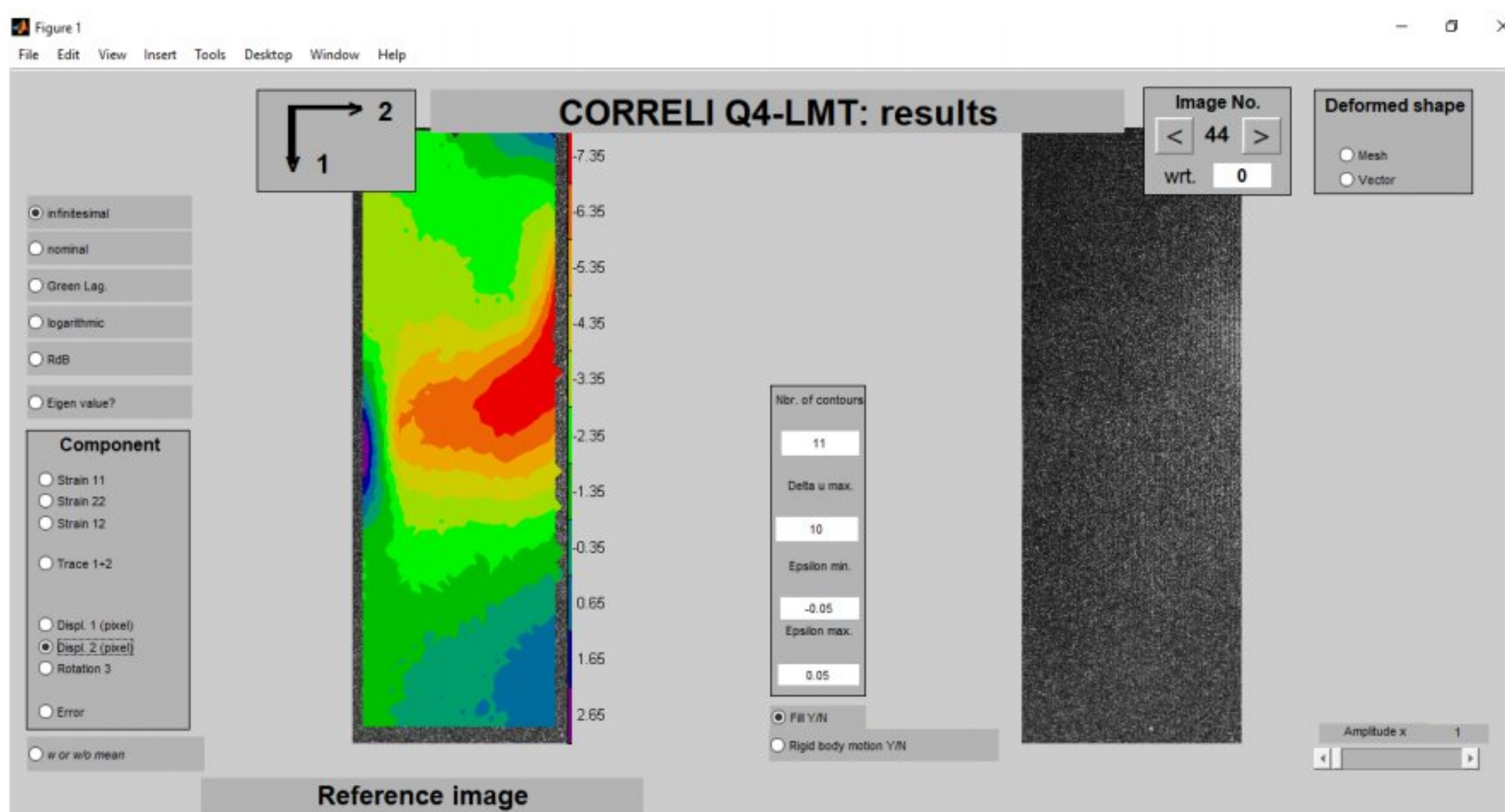
extremidades e em alguns trechos no meio da superfície útil correspondendo a 1% e grande parte do corpo de prova em verde com deformação zero.

Figura 25: Campo de deslocamentos na direção 1 do ensaio C5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26: Campo de deslocamentos na direção 2 do ensaio C5.

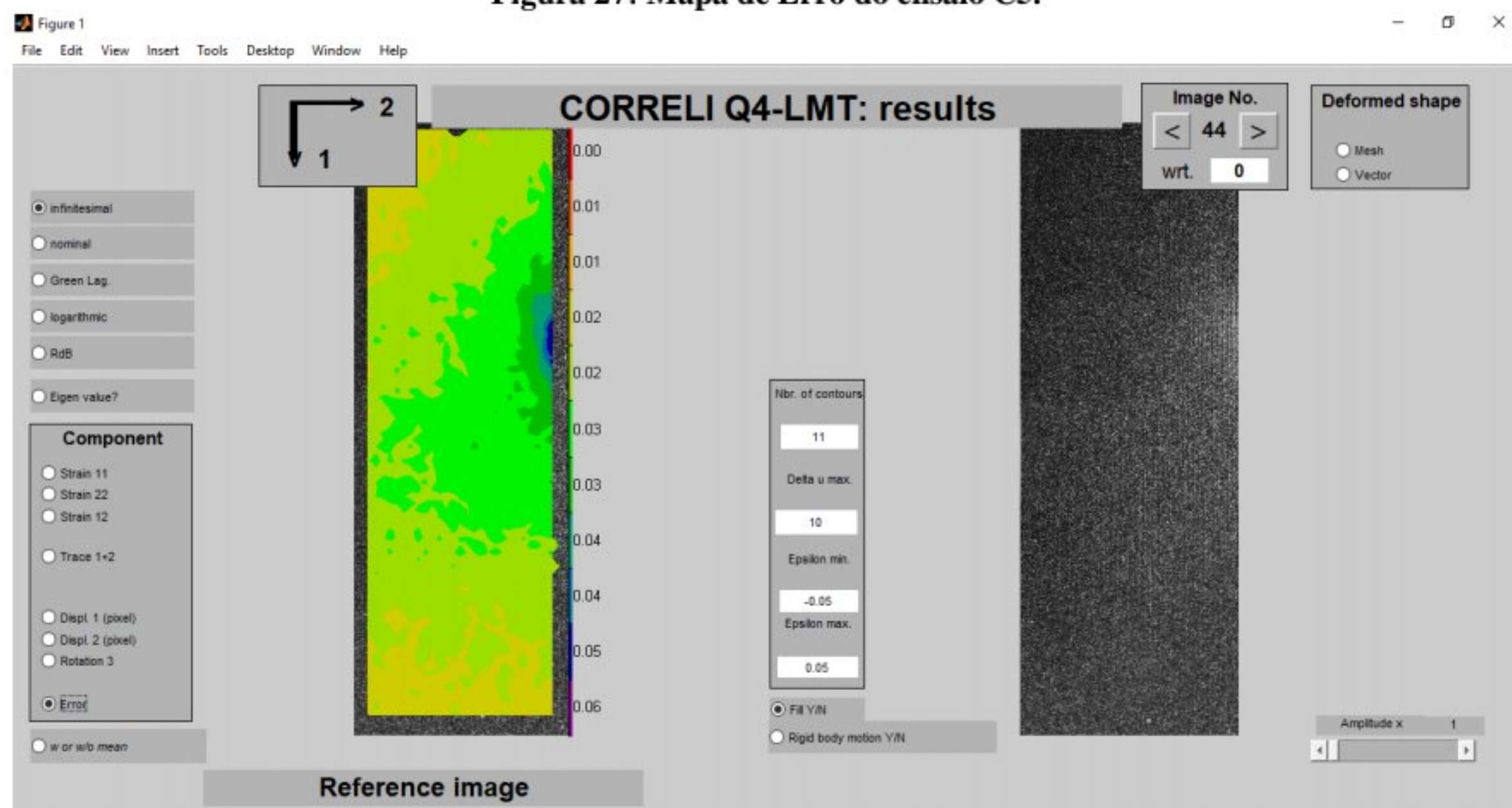


Fonte: Autoria própria.

Com relação aos dados de campos de deslocamento, na direção 1 o corpo de prova desloca-se bastante na parte superior, o que é normal pois a travessa móvel é a superior. Os níveis de deslocamento estão bem definidos e apresentam uma variação de 3px entre eles. Se aplicar o fator de conversão, tem-se aproximadamente 0,0624mm entre cada nível. O valor máximo de deformação encontrado foi de 50,39px ou 1,05mm. E na Figura 26 os campos mostram que o corpo apresenta flambagem da direita para a esquerda, e

apenas uma pequena parte, em roxo, situada na lateral esquerda se desloca para o lado direito da peça.

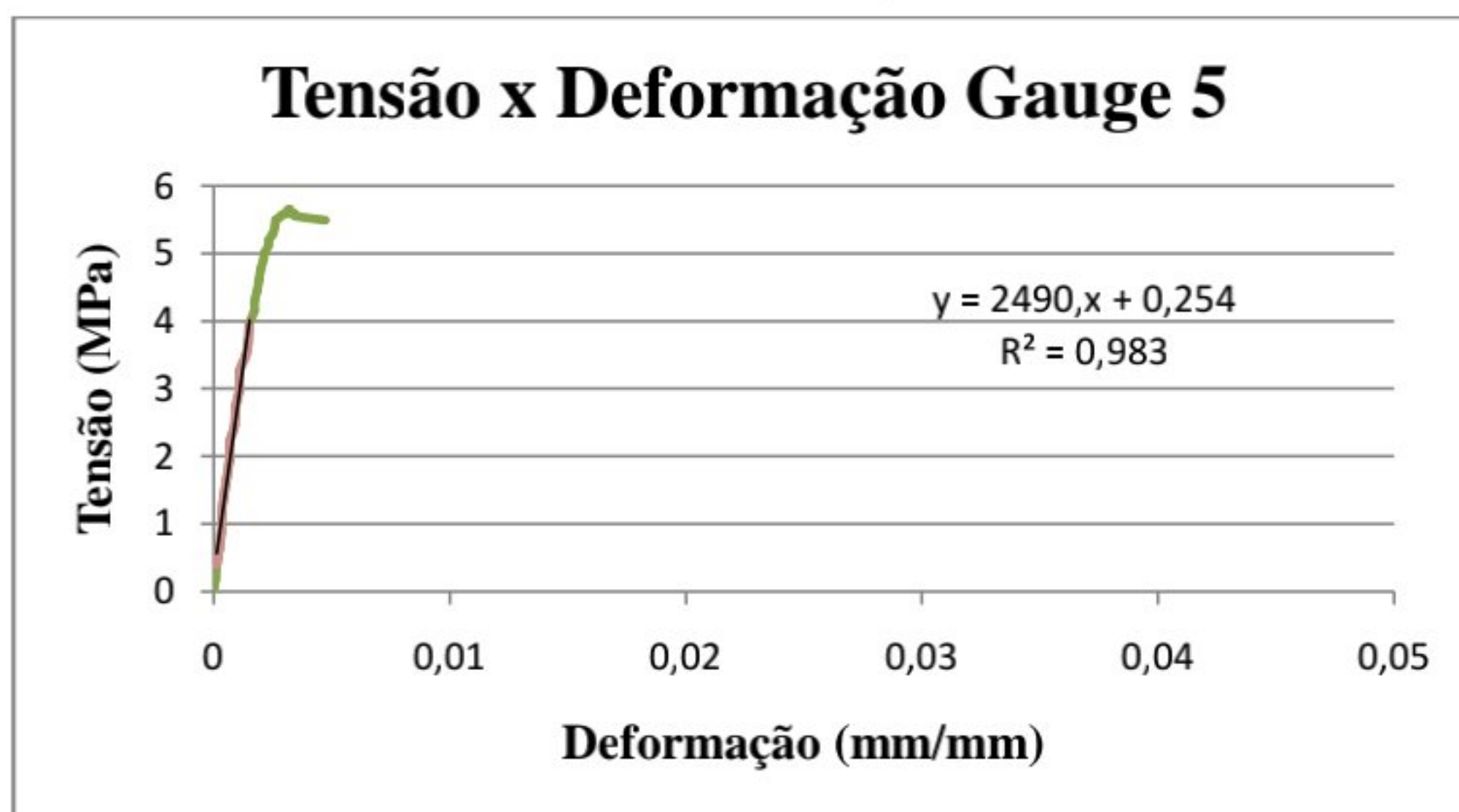
Figura 27: Mapa de Erro do ensaio C5.



Fonte: Autoria própria.

O algoritmo também disponibiliza um Mapa de Erros, referente à porcentagem de erro apresentada em cada região do corpo de prova. A Figura 27 apresenta o erro relacionado à análise realizada no corpo de prova 5, onde ele apresentou um campo de erros maior na faixa de 2% a 3%, essa faixa foi demonstrada da mesma forma para os demais.

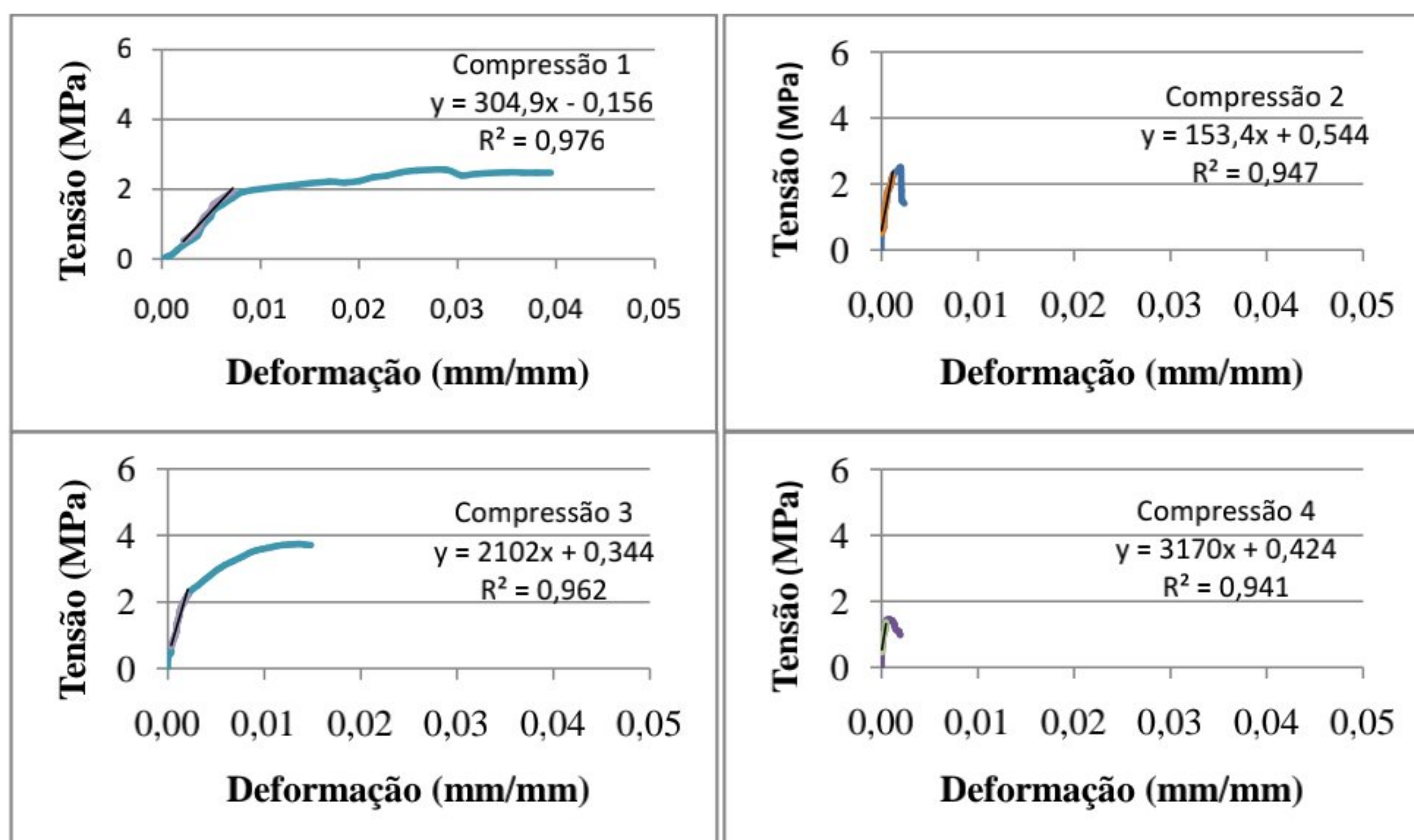
Figura 28: Gráfico de Tensão x Deformação Gauge no ensaio C5.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 apresenta o gráfico obtido com os resultados da análise da região central da peça, que é onde os dados apresentam um melhor ajuste linear, e com a linearização temos o valor de 2,49 GPa de módulo de elasticidade.

Figura 29: Tensão x Deformação Gauge em Compressão 1, 2, 3 e 4, sucessivamente.

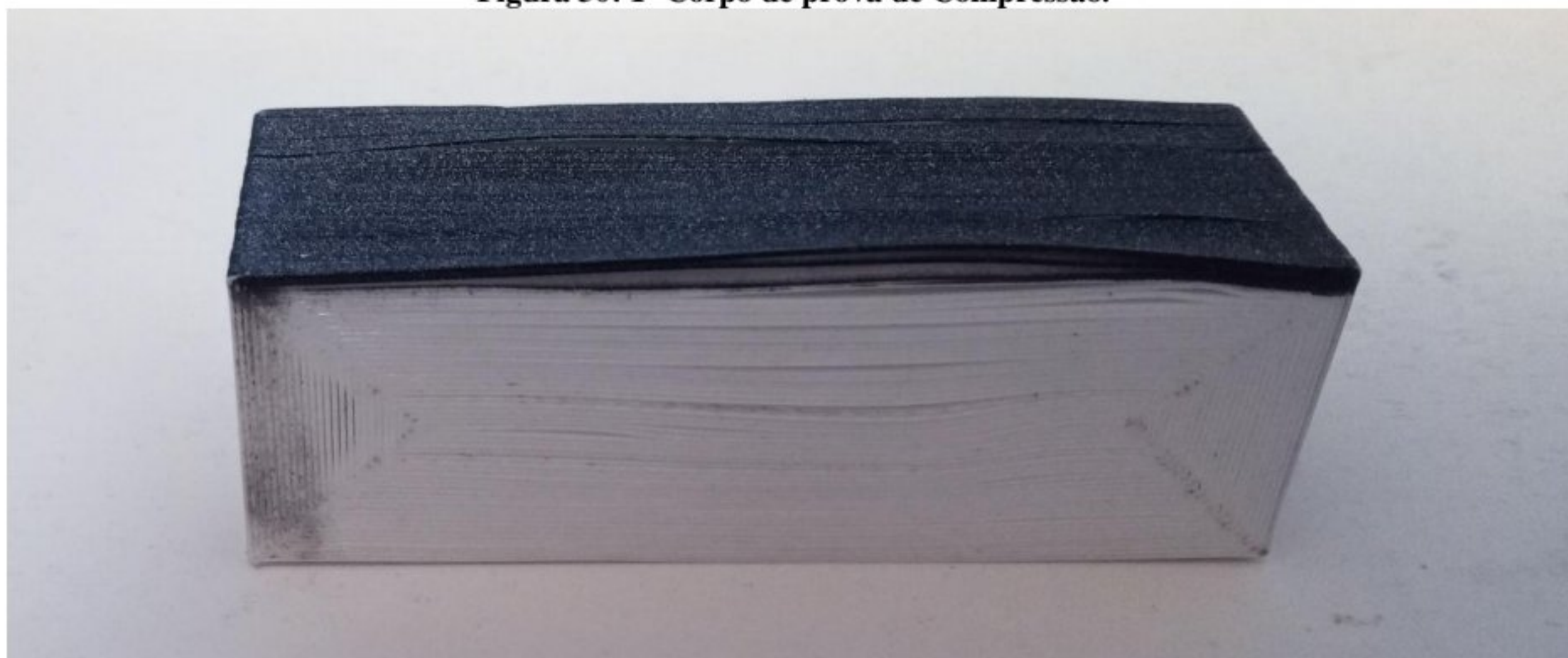


Fonte: Autoria própria.

A Figura 29 mostra os demais gráficos dos ensaios de compressão, onde os dois primeiros apresentam valores bem abaixo dos demais, e não devem ser levados em conta para os cálculos de módulo de elasticidade médio e o desvio padrão.

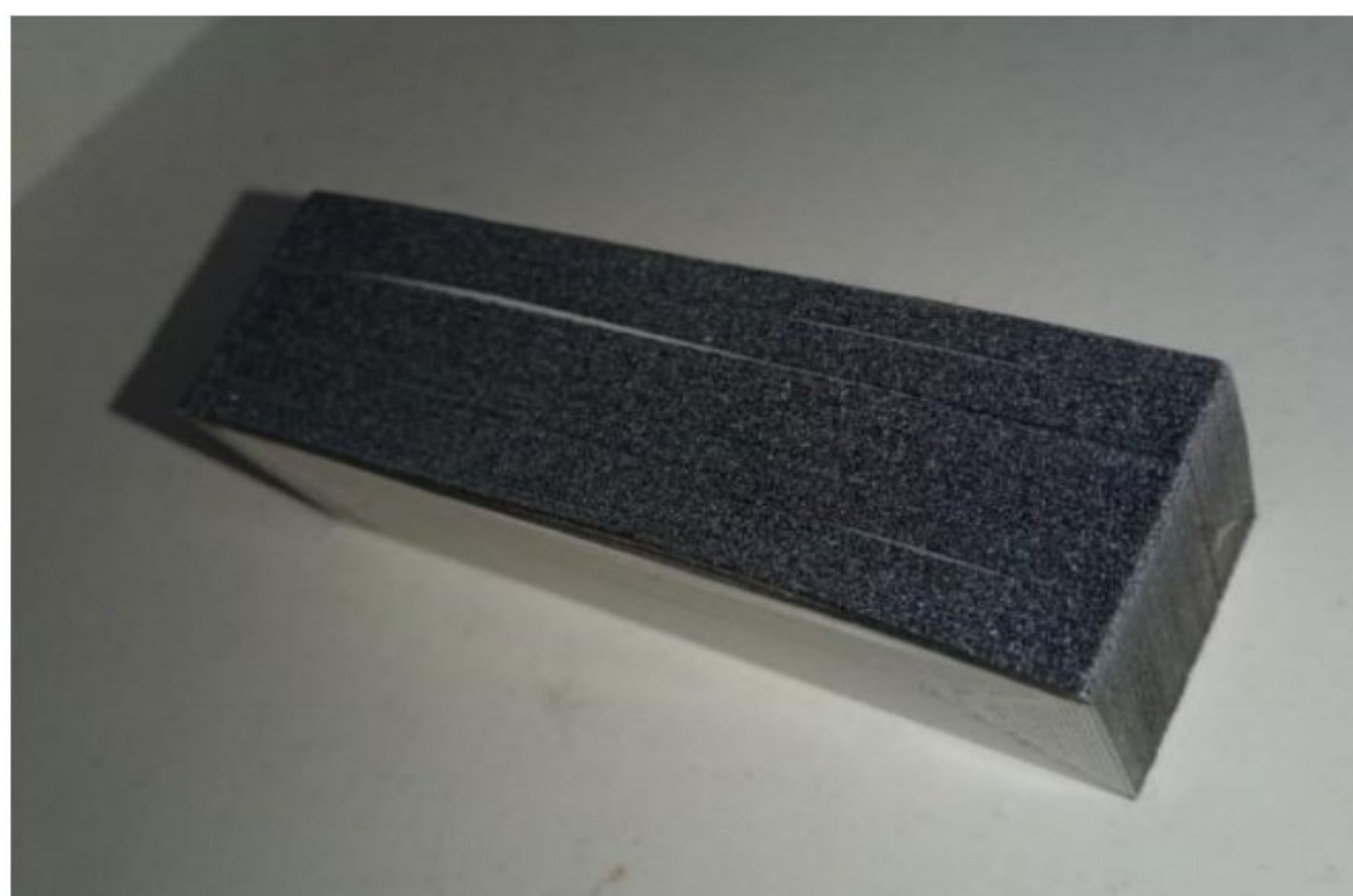
As Figura 30 e 31 mostram o corpo de prova 1 e 2, sucessivamente. Após os ensaios são observadas as fibras soltas por todo o material, demonstrando a necessidade de um estudo a mais sobre os parâmetros de impressão 3D, como o parâmetro de velocidade de impressão e temperatura afetam a junção das camadas e as propriedades mecânicas do material. Provavelmente os defeitos estão relacionados aos erros encontrados graficamente, pois eles afetam diretamente nas propriedades do material.

Figura 30: 1º Corpo de prova de Compressão.



Fonte: Autoria própria.

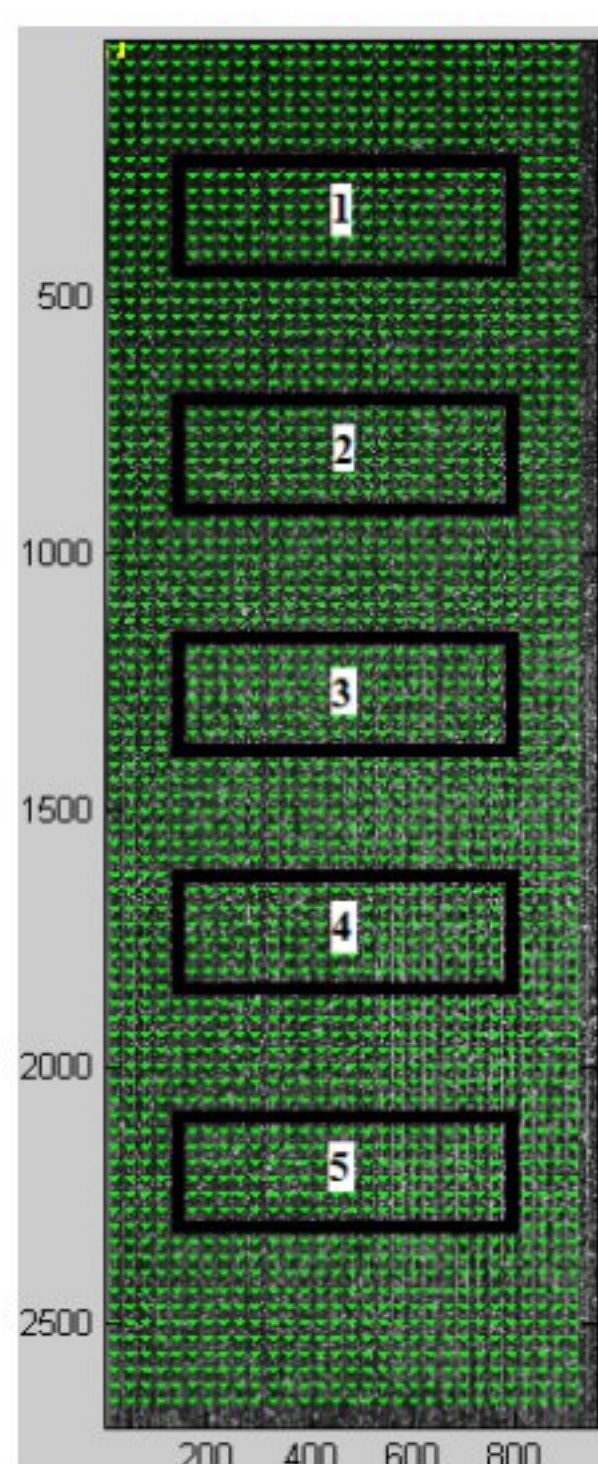
Figura 31: 2º Corpo de prova de Compressão.



Fonte: Autoria própria.

Já nos ensaios de número 3, 4 e 5, os resultados que foram obtidos são satisfatórios e mais próximos entre si. Porém, cada gráfico tem sua peculiaridade. O ensaio 3 possui ajustes de qualidade e uns valores de módulo de elasticidade coerentes, tendo sua média obtida pelos Gauges centrais (EG2, EG3 e EG4) de 2,10 GPa e um desvio padrão de aproximadamente 209,87 MPa. A localização desses Gauges está descrita na Figura 32.

Figura 32: Localização dos Gauges no 5º ensaio de compressão.



Fonte: Autoria própria.

No ensaio 4, mesmo não possuindo valores excelentes de ajuste linear, os seus Gauges possuem gráficos bem semelhantes, demonstrando assim uma uniformidade com

que o material foi sobreposto durante a impressão nesse corpo de prova. Ao realizar uma média com os Gauges EG4 e EG5, que são os de melhor ajuste e valores menos destoantes, obtém-se os seguintes resultados, 3,17 GPa de módulo de elasticidade e 1,84 GPa de desvio padrão, o que chega a ser um valor elevado de desvio.

Já para o ensaio 5, todos os valores de coeficiente de ajuste variam de 0,97 a 0,99. É um gráfico em que todos os dados são levados em consideração e utilizados para a média, então os resultados obtidos para módulo de elasticidade e seu desvio padrão é 1,37 GPa $\pm$ 0,654 MPa.

Na Tabela 5 apresentam-se de forma geral os valores de módulo de elasticidade obtidos para os ensaios de compressão e a média já levando em consideração a retirada dos dados discrepantes apresentados em C1 e C2, onde o parâmetro escolhido para a retirada dos mesmos foi os valores serem inferior a 1 GPa, valor mínimo atingindo pelos outros corpos de prova e no ensaio de Microtração.

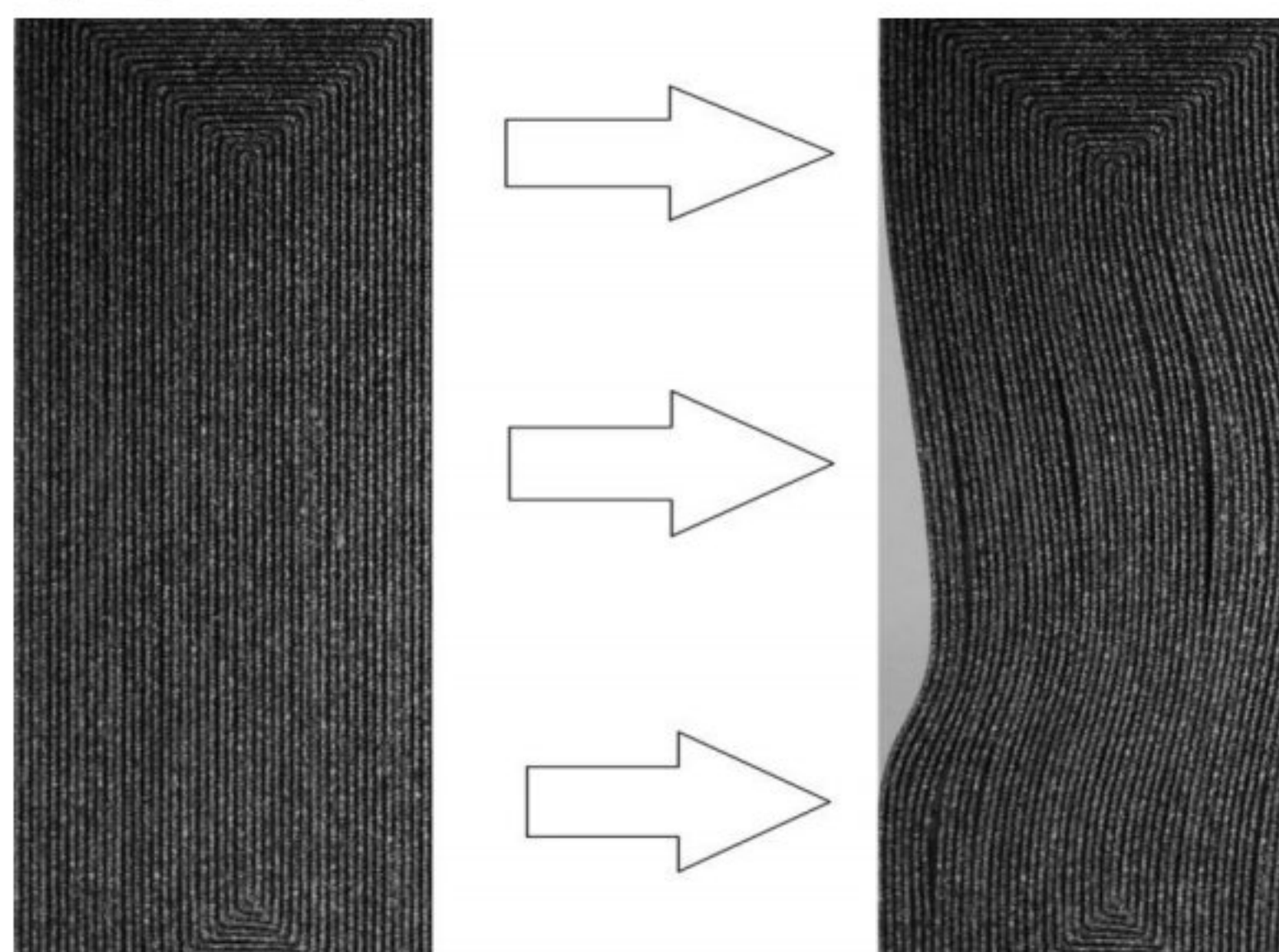
Tabela 5: Módulo de Elasticidade nos Ensaio de Compressão.

	C1	C2	C3	C4	C5	Média	Desvio Padrão
Modulo de Elasticidade (GPa)	0,305	0,153	2,102	3,170	1,370	2,214	0,905

Fonte: Autoria própria.

O valor de desvio padrão esta dentro do aceitável, inclusive aproximasse do valor de desvio padrão obtido nos ensaios de Microtração e do valor descoberto em trabalhos semelhantes. Ao realizar um estudo mais aprofundado acerca do comportamento do corpo em compressão, mais especificamente no ensaio 4, há uma flambagem no material tanto que nas fotos cortadas o corpo começa a sair do enquadramento.

Figura 33: Comparação entre a primeira e última foto cortada do 4º Ensaio de Compressão.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 33 que houve uma instabilidade do material com a flambagem e que é importante um redimensionamento dos corpos de prova de compressão para evitar tal fenômeno.

Os corpos de prova foram recortados todos com 960x2700 pixels e a dimensão do lado texturizado variadas, então, utilizando a equação mostrada abaixo, temos os fatores de conversão mostrados na Tabela 6.

$$Fc = \frac{\text{Largura do corpo}}{960}$$

Tabela 6: Fator de conversão para Compressão.

	C1	C2	C3	C4	C5
Fator de Conversão (px/mm)	0,0192	0,0193	0,0208	0,0208	0,0208

Fonte: Autoria própria.

6. CONCLUSÕES

Por fim, os objetivos propostos inicialmente foram alcançados e o que foi realizado durante esse projeto proporcionou a idealização de novos estudos a serem elaborados. Esses ensaios mostram que para tensões de aproximadamente 15 MPa o material resiste elasticamente, já que um dos dados obtidos foram que a tensão de escoamento médio é de 19,295 MPa.

Os resultados obtidos por meio dos ensaios de Microtração retornaram um valor médio de 1,99 GPa para o módulo de elasticidade, uma tensão máxima de 19,325 MPa e uma tensão média de ruptura de 16,895 MPa. São valores um pouco abaixo do que os obtidos em trabalhos relacionados, contudo está na mesma grandeza dimensional. Já para os ensaios de compressão o valor médio módulo de elasticidade sobe para 2,21 GPa com um desvio padrão de 0,91 GPa.

Como sugestão de trabalhos futuros, é interessante que se faça uma análise mais aprofundada a respeito dos tipos de impressão existentes e também de como cada parâmetro vai interferir no objeto final em quesitos como qualidade, propriedades mecânicas e dimensões.

A respeito dos corpos de prova de compressão foi visto que há flambagem, sendo perceptível a olho nu em uns e em outros com auxílio dos campos de deformação, faz-se necessário que os mesmos sejam redimensionados para que esse fenômeno não venha a atrapalhar os ensaios, possivelmente reduzindo a sua altura ou aumentando a área da secção transversal.

Como trabalhos futuros, sugere-se realizar novos ensaios com corpos de provas impressos em um método com parâmetros bem especificados, mas para isso é preciso também se aprofundar mais em relação aos métodos de impressão. Isso tudo na tentativa de obter parâmetros mais precisos acerca de cada ensaio e também avançar para a melhor utilização do Poli(Ácido Lático) nas Impressoras 3D, na fabricação de equipamentos e peças com fins ortopédicos.

7. REFERÊNCIAS

3D LAB INDUSTRIA LTDA..**PLA: Tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA.** Disponível em <https://3dlab.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamentopla/#:~:text=O%20PLA%20%C3%A9%20um%20termopl%C3%A1stico,ou%20cana%2Dde%2Da%C3%A7%C3%BAcar>. Acesso em: 23 maio 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15743-7: Implantes ortopédicos — Seleção de ensaios, informações e requisitos para comprovação da segurança e eficácia Parte 7: Implantes fabricados com polímeros absorvíveis.** 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 36 p.

AURAS, R. **Poly(lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications.** Edited by Rafael Auras, et al. Hoboken, N.J: Wiley, 2010.

CODES, Rodrigo Nogueira de. **Vieillissements statique et dynamique et instabilités associées: expérimentation, modélisation et simulations numériques.** Autre. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2011. Français.

DANTAS, Victor de Andrade. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ATRAVÉS DE CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DO ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) EM DOIS DIFERENTES MODELOS DE ÓRTESES ORTOPÉDICAS.** 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

HAUSMAN, Kalani Kirk; HORNE, Richard. **3D Printing For Dummies.** Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014. 384 p.

HILD, F. CORRELI-LMT: A Software for Displacement Field Measurements by Digital Image Correlation. Rapport interne N° 254, LMT-Cachan, France, 2002.

HILD, F.; PÉRIÉ, J. N.; CORET, M. Mesure de champs de déplacements 2d par intercorrélation d'images: Correli2D. Rapport 230, LMT-Cachan, 1999.

LASPRILLA, Astrid Juliana Rincón. **SÍNTESE DO POLI-ÁCIDO LÁCTICO A PARTIR DO ÁCIDO LÁCTICO PARA APLICAÇÃO BIOMÉDICA.** 2011. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

MEDICAEXPO. **Parafusos de interferência absorvíveis.** Disponível em: <https://www.medicaexpo.com/pt/fabricante-medico/parafuso-interferencia-absorvivel-29094.html>. Acesso em: 22 set. 2021.

ORTHOINFO. **Lesões do ligamento cruzado anterior (LCA) (Anterior Cruciate Ligament (ACL) Injuries).** Disponível em: <https://orthoinfo.aaos.org/pt/diseases--conditions/lesoes-do-ligamento-cruzado-anterior-lca-acl-injuries/>. Acesso em: 23 maio 2021.

ORTOPEDIABR. **Reconstrução do ligamento cruzado anterior (LCA). Como é a recuperação?** Disponível em: <http://www.ortopediabr.com.br/reconstrucao-do-ligamento-cruzado-anterior/>. Acesso em: 24 maio 2021.

RAY, S. S.; RAMONTJA, J. Polylactide-Based Nanocomposites. In: YU, L. (Org.). *Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Resources*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., p. 389–413, 2009.

RODRIGUES, G. D. E. A. **Produção De Ácido Lático a Partir Do Bagaço Da Cana De Açúcar.** Unicamp: São Paulo, 2012.

SEGUIN, Luciana. **Trabalho explicativo a respeito das impressoras 3D, e seus desenvolvimentos.** Curso de Curso Técnico em Instrumentação, Curso Nacional de Aprendizagem Industrial-SENAI, Santos, 2011.

YONEYAMA, Satoru; MURASAWA, Go. *DIGITAL IMAGE CORRELATION*. 2008. 28 f. Tese (Doutorado) - Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University, Yamagata, 2008.