



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS LEITE DOS SANTOS

**COMPORTAMENTO À FISSURAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DO
BAGAÇO DO SORGO SACARINO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DE
IMAGEM DIGITAL (CID)**

PAU DOS FERROS - RN

2024

LUCAS LEITE DOS SANTOS

**COMPORTAMENTO À FISSURAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DO
BAGAÇO DO SORGO SACARINO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DE
IMAGEM DIGITAL (CID)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Centro Multidisciplinar de Pau dos
Ferros – CMPF, como requisito para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique
Borges de Oliveira.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Adla Kellen Dionísio
Sousa.

PAU DOS FERROS - RN

2024

© 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.

S237c Santos, Lucas Leite dos.
Comportamento à fissuração do concreto com adição
do bagaço do sorgo sacarino através da técnica de
correlação de imagem digital (CID) / Lucas Leite
dos Santos. - 2024.
70 f. : il.

Orientador: Leonardo Henrique Borges de
Oliveira.
Coorientadora: Adla Kellen Dionísio Sousa.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. Correlação de imagem digital. 2. CID. 3.
Deformação. 4. Sorgo Sacarino. 5. Concreto. I.
Oliveira, Leonardo Henrique Borges de, orient.
II. Sousa, Adla Kellen Dionísio, 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 Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

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.

LUCAS LEITE DOS SANTOS

**COMPORTAMENTO À FISSURAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DO
BAGAÇO DO SORGO SACARINO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DE
IMAGEM DIGITAL (CID)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Centro Multidisciplinar de Pau dos
Ferreiros – CMPF, como requisito para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

DATA DA APROVAÇÃO: 16/04/2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO HENRIQUE BORGES DE OLIVEIRA**
Data: 22/04/2024 12:04:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira - UFERSA
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **ADLA KELLEN DIONÍSIO SOUSA**
Data: 22/04/2024 12:10:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Adla Kellen Dionísio Sousa - UFERSA
Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO NOGUEIRA DE CODES**
Data: 23/04/2024 10:01:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes - UFERSA
Examinador

*A minha mãe, Maria das Graças Leite de
Araújo*

A minha avó, Ana Bertini Leite de Araújo

A minha tia, Maria Telma Leite de Araújo

Aos meus irmãos, tios, primos e amigos

Dedico

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Maria das Graças Leite de Araújo por ter me incentivado a sempre escolher os melhores caminhos e a acreditar o quanto a educação tem o poder de realizar transformações nas nossas vidas.

A minha avó, Ana Bertini Leite de Araújo, por ter ajudado na minha criação e dos meus irmãos e pelos esforços feitos para que nós tivéssemos a oportunidade de ingressar à universidade.

As minhas tias, Maria Telma Leite de Araújo, Margarida Leite de Araújo e Suzana Leite de Araújo, por fazerem parte da minha criação e dos meus irmãos, ajudando a minha mãe nos momentos difíceis e por sempre ter nos proporcionado o melhor, na medida do possível.

A meu professor orientador Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira, por ter se disposto a me orientar. Por todos os ensinamentos compartilhados, pela disponibilidade em esclarecer dúvidas e por todas as orientações fornecidas para a realização desse trabalho.

A minha professora coorientadora Dr.^a Adla Kellen Dionísio Sousa, pela oportunidade dada no primeiro momento quando busquei que me orientasse neste trabalho, pelas dúvidas esclarecidas durante as etapas experimentais em laboratório e por todas as orientações que contribuíram para a realização desse trabalho.

A todos os meus amigos e familiares que estão ao meu lado me incentivando e acreditando no meu potencial.

RESUMO

A técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) destaca-se como sendo um método óptico-numérico inovador que permite a análise detalhada do campo de deformação de superfícies, como o concreto, sem contato direto com a amostra, permitindo assim realizar uma análise dos deslocamentos e das deformações nos elementos sem interferir no processo. Deste modo, o presente estudo investigou a viabilidade do sorgo sacarino (*Sorghum Bicolor* L. Moench), uma planta que possui em seu grão um alto teor de amido, entre 60% e 80%, como adição no concreto para melhorar a sua resistência à fissuração. Para tal, realizou-se uma breve revisão sistemática da literatura onde identificou-se trabalhos acadêmicos que utilizaram a técnica CID e obtiveram resultados satisfatórios, reforçando a relevância do método para o estudo de deformações e deslocamentos. Assim sendo, o objetivo deste trabalho consistiu na aplicação da técnica CID para realizar o monitoramento e analisar a formação de fissuras em corpos de prova de concreto com adição de sorgo sacarino, comparando-os com os do concreto referência com resistência característica $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$. Os corpos de prova T1, T2, C1 e C2 foram submetidos a ensaios de tração por compressão diametral e compressão axial, demonstrando o comportamento de rupturas e a resistência do concreto com a adição do sorgo sacarino onde constatou-se uma redução considerável da sua resistência, provavelmente pela presença do sorgo que apresentou alta absorção de água presente na mistura, sendo necessário então correções no traço e adequação do fator a/c para verificar a viabilidade do sorgo sacarino como adição.

Palavras-chave: Correlação de imagem digital. CID. Deformação. Sorgo Sacarino. Concreto.

ABSTRACT

The Digital Image Correlation (CID) technique stands out as an innovative optical-numerical method that allows detailed analysis of the deformation field of surfaces, such as concrete, without direct contact with the sample, thus allowing an analysis of the displacements and deformations in the elements without interfering in the process. Thus, the present study investigated the viability of sweet sorghum (*Sorghum Bicolor* L. Moench), a plant that has a high starch content in its grain, between 60% and 80%, as an addition to concrete to improve its resistance to cracking. To this end, a brief systematic review of the literature was carried out, identifying academic works that used the CID technique and obtained satisfactory results, reinforcing the relevance of the method for the study of deformations and displacements. Therefore, the objective of this work was to apply the CID technique to monitor and analyze the formation of cracks in concrete specimens with the addition of sweet sorghum, comparing them with those of reference concrete with characteristic resistance $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$. Specimens T1, T2, C1 and C2 were subjected to tensile tests by diametral compression and axial compression, demonstrating the rupture behavior and resistance of the concrete with the addition of sweet sorghum, where a considerable reduction in its resistance was observed, probably due to the presence of sorghum, which showed high water absorption in the mixture, making corrections to the trace and adjustment of the w/c factor necessary to verify the viability of sweet sorghum as an addition.

Keywords: Digital Image Correlation. DIC. Deformation. Sweet Sorghum. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Preparação do padrão estocástico de uma argamassa assentada sobre um bloco de granito.....	20
Figura 2: Sistema de captação de imagens digitais	20
Figura 3: Princípio da técnica CID. Quadriláteros em vermelho indicam subsets.....	21
Figura 4: Características morfológicas da cultura do Sorgo (<i>Sorghum Bicolor</i> L. Moench) ...	22
Figura 5: Análise de deformação de uma junta composta de carbono-epóxi utilizando o <i>Gom Inspect Correlate</i>	24
Figura 6: Etapas do processo metodológico	25
Figura 7: Etapas da revisão sistemática	27
Figura 8: Preparação do material.....	30
Figura 9: Adição dos materiais na betoneira	31
Figura 10: Concreto após sair da betoneira	32
Figura 11: Teste de abatimento ou <i>Slump Test</i>	32
Figura 12: Molde dos corpos de prova	33
Figura 13: Desmolde dos corpos de prova	33
Figura 14: Retirada dos corpos de prova do tanque de cura.....	34
Figura 15: Processo de retificação dos corpos de prova.....	34
Figura 16: Corpos de prova – 7 dias.....	35
Figura 17: a) Concreto C1 – 7 dias; b) Concreto C2 – 7 dias.....	35
Figura 18: Aplicação da tinta.....	36
Figura 19: Esquema com posicionamento das câmeras	36
Figura 20: Interface do <i>software Gom Inspect Correlate</i>	37
Figura 21: Definindo a escala no <i>Gom Inspect Correlate</i>	38
Figura 22: Definição de componente de superfície.	38

Figura 23: Qualidade do padrão estocástico.....	39
Figura 24: Quantidade de trabalhos selecionados de acordo com a base de dados.....	41
Figura 25: Corpos ensaiados em compressão axial. A) Ruptura cisalhada b) Ruptura coluna com formação de cones.	49
Figura 26: Resistência à compressão axial (28 dias).....	50
Figura 27: Resistência à tração por compressão diametral (28 dias).	51
Figura 28: Representação dos pontos selecionados.....	52
Figura 29: Curvas tensão-deformação.	54
Figura 30: Curvas carga-deslocamento em x (vertical).....	55
Figura 31: Curvas carga-deslocamento em y (horizontal).....	56
Figura 32: Pontos distribuídos na região de interesse do T1	57
Figura 33: Estágios de deformação do corpo de prova T1.	58
Figura 34: Pontos distribuídos pela região de interesse do T2	59
Figura 35: Estágios de deformação do corpo de prova T2.	60
Figura 36: Pontos distribuídos pela região de interesse do C1	61
Figura 37: Estágios de deformação do corpo de prova C1.....	62
Figura 38: Pontos distribuídos pela região de interesse do C2.....	63
Figura 39: Estágios de deformação do corpo de prova C2.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição dos ensaios realizados	26
Tabela 2: Normas técnicas de referência	26
Tabela 3: Quantitativo de materiais	31
Tabela 4: Descrição dos ensaios realizados	51
Tabela 5: Nomenclatura dos corpos de prova e seus respectivos ensaios.	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos tipos de sorgo	23
Quadro 2: Análise dos trabalhos selecionados	41

LISTA DE SIGLAS

CID	Correlação de imagem digital
CS	Concreto com Sorgo
CR	Concreto Referência
CLC	Concreto com <i>Luffa Cylindrica</i>
T1	Concreto 1 submetido ao ensaio de tração por compressão diametral
T2	Concreto 2 submetido ao ensaio de tração por compressão diametral
C1	Concreto 1 submetido ao ensaio de compressão axial
C2	Concreto 2 submetido ao ensaio de compressão axial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. OBJETIVO GERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. REVISÃO TEÓRICA.....	19
3.1. CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	19
3.1.1. Região de interesse e padrão estocástico	19
3.1.2. Captura de imagens	20
3.1.3. Processamento de dados	21
3.2. SORGO.....	22
3.2.1. Aspectos gerais.....	22
3.2.2. Características morfológicas	22
3.2.3. Sorgo Sacarino.....	23
3.3. <i>SOFTWARE GOM INSPECT CORRELATE</i>	24
4. METODOLOGIA.....	25
4.1. BUSCA NA LITERATURA/ REVISÃO SISTEMÁTICA.....	27
4.1.1. Delimitação da questão	27
4.1.2. Seleção de base de dados	28
4.1.3. Elaboração de estratégia de busca	28
4.1.4. Seleção e sistematização	29
4.1.5. Extração dos dados.....	29
4.2. DEFINIÇÃO DO MATERIAL, GRANULOMETRIA E <i>SLUMP TEST</i>	30
4.2.1. Produção do concreto.....	31
4.3. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA, APLICAÇÃO DA TINTA E POSICIONAMENTO DAS CÂMERAS.....	33
4.3.1 Ensaio com 7 dias.....	34

4.3.1	Ensaio com 28 dias.....	36
4.4.	PROCESSAMENTO DE IMAGENS – CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL (CID) 37	
4.5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CID.....	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1.	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	40
5.2.	ETAPA EXPERIMENTAL	49
5.2.1.	Comportamento de rupturas.....	49
5.2.2.	Resistência do concreto	50
5.2.3.	Análises de Tensão-Deformação.....	52
5.2.4.	Análises de Carga-Deslocamento	55
5.3.	CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	57
5.3.1.	Análise de deformações	57
5.3.1.1.	Corpo de prova – T1	57
5.3.1.2.	Corpo de prova – T2	59
5.3.1.3.	Corpo de prova – C1	61
5.3.1.4.	Corpo de prova – C2	63
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

A Correlação de Imagem Digital (CID) é uma técnica óptica-numérica inovadora que permite a extração de informações completas do campo de um objeto a partir de imagens digitais. A CID tem se mostrado eficaz na avaliação do estado de tensão-deformação de elementos estruturais, permitindo o estudo de mecanismos de fissuração e fratura em construções. Especificamente, a CID pode ser usada para monitorar a propagação de fissuras e registrar o campo completo de deformação da superfície do concreto (Santos, A. *et al.*, 2015).

O método possui um sistema que consiste em posicionar uma câmera de forma a capturar imagens da superfície a ser estudada (Santos, A. *et al.*, 2015). Portanto, o princípio fundamental desta técnica é que, a partir da imagem digital da superfície em estudo na condição inicial do teste (imagem de referência) e de uma imagem subsequente na condição de carga e deformação de interesse (imagem a ser contrastada com a de referência), é possível determinar o campo de deslocamentos da amostra (e de deformações, a partir dos deslocamentos), através da análise das diferenças entre essas imagens. (Rezende; Cardozo; Shehata, 2019).

Com relação a este método de captura de informações, é possível citar 3 vantagens tais como: (1) o método CID não necessita de contato com as amostras do material e não gera qualquer dano a estrutura, permitindo realizar uma análise dos deslocamentos e das deformações em elementos sem interferir no processo; (2) as imagens gravadas e processadas das superfícies analisadas ocorre com rapidez e de modo conveniente; (3) a CID pode ser utilizada em estruturas com superfícies não uniforme, permitindo medir quase todos os tipos de deformações no tempo e no espaço (Santos, A., 2015).

O Sorgo é uma planta que pertence à família herbácea *Poaceae*, ao gênero *Sorghum* e à espécie *Sorghum Bicolor* L. Moench, é uma planta com altas taxas de fotossíntese e que floresce em dias curtos (Oliveira, 2021). O sorgo sacarino por sua vez, é uma variedade específica de sorgo cultivada principalmente por seu alto teor de açúcar nos colmos, o que o torna uma importante fonte de matéria-prima para a produção de açúcar, etanol e outros produtos derivados (Costa, 2017).

Desse modo, este trabalho utilizou a matéria-prima sorgo sacarino na produção de corpos de prova de concreto com o objetivo de verificar a sua viabilidade como adição no concreto, à partir da análise da resistência a fissuração dos concreto produzidos através da técnica de correlação de imagem digital (CID). Visto que a CID é uma técnica óptica que permite a visualização de campos de deslocamento através do processamento sequencial de

imagens capturadas a uma taxa fixa e esta técnica pode fornecer dados valiosos sobre a formação e propagação de fissuras no concreto.

Portanto, a pesquisa proposta busca entender como a incorporação do sacarino afeta o comportamento do concreto sob tensão e fissuração, e como a CID pode ser utilizada para monitorar e analisar esses efeitos de forma precisa. Ao fazer isso, a pesquisa tem o potencial de contribuir para o desenvolvimento de métodos mais eficientes e sustentáveis de reforço e monitoramento do concreto, ao mesmo tempo em que promove o uso de materiais renováveis na indústria da construção civil. Isso representa uma abordagem inovadora para a construção sustentável e a engenharia, com implicações significativas para a utilização de resíduos vegetais e a melhoria da precisão das medições de engenharia.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal foi analisar o comportamento de fissuração do concreto com adição de sorgo sacarino, utilizando a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o comportamento mecânico em corpos de prova de concreto;
- Comparar a resistência à fissuração do concreto com adição de sorgo sacarino com a do concreto referência;
- Aplicar a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) para monitorar e analisar a formação de fissuras durante os ensaios mecânicos;
- Analisar as deformações e deslocamentos de pontos;

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1. CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

A Correlação de Imagem Digital (CID) é uma técnica que permite a visualização de campos de deslocamento através do processamento sequencial de imagens capturadas em uma determinada frequência. Esta técnica não requer contato direto com a amostra, é flexível e pode ser facilmente integrada com uma máquina de ensaios mecânicos (Santos, A. *et al.*, 2015).

O princípio fundamental desta técnica é que, a partir da imagem digital da superfície em estudo na condição inicial do teste (imagem de referência) e de uma imagem subsequente na condição de carga e deformação de interesse (imagem a ser contrastada com a de referência), é possível determinar o campo de deslocamentos da amostra (e de deformações, a partir dos deslocamentos), através da análise das diferenças entre essas imagens. (Rezende; Cardozo; Shehata, 2019).

Conforme Santos (2015), dentre os pontos positivos presente nesta técnica, destacam-se 3, tais como:

- O método CID não necessita de contato com as amostras do material e não gera qualquer dano a estrutura, permitindo realizar uma análise dos deslocamentos e das deformações em elementos sem interferir no processo;
- As imagens gravadas e processadas das superfícies analisadas ocorrem com rapidez e de modo conveniente;
- A CID pode ser utilizada em estruturas com superfícies não uniforme, permitindo medir quase todos os tipos de deformações no tempo e no espaço.

3.1.1. Região de interesse e padrão estocástico

A região a ser analisada é denominada de região de interesse ou *region of interest* (ROI). Para a aplicação da CID, a superfície deve ser tratada para gerar um padrão aleatório. As imagens são capturadas por uma câmera de alta resolução e posteriormente processadas por um algoritmo computacional específico de correlação de imagens, resultando nos campos de deslocamentos. Dessa forma, para assegurar a singularidade do *subset*, é crucial que a superfície em estudo apresente um padrão que não seja repetitivo, seja isotrópico e tenha alto contraste (Rezende; Cardozo; Shehata, 2019).

Normalmente, isso é alcançado aplicando-se um fundo branco opaco com um padrão de pontos pretos opacos (*speckles*) distribuídos de maneira aleatória. Pois a técnica utiliza padrões de texturas artificiais ou naturais, de modo a ter pontos de texturas únicos que transmitem

informações da superfície em análise para o computador (Rezende; Cardozo; Shehata, 2019). A Figura 1 a seguir, mostra preparação do padrão estocástico por meio da aplicação de uma camada de tinta branca, e posteriormente o uso do *spray* preto para criar o padrão de pontos aleatório.

Figura 1: Preparação do padrão estocástico de uma argamassa assentada sobre um bloco de granito.

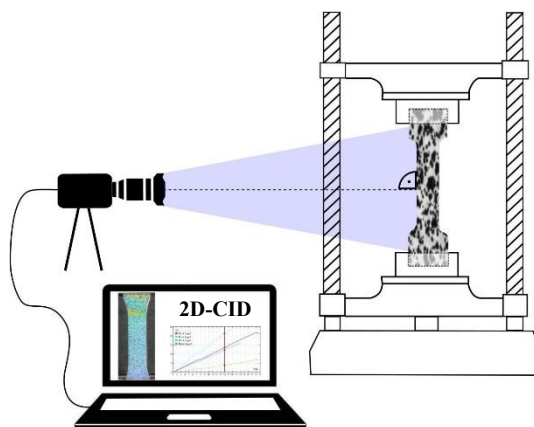


Fonte: Adaptado de Mylo e Poppinga (2024)

3.1.2. Captura de imagens

O método possui um sistema que consiste em posicionar uma câmera de forma a capturar imagens da superfície a ser estudada (Figura 2). Luzes são colocadas estrategicamente e a uma distância apropriada para o correto enquadramento do espécime. A imagem é armazenada no HD através de uma placa de captura de vídeo, dispositivo que processa os sinais analógicos da CCD ou Dispositivo de Carga Acoplada (Santos, A. *et al.*, 2015).

Figura 2: Sistema de captação de imagens digitais



Fonte: Adaptado de Mylo e Poppinga (2024)

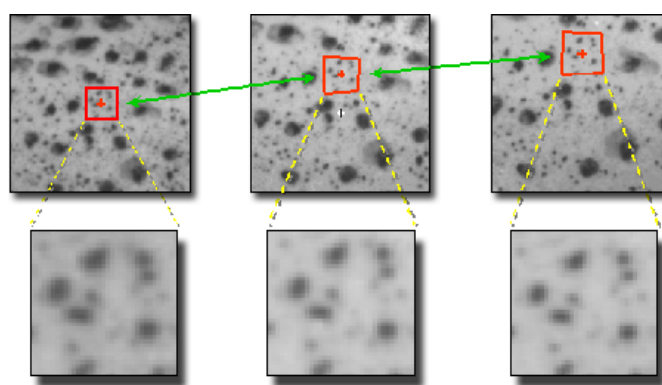
De acordo com o princípio da Correlação de Imagem Digital (CID), a estimativa do movimento de cada ponto é derivada do aumento do sistema de imagem (correlação mm/pixel).

Esta estimativa refletirá o movimento real do ponto físico se, conforme mencionado por Santos, A. et al (2015), dois critérios específicos forem atendidos, que são:

1. A superfície do corpo de prova deve estar a 90° em relação ao sensor de captação e se manter nessa posição durante o carregamento;
2. A imagem não deve sofrer distorção geométrica.

Dessa forma, imagem gerada é composta por uma série de pixels (Figura 3), que são pequenas células sensíveis à luz e que armazenam sua intensidade na escala de cinza variando de 0 a 255 (Rezende; Cardozo; Shehata, 2019). O processo de correlação de subconjuntos de pixels (também chamados de *subsets* ou facetas) é realizado entre a imagem de referência e as demais.

Figura 3: Princípio da técnica CID. Quadriláteros em vermelho indicam *subsets*



Fonte: Rezende, Cardozo e Shehata (2019).

3.1.3. Processamento de dados

Após restringir a área de interesse na imagem de referência e realizar uma validação de textura, é possível entender como os algoritmos de Correlação de Imagem Digital (CID) realizam a correlação entre imagens por meio da correspondência de conjuntos de pixels, chamados blocos. Inicialmente, a área de imagem de interesse é dividida em várias partes pequenas com um número de pixels. Cada parte é chamada de bloco. Devido à aleatoriedade da textura, cada bloco possui uma matriz de intensidade de pixel única. Em seguida, para cada bloco na imagem de referência, o algoritmo busca os blocos na próxima imagem até encontrar a respectiva matriz por meio de uma função de minimização. Se a textura não apresentar um padrão estocástico adequado, mais de um bloco pode apresentar a mesma matriz de intensidade de tom, causando uma correspondência incorreta ou até mesmo uma não correlação entre as imagens (Silva, Kzam, Lopez, 2023).

3.2. SORGO

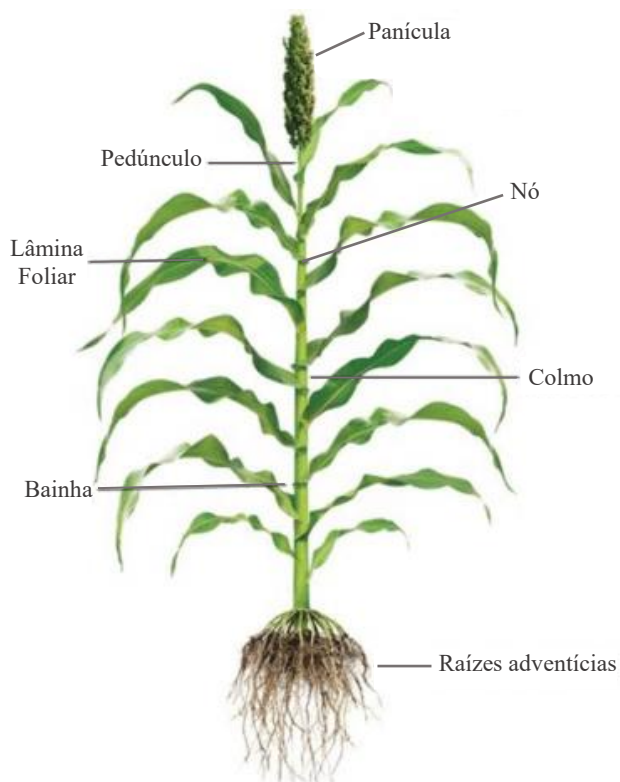
3.2.1. Aspectos gerais

O Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é classificado como o quinto cereal mais relevante globalmente, seguindo o trigo, arroz, milho e cevada. O seu grão possui um alto teor de amido, variando entre 60% e 80%. O amido de sorgo encontra aplicações nas indústrias alimentícia, química, farmacêutica e têxtil (Aviara, Igbeka, Nwokocha, 2010; Costa, 2017).

3.2.2. Características morfológicas

O sorgo, é uma planta que pertence à família herbácea *Poaceae*, ao gênero *Sorghum* e à espécie *Sorghum Bicolor* L. Moench, é uma planta com altas taxas de fotossíntese e que floresce em dias curtos. Como se pode observar na Figura 4, o caule da planta é dividido em nós e entrenós e possui folhas ao longo de toda a sua extensão. A inflorescência do sorgo é uma panícula e seu fruto é um grão seco ou cariopse. A planta pode atingir uma altura de 1 a 4 metros e produz uma inflorescência terminal do tipo paniculado. Uma espiga fértil e sésil, acompanhada por duas espiguetas estéreis pedunculadas, é uma característica distintiva do gênero (Oliveira, 2021).

Figura 4: Características morfológicas da cultura do Sorgo (*Sorghum Bicolor* L. Moench)



Fonte: Adaptado de Pinheiro *et al.* (2021)

A maioria dos tipos de sorgo precisa de temperaturas acima de 21 °C para crescer e se desenvolver adequadamente. Sua estrutura radicular é composta por raízes que contêm sílica na endoderme, muitos pelos absorventes e altos níveis de lignificação do periciclo, o que torna a planta mais resistente à falta e ao excesso de água no solo do que outros cereais.

3.2.3. Sorgo Sacarino

O sorgo sacarino é uma variedade específica de sorgo cultivada principalmente por seu alto teor de açúcar nos colmos, o que o torna uma importante fonte de matéria-prima para a produção de açúcar, etanol e outros produtos derivados (Costa, 2017). No território brasileiro, o sorgo tem se destacado como uma opção viável em várias localidades devido à sua capacidade de se ajustar a uma variedade de condições ambientais. Especialmente em áreas propensas à escassez de água e temperaturas elevadas, o sorgo emerge como uma alternativa promissora. Além disso, sua adaptabilidade se estende a solos ácidos e alcalinos, ampliando ainda mais suas possibilidades de cultivo (Oliveira, 2021).

Atualmente existem 5 tipos de sorgo, sendo eles: o granífero, o sacarino, o vassoura, forrageiro e o biomassa. De acordo com Oliveira (2021), eles podem ser classificados e definidos da seguinte maneira, conforme Quadro 1.

Quadro 1: Classificação dos tipos de sorgo

CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE SORGO	
SORGO GRANÍFERO	Inclui tipos de sorgo de porte baixo, altura de planta até 170 cm, que produz na extremidade superior, uma panícula (cacho), onde se localizam os grãos (principal produto deste tipo de sorgo).
SORGO FORRAGEIRO	Compreende um tipo de sorgo de porte alto, com altura de planta superior a dois metros, muitas folhas, panículas abertas, com poucas sementes, elevada produção de forragem.
SORGO SACARINO	Possui porte elevado, sua altura é superior a dois metros, caracterizado principalmente por apresentar colmo doce e succulento apropriados para produção de açúcar e álcool e/ou confecção de silagem.
SORGO VASSOURA	Possuem panículas rígidas e duráveis, que após serem colhidas e secas, são utilizadas para produzir as cerdas das vassouras.
SORGO BIOMASSA	São plantas de porte alto, podendo atingir mais de 5 m de altura, sua principal finalidade é produção de biomassa utilizada como fonte renovável de energia

Fonte: Adaptado de Oliveira (2021).

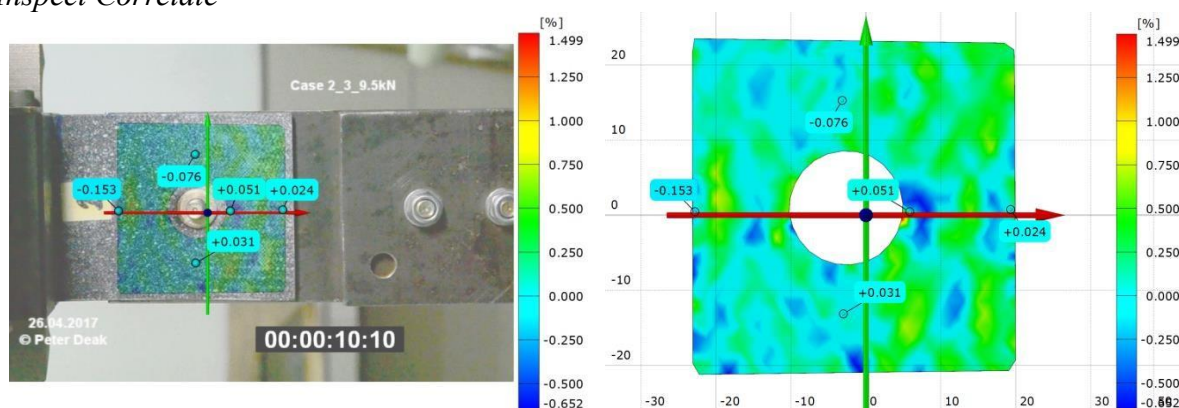
3.3. SOFTWARE GOM INSPECT CORRELATE

O *Gom Inspect Correlate* é um programa que emprega a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) para criar representações bidimensionais e tridimensionais de tensão e deformação. O *software* permite a medição não invasiva de alterações de comprimento, a realização de testes em múltiplas direções simultaneamente e o acompanhamento em tempo real das mudanças de comprimento durante uma medição (Schneiders, 2018).

Através do *software* é analisar processos dinâmicos, como deslocamentos, rotações ou mudanças de ângulo. O *Gom Inspect Correlate* é intuitivo de usar e equipado com funções práticas, o *software* o suporta de forma ótima em suas aplicações de teste 3D. Utiliza correlação de imagem digital e algoritmos de rastreamento de pontos para medição precisa de subpixels das coordenadas 3D e rastreie-as ao longo do tempo (GOM, 2023).

Na Figura 5, é possível observar um exemplo uso do *software Gom Inspect Correlate* e aplicação da técnica CID.

Figura 5: Análise de deformação de uma junta composta de carbono-epóxi utilizando o *Gom Inspect Correlate*



Fonte: Adaptado de Deák & Kowalik (2018).

Deák e Kowalik (2018), realizaram uma análise da resistência individual das juntas usadas na estrutura composta de laminado (Figura 5), a fim de utilizarem os resultados no cálculo de projeto em estruturas de fuselagem de aviões de peso leve. Sendo assim, tracionou-se a amostra feita de carbono-epóxi e mediu-se sua deformação.

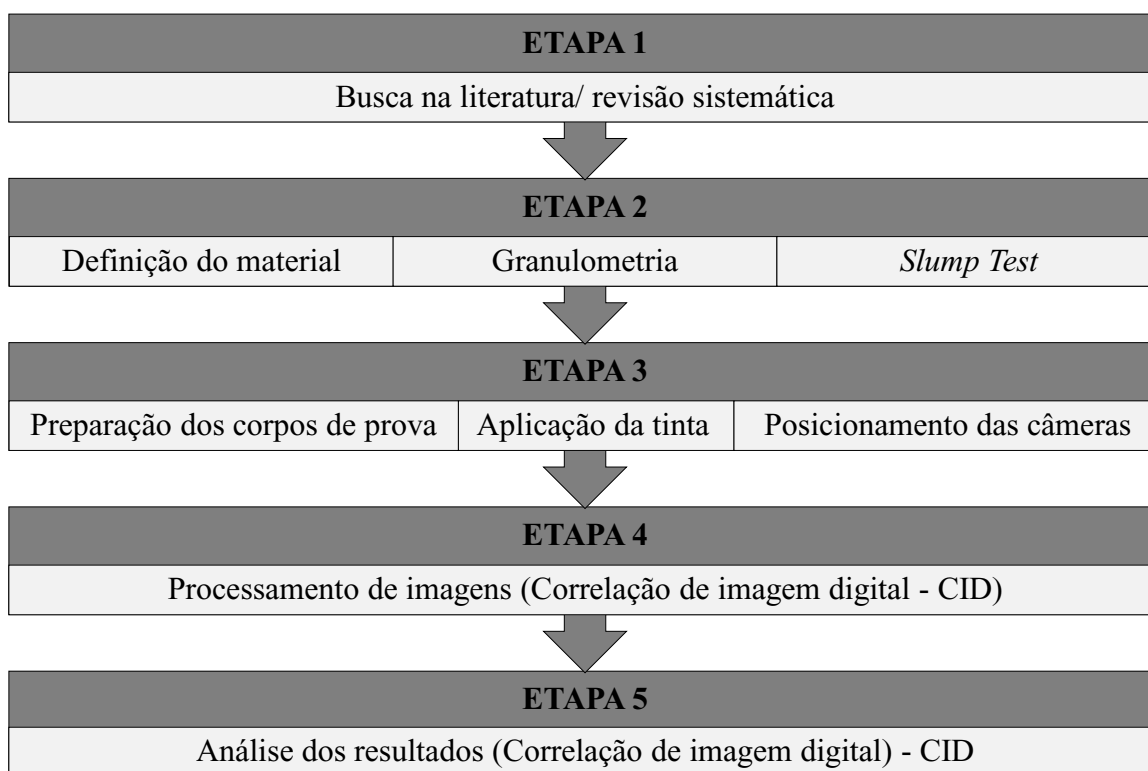
No conceito paramétrico do GOM, cada elemento individual preserva seu histórico de criação dentro da estrutura do *software*. Todas as ações e passos de avaliação são completamente rastreáveis e conectados. Elementos individuais podem ser alterados e ajustados a qualquer instante, e uma solução de um único botão atualiza todos os elementos dependentes automaticamente após as modificações serem realizadas (GOM, 2023).

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho envolveu a aplicação da técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) na avaliação da resistência à fissuração do concreto produzido com adição de sorgo sacarino. Diante disso, para verificar a capacidade da técnica CID na análise e no estudo de deformação e deslocamento de um objeto a partir da delimitação de uma região de interesse, além de uma etapa experimental, utilizou-se da técnica de revisão sistemática da literatura para a realização de uma breve investigação à cerca da eficiência da técnica a partir da análise de produções acadêmicas.

Assim sendo, o processo metodológico foi subdividido em etapas conforme Figura 6.

Figura 6: Etapas do processo metodológico



Fonte: Autor (2024).

Para a etapa experimental, inicialmente foram produzidos 8 corpos de prova que foram submetidos a ensaios no laboratório de Materiais de Construção do Campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, em Pau dos Ferros-RN. Os corpos de prova foram produzidos para serem ensaiados como descrito na Tabela 1.

Para tal, foi determinado primeiramente o traço para a produção do concreto através da caracterização dos materiais determinados através do ensaio de granulometria.

Tabela 1: Descrição dos ensaios realizados

ENSAIO	CORPOS DE PROVA	IDADE DO ENSAIO
Compressão	2	7 dias
Compressão diametral	2	7 dias
Compressão	2	28 dias
Compressão diametral	2	28 dias

Fonte: Autor (2024).

Os ensaios foram realizados de acordo e seguindo os procedimentos dispostos pelas normas técnicas descritas a seguir na Tabela 2. As normas técnicas possuem o intuito de garantir que o concreto atenda aos padrões específicos para a execução de ensaios de compressão e tração em corpos de prova cilíndricos garantindo a confiabilidade, precisão e padronização dos resultados. Essas normas estabelecem metodologias específicas que devem ser seguidas rigorosamente para assegurar que os ensaios reflitam as propriedades reais dos materiais testados, permitindo uma comparação justa e uniforme entre diferentes estudos e materiais.

Tabela 2: Normas técnicas de referência

NORMA ABNT	TÍTULO
NBR 7211: 2022	Agregados para concreto – requisitos.
NBR 5738: 2015	Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.
NBR 16889: 2020	Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone.
NBR 5739: 2018	Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.
NBR 7222: 2011	Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Autor (2024).

4.1. BUSCA NA LITERATURA/ REVISÃO SISTEMÁTICA

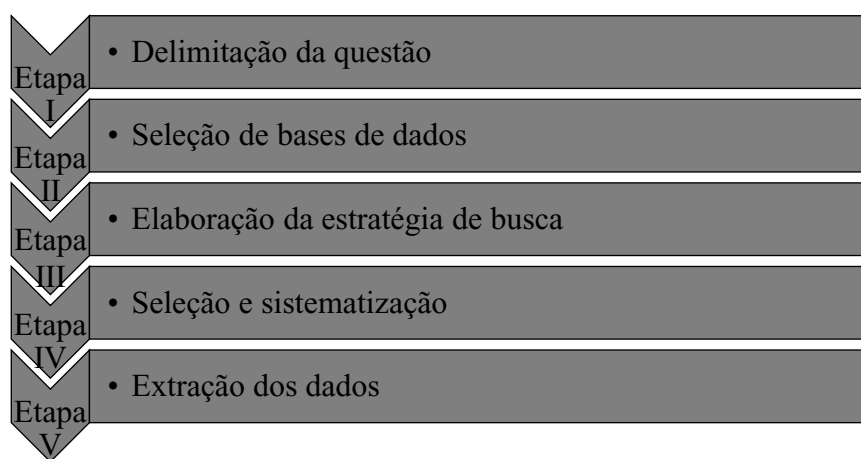
Na Etapa 1 conforme descrito na Figura 6, foi realizada uma breve revisão da literatura com o intuito de selecionar trabalhos acadêmicos que utilizaram a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) em seus estudos e apresentaram resultados satisfatórios.

A revisão da literatura aplicada é do tipo “sistemática” que representa uma abordagem de pesquisa que adere a protocolos específicos, com o objetivo de compreender e conferir coerência a um breve conjunto de documentos, especialmente ao avaliar o que é eficaz e o que não é em um contexto específico. Essa modalidade de investigação, busca evidências relevantes e segue um método científico explícito, tornando-se uma contribuição original na área de pesquisa clínica. Portanto, a revisão sistemática é uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões informadas e embasadas em evidências (Galvão e Ricarte, 2020).

Ainda de acordo com Galvão e Ricarte (2020), essa abordagem concentra-se na possibilidade de replicação por outros pesquisadores, detalhando de maneira clara as fontes de dados bibliográficos consultadas, as estratégias de busca utilizadas em cada base, o procedimento de seleção dos artigos científicos, os critérios para inclusão e exclusão desses artigos, bem como o método de análise aplicado a cada um. Além disso, ela explana as limitações inerentes a cada artigo examinado, bem como as restrições da própria revisão.

Portanto, a divisão das etapas para a realização da revisão sistemática foi definida conforme Figura 7 abaixo:

Figura 7: Etapas da revisão sistemática



Fonte: Autor (2024).

4.1.1. Delimitação da questão

A delimitação da questão consistiu na determinação da pergunta ou do problema abordado na pesquisa. Segundo Galvão e Ricarte (2020), ela deve contemplar o problema que

será estudado, o tipo de intervenção que será analisado e se haverá a comparação das intervenções e o desfecho que se pretende estudar.

Donato H. e Donato M. (2019), mostram que essa abordagem utilizada para a elaboração da questão é definida pela Sigla PICO (*Population, Intervention, Comparison, Outcome*), onde p é a população ou problema, i é a intervenção, c é a comparação e o é o *outcome*/resultado.

Portanto, a situação problema definida foi “Como a aplicação da técnica de correlação de imagem digital (CID) pode ser utilizada na análise de deformação ou deslocamento de um objeto a partir da delimitação de uma região de interesse”?

4.1.2. Seleção de base de dados

Após a delimitação da questão a ser tratada na revisão, foram definidas as bases de dados consultadas para a busca de artigos e outros trabalhos acadêmicos que possam ser incluídos na revisão. Para tal, foram utilizadas algumas ferramentas digitais como, os buscadores acadêmicos Google Acadêmico e *Science Direct*, o portal Periódico CAPES, a BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações) e o diretório de revistas SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), com o intuito de selecionar e identificar os principais trabalhos acadêmicos dentro da questão problema que foi delimitada.

4.1.3. Elaboração de estratégia de busca

Para utilizar as bases de dados bibliográficos, é preciso elaborar uma estratégia de busca. Essa estratégia inclui uma série de procedimentos e utiliza mecanismos tecnológicos disponíveis para encontrar a informação desejada (Galvão e Ricarte, 2020).

Para usar métodos de pesquisa sofisticados, é preciso consultar fontes terminológicas, tesouros e dicionários especializados para identificar sinônimos, bem como para converter corretamente os conceitos que fazem parte da questão de revisão para o inglês, pois as bases de dados bibliográficos internacionais dão preferência ao inglês como língua de pesquisa. (Donato H. e Donato M. 2019; Galvão e Ricarte, 2020).

Portanto, foram utilizadas três estratégias de busca para a questão “Como a aplicação da técnica de correlação de imagem digital (CID) pode ser utilizada na análise de deformação ou deslocamento de um objeto a partir da delimitação de uma região de interesse”?

Para isso, utilizou-se dos seguintes descritores:

- Descritor 1: *Digital image correlation*
- Descritor 2: *Screen image deformation*

- Descritor 3: *Digital picture displacement*

4.1.4. Seleção e sistematização

A busca na literatura gerou grande quantidade de resultados, porém, foi realizada uma análise para inclusão e exclusão de acordo com os critérios pré-estabelecidos. Num primeiro momento foram observados os títulos e resumos. Os critérios estabelecidos para a seleção dos trabalhos foram:

1. Produções acadêmicas publicadas nos últimos 10 anos;
2. Produções que aplicaram a técnica CID em diferentes estudos e obtiveram resultados satisfatórios.

Baseado em Donato H. e Donato M. (2019), a sistematização das referências seguiu a seguinte ordem:

1. Examinou-se títulos e resumos para remover documentos irrelevantes;
2. Eliminou-se as duplicidades;
3. Obteve-se os textos integrais de todos os artigos com potencial relevância;
4. Reuniu-se múltiplos relatos do mesmo estudo;
5. Examinou-se se os estudos estão de acordo com os critérios de elegibilidade;
6. Tomou-se as decisões finais quanto à inclusão dos estudos antes de proceder à extração dos dados.

4.1.5. Extração dos dados

Após a etapa de seleção e sistematização, foi elaborado uma tabela/formulário para a realização da extração de dados referentes a cada trabalho. De acordo com Donato H. e Donato M. (2019), o passo inicial para este processo envolve uma avaliação descritiva de cada estudo (detalhes do estudo; dados para a análise), habitualmente apresentado em formato tabular.

Portanto, as informações extraídas consistem em:

1. Título do trabalho
2. Autor
3. Data de publicação
4. Metodologia aplicada
5. Resultados

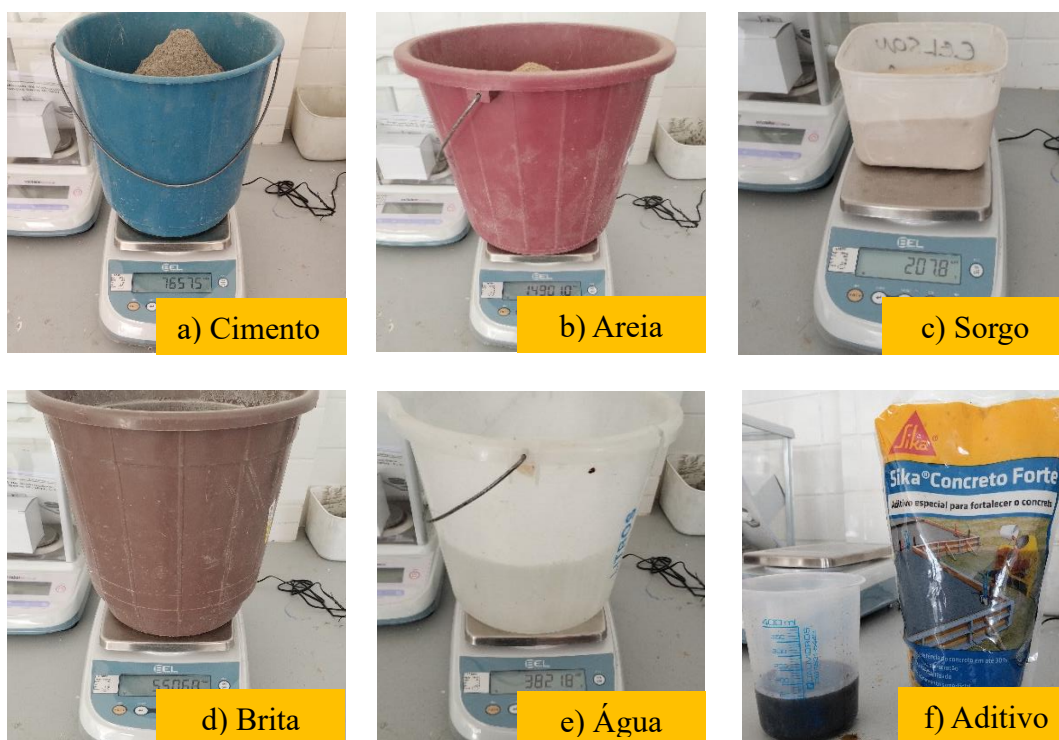
Após a coleta de todos os estudos relevantes, a avaliação da qualidade, a extração dos dados é necessária chegar a conclusões conforme descritas no item 6 deste trabalho.

4.2. DEFINIÇÃO DO MATERIAL, GRANULOMETRIA E *SLUMP TEST*

A etapa 2, conforme Figura 6 da metodologia, iniciou-se com a definição dos materiais. Sendo assim, o cimento utilizado na produção do concreto ($f_{ck} = 30MPa$) foi o CP V ARI de alta resistência, para os agregados miúdos e graúdos foram utilizados a areia do tipo lavada de rio e pedra britada. Além disso foi utilizado o sorgo sacarino como adição ao concreto.

Para a dosagem do concreto adotou-se o traço 1:2,48:1,92:0,50, conforme Almeida (2023). Após determinação do traço para o concreto, os materiais foram pesados para que o concreto pudesse ser produzido. A Figura 8 a seguir, retrata a pesagem do agregado graúdo (Figura 8a), agregado miúdo (Figura 8b), cimento (Figura 8c), água (Figura 8d), sorgo (Figura 8e) e do aditivo (Figura 8e).

Figura 8: Preparação do material



Fonte: Autor (2024).

As quantidades referentes a cada material utilizados na produção dos corpos de prova são descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Quantitativo de materiais

Material	Cimento	Brita	Areia	Água	Sorgo	Aditivo
Quantidade	7,76 kg	19,23 kg	14,90 kg	4,14 L	20,78 g	153,18 mL

Fonte: Autor (2024).

4.2.1. Produção do concreto

O processo de concretagem procedeu com a adição de agregado graúdo conforme ilustrado na Figura 9a e Figura 9b. Após isso foi inserido parte da água (Figura 9c) e adicionado o aditivo plastificante Sika® Concreto Forte conforme Figura 9d.

Figura 9: Adição dos materiais na betoneira



Fonte: Autor (2024).

Após a mistura dos materiais na betoneira, o concreto foi depositado em bandejas como observado na Figura 10a.

Figura 10: Concreto após sair da betoneira



Fonte: Autor (2024).

Como observado na Figura 10b, o concreto apresentou uma consistência relativamente seca e esfarelada. Esse fato ocorreu devido a presença do sorgo que por se tratar de um pó seco, absorveu parte da água, deixando o aglomerante e os agregados com pouca água para formar a matriz. Porém, o experimento seguiu-se para o teste de abatimento ou *Slump Test* conforme a NBR 16889: 2020.

Como pode-se observar Figura 11 a seguir, no teste de abatimento, o concreto apresentou um *Slump* de 12 mm.

Figura 11: Teste de abatimento ou *Slump Test*



Fonte: Autor (2024).

4.3. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA, APLICAÇÃO DA TINTA E POSICIONAMENTO DAS CÂMERAS

Em seguida, a produção do concreto procedeu-se para a moldagem dos corpos de prova utilizando moldes cilíndricos em aço zincado tamanho 10x20 cm e previamente aplicado desmoldante, conforme NBR 5738: 2015. Na Figura 12 pode-se observar os corpos de prova em seus moldes.

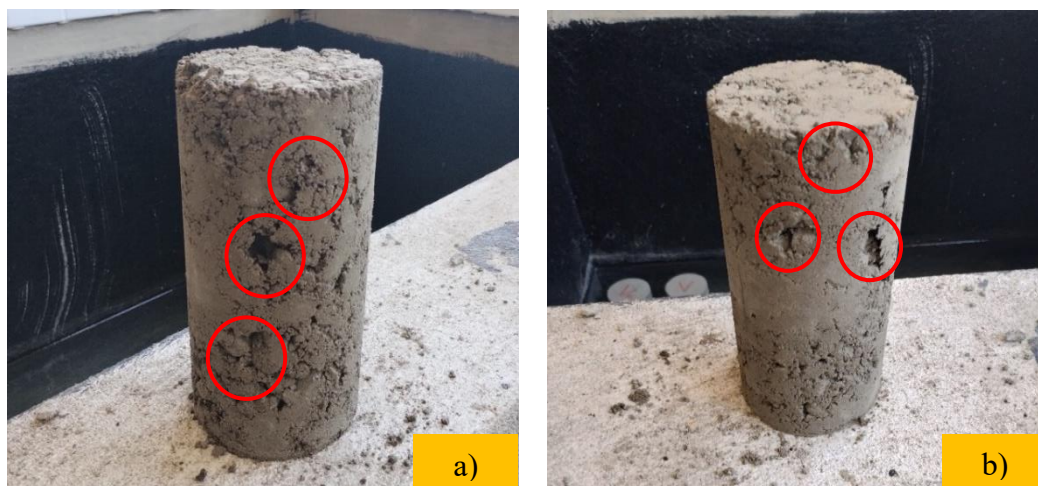
Figura 12: Molde dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024).

Após 24 horas foi feito o desmolde dos corpos de prova, onde observou-se um que o concreto apresentou um aspecto poroso com a presença de vazios em algumas regiões, conforme Figura 13a e Figura 13b.

Figura 13: Desmolde dos corpos de prova



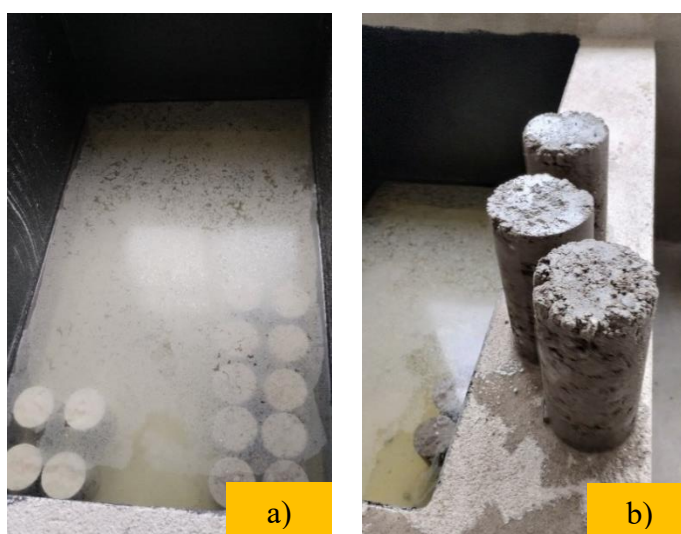
Fonte: Autor (2024).

Seguindo o procedimento, após a produção, os corpos de prova foram colocados em um tange de cura para evitar que o concreto perdesse água nos primeiros dias após a sua produção.

4.3.1 Ensaio com 7 dias

Seguindo o procedimento, após 7 dias, o concreto foi retirado do tange de cura para a realização dos ensaios, conforme Figura 14a e Figura 14b.

Figura 14: Retirada dos corpos de prova do tange de cura



Fonte: Autor (2024).

Após isso, os corpos de prova foram para a retífica, onde observou-se que o concreto apresentava baixa consistência, fragmentando-se durante o processo de retificação, como se pode observar na Figura 15a e 15b. Isso se deu provavelmente devido a adição do sorgo que apresentou alta absorção de água presente na mistura.

Figura 15: Processo de retificação dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024).

Como o concreto fragmentou-se, os corpos de prova que seriam utilizados para o ensaio de compressão diametral e que seriam rompidos ao passar dos 7 dias, não puderam ser testados devido aos mesmos estarem fora dos padrões estabelecidos na NBR 7222: 2011 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Diante disso, optou-se para a realização dos testes em dois corpos de prova à esquerda na Figura 16, que apresentavam padrão adequado para o ensaio de compressão conforme a NBR 5739: 2018 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Figura 16: Corpos de prova – 7 dias



Fonte: Autor (2024).

Os corpos de prova (Figura 17a e Figura 17b), foram então, submetidos a uma leve pintura através de um padrão de pontos brancos com o intuito de criar um contraste a ser reconhecido na CID. Porém, ao ser fixado na prensa o concreto C1 apresentou uma fissura ao longo do seu comprimento conforme Figura 15a, impossibilitando o ensaio. Já o concreto C2 rompeu-se em poucos segundo à medida que a prensa atingiu os 3 kN.

Figura 17: a) Concreto C1 – 7 dias; b) Concreto C2 – 7 dias.

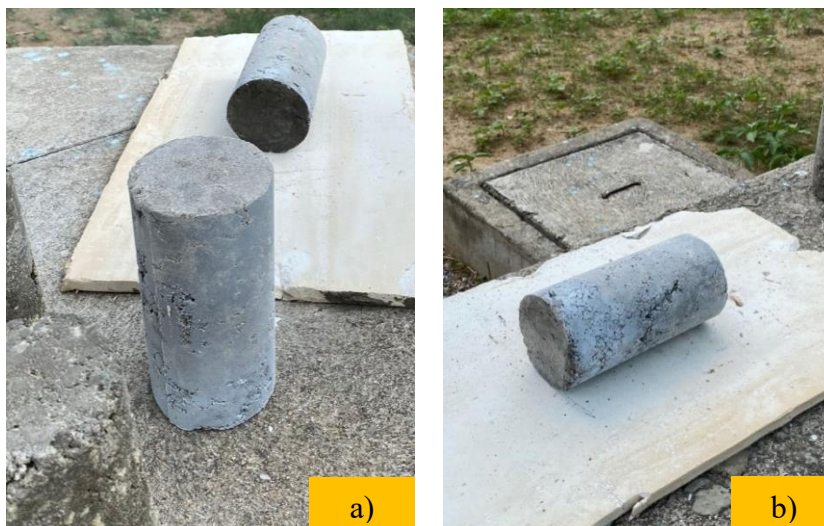


Fonte: Autor (2024).

4.3.1 Ensaio com 28 dias

Após 28 dias, foi aplicada a tinta branca e preta e execução do padrão de pontos estocástico nos corpos de prova conforme Figura 18a e 18b, criando um contraste e uma heterogeneidade na peça que foi filmada, fator importante quando se trata de CID.

Figura 18: Aplicação da tinta



Fonte: Autor (2024).

Após isso, foi realizada a execução do esquema do ensaio conforme Figura 19. Para tal foram usadas 3 câmeras com resolução de 50MP, 30 FPS, sob luz natural, posicionadas na parte frontal e traseiras do ensaio e acionadas manualmente. A prensa hidráulica usada é da marca Zhejiang Geotechnical Instrument Manufacturing Co., LTDA, com carga máxima de 2000 kN,

Figura 19: Esquema com posicionamento das câmeras



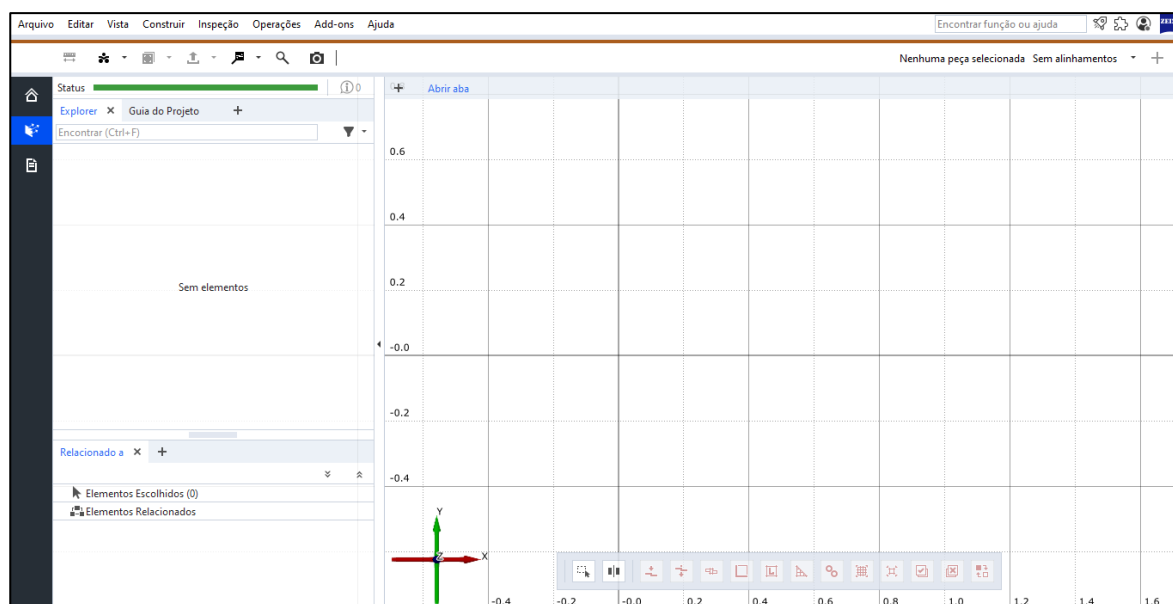
Fonte: Autor (2024).

4.4. PROCESSAMENTO DE IMAGENS – CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL (CID)

As imagens capturadas durante os ensaios foram processadas utilizando a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID). Isso permitiu o monitoramento e análise da formação de fissuras. Para o processamento das imagens foi utilizando o software *Gom Inspect Correlate* versão 2023.3.0.969 da empresa GOM Metrology, pertencente ao grupo alemão ZEISS.

A seguir na Figura 20, é possível observar a interface do software *Gom Inspect Correlate*.

Figura 20: Interface do software *Gom Inspect Correlate*

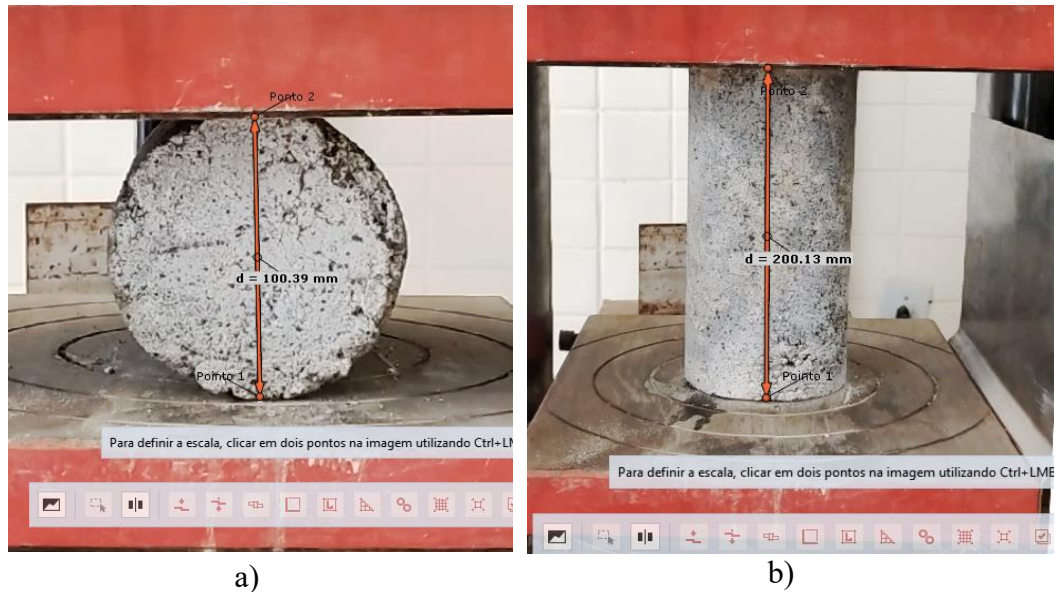


Fonte: Autor (2024).

Para realizar o procedimento de análise no software, inicialmente foram importados os arquivos em vídeo referentes as gravações dos ensaios de compressão e tração. Utilizando a ferramenta computacional *Gom Inspect correlate*, o primeiro passo consistiu no ajuste da escala do vídeo, pois o software precisa ser calibrado para medir a posição dos pixels que formam a imagem que está sendo analisada. O ajuste é feito a partir da definição de dois pontos onde é traçado uma reta os ligando e então definimos o seu comprimento.

Como se pode observar na Figura 21a e 21b, foi traçado uma reta com comprimento referente ao diâmetro e o comprimento dos corpos de prova em que estava sendo realizado a análise. Em laboratório os corpos de prova foram medidos 3 vezes com o auxílio do paquímetro, e as medidas utilizadas para o diâmetro e comprimento, corresponde a média das três medições.

Figura 21: Definindo a escala no *Gom Inspect Correlate*



Fonte: Autor (2024).

O segundo passo a ser realizado com o auxílio da ferramenta foi a definição da região de interesse e criação de um componente de superfície. Para isso, traçou-se linha ao redor e ao longo de todo o corpo de prova para que o *software* identificasse apenas essa região como objeto em que ele irá realizar a análise. As regiões de interesse consistem nas superfícies em verde que marcam os corpos de prova na Figura 22a e 22b.

Figura 22: Definição de componente de superfície.



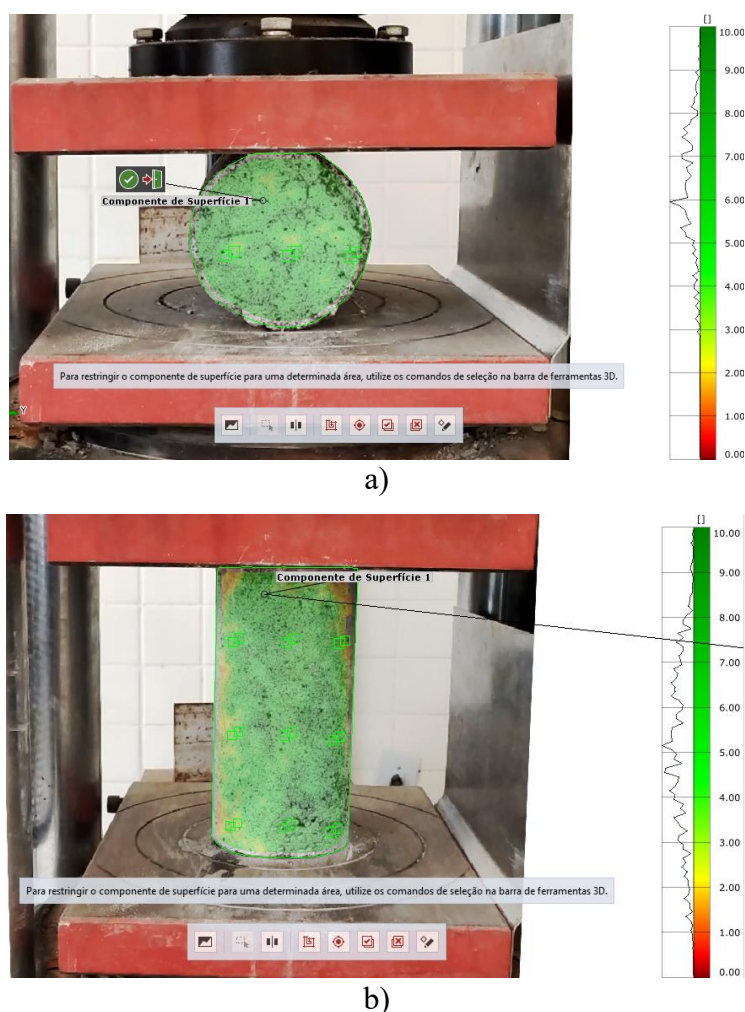
Fonte: Autor (2024).

O terceiro passo, consistiu na verificação do padrão estocástico. Como mencionado, a realização de um padrão de pontos é importante para que o *software* consiga captar o deslocamento desses pontos e meça deformações, deslocamentos, velocidades etc.

A ferramenta utiliza uma escala de 0 a 10 para identificar a confiabilidade e eficiência das repostas pelo padrão estocástico. Após isso, ela gera uma superfície com um padrão de cores verde para os pontos que estão com maior eficiência (próximos de 10) e vermelho para pontos com menor eficiência (próximos de 0). Quanto mais próximo do verde, melhor está o padrão estocástico e consequente melhor será a leitura realizada pelo programa. Por outro lado, quando mais próximo do vermelho a região estiver, pior será a leitura realizada pelo programa.

Na Figura 23a e 23b, é possível observar os padrões apresentados para o ensaio de compressão diametral e axial, respectivamente. Tais padrões foram considerados satisfatórios para o procedimento do estudo com auxílio da técnica de correlação de imagens (CID).

Figura 23: Qualidade do padrão estocástico



Fonte: Autor (2024)

4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CID

Os dados obtidos a partir da análise CID foram utilizados analisar a resistência à fissuração do concreto adicionado com fibras de sorgo sacarino. Desse modo, foi possível realizar uma comparação com os resultados obtidos pelos concretos produzidos por França (2023) e Almeida (2023) que juntas produziram um concreto convencional de referência e também reforçados fibras de *Luffa Cylindrica*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura foi realizada com o objetivo de demonstrar que a técnica de correlação de imagem digital é uma ferramenta eficiente quando aplicada de forma correta, não gerando qualquer alteração ou interferência no objeto estudado. Os resultados gerados nesta análise foram descritos a seguir.

Como mencionado na etapa metodológica, foram utilizadas algumas ferramentas digitais como, os buscadores acadêmicos Google Acadêmico e *Science Direct*, o portal Periódico CAPES, a BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações) e o diretório de revistas ScieELO (*Scientific Electronic Library Online*), com o intuito de selecionar e identificar os principais trabalhos acadêmicos dentro da questão problema que foi delimitada. E foram aplicados os seguintes descritores:

- Descritor 1: *Digital image correlation*
- Descritor 2: *Screen image deformation*
- Descritor 3: *Digital picture displacement*

Para a pesquisa, utilizando o descritor 1 “*Digital image correlation*” e aplicando o filtro de 2014-2024, foram gerados 598.000 resultados do Google Acadêmico, 196.856 resultados no Science Direct, 27.141 resultados no Periódicos CAPES, 1.386 resultados na BDTD e 76 resultados no ScieELO.

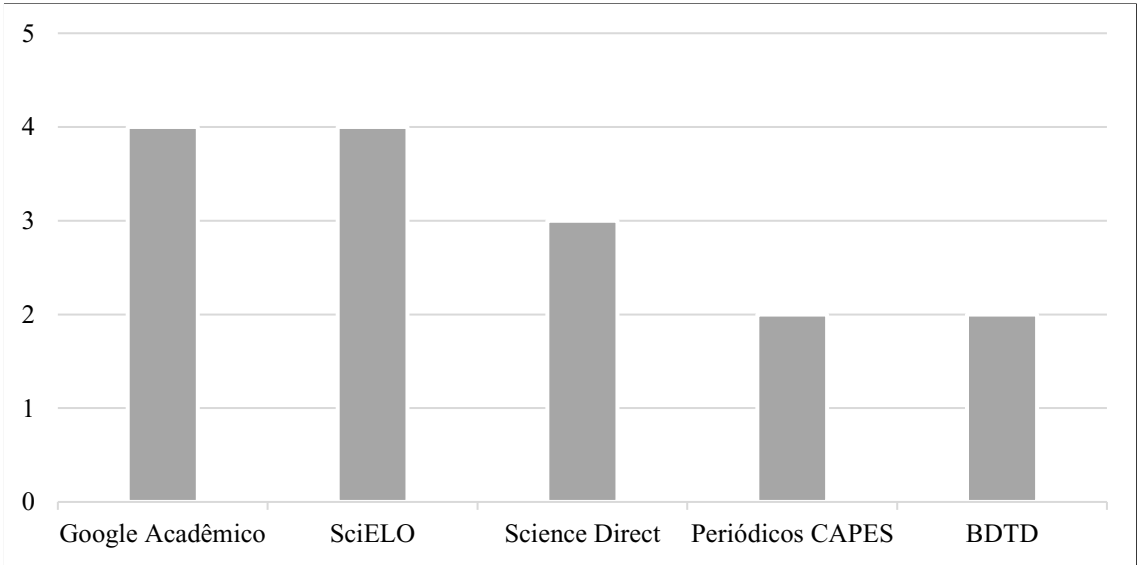
Para a pesquisa, utilizando o descritor 2 “*Screen image deformation*” e aplicando o filtro de 2014-2024, foram gerados 21.400 resultados do Google Acadêmico, 26.159 resultados no Science Direct, 122 resultados no Periódicos CAPES, 0 resultados na BDTD e 0 resultados no ScieELO.

Para a pesquisa, utilizando o descritor 3 “*Digital picture displacement*” e aplicando o filtro de 2014-2024, foram gerados 28.400 resultados do Google Acadêmico, 12.251 resultados

no Science Direct, 287 resultados no Periódicos CAPES, 46 resultados na BDTD e 0 resultados no ScieELO.

Sendo assim, selecionou-se 15 trabalhos acadêmicos produzidos nos últimos 10 anos (2014-2024), sendo eles 12 artigos científicos, duas dissertações de mestrado e uma tese de doutorado. A quantidade de trabalhos selecionados por base de dados/ferramentas digitais pode ser observada na Figura 24.

Figura 24: Quantidade de trabalhos selecionados de acordo com a base de dados



Fonte: Autor (2024)

A seguir no Quadro 2, é possível observar a análise feita a partir dos 15 trabalhos acadêmicos selecionados. A tabela está ordenada de acordo com o ano de publicação e contém informações como: título do trabalho, autor, ano, metodologia e resultados.

Quadro 2: Análise dos trabalhos selecionados

TÍTULO DO TRABALHO	AUTOR	ANO	METODOLOGIA	RESULTADOS
Compressive behaviors of cylindrical concrete specimens made of demolished concrete blocks and fresh concrete	WU, Bo; LIU, Chunhui; WU, Yaopeng	2014	O estudo utiliza a técnica de correlação de imagem digital (CID) para medir deslocamentos e distribuição de deformações na superfície frontal das	A CID permitiu o cálculo de deslocamentos e distribuição de deformações sobre a superfície frontal da amostra, fornecendo informações sobre o comportamento das amostras sob compressão uniaxial. Dessa forma, aplicação da correlação

			amostras de concreto durante o processo de carregamento.	digital de imagens no estudo facilitou a medição de deslocamentos, distribuição de deformações e propagação de fissuras na superfície frontal das amostras de concreto, fornecendo informações valiosas sobre seu comportamento durante o processo de carregamento.
Utilizing digital image correlation to determine stress intensity factors.	DEHNAVI, M. Y. <i>et al.</i>	2014	O estudo utilizou a CID para avaliar os fatores de intensidade de tensão no plano ou <i>stress intensity factors</i> (SIFs) para o contato entre um meio plano com uma fissura na borda e uma cunha inclinada assimétrica.	Os valores de SIF obtidos na análise CID foram comparados com os resultados obtidos pelo método de fotoelasticidade. Uma boa concordância foi observada entre as duas técnicas, destacando a confiabilidade do DIC. Sendo assim, embora a técnica DIC requer uma configuração simples e preparação mínima das amostras, ela é capaz de fornecer resultados confiáveis.
Failure mechanism of fibre reinforced concrete under splitting test using digital image correlation.	BOULEKBAC HE, Bensaid <i>et al.</i>	2014	A técnica de correlação de imagem digital (CID) foi usada para medir e analisar a deformação e o comportamento de fissuração das amostras durante os testes de divisão.	A técnica CID forneceu informações precisas e detalhadas sobre o mecanismo de fratura de concretos reforçados com fibra de aço, incluindo a detecção da primeira fissura, a medição da abertura da fissura e o rastreamento do processo de fissuração.
Mechanical properties identification of sheet metals by 2D-digital	NGUYEN, Van-Thuong <i>et al.</i>	2017	O trabalho desenvolveu um sistema 2D-DIC interno para medir propriedades	Os resultados do método DIC revelaram resultados razoáveis na medição de deformação global e deformação local para

image correlation method.			mecânicas de chapas metálicas como módulo de Young e índice de Poisson.	capturar o comportamento da fratura dúctil dos materiais.
Deformações e modo de ruptura em prismas de blocos de concreto: análise experimental com extensometria e correlação de imagem.	SCHOSSLER, Rodrigo Teixeira.	2019	A correlação digital de imagem (CID) foi utilizada para medir e analisar as deformações nos blocos de concreto. Dessa forma, a metodologia envolveu comparar as deformações específicas obtidas na CID com as dos medidores de tensão.	A análise DIC forneceu informações sobre as deformações específicas dos blocos, permitindo uma compreensão detalhada de seu comportamento sob carga. Os resultados do CID foram usados para gerar diagramas de tensão-deformação, fornecendo informações sobre as propriedades mecânicas dos blocos. Além disso a CID também ajudou a visualizar a progressão da falha nos blocos, capturando o avanço do processo de ruptura.
Crack initiation and failure development in bimrocks using digital image correlation under dynamic load.	SHARAFISAF A, Mansour; ALIABADIAN, Zeinab; SHEN, Luming	2020	O estudo usou o método de correlação de imagem digital (CID) para analisar a iniciação e a falha de fissuras em <i>bimrocks</i> (misturas de rochas compostas por blocos rígidos) sob carregamento dinâmico de impacto.	Os resultados do DIC mostram que <i>bimrocks</i> com blocos grandes exibem considerável tortuosidade na trajetória da fissura e extensa falha irregular, enquanto <i>bimrocks</i> com blocos de tamanho médio apresentam menos tortuosidade e falha irregular. <i>Bimrocks</i> com pequenos blocos se comportam de forma semelhante à rocha intacta.
Strain analysis in diametral compression test through digital image correlation.	SILVA, Â. Q. N.; GALERY, R.	2021	O estudo aplicou a técnica de Correlação de Imagens Digitais (CID 2D) em um ensaio de compressão diametral,	Os resultados deste estudo demonstram que a técnica CID permite complementar as informações dos testes de compressão diametral obtidos com extensômetros, auxiliando

			comparando o resultado medido por um extensômetro com o resultado obtido pela técnica CID.	na visualização e propagação de fissuras e em alguns casos, substituindo o uso de extensômetros, na medida em que variação é tolerada.
DIC method applied in the calibration of FEA model of rock-mortar cohesive interface	SILVA JUNIOR, E.; KZAM, A.; LOPEZ, J.	2023	Foi utilizado o método de correlação de imagens digitais (CID) para obtenção dos dados de deslocamento de ensaio laboratorial que simula o comportamento ao cisalhamento das juntas rocha-concreto.	Os resultados do método CID foram utilizados para calibrar o modelo numérico não linear do ensaio utilizando o método bilinear de zona coesiva nos elementos de contato interfacial rocha-argamassa. Através de uma análise paramétrica variando o parâmetro de tensão cisalhante máxima dos elementos coesivos de contato, determinou-se a tensão máxima de tração, deslocamento crítico e taxa de dano.
Evaluating the accuracy of a digital correlation system to predict the fatigue failure of additively manufactured parts	BOTHA, S.; FOURIE, J.; KLOPPERS, C. P.	2023	O estudo investigou o nível de precisão que um sistema DIC poderia obter como um teste não destrutivo alternativo para prever onde e quando uma amostra de teste falharia. Para determinar se esta alternativa era viável, foram realizados testes até que os corpos de prova falhassem. As imagens DIC foram analisadas a 50% da vida em fadiga e no ponto imediatamente antes da falha para determinar se o	OS resultados obtidos nos testes experimentais do estudo mostram que o sistema DIC poderia prever com precisão o ponto de falha na meia-vida de fadiga em apenas 10% das amostras de teste que foram investigadas. O sistema DIC foi capaz de prever com precisão o ponto de falha logo antes da falha ocorrer em apenas 25% das amostras de teste investigadas.

			sistema DIC indicava com precisão a concentração de deformação no mesmo ponto onde as amostras falharam.	
Measuring J-R curve under dynamic loading conditions using digital image correlation	CHEN, Cheng; QIAN, Xudong.	2023	O artigo aplica a técnica de correlação de imagem digital CID para quantificar a curva JR dinâmica (uma representação gráfica usada para descrever o comportamento de materiais frente à propagação de trincas).	O método proposto permitiu a medição consistente e a quantidade de extensão de fissura apenas a partir do deslocamento medido pelo DIC na superfície da amostra, o que facilita a comparação direta da fratura tenacidade sob diferentes taxas de deformação. Os resultados demonstram melhor resistência à fratura de materiais metálicos sob taxas de deformação aumentadas.
Determination of Tensile Properties of Polyester-Industrial Waste Red Mud Composites Using Digital Image Correlation (DIC)	RODRIGUES, Marcelo <i>et al.</i>	2023	O trabalho avaliou as propriedades mecânicas de tração de compósitos de matriz de poliéster carregados com um resíduo industrial de lama vermelha, com fração mássica de 20%. As propriedades foram levantadas através da técnica convencional de extensômetro e comparadas com os dados obtidos através do DIC.	Os resultados mostraram que a técnica DIC foi precisa no monitoramento dos deslocamentos e na determinação da deformação média dos corpos de prova ensaiados, além de fornecer amplos campos de deformação, para avaliação de mecanismos de falha ao longo do processo de solitação de amostra.
Correlação de imagem digital e modelagem numérica aplicada à	LACERDA, Benício de Morais.	2023	O trabalho utilizou a correlação de imagem digital (CID) juntamente com uma	Os resultados mostraram que a CID forneceu dados para a elaboração de uma simulação numérica para construir e

determinação de propriedades elásticas em revestimentos de argamassa sob tração			modelagem numérica para a avaliação das propriedades elásticas de argamassas de revestimentos aplicadas sobre substratos cerâmicos quando submetidos a esforços de tração.	analisar em elementos finitos um modelo de equação adequado para a escala proposta no estudo experimental.
Internal crack detection based on thermal excitation enabled digital image correlation method	WU, Dan <i>et al.</i>	2024	O trabalho utiliza o método de correlação de imagens digitais com excitação de fluxo térmico para obter deformação de campo total para detecção de trincas internas. Sendo assim, a excitação térmica foi utilizada para aquecer a amostra e a correlação de imagens digitais foi aplicada para medir o campo de deformação.	Os resultados experimentais mostram que o método proposto pode detectar com eficácia as trincas internas (fabricadas por teste de fadiga) no material de aço inoxidável 204. Os resultados mostraram que o método de correlação de imagem digital estimulada termicamente pode detectar trincas internas no material térmico próximo à superfície e é um método promissor para detecção de danos por trincas internas.
A new digital Image correlation method for discontinuous measurement in fracture analysis.	TIAN, Yuzhe <i>et al.</i>	2024	O artigo propõe o método <i>Adaptive Discontinuous Digital Image Correlation</i> (AD-DIC), que é explicitamente projetado para medir campos de deslocamento descontínuos de maneira eficaz e precisa na análise de fraturas.	Os resultados mostraram que o método AD-DIC atinge um alto nível de precisão no cálculo da abertura de fissuras, com erro inferior a 0,1 pixels. Os experimentos reais apresentados neste estudo demonstram as amplas aplicações do método AD-DIC na análise de fraturas, incluindo a identificação de fissuras que são difíceis de detectar a olho nu, a medição da abertura e do ângulo de inclinação da fissura e o rastreamento dos processos de

				propagação de fissuras ao longo do tempo.
Compressive failure analysis of seawater-mixed aluminate cement concrete based on digital image correlation technique.	YUAN, Yuan <i>et al.</i>	2024	A técnica de correlação de imagem digital (CID) foi utilizada para observar a deformação de campo total do concreto de cimento-aluminato misturado com água do mar sob as condições de cura de água doce/água do mar (CAF/CAS) em todo o processo de compressão.	Os resultados dos testes revelaram que o processo de deformação pode ser dividido em quatro estágios, incluindo o estágio de compactação, o estágio de deformação elástica, o estágio de propagação de fissuras e o estágio de falha. Além disso, demonstrou que a ruptura tanto do CAF quanto do CAS resultou da combinação de ruptura por cisalhamento e ruptura por tração perpendicular à direção do carregamento.

Fonte: Autor (2024)

Os trabalhos selecionados forneceram de forma geral, uma visão relativamente ampla sobre o funcionamento da técnica de correlação de imagem digital, fornecendo resultados positivos em seus estudos. Notou-se que a técnica apresentou resultados precisos em todos os trabalhos analisados, seja para medir deformações ou deslocamentos, até quando comparado com outras técnicas ou modelos teóricos conforme analisado por Silva, Kzam, Lopez (2023).

Silva, Kzam, Lopez (2023), utilizaram o método de correlação de imagem digital (CID) para calibrar um modelo MEF (Método dos Elementos Finitos) de interface coesiva rocha-argamassa (estrutura formada por argamassa assentada sobre uma superfície inclinada de granito rochoso). Para realizar o monitoramento do processo de propagação de fissuras na interface concreto-rocha em dois testes diferentes: flexão em três pontos e cisalhamento em quatro pontos, aplicou-se a CID e realizou uma e realizou uma comparação com os mesmos pontos do modelo numérico. Foi possível obter dados de deslocamentos verticais e horizontais, para os pontos especificados, calibração do modelo numérico, além da comparação dos dados da CID com a análise de elementos infinitos permitindo a validação do modelo numérico desenvolvido.

Wu, B, *et al.* (2014), produziu corpos de prova cilíndricos feitos de blocos de concreto demolidos e concreto fresco e realizou uma análise dos comportamentos de compressão dos mesmos. Foi possível então determinar, através do método de correlação de imagem digital o

comportamento de falha dos corpos de prova, além de detectar a iniciação e propagação de fissuras. Além disso, autor mostra que a técnica CID é não destrutiva, ou seja, não gera danos ou interferência no material estudado. A técnica CID forneceu uma análise da superfície estudada, a partir da captação de imagens durante o processo de carregamento de compressão, rastreando o desenvolvimento e propagação de fissuras. E também, foi possível detectar a medição do campo completo de deformação e distribuição de tensões o que é essencial para entender o comportamento do concreto sob estresse.

Yuan, Y. *et al.* (2024), realizou uma análise de falha compressiva do concreto de cimento aluminato misturado com água do mar, utilizando a técnica de correlação de imagem digital (CID) e mostrou que o método consegue verificar a deformação completa do concreto sob compressão identificando os estágios de deformação e mecanismos de falha. O processo de deformação pôde ser dividido em quatro estágios (compactação, deformação elástica, propagação de fissuras e estágio de falhas), e que a falha resulta da combinação de falha por cisalhamento e tração.

Sharafisafa, M. *et al.* (2020), realizou um estudo que retrata a iniciação e o desenvolvimento de trincas e falhas em *bimrocks* (rochas bloco-em-matriz) sob carga dinâmica, utilizando a correlação de imagem digital. Através da técnica, foi possível além da detecção de falhas, realizar uma análise detalhada do comportamento de deformação dos *bimrocks*, a CID combinada com a filmagem de alta velocidade permitiu a visualização clara do processo de carregamento e falha, além de fornecer dados quantitativos sobre a deformação e falha de *bimrocks*.

Schossler (2019), utilizou a técnica de Correlação Digital de Imagem (CID) para avaliar deformações e o processo de ruptura da alvenaria estrutural e a influência da argamassa na resistência e no modo de ruptura das paredes. A técnica foi capaz de fornecer resultados positivos no estudo de deformações e modo de ruptura em prismas de blocos de concreto, permitindo a detecção precisa das deformações sob cargas de compressão. A CID, permitiu a visualização clara do processo de deformação e ruptura e também forneceu dados quantitativos sobre a deformação e ruptura, o que é valioso para a modelagem e previsão do comportamento desses materiais.

Rodrigues *et al.* (2023), determinou as propriedades mecânicas em tração do poliéster utilizando o método de correlação de imagem digital (CID) e comparou com a técnica convencional de extensômetro. Sendo assim, a técnica foi precisa no monitoramento e em determinar os deslocamentos de forma precisa além de fornecer o campo de deformações de forma completa da evolução do campo do mecanismo de ruptura do poliéster.

5.2. ETAPA EXPERIMENTAL

5.2.1. Comportamento de rupturas

O comportamento da ruptura dos corpos de prova está mais associado à qualidade da execução do ensaio do que em relação da qualidade do concreto em si. Senso assim, pelo tipo de ruptura é possível identificar se o ensaio foi bem executado desde a hora da moldagem, ou na hora da retífica, ou na hora do capeamento (Valin, 2022).

A NBR 5739:2018, indica os tipos de ruptura dos corpos de como subdivididos em:

- Tipo A: Cônica e cônica afastada em 25 mm de capeamento;
- Tipo B: Cônica e bipartida e cônica com mais de uma bipartição;
- Tipo C: Coluna com formação de cones;
- Tipo D: Cônica e cisalhada;
- Tipo E: Cisalhada;
- Tipo F: Fraturas no topo e/ou na base abaixo do capeamento;
- Tipo G: Similar ao tipo F – com fraturas próximas ao topo.

Segundo Valin (2022), os tipos A, B e C, são típicos ou desejáveis, os tipos D e E são aceitáveis e os tipos F e G são indesejáveis. Sendo assim, para os corpos de prova submetidos a compressão axial, foram identificados os tipos de ruptura cisalhada (ocorre em planos inclinados em relação à direção da força cortante) no concreto C1 e ruptura coluna com formação de cones (indica boa distribuição de cargas), conforme Figura 25a e Figura 25b.

Figura 25: Corpos ensaiados em compressão axial. A) Ruptura cisalhada b) Ruptura coluna com formação de cones.



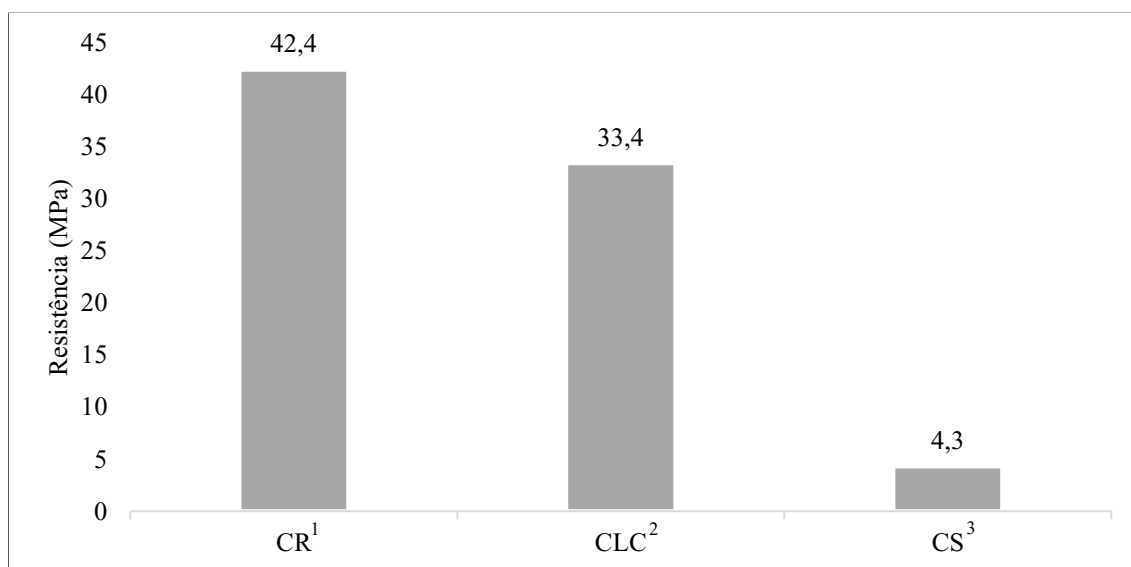
5.2.2. Resistência do concreto

O concreto produzido apresentou certa fragilidade devido à perda de água para o sorgo no momento de confecção do material, gerando um concreto pouco fluido. A perda de resistência fica evidente quando comparado com o concreto referência de Almeida (2023), que apresentou a resistência superior à esperada para o concreto $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ proposto.

Almeida (2023) observou também que a adição de fibras de *Luffa Cylindrica* provocou uma diminuição da resistência pois a consistência presente no concreto não gerou fluidez necessária para o correto adensamento do concreto. Fator também verificado durante a confecção do concreto com adição de sorgo sacarino. Outro fator determinante na perda da resistência e consequente fragilidade do material, consistiu na presença de vazios.

Na Figura 26 a seguir, é possível verificar o valor médio das resistências obtidas pelos corpos de prova de concreto adicionado com sorgo sacarino (CS) e os concretos referência (CR) e adicionado com *Luffa Cylindrica* (CLC) produzidos por Almeida (2023) e França (2023) nos ensaios de compressão axial.

Figura 26: Resistência à compressão axial (28 dias).



Fonte: Autor (2024).

Com relação a resistência à tração por compressão diametral foi observado uma redução da resistência do concreto adicionado com sorgo sacarino quando comparado tanto com o concreto referência quando com o concreto adicionado com *Luffa Cylindrica*. Sendo assim, o

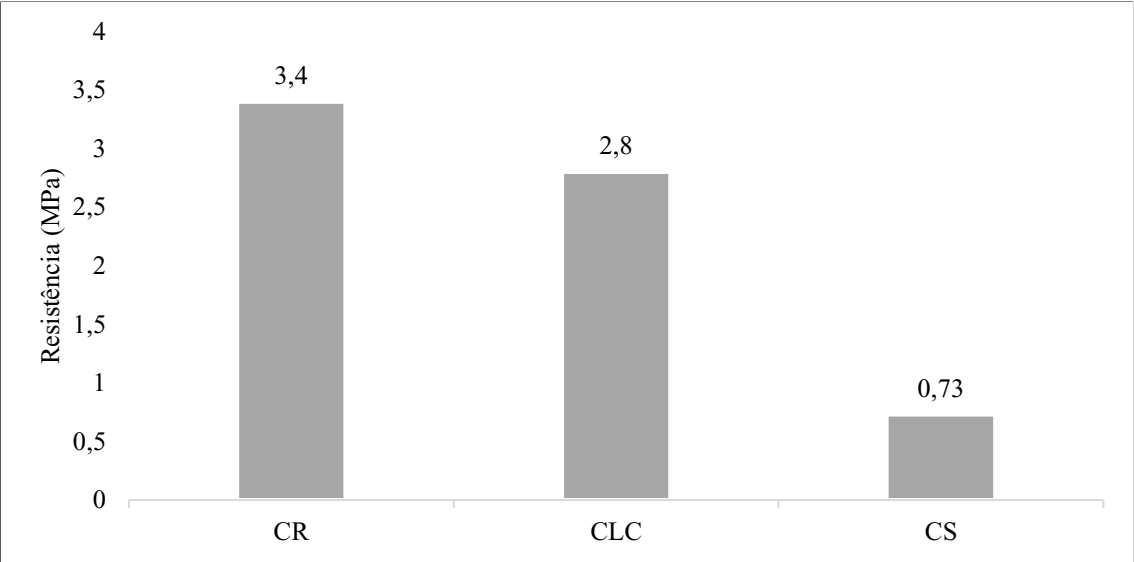
¹ CR – Concreto referência produzido por Almeida (2023) e França (2023).

² CLC – Concreto com adição de fibras de *Luffa Cylindrica* produzido por Almeida (2023) e França (2023).

³ CS – Concreto com adição de Sorgo Sacarino (*Sorghum bicolor*).

concreto referência (CR) apresentou resistência de 3,4 MPa, enquanto que o concreto com sorgo sacarino apresentou resistência de 0,73 Mpa, ou seja, uma redução de 78,53% da sua resistência à tração. Os dados referentes às resistências à compressão diametral estão na Figura 27 abaixo.

Figura 27: Resistência à tração por compressão diametral (28 dias).



Fonte: Autor (2024).

A princípio não foi possível realizar uma comparação entre as resistências adquiridas pelo concreto aos 7 dias em relação aos de 28 dias devido à não conformidade de 2 corpos de prova que não se enquadravam no padrão estabelecidos na norma NBR 7222 para o ensaio de compressão diametral e também devido a fragilidade dos corpos de prova que seriam utilizados no ensaio de compressão axial onde um fissurou ao fixar na prensa e outro rompeu quando aplicado carga de apenas 3 kN. Desse modo, na Tabela 4 a seguir, é possível observar os valores das cargas de ruptura e das resistências dos corpos de prova ensaiados aos 28 dias.

Tabela 4: Descrição dos ensaios realizados

Compressão (28 DIAS)				
Concreto	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. Variação
C1	33,71	4,30	0,325	8,17%
C2	28,76	3,65		
Tração (28 DIAS)				
Concreto	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. Variação
T1	23,54	0,73	0,045	6,57%
T2	21,00	0,64		

Fonte: Autor (2024)

A nomenclatura dos corpos de prova produzidos com adição de sorgo sacarino e submetidos a ensaios de tração e compressão, é descrito conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Nomenclatura dos corpos de prova e seus respectivos ensaios.

Nomenclatura dos corpos de provas adicionados com Sorgo Sacarino (<i>Sorghum bicolor</i>)	
C1	Primeiro corpo de prova submetido à compressão axial.
C2	Segundo corpo de prova submetido à compressão axial.
T1	Primeiro corpo de prova submetido à tração por compressão diametral.
T2	Segundo corpo de prova submetido à tração por compressão diametral.

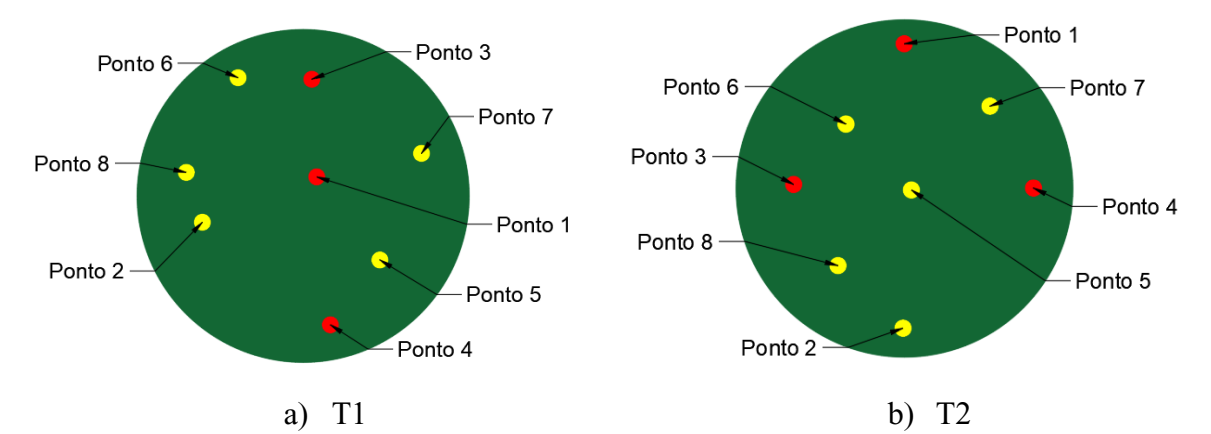
Fonte: Autor (2024).

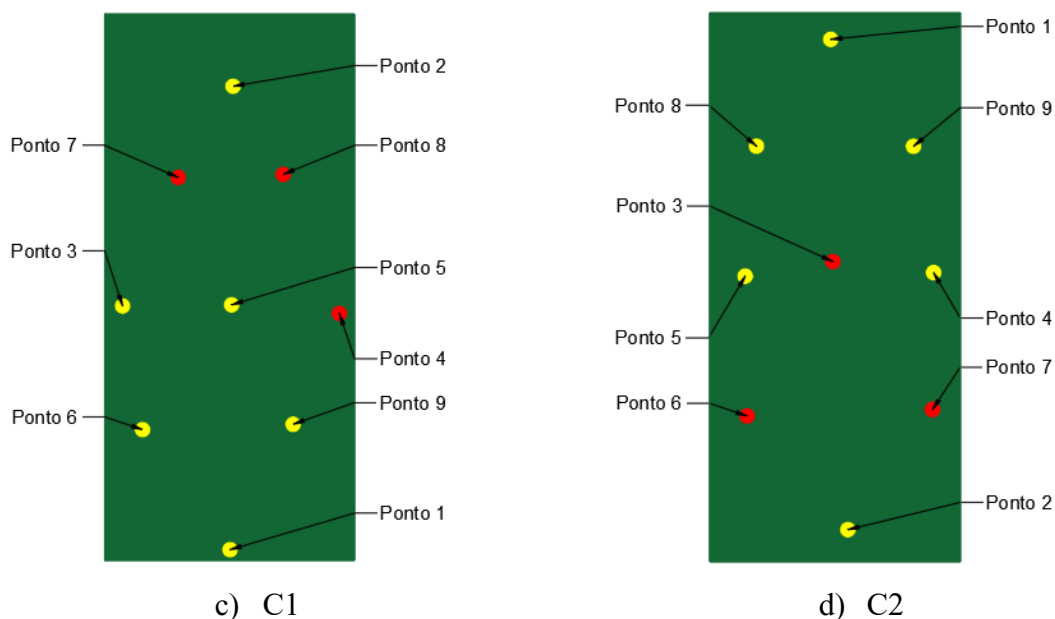
O primeiro corpo de prova submetido a compressão axial (C1) rompeu-se com uma carga máxima de 33,71 kN. apresentando uma resistência levemente superior ao corpo de prova C2. Já dentre os concretos submetidos a tração por compressão diametral, temos o corpo de prova T1 rompendo-se com uma carga de 23,54 kN com consequente resistência de 0,73 MPa pouco superior a resistência do corpo de prova T2 com 0,64 MPa.

5.2.3. Análises de Tensão-Deformação

Para a observação mais detalhada do comportamento das deformações e deslocamentos, o método da correlação de imagem digital (CID) foi utilizado a partir da delimitação de uma região de interesse a qual foi delimitada com 8 pontos nos dois corpos de prova submetidos a compressão diametral (Figuras 28a e 28b) e 9 pontos nos outros dois corpos de prova submetidos a compressão axial (Figuras 28c e 28d).

Figura 28: Representação dos pontos selecionados.





Fonte: Autor (2024).

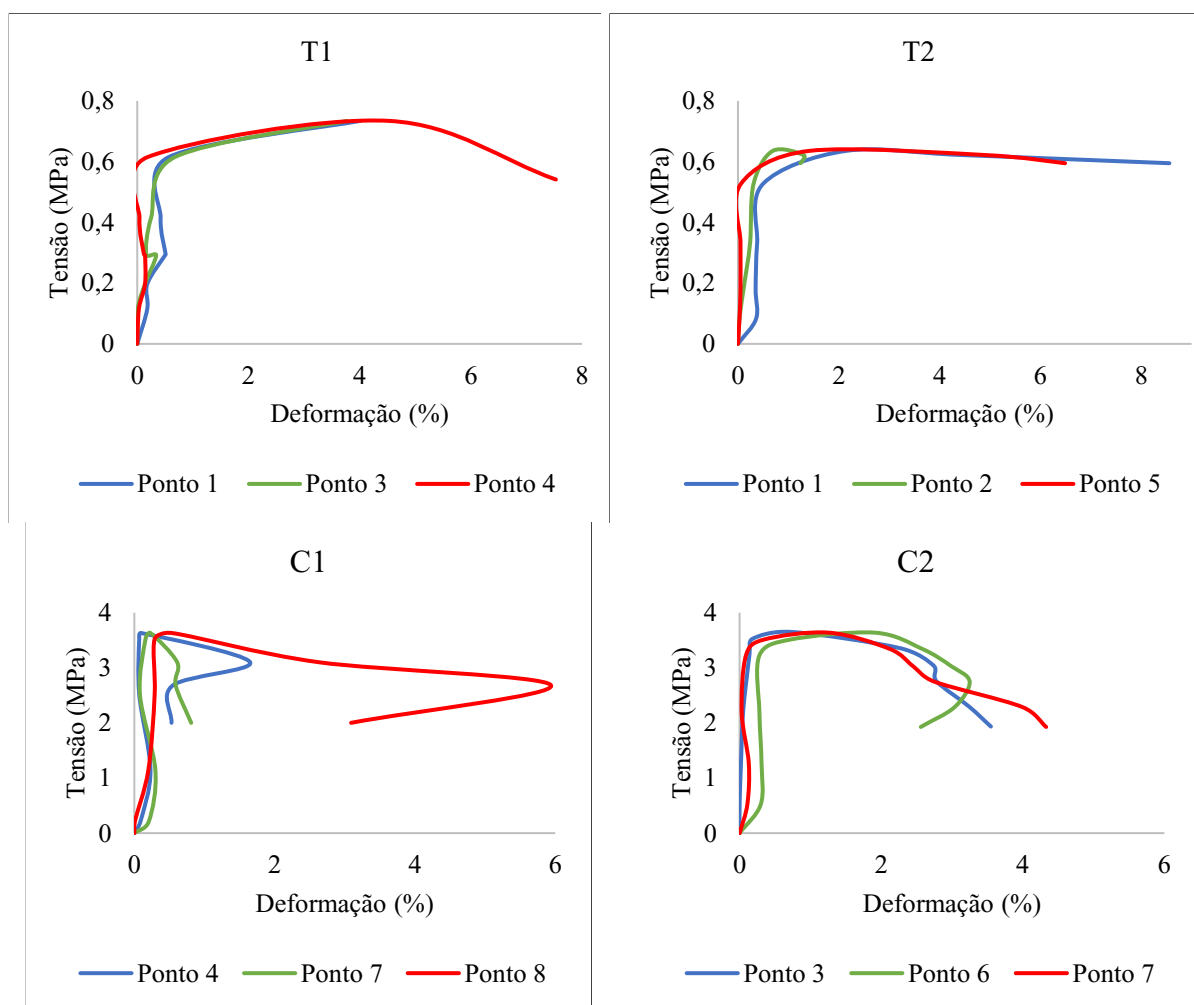
Dentre esses pontos, foram selecionados 3 o quais foram destacados em vermelho na Figuras 28a, Figura 28b, Figura 28c e Figura 28d, sendo eles pontos próximos às regiões de fissuras e onde as deformações e os deslocamentos eram maiores e que representavam de maneira mais fiel o ensaio.

A análise da curva tensão-deformação do concreto é crucial para o projeto de estruturas, pois ela fornece uma série de informações valiosas sobre o comportamento do material. Além de permitir a determinação da resistência à compressão do concreto, que é um indicador fundamental da capacidade do material de suportar cargas sem falhar, a curva também revela a deformação de pico, que é a deformação máxima que o concreto pode suportar antes de romper (Rauecker et al., 2019). Os gráficos de foram então gerados utilizando os dados fornecidos pelo *Gom Inspect Correlate* e plotados na ferramenta Excel.

A Figura 29 a seguir, fornece uma observação do comportamento das deformações nesses pontos para os 4 corpos de prova ensaiados. Dentre eles, o corpo de prova T2 (Figura 29b) apresentou pontos com maiores deformações como é possível observar na imagem e também pode ser visualizado no item 5.3.1.2. deste trabalho. O ponto 1 do corpo de prova T2, se encontra na sua parte superior apresentando uma deformação de até 8,56% seguido pelo ponto 5 que foi inserido em uma região central com deformação de 6,49%. Porém, após o instante 73 s, o *software* não mais os reconheceu porque a fissuração nesta região central do corpo de prova deformou o concreto e a região entre a fissura ficou indetectada pelo *Gom Inspect Correlate*, sendo assim, os pontos não puderam ser analisados restando aproximadamente 30 s de ensaio. Em T1 (Figura 29a), as deformações foram analisadas até o

estágio 79 s, e dentre os pontos seleccionados, o ponto 4 apresentou maior deformação com 7,53%, seguido pelo ponto 1 e ponto 3 com deformações de 4,01% e 3,77%, respectivamente.

Figura 29: Curvas tensão-deformação.



Fonte: Autor (2024)

Para os concretos submetidos a compressão axial, tem-se o C1 apresentando, dentre os pontos seleccionados, uma maior deformação com 5,94% e a medida de que o ensaio chega ao fim e a carga aplicada pela prensa sofre uma pequena redução, o gráfico retorna à deformação de 3,09%. Já os pontos de prova C2 apresentam um comportamento semelhante, dentre os pontos seleccionados, tendo como deformação máxima o ponto 7 com 4,33% aos 113s.

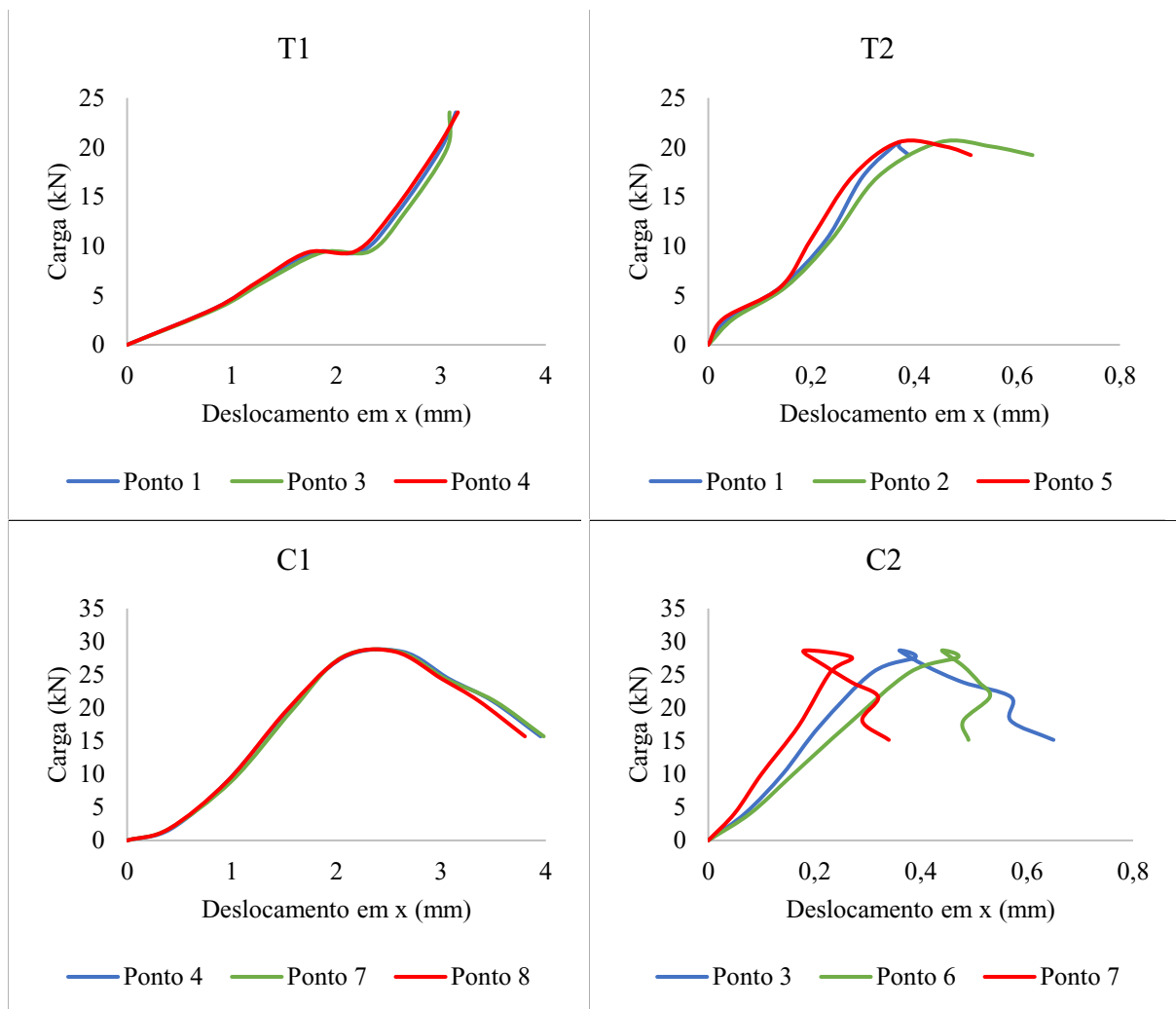
Segundo Schossler (2019), quando argamassas e o concreto são submetidos a uma tensão de compressão axial, inicialmente eles exibem um comportamento elástico-linear. Esse comportamento persiste até que as primeiras microfissuras comecem a aparecer. A partir desse ponto, o material começa a endurecer, um fenômeno conhecido como “endurecimento” ou “*hardening*”. Isso é marcado por um aumento na resistência do material, com deformações continuamente crescentes até que a compressão do material (f_c) seja alcançada. Nesse estágio,

o material começa a amolecer, em um processo que envolve o aumento tanto do tamanho quanto do número de fissuras.

5.2.4. Análises de Carga-Deslocamento

Além das deformações, também foram observadas as características dos deslocamentos causados pela carga aplicada em diferentes estágios de tempo durante a realização dos ensaios. Sendo assim, foram coletados os dados referentes a cargas e deslocamentos em diferentes estágios de 10 s e então plotados os gráficos. A Figura 30 a seguir, fornece uma observação do comportamento dos deslocamentos em 3 pontos selecionados para os 4 corpos de prova ensaiados. É possível observar que o corpo de prova T1 apresenta um comportamento de deslocamento sempre crescente até o estágio 79 s, onde foi aplicada a carga máxima de 23,54 kN e deslocamento máximo de 3,16 mm.

Figura 30: Curvas carga-deslocamento em x (vertical)

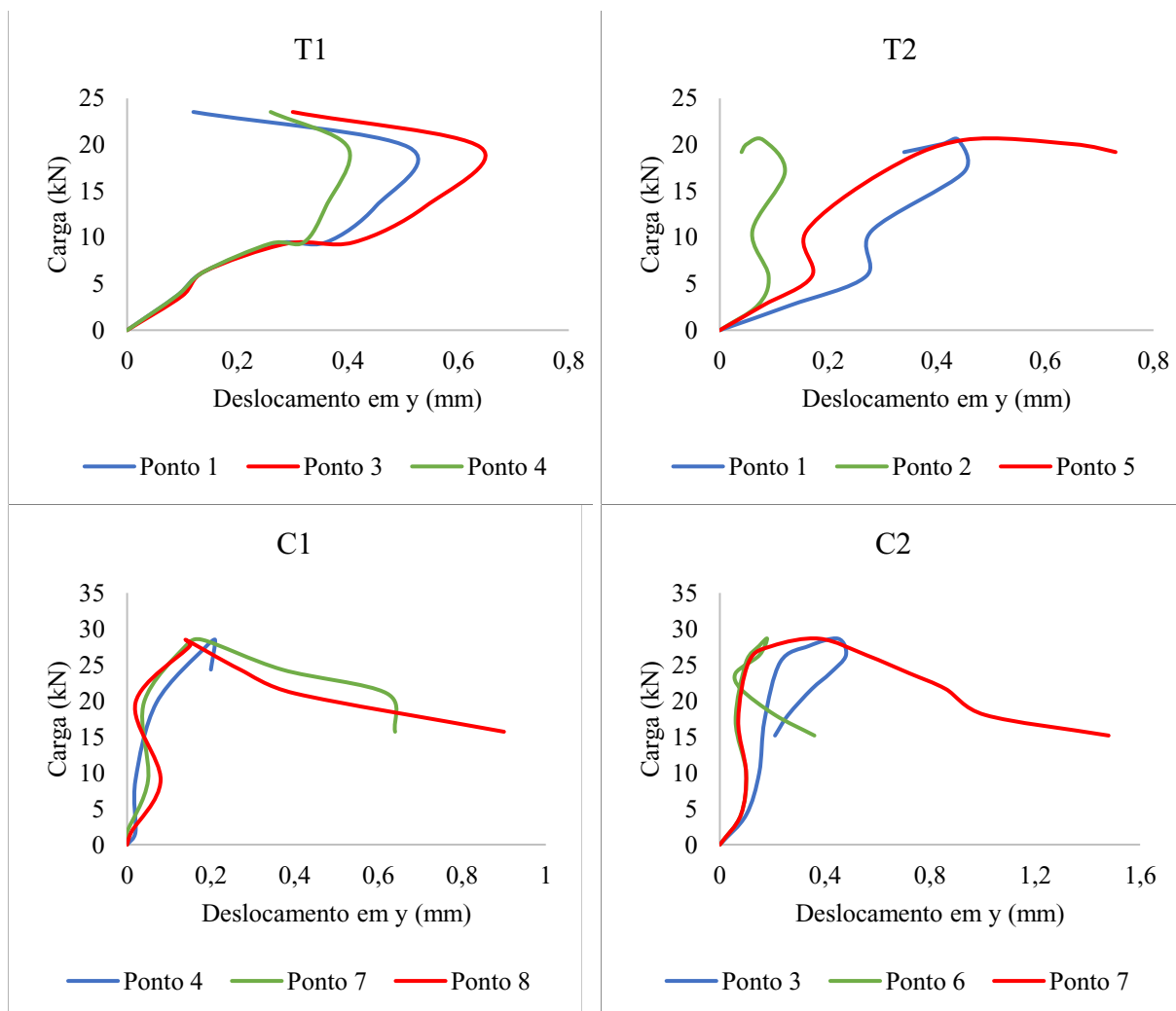


Fonte: Autor (2024).

Os deslocamentos do corpo de prova T2 foram acompanhados até o estágio 73 s, onde o ponto de deslocamento máximo (ponto 2), deslocou 0,63 mm. Já os corpos de prova submetidos a compressão axial C1 e C2, apresentaram deslocamentos máximos de 3,98 mm em 120 s e 0,65 mm em 113 s, respectivamente.

Com relação aos deslocamentos no eixo y, para os 3 pontos selecionados do concreto T1, tem-se o ponto 3 com deslocamento de 0,54 mm apresentando maior valor no estágio 79 s. Para o corpo de prova T2 o maior deslocamento foi observado no ponto 5 com valor de 0,73 mm, no estágio 73 s. Para os concretos submetidos a compressão axial, tem-se o C2 apresentando maior deslocamento com 1,48 mm no estágio 113 s, seguido pelo C1 com deslocamento máximo de 0,9 mm no estágio 120 s. A Figura 31 a seguir, fornece uma observação do comportamento dos deslocamentos em 3 pontos selecionados para os 4 corpos de prova ensaiados.

Figura 31: Curvas carga-deslocamento em y (horizontal)



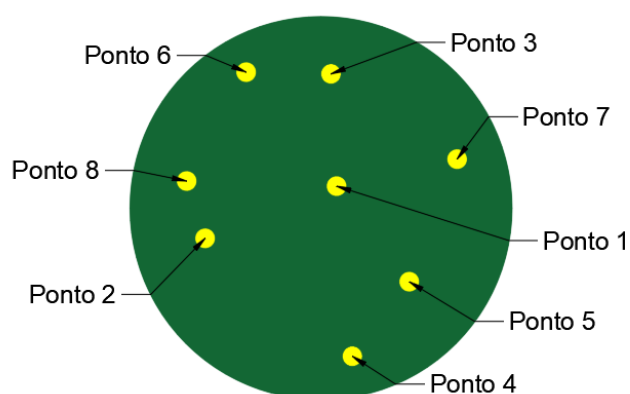
5.3. CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

5.3.1. Análise de deformações

5.3.1.1. Corpo de prova – T1

Para a análise de deformações nos corpos de prova submetido a tração por compressão diametral, foram definidos 8 pontos distribuídos ao longo da superfície dos corpos de prova T1 (Figura 32) com o intuito de analisar-se diferentes pontos de deformações.

Figura 32: Pontos distribuídos na região de interesse do T1



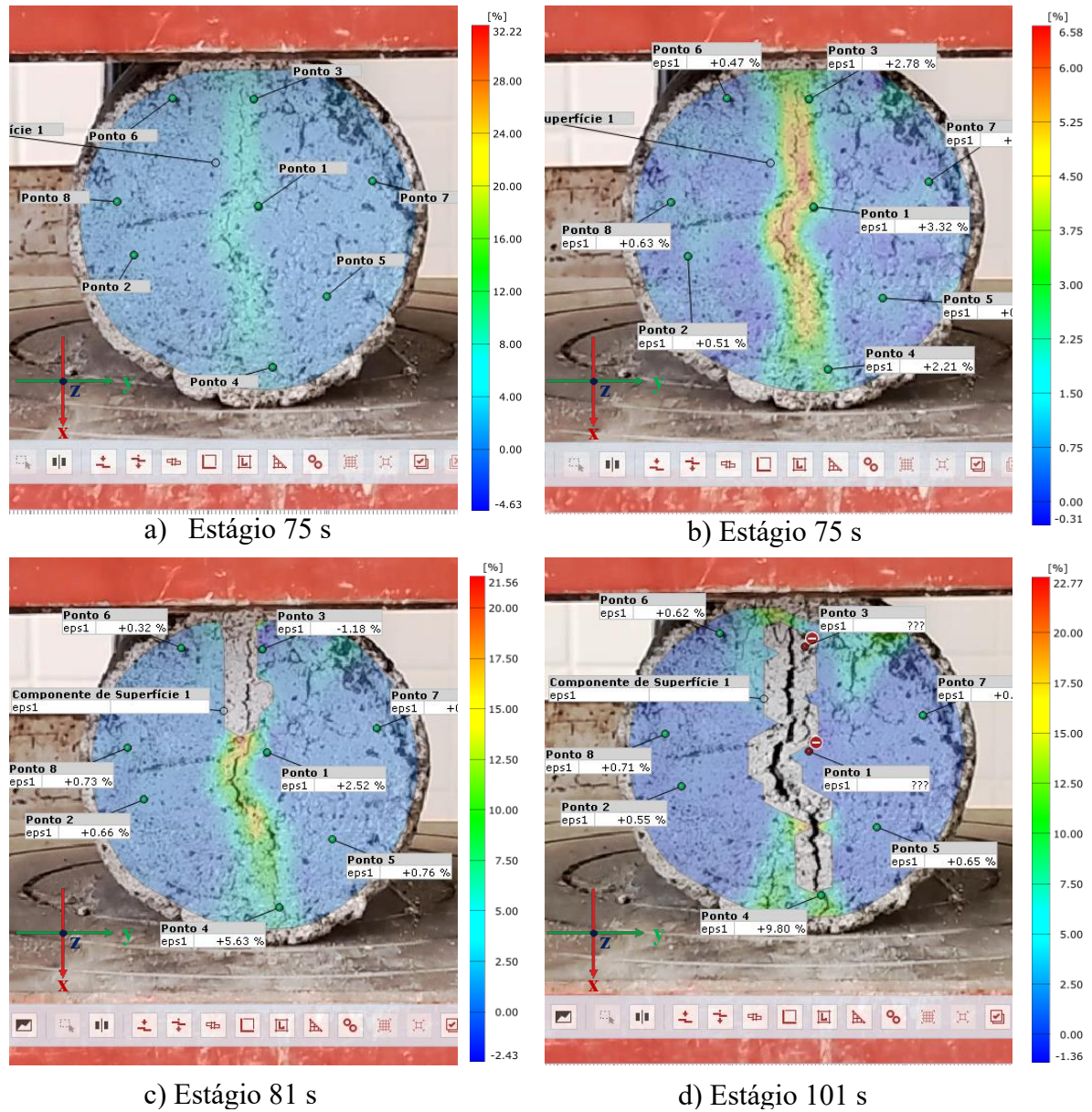
Fonte: Autor (2024).

No ensaio de compressão diametral, há a presença de duas forças concentradas diametralmente opostas aplicadas no corpo de prova cilíndrico gerando nos pontos do plano diametral contendo a linha de ação de cargas, estados de tensão, nos quais a componente de tensão normal ao referido plano é constante (Santos, 2015).

Sendo assim, Na Figura 33 abaixo, é possível verificar uma ordem cronológica de deformações do corpo de prova T1 (Corpo de prova 1 para o ensaio de tração por compressão diametral).

No *software Gom Inspect Correlate* foi aplicada a opção de análise de deformações “*Strain Maior*”. Utilizando a escala de deformações em estágio global, é possível perceber aos 75 s (Figura 33a), o surgimento de uma faixa de coloração azul que indica que essa região começa a apresentar aumento de tensões e consequentemente as fissuras surgirão ao longo desta faixa. Essa faixa corresponde a linha de ação de cargas e é melhor visualizada quando a visualização da escala é alterada para o estágio atual, o qual representa as deformações apenas para o instante determinado, gerando uma escala de cores mais intuitiva como observada na Figura 33b.

Figura 33: Estágios de deformação do corpo de prova T1.



Fonte: Autor (2024).

A primeira alteração de cores observada na Figura 33a, aconteceu quando utilizado a opção de visualização de escala de deformação em uma escala global, ou seja, em que todos os estágios de deformação do ensaio inteiro foram reunidos em uma escala de -4% até 32%.

Em seguida pode-se perceber que ao analisar as deformações no instante 75 s, agora em uma escala de forma local, ou seja, as deformações em uma escala para o instante 75s, percebem-se que as deformações crescem ao centro apresentando assim valores consequentemente maiores do que as outras regiões como se pode observar na Figura 33b. Mais em específico nos pontos 1, 3 e 4 (pontos destacados na Figura 32 e também observados na

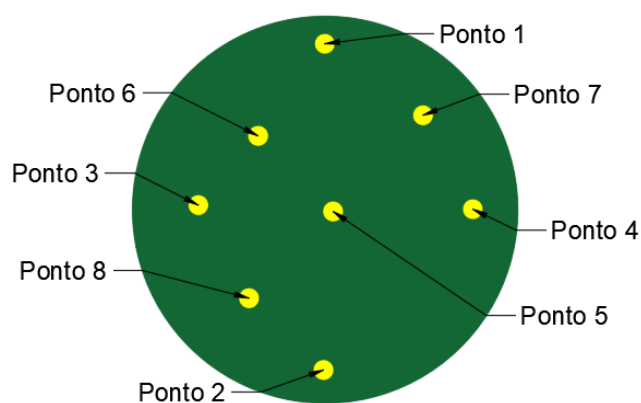
Figura 33b) que se situam na faixa central e vertical por onde a fissura acontece, com deformações 3,34%, 2,78% e 2,21%, respectivamente.

Já próximo ao fim do ensaio, é possível observar em na Figura 33d, que os pontos 1 e 3 apresentam um sinal vermelho junto com símbolos de interrogações. Isso significa que aquelas regiões onde os pontos estão localizados, o *software* não é mais capaz de medir deformações pois a região sofreu alterações e a região não pôde ser mais mapeada.

5.3.1.2. Corpo de prova – T2

Para a análise de deformações no corpo de prova submetido a tração por compressão diametral T2, foram definidos também 8 pontos distribuídos ao longo da sua superfície conforme Figura 34.

Figura 34: Pontos distribuídos pela região de interesse do T2



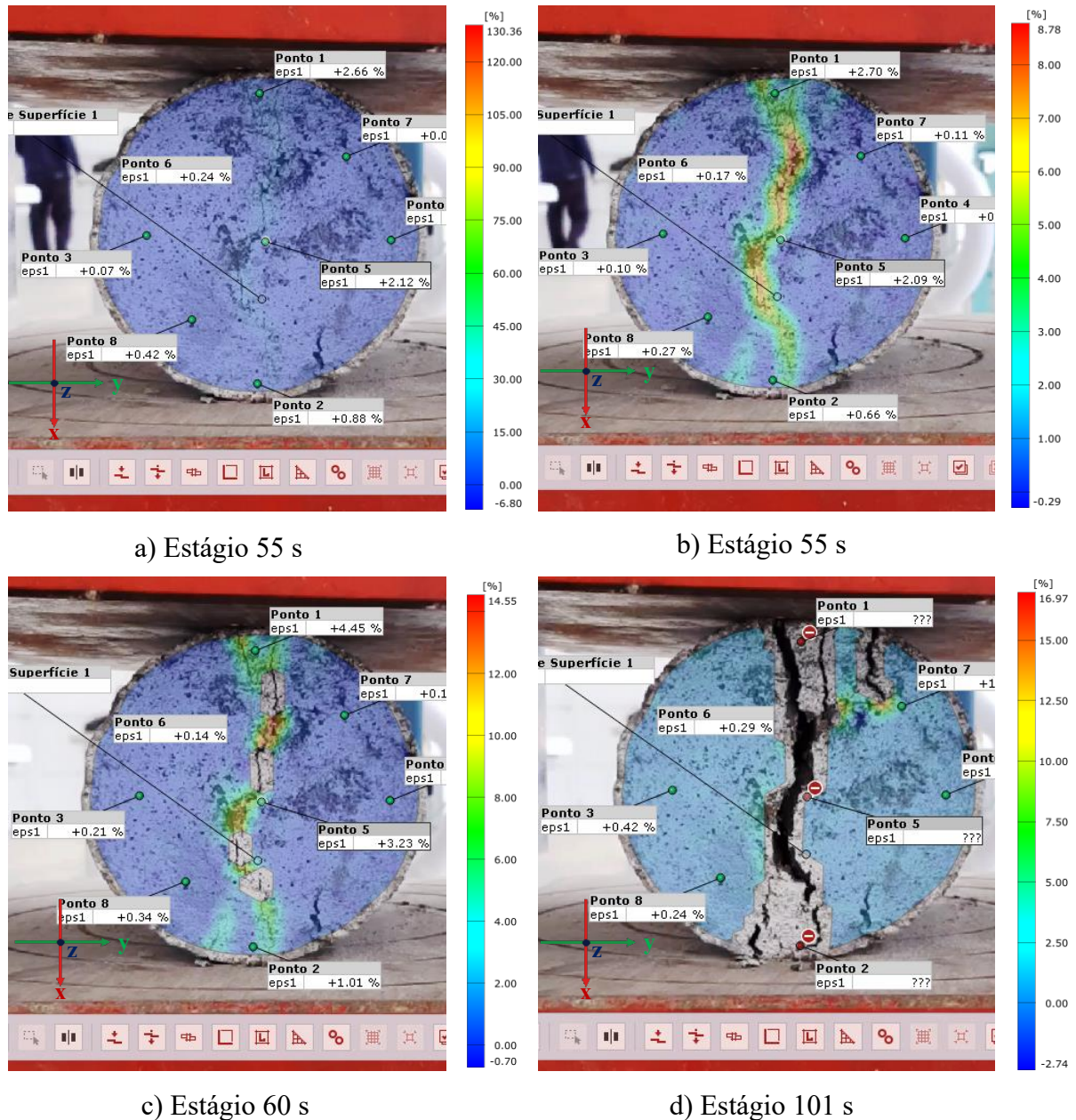
Fonte: Autor (2024).

Na Figura 35 abaixo, é possível verificar uma ordem cronológica de deformações do corpo de prova T2 (Corpo de prova 2 para o ensaio de tração por compressão diametral).

Num primeiro momento é visualizado as deformações numa escala global de deformações (Figura 35a), e em seguida uma escala de deformações na forma atual (Figura 35b), ou seja, que mostra as deformações apenas para um estágio específico de tempo, da mesma forma que foi realizada no ensaio do corpo de prova T1.

Anteriormente ao estágio 55 s, o corpo de prova não apresentou grandes deformações, porém, ao atingir 55 s de ensaio, o *software* começou a demonstrar a presença de uma zona de concentração de tensões crescente na região central do corpo de prova, conforme observado na Figura 35b, no estágio 55 s.

Figura 35: Estágios de deformação do corpo de prova T2.



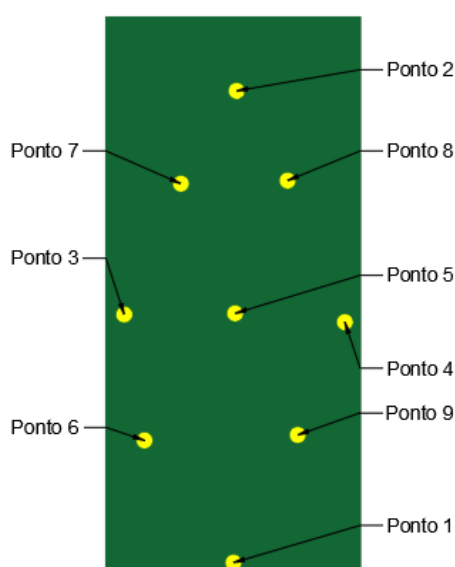
Fonte: Autor (2024)

À medida que o ensaio avançava e a carga da prensa se intensificava, o *software* detectava a crescente deformação observada principalmente nos pontos 1, 2 e 5 da faixa central e vertical por onde a fissura acontece, com deformações 4,45%, 3,23% e 1,21%, respectivamente. Já no estágio 101 s (Figura 35d), é possível observar uma grande abertura ocorrida no corpo de prova gerando uma escala com grandes deformações, que foram calculadas pelo *software*.

5.3.1.3. Corpo de prova – C1

Para a análise de deformações nos corpos de prova submetidos a compressão axial, foram definidos 9 pontos distribuídos ao longo da sua superfície conforme Figura 36, onde é possível identificar todos os pontos que foram utilizados para analisar a deformação do corpo de prova C1.

Figura 36: Pontos distribuídos pela região de interesse do C1



Fonte: Autor (2024).

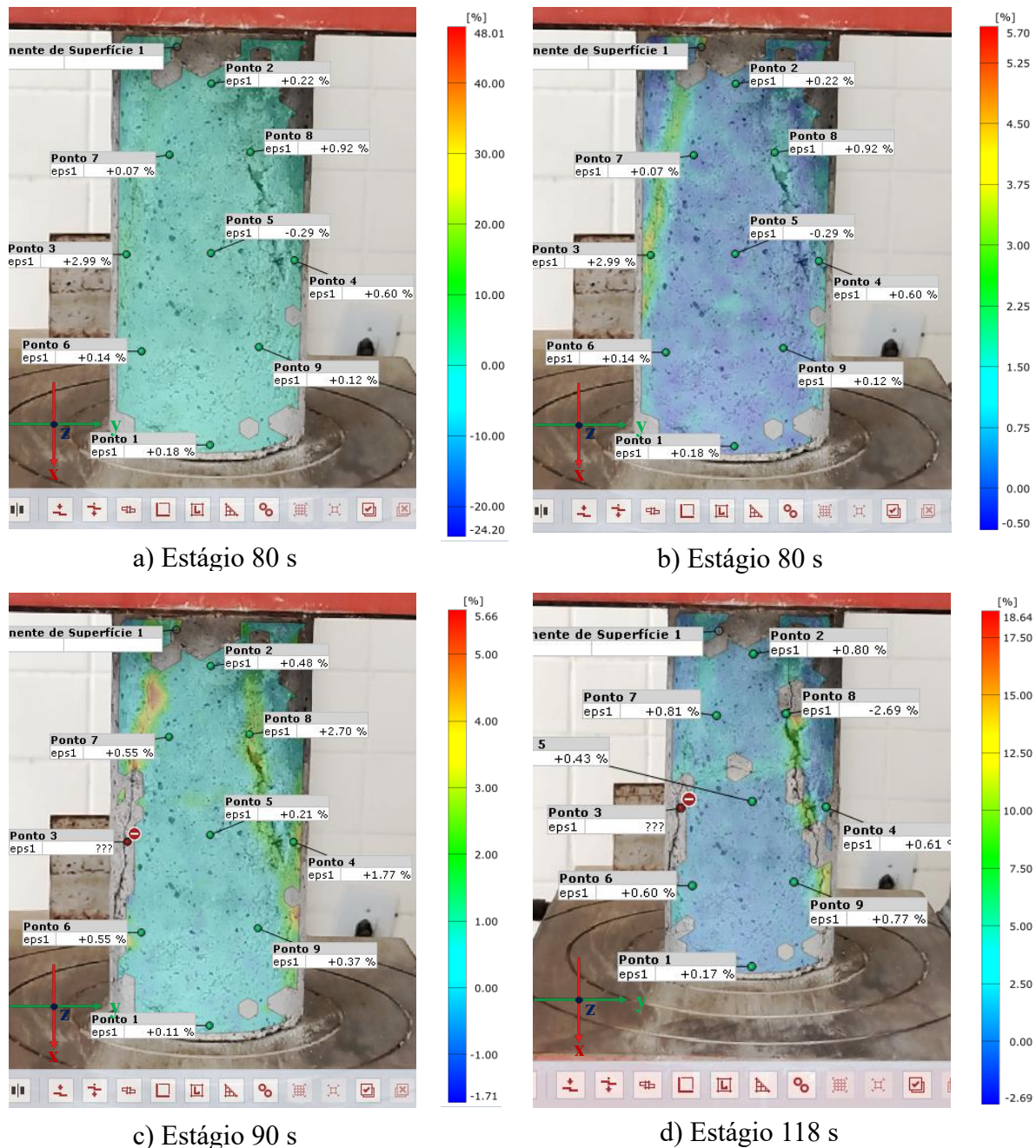
Deste modo, analisando o corpo de prova C1, na Figura 37 é possível verificar uma ordem cronológica com as suas deformações. Inicialmente na Figura 34a, as deformações estão numa escala global de deformações, enquanto que na Figura 37b, Figura 37c e Figura 37d, utilizou-se uma escala atual.

Assim sendo, verificou-se anteriormente ao estágio 80 s, a superfície permanece com deformações baixas, porém, ao atingir o segundo 80 (Figura 37a e Figura 37b), o corpo de prova começa a apresentar fissuras. Observando o comportamento do corpo de prova através de uma escala em estágio atual, correspondente ao segundo 80 (Figura 37b), a escala de deformação mostra que há uma crescente concentração de tensões visualizadas por uma faixa diagonal com coloração verde e amarelo surgindo no lado esquerdo do corpo de prova, o ponto 3 que está localizado nesta região possui deformações muito maiores do que nas outras regiões, com uma deformação de +2,99%.

Já no estágio 90 s (Figura 37c), após o surgimento da primeira fissura na região esquerda, o gráfico mostra o surgimento de uma nova faixa diagonal com coloração verde e

amarelo agora ao lado direito em sentido diagonal. Dentro desta faixa, encontram-se os pontos 4 e 8, com deformações de 1,77% e 2,70%, respectivamente.

Figura 37: Estágios de deformação do corpo de prova C1.



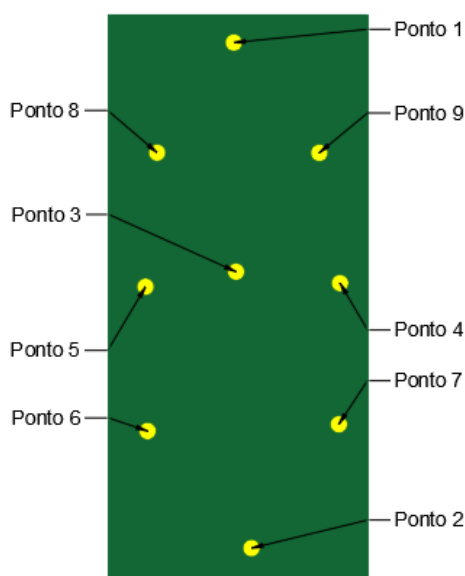
Fonte: Autor (2024)

Já no estágio 118 s (Figura 37d), no fim do ensaio, o ponto 3 é deslocado devido a deformação causada nessa região a qual o *software* passa a não identificar mais o padrão estocástico, o que ocorre também em outras regiões do corpo de prova, com o surgimento de regiões deformadas e a região de interesse não é mais identificada em determinados pontos.

5.3.1.4. Corpo de prova – C2

Novamente para a análise de deformações nos corpos de prova submetidos a compressão axial, foram definidos 9 pontos distribuídos ao longo da sua superfície conforme Figura 38, onde é possível identificar todos os pontos que foram utilizados para analisar a deformação do corpo de prova C2.

Figura 38: Pontos distribuídos pela região de interesse do C2

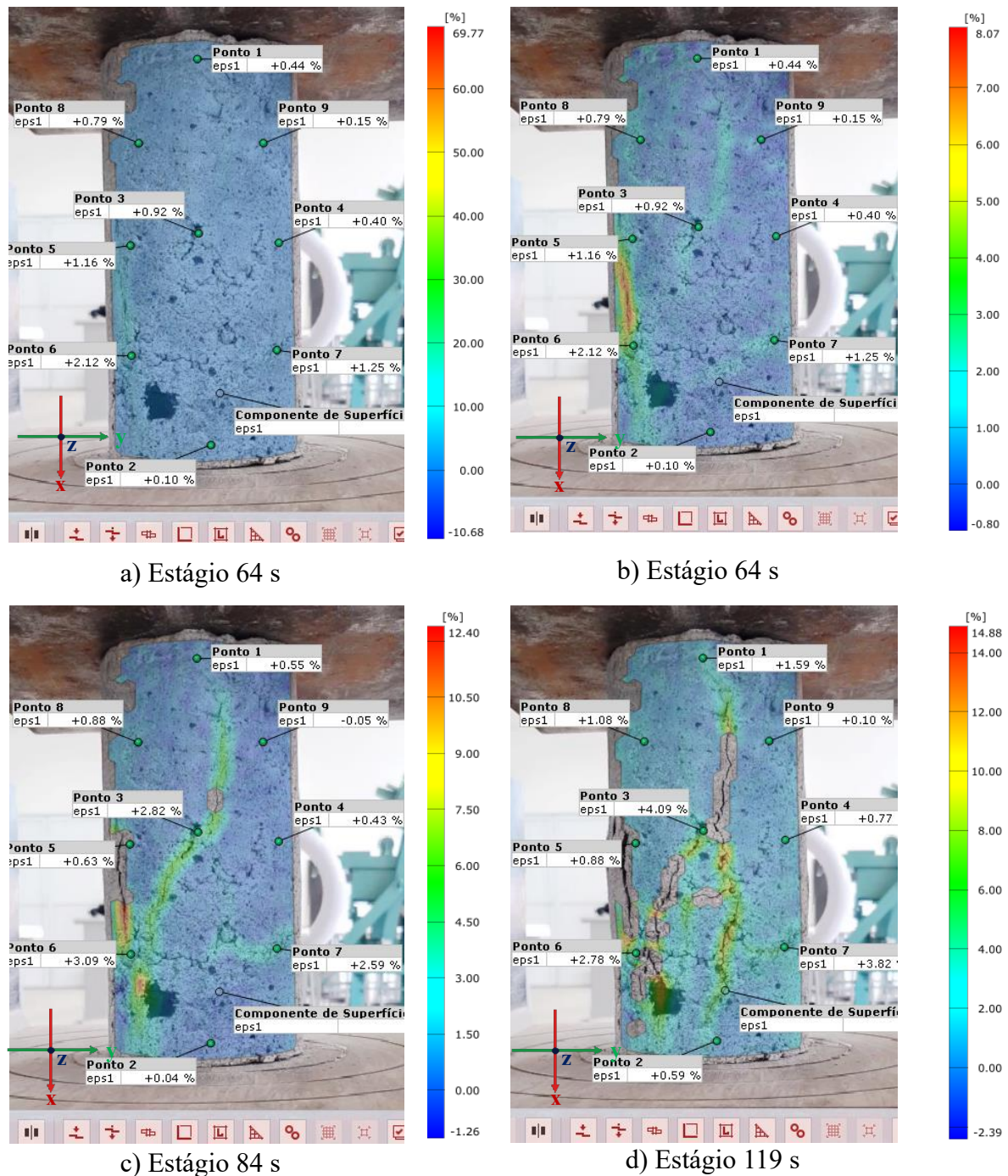


Fonte: Autor (2024).

Com relação as deformações em corpos de prova submetidos a compressão axial, temos que para o corpo de prova C2, anteriormente ao estágio 64 s, a superfície permanece com deformações baixas, porém, ao atingir o segundo 64 s (Figura 39a e Figura 39b), o corpo de prova começa a apresentar fissuras. Na Figura 39b, no estágio 64 s, utilizando uma escala de deformações atual, é possível observar algumas faixas em azul claro indicando direções de propagação de tensões. Além disso, é possível identificar visualmente de forma clara a faixa amarela com vermelho onde para esse instante há maiores concentrações de tensões, como mostra as deformações nos pontos 5 e 6, com 1,16% e 2,12%, respectivamente.

Já no estágio 84 s (Figura 39c), a fissuração se propaga no lado esquerdo, onde surge a primeira região onde o *software* pára de identificar a região pois a abertura causada pela fissuração altera o padrão utilizado pelo software para identificar a região de interesse. Nesse estágio, há uma intensificação da faixa com crescentes deformações ligando a região esquerda ao centro e região superior da face frontal do corpo de prova C2.

Figura 39: Estágios de deformação do corpo de prova C2



Fonte: Autor (2024)

No estágio 119 s (Figura 39d), as deformações crescem ainda mais na região esquerda e na região central com uma faixa que possui um comportamento vertical na região superior e conforme a carga se intensifica, a linha de concentração de cargas se subdivide em 2, indicando o comportamento de ruptura que este corpo de prova apresentou no item 5.2.1., ou seja, uma ruptura semelhante a coluna com formação de cones, conforme a norma NBR 5739:2018.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão sistemática da literatura demonstrou que a técnica de correlação de imagem digital (CID) é uma ferramenta eficiente quando aplicada de forma correta, não gerando qualquer alteração ou interferência no objeto estudado. Verificou-se que a técnica apresentou resultados precisos em todos os trabalhos analisados, seja para medir deformações ou deslocamentos, até quando comparado com outras técnicas ou modelos teóricos.

Na etapa experimental, o método da correlação de imagem digital foi capaz de proporcionar uma observação visual do comportamento da fissuração do concreto através do tempo, permitindo a identificação da fissura, medição de deformação e deslocamento, além de informações sobre a morfologia e outras características das fissuras, gerando então um grande potencial para aplicação na área da mecânica da fratura.

Dentre os corpos de prova, o T2 apresentou maiores deformações variando numa escala de -6,80% à +130,36%, seguido pelo corpo de prova C2 com escala de -10,68% à +69,77%, seguido pelo C1 com variação de -24,20% à 40,01 e por fim o T1 variando de -4,63% à 32,22%.

Constatou-se que para o concreto com adição de sorgo sacarino houve uma redução considerável da sua resistência à compressão em cerca de 89,86% e 78,53% da resistência à tração quando comparado com o concreto referência de Almeida (2023) e França (2023). No entanto, vale salientar que apesar da redução da resistência do concreto observada nos experimentos, este trabalho consiste em um estudo preliminar e futuros aprimoramentos no traço do concreto poderão resultar em melhorias no seu uso como adição no concreto.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Suyanne Kananda Brito. **Efeito da adição de fibra vegetal nas propriedades mecânicas do concreto**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros-RN, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211. Agregados para concreto - requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.
- AUGUSTO, Carlos; LÚCIO, Leonardo; LUIZ, Ricardo. Concreto estrutural com adição de fibras vegetais. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 6, n. 2, Jul/dez. 2014.
- AVIARA, Ndubisi A.; IGBEKA, Joseph C.; NWOKOCHA, Louis M. Physicochemical properties of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) starch as affected by drying temperature. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 12, n. 2, p. 85-94, 2010.
- BOTHA, Shaun; FOURIE, Jaundrie; KLOPPERS, Cornelius Petrus. Evaluating the accuracy of a digital correlation system to predict the fatigue failure of additively manufactured parts. **South African Journal of Industrial Engineering**, v. 34, n. 1, p. 61-71, 2023.
- BOULEKBACHE, Bensaid et al. Failure mechanism of fibre reinforced concrete under splitting test using digital image correlation. **Materials and structures**, v. 48, p. 2713-2726, 2015.

CHEN, Cheng; QIAN, Xudong. Measuring J-R curve under dynamic loading conditions using digital image correlation. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 46, n. 10, p. 3892-3911, 2023.

COSTA, João Paulo Nunes da. **Crescimento e Produção da Primeira Rebrotas de Cultivares de Sorgo Sob Diferentes Laminas de Irrigação**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

D'ÁVILLA, Virgínia Maria Rosito. **Estudo sobre modelos de fissuração de peças de concreto armado via método de elementos finitos**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

DEÁK, Péter; KOWALIK, Michał. Composite aircraft joint experimental testing with digital image correlation. 2018. **13th Research and Education in Aircraft Design Conference 2018**, Brno, Czech Republic, 7th – 9th November, p. 150- 160, 2018.

DEHNAVI, Mohammadreza Yadegari et al. Utilizing digital image correlation to determine stress intensity factors. **Polymer Testing**, v. 37, p. 28-35, 2014.

DONATO, H. DONATO, M. Stages for Undertaking a Systematic Review. **Acta Med Port**. Lisboa, PT, 32(3):227-35, 2019. Disponível em: <https://www.actamedicaportuguesa.com/revista/index.php/amp/article/view/11923>. Acesso em: 13 fev. 2024.

FRANÇA, Wânessa Antunes de. **Correlação de imagem digital na avaliação ao comportamento da fissuração do concreto**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros-RN, 2023.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: CONCEITUAÇÃO, PRODUÇÃO E PUBLICAÇÃO. **Logeion: Filosofia da Informação**, Rio de Janeiro, RJ, v. 6, n. 1, p. 57–73, 2019. DOI: 10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73. Disponível em: <https://revista.ibict.br/fiinf/article/view/4835>. Acesso em: 11 fev. 2024.

NGUYEN, Van-Thuong et al. Mechanical properties identification of sheet metals by 2D-digital image correlation method. **Procedia engineering**, v. 184, p. 381-389, 2017.

OLIVEIRA *et al.* Modelo de correlação de imagens digitais aplicado à avaliação do comportamento de CRFA. In: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2019, **Anais do 61º congresso brasileiro do concreto**, Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018, p. 1-16.

LACERDA, Benício de Moraes. **Correlação de imagem digital e modelagem numérica aplicada à determinação de propriedades elásticas em revestimentos de argamassa sob tração**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2023.

MYLO, Max D.; POPPINGA, Simon. Digital image correlation techniques for motion analysis and biomechanical characterization of plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1335445, 2024.

OLIVEIRA, T. C. de. The culture of sweet sorghum: review. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. e28610212755, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i2.12755. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/12755>. Acesso em: 31 mar. 2024.

PINHEIRO, Antonio Gebson *et al.* Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira-Revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 2403-2426, 2021.

RAUECKER, José Carlos Nunes *et al.* An experimental and numerical approach for determining compression curves for plain and steel fiber reinforced concretes. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, p. e12476, 2019.

REZENDE, Thomas Lima de; CARDOZO, Daniel Carlos Taissum; SHEHATA, Lídia da Conceição Domingues. Uso da técnica de correlação de imagem digital (CID) para análise das contribuições de diferentes mecanismos na resistência à força cortante de vigas de concreto. In: 61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2019, **Anais do 61º congresso brasileiro do concreto**, Fortaleza: IBRACON, 2019, p. 1-15.

RODRIGUES, Marcelo *et al.* Determination of Tensile Properties of Polyester-Industrial Waste Red Mud Composites Using Digital Image Correlation (DIC). **Materials Research**, v. 26, p. e20220449, 2023.

Rural pecuária. **Minas Gerais: Produção de rapadura e aguardente de sorgo sacarino é testada.** Ruralpecuaria.com.br. Disponível em: <<https://ruralpecuaria.com.br/tecnologia-e-manejo/sorgo/minas-gerais-producao-de-rapadura-e-aguardente-de-sorgo-sacarino-e-testada.html>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

SANTOS, A. H. A. *et al.* Concrete modulus of elasticity assessment using digital image correlation. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, p.587-594, 2016.

SANTOS, A. H. A. *et al.* Estudo do efeito de escala utilizando correlação de imagem digital. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, p. 323-340, 2015.

SANTOS, Ayrton Hugo de Andrade e. **Estudo experimental do efeito de escala em estruturas de concreto utilizando correlação de imagem digital.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2015.

SCHNEIDERS, Ricardo Braun. Determinação da curva tensão deformação com o auxílio da correlação de imagens digitais (DIC). Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pampa – Unimpa, Alegrete, 2018.

SCHOSSLER, Rodrigo Teixeira. **Deformações e modo de ruptura em prismas de blocos de concreto: análise experimental com extensometria e correlação de imagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

SILVA, Ângelo Quintiliano Nunes; GALERY, Roberto. Strain analysis in diametral compression test through digital image correlation. **REM-International Engineering Journal**, v. 75, p. 67-72, 2021.

SHARAFISAFa, Mansour; ALIABADIAN, Zeinab; SHEN, Luming. Crack initiation and failure development in bimrocks using digital image correlation under dynamic load. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 109, p. 102688, 2020.

SILVA JUNIOR, Edivaldo José; KZAM, Aref Kalilo Lima; LOPEZ, Julio Florez. DIC method applied in the calibration of FEA model of rock-mortar cohesive interface. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, p. e17502, 2023.

TIAN, Yuzhe *et al.* A new digital image correlation method for discontinuous measurement in fracture analysis. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 130, p. 104299, 2024.

VALIN, Marcos. Tipos de RUPTURA de corpos de prova de CONCRETO - NBR 5739 (Como interpretar? Para que serve?). YouTube, 31 out. 2022. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=gTmhpUNoPHI>>. Acesso em: 27 mar. 2024.

GOM Correlate is now ZEISS INSPECT Correlate. Gom.com. Disponível em: <<https://www.gom.com/en/products/metrology-software/gom-correlate-pro>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

VALIN, Marcos. Tipos de RUPTURA de corpos de prova de CONCRETO - NBR 5739 (Como interpretar? Para que serve?). YouTube, 31 out. 2022. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=gTmhpUNoPHI>>. Acesso em: 27 mar. 2024.

WU, Bo; LIU, Chunhui; WU, Yaopeng. Compressive behaviors of cylindrical concrete specimens made of demolished concrete blocks and fresh concrete. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 118-130, 2014.

WU, Dan et al. Internal crack detection based on thermal excitation enabled digital image correlation method. **Measurement**, p. 114-262, 2024.

YUAN, Yuan et al. Compressive failure analysis of seawater-mixed aluminate cement concrete based on digital image correlation technique. **Journal of Building Engineering**, v. 85, p. 108-594, 2024.