



Haniel Bruno Santos Moura

## **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DIC PARA OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM AGREGADO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelos Professores Dr. Alcebiades Negrão  
Macedo e Dr. Leonardo Dantas Rodrigues

Belém – Pará – Brasil

2025

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO PARÁ  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

HANIEL BRUNO SANTOS MOURA

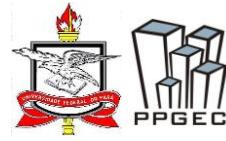
**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DIC PARA OBTENÇÃO DE  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM AGREGADO  
SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientadores: Dr. Alcebíades Negrão  
Macedo e Dr. Leonardo Dantas Rodrigues

Belém – Pará – Brasil

2025



# APLICAÇÃO DA TÉCNICA DIC PARA OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM AGREGADO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA

AUTOR:

**HANIEL BRUNO SANTOS MOURA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 02 / 06 / 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ALCEBIADES NEGRÃO MACEDO  
Data: 27/06/2025 14:20:54-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo  
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LEONARDO DANTAS RODRIGUES  
Data: 27/06/2025 14:00:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Dantas Rodrigues  
Coorientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LUIS ANTONIO GUIMARAES BITENCOURT JUNIC  
Data: 16/06/2025 22:31:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luis Antônio Guimarães Bitencourt  
Membro Externo (USP)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** EDILSON MORAIS LIMA E SILVA  
Data: 25/06/2025 18:21:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edilson Moraes Lima e Silva  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)

---

- M929     Moura, Haniel Bruno Santos.  
            Aplicação da técnica DIC para obtenção de  
            propriedades mecânicas do concreto com agregado sintético  
            de resíduo de bauxita / Haniel Bruno Santos Moura, . — 2025.  
            128 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo  
Coorientador(a): Prof. Dr. Leonardo Dantas Rodrigues  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, ,  
, Belém, 2025.
1. Correlação digital de imagens . 2. Módulo de  
elasticidade . 3. Caracterização . 4. Concreto. I. Título.

---

CDD 624.176

## **Agradecimentos**

A conclusão deste trabalho só foi possível graças ao apoio e incentivo de muitas pessoas, às quais expresso minha profunda gratidão.

Agradeço, primeiramente, aos meus orientadores, Prof. Dr. Alcebíades Macedo e Prof. Dr. Leonardo Dantas, por sua orientação, paciência e incentivo ao longo desta jornada. Seu conhecimento e dedicação foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas do grupo NAAT, Alisson, Ianes, Riquelme, Matheus, Nelson, Alan e demais colegas e ao colega Robson, do PPGEC, pelo ambiente colaborativo, pelas discussões produtivas e pelo apoio durante todas as etapas da pesquisa.

À minha namorada, Letícia, por todo suporte, paciência e incentivo incondicional ao longo deste percurso. Sua presença foi essencial nos momentos mais desafiadores, e sua companhia tornou essa jornada mais leve.

Aos meus familiares, minha mãe Adriana, meu pai Severino, minhas irmãs Hanna e Lorena, tios e avós, pelo amor incondicional, apoio emocional e compreensão durante os momentos de maior dedicação a esta dissertação.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, direta ou indiretamente, oferecendo apoio, incentivo e momentos de descontração fundamentais para manter o equilíbrio ao longo deste processo.

Por fim, sou grato a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Com o aumento da escassez de recursos naturais utilizados na construção civil, pesquisadores de todo o mundo vêm se dedicando ao desenvolvimento de materiais alternativos para a produção do concreto. Para validar a aplicação desses novos materiais em estruturas, é essencial realizar uma adequada caracterização mecânica. Atualmente, a indústria apresenta diversas técnicas tradicionais de ensaio (Compressômetro, LVDT, *Clip gage* e *strain gage*) que utilizam sensores físicos para medir deslocamentos, aberturas de fissuras e deformações. Entretanto, técnicas alternativas de medição têm ganhado espaço na identificação de danos estruturais, como o surgimento de fissuras e variações abruptas no campo de deformações que podem indicar falhas internas ou processos de degradação não visíveis superficialmente. O presente trabalho utiliza a técnica de correlação digital de imagens (DIC) para analisar as características mecânicas do concreto com agregado sintético derivado de resíduo de bauxita. Foram definidos procedimentos para otimizar os parâmetros operacionais da técnica DIC, tais como *subset*, *step* e região de interesse (ROI), adotados nos *software* VIC-2D e VIC-3D, com base na comparação com resultados obtidos por métodos tradicionais de medição de deformações. A análise considerou variações nas variáveis do software utilizado e o padrão de pintura dos corpos de prova (CPs). Com o auxílio da técnica DIC, com uma ou duas câmeras, e de técnicas tradicionais, foram analisados parâmetros como o módulo de elasticidade do concreto, o coeficiente de Poisson e o fator de correção  $\alpha_E$ , seguindo as orientações da NBR 8522:2021. Foram realizados ensaios em dois grupos de corpos de prova. O primeiro grupo, com agregado natural (brita granítica, tipo 1), compreendeu duas famílias de concreto. Já o segundo grupo, utilizando o agregado sintético, também foi dividido em duas famílias. Dentre os resultados apresentados neste trabalho, definiu-se parâmetros que otimizam as medições realizadas com a técnica DIC, servindo de referência para trabalhos futuros. Destaca-se ainda que a abordagem 2D, com apenas uma câmera, apresentou desempenho comparável à técnica 3D, que demanda duas câmeras sincronizadas, procedimentos de calibração e um custo significativamente maior para aquisição e operação. A caracterização dos concretos revelou que o concreto com agregado natural apresentou  $F_{ck}$  entre 18,48 e 25,61 MPa, com módulo de elasticidade variando de 23,71 a 29,76 GPa. Já o concreto com agregado sintético teve  $F_{ck}$  médio de 18,81 MPa e módulo de elasticidade médio de 20,57 GPa. Em ambos os casos, o coeficiente de Poisson oscilou entre 0,18 e 0,24. A análise dos fatores de correção permitiu apenas uma estimativa das propriedades mecânicas, indicando que os concretos com agregado natural apresentaram valores próximos ao referencial de 1, variando entre 0,97 e 1,05. Para os concretos com agregado sintético, o fator médio observado foi de aproximadamente 0,86. Esses resultados sugerem que o agregado sintético apresenta potencial de uso, e que a técnica DIC fornece estimativas coerentes das propriedades mecânicas, quando comparada aos métodos tradicionais.

**Palavras-chave:** Correlação digital de imagens, DIC, módulo de elasticidade, caracterização, concreto.

## Abstract

Due to the increasing scarcity of natural resources used in civil construction, researchers worldwide have been dedicated to developing alternative materials for concrete production. To validate the application of these new materials in structures, an adequate mechanical characterization is essential. Currently, the industry employs several traditional testing techniques (Compressometer, LVDT, clip gage, and strain gage) that use physical sensors to measure displacements, crack openings, and strains. However, alternative measurement techniques have gained ground in identifying structural damage, such as the emergence of cracks and abrupt variations in the strain field that may indicate internal failures or degradation processes not visible on the surface. This work uses the Digital Image Correlation (DIC) technique to analyze the mechanical characteristics of concrete with synthetic aggregate derived from bauxite residue. Procedures were defined to optimize the operational parameters of the DIC technique, such as subset, step, and region of interest (ROI), adopted in the VIC-2D and VIC-3D software, based on comparisons with results from traditional strain measurement methods. The analysis considered variations in the software variables and the speckle pattern of the specimens. With the aid of the DIC technique, using one or two cameras and traditional techniques, parameters such as the concrete's modulus of elasticity, Poisson's ratio, and the correction factor  $\alpha_E$  were analyzed, following the guidelines of NBR 8522:2021. Tests were performed on two groups of specimens. The first group, with natural aggregate (type 1 granitic crushed stone), comprised two concrete families. The second group, using the synthetic aggregate, was also divided into two families. Among the results presented in this work, the parameters that optimize the measurements performed with the DIC technique were defined, serving as a reference for future studies. Furthermore, it is noteworthy that the 2D approach, with a single camera, showed performance comparable to the 3D technique, which requires two synchronized cameras, calibration procedures, and a significantly higher cost for acquisition and operation. The characterization of the concretes revealed that the concrete with natural aggregate exhibited a characteristic compressive strength ( $F_{ck}$ ) between 18.48 and 25.61 MPa, with a modulus of elasticity ranging from 23.71 to 29.76 GPa. The concrete with the synthetic aggregate had an average  $F_{ck}$  of 18.81 MPa and an average modulus of elasticity of 20.57 GPa. In both cases, the Poisson's ratio ranged from 0.18 to 0.24. The analysis of the correction factors allowed for an estimation of the mechanical properties, indicating that the concretes with natural aggregate presented values close to the reference of 1, ranging from 0.97 to 1.05. For the concretes with the synthetic aggregate, the average observed factor was approximately 0.86. These results suggest that the synthetic aggregate shows potential for use and that the DIC technique provides consistent estimates of mechanical properties when compared to traditional methods.

**Keywords:** Digital Image Correlation, DIC, modulus of elasticity, characterization, concrete.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	<i>OBJETIVO GERAL .....</i>	18
1.1.2	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</i>	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	AGREGADO SINTÉTICO COM RESÍDUO DE BAUXITA .....	20
2.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO ( $E_c$ ).....	22
2.2.1	<i>CONCEITO.....</i>	22
2.2.2	<i>DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....</i>	22
2.2.3	<i>RELAÇÃO <math>F_{ck}</math> E <math>E_c</math>.....</i>	25
2.3	TÉCNICAS TRADICIONAIS DE MEDAÇÃO DE DEFORMAÇÃO EM ENSAIOS DE CONCRETO .....	26
2.3.1	<i>COMPRESSÔMETRO (CPR) .....</i>	26
2.3.2	<i>TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO VARIÁVEL LINEAR (LVDT).....</i>	27
2.3.3	<i>EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE COLAGEM SUPERFICIAL (STRAIN GAGE ou SG) .....</i>	28
2.3.4	<i>EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE FIXAÇÃO EXTERNA (CLIP GAGE ou CG).....</i>	29
2.4	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (DIC) .....	30
2.4.1	<i>PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TÉCNICA DIC.....</i>	30
2.4.2	<i>CALIBRAÇÃO.....</i>	33
2.5	TABELA COMPARATIVA ENTRE TÉCNICAS .....	34
2.6	APLICAÇÕES DA TÉCNICA DIC EM ANÁLISES DE CONCRETO .....	35
2.7	ENSAIOS DE MÓDULO COM MÚLTIPLAS MEDIÇÕES.....	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>
3.1	MATERIAS UTILIZADOS.....	43
3.1.1	<i>CONCRETO CONVENCIONAL .....</i>	43
3.1.2	<i>CONCRETO COM AGREGADO SINTÉTICO .....</i>	44
3.2	PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	45
3.3	SISTEMA DE MEDAÇÃO.....	46
3.3.1	<i>PINTURA DOS CORPOS DE PROVA.....</i>	47
3.3.2	<i>SISTEMA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (DIC).....</i>	48
3.3.3	<i>AFERIÇÃO DO SISTEMA .....</i>	52
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS DO CONCRETO .....	52
3.4.1	<i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....</i>	52
3.4.2	<i>MÓDULO DE ELASTICIDADE .....</i>	53
3.4.3	<i>PROCEDIMENTO DE PREPARO E ANÁLISE DOS CPs .....</i>	53
3.5	OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISES DA TÉCNICA DIC .....	58

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>61</b>
4.1	RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA .....	66
4.1.1	<i>INTERVALO DE MEDAÇÃO A E B .....</i>	66
4.1.2	<i>SUBSET E STEP IDEAis.....</i>	71
4.1.3	<i>AMPLITUDE DA REGIÃO DE INTERESSE e PADRÃO DE PINTURA .....</i>	78
4.2	RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA .....	80
4.2.1	<i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....</i>	80
4.2.2	<i>MÓDULO DE ELASTICIDADE .....</i>	81
4.2.3	<i>fator DE CORREÇÃO <math>\alpha_E</math> E coeficiente DE POISSON .....</i>	85
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES COM AGREGADO NATURAL E SINTÉTICO .....	88
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>90</b>
5.1	CONCLUSÃO PRIMEIRA ETAPA.....	90
5.2	CONCLUSÃO SEGUNDA ETAPA.....	91
5.3	SUGESTÕES.....	93
<b>REFERÊNCIAS 95</b>		
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS E ANÁLISES DO ENSAIO DE VALIDAÇÃO. ....100</b>		
A.1	ENSAIO ALUMINIO .....	100
A.2	ENSAIO CONCRETO .....	102
<b>APÊNDICE B – CONJUTNO DE TABELAS DE AUXÍLIO.....105</b>		
B.1	TABELAS DE PARES DE <i>STEP/SUBSET</i> .....	105
B.2	TABELA DE RESULTADOS SATISFATORIOS PARA OS CPs.....	120
<b>APÊNDICE C – ANÁLISE CAMPO GLOBAL DE DEFORMAÇÃO .....123</b>		

## Lista de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática do módulo de deformação secante $E_{cs}$ .....	23
Figura 2 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – metodologia A – tensão $\sigma_a$ fixa. ....	24
Figura 3 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – metodologia B – deformação $\epsilon_a$ fixa.....	24
Figura 4 – Compressômetro com bases independentes. ....	26
Figura 5 – Circuito LVDT.....	27
Figura 6 – LVDT acoplado em um compressômetro. ....	28
Figura 7 – Modelo extensômetro axial único. ....	29
Figura 8 – <i>Clip gage</i> instalado em um corpo de prova de concreto. ....	29
Figura 9 – Ilustração de uma imagem, determinando o valor de nível de cinza para cada pixel. ....	31
Figura 10 – Processo de seleção de <i>subsets</i> na imagem de referência. ....	31
Figura 11 – Processo de seleção de <i>subsets</i> na imagem de referência. ....	32
Figura 12 – Placa de calibração. ....	33
Figura 13 – Cinco pontos de deformações $\epsilon_{xx}$ ao logo da região de interesse, em torno do eixo central do espécime.....	36
Figura 14 – Razão da deformação axial 3D-DIC para LVDT. ....	37
Figura 15 – Progresso de deformações $\epsilon_{xx}$ a) pré-90% da carga máxima, b) carga máxima, c) pós-80% da carga máxima e d) pós-50% da carga máxima.....	38
Figura 16 – a) Trajetória de equilíbrio estático da viga testada na faixa elástica dos deslocamentos b) Trajetória de equilíbrio estático da viga testada na faixa plástica dos deslocamentos. ....	40
Figura 17 – Materiais utilizados, a) Brita tipo 1 granítica, b) areia quartzosa, c) cimento POTY CP II F 40, d) aditivo Sika® Concreto Forte, da família dos plastificantes e segunda geração.....	44
Figura 18 – Agregado Sintético. ....	45
Figura 19 – Processo de pintura a) CPs lixados com lixa 120mm, b) CPs pintados com selador, c) CPs pintados com tinta spray branco fosco, d) Padrão de <i>speckles</i> técnica A e e) Padrão de <i>speckles</i> técnica B.....	47
Figura 20 – a) Sistema de aquisição e calibração, b) iluminação, c) câmeras e d) lentes.....	49

Figura 21 – Componentes auxiliares a) Tripé, b) cabeça articulada e c) haste de sustentação para as câmeras.....	50
Figura 22 – Posicionamento padrão da câmera a 1,15 metros.....	50
Figura 23 – Inclinação da câmera a) Eixo Y a 0º e b) Eixo X a 0º.....	51
Figura 24 – Rotação das câmeras a) câmera esquerda e b) câmera direita.....	51
Figura 25 – Corpos de prova da família 1 a) CC_F1_1 e b) CC_F1_2.....	54
Figura 26 – Corpos de prova da família 2, a) CC_F2_1, b) CC_F2_2, c) CC_F2_3, d) CC_F2_4, e) CC_F2_5 e f) CC_F2_6.....	55
Figura 27 – Corpos de prova da família 3 a) CS_F3_1, b) CS_F3_2, c) CS_F3_3 e d) CS_F3_4.....	56
Figura 28 – Corpos de prova da família 4 a) CS_F4_1, b) CS_F4_2, c) CS_F4_3, d) CS_F4_4, e) CS_F4_5 e f) CS_F4_6.....	57
Figura 29 – Malha de <i>subset</i> a) 19x19, b) 29x29, c) 39x39 e d) 49x49.....	58
Figura 30 – Amplitude das regiões de interesse a) ROI ampla e b) ROI estreita.....	60
Figura 31 – Campo global de deformação para o ultimo carregamento para cada CP da família 1, CC_F1_1.....	62
Figura 32 – Campo global de deformação para o ultimo carregamento para cada CP da família 2, a) CC_F2_1, b) CC_F2_2, c) CC_F2_4 e d) CC_F2_5.....	62
Figura 33 – Campo global de deformação para o ultimo carregamento para cada CP da família 3 a) CS_F3_1, b) CS_F3_2, c) CS_F3_3 e d) CS_F3_4.....	63
Figura 34 – Campo global de deformação para o ultimo carregamento para cada CP da família 4 a) CS_F4_1, b) CS_F4_2, c) CS_F4_3, d) CS_F4_4, e) CS_F4_5 e f) CS_F4_6.....	64
Figura 35 – Variação do campo global para cada par <i>subset/set</i> do CC_F2_2 a) 19/6, b) 19/9, c) 29/6, d) 29/9, e) 29/15, f) 39/8, g) 39/13 h) 39/19, i) 49/10, j) 49/16 e l) 49/24.....	71
Figura A 1 – Espécime de alumínio.....	100
Figura A 2 – Campo global de deformação CPA_01.....	101
Figura A 3 – a) Setup do ensaio e b) espécime de concreto.....	103
Figura A 4 – Campo global de deformação CPR_01.....	103
Figura C 1 – Campo global de deformação a) CC_F2_2 e b) CC_F2_3.....	124
Figura C 2 – Progressão de carga do CC_F2_2 a) 0,7 Fck, b) 0,8 Fck, c) 0,9 Fck e d) Fck.....	126

Figura C 3 – Progressão de carga do CC\_F2\_3 a) 0,7 Fck, b) 0,8 Fck, c) 0,9 Fck e d)  
Fck ..... 126

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resultados Santos.....	21
Tabela 2 – Resultados resistência à compressão axial.....	21
Tabela 3 – Parâmetros obtidos de calibração do sistema de câmeras.....	33
Tabela 4 – Comparação de técnicas.....	34
Tabela 5 – Agrupamentos de módulo secante ( $E_{cs}$ ) de três betonadas (3bt) do Concreto, por instrumentação: cálculo dos indicadores de precisão.....	41
Tabela 6 – Traços ou $F_{ck}$ para os concretos.....	46
Tabela 7 – Resumo dos procedimentos de preparo e ensaios nos corpos de prova.	54
Tabela 8 – Layout da tabela de combinação dos $F_{ck}$ 's.....	59
Tabela 9 – Relação do módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F2_2 – 19/6).....	67
Tabela 10 – Conjunto de média dos desvios padrões e médias das porcentagens dos módulos de elasticidade em relação ao valor ideal (CC_F2_2). .....	68
Tabela 11 – Conjunto médias dos desvios padrões e médias para o cálculo do módulo de elasticidade em relação ao valor de referência de todos os CPs. ....	69
Tabela 12 – Conjunto de médias dos desvios padrões e médias para o cálculo coeficiente de Poisson de todos os CPs. ....	70
Tabela 13 – Resultados Satisfatórios de Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson (CC_F2_2).....	77
Tabela 14 – Somatório de valores válidos para as deformações $\epsilon_{yy}$ e $\epsilon_{xx}$ em todos os CPs. ....	77
Tabela 15 – Somatório de valores válidos com <i>speckle</i> gerado por spray para as deformações $\epsilon_{yy}$ e $\epsilon_{xx}$ .....	78
Tabela 16 – Somatório de valores válidos com <i>speckle</i> gerado por pincel para as deformações $\epsilon_{yy}$ e $\epsilon_{xx}$ .....	78
Tabela 17 – Resultados de resistência a compressão. ....	81
Tabela 18 – Resultados médios de módulo de elasticidade. ....	82
Tabela 19 – Fatores de correção $\alpha_E$ . ....	86
Tabela 20 – Coeficientes de Poisson. ....	87
Tabela 21 – Análise comparativa das propriedades mecânicas dos concretos (Famílias F1, F2, F3 e F4). ....	88
Tabela A 1 – Relação do módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do CPA_01. ....	102

Tabela B 1 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F1_1 – 19/6).....	105
Tabela B 2 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F1_1 – 49/10).....	106
Tabela B 3 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F2_1 – 19/6).....	106
Tabela B 4 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F2_1 – 49/10).....	107
Tabela B 5 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F2_2 – 19/6).....	107
Tabela B 6 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F2_2 – 49/10).....	108
Tabela B 7 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F2_3 – 19/6).....	108
Tabela B 8 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F2_3 – 49/10).....	109
Tabela B 9 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F2_4 – 19/6).....	109
Tabela B 10 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F2_4 – 49/10).....	110
Tabela B 11 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F3_1 – 49/16).....	110
Tabela B 12 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F3_1 – 49/16).....	111
Tabela B 13 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F3_2 – 49/16).....	111
Tabela B 14 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F3_2 – 49/16).....	112
Tabela B 15 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F3_3 – 19/6).....	112
Tabela B 16 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F3_3 – 49/10).....	113

Tabela B 17 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F3_4 – 19/6).....	113
Tabela B 18 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F3_4 – 49/10).....	114
Tabela B 19 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F4_1 – 49/16).....	114
Tabela B 20 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F4_1 – 49/16).....	115
Tabela B 21 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F4_2 – 49/16).....	115
Tabela B 22 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F4_2 – 49/16).....	116
Tabela B 23 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F4_3 – 49/16).....	116
Tabela B 24 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F4_3 – 49/16).....	117
Tabela B 25 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F4_4 – 19/6).....	117
Tabela B 26 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F4_4 – 49/10).....	118
Tabela B 27 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F4_5 – 19/6).....	118
Tabela B 28 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F4_5 – 49/10).....	119
Tabela B 29 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição (CC_F4_6 – 19/6).....	119
Tabela B 30 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição (CC_F4_6 – 49/10).....	120
Tabela B 31 – Conjunto total de resultados satisfatórios para os CPs. ....	120
Tabela B 32 – Conjunto total de resultados satisfatórios para os CPs. (Continuação) .....	121
Tabela B 33 – Conjunto total de resultados satisfatórios para os CPs. (Continuação) .....	122

## Lista de Gráficos

Gráfico 1 –  Tensão  x Deformação ( $\mu\epsilon$ ) (CC_F2_2 – 19/6).....	66
Gráfico 2 – Distribuição  Tensão  x Deformação ( $\epsilon_{yy}$ ) do CC_F2_2 para os pares <i>subset/step</i> 19/6, 29/9, 39/13 e 49/16. ....	74
Gráfico 3 – Distribuição  Tensão  x Deformação ( $\epsilon_{yy}$ ) por par <i>subset/step</i> (CS_F4_2). .....	75
Gráfico 4 – Distribuição Tensão x Deformação ( $\epsilon_{xx}$ ) por par <i>subset/step</i> (CS_F4_2). .....	76
Gráfico 5 –  Tensão  x Deformação ( $\mu\epsilon$ ) (CS_F3_3 – 49/16).....	79
Gráfico 6 –  Tensão  (MPa) x Deformação ( $\mu\epsilon$ ) com ciclos de carga CS_F4_2.....	84
Gráfico A 1 – Tensão x deformação $\epsilon_{yy}$ CPS_03. ....	101
Gráfico A 2 – Tensão x Deformação CPR_01 (29/9). ....	104
Gráfico C 1 – Tensão x deformação $\epsilon_{yy}$ CC_F2_2 (19/6). ....	125
Gráfico C 2 – Tensão x deformação $\epsilon_{yy}$ CC_F2_3 (19/6). ....	125

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
CG	<i>Clip gauge</i>
CP	Corpo de prova
CPR	Compressômetro
CV	Coeficiente de variação
DIC	Correlação digital de imagens
$S_d$	Desvio padrão
$E_{ci}$	Módulo de elasticidade inicial tangente
$E_{cs}$	Módulo de elasticidade secante
$E_x$	Módulo de elasticidade na direção X
$E_y$	Módulo de elasticidade na direção Y
$f_c$	Resistência à compressão
$f_{cef}$	Resistência efetiva à compressão
$F_{ck}$	Resistência característica à compressão aos 28 dias
LVDT	Transdutor de deslocamento variável linear
ROI	Região de interesse
SG	<i>Strain gage</i> (extensômetro elétrico)
$\alpha_E$	Fator de correção para o módulo de elasticidade
$\varepsilon_a$	Deformação específica no ponto a
$\varepsilon_b$	Deformação específica no ponto b
$n$	Coeficiente de Poisson
$\sigma_a$	Tensão aplicada no ponto a
$\sigma_b$	Tensão aplicada no ponto b

## 1 INTRODUÇÃO

A análise de estruturas em concreto, atualmente, apresenta diversos métodos de ensaio para quantificar as propriedades mecânicas dos objetos de estudo. Os aparelhos mais comuns usados na engenharia civil são os relógios aparadores, transdutores de deslocamento variável linear (LVDT), extensômetros elétricos de fixação externa (*clip gages*) e extensômetro de colagem superficial (*strain gauge*) (Montija, 2007). A principal desvantagem desses métodos é a restrição da área de análise, fornecendo apenas valores de comportamento médio dos componentes de deslocamento nos pontos de contato do instrumento.

Embora o concreto seja geralmente considerado homogêneo em uma escala macroscópica, permitindo pequenas variações nas propriedades do elemento estrutural, sua análise, quando confinado em um corpo de prova, revela propriedades heterogêneas e não isotrópicas (Mehta e Monteiro, 2014). Nesse contexto, a aplicação de técnicas tradicionais de caracterização pode resultar na perda de informações cruciais para estudos mais aprofundados. Para estes tipos de materiais, técnicas de campo com medição global podem proporcionar uma avaliação mais completa e precisa.

Dentre essas técnicas, vem ganhando destaque, nas últimas décadas, a correlação digital de imagens (Digital image correlation - DIC), que permite a visualização de valores de deslocamentos e deformações em toda superfície de análise. O desenvolvimento desta técnica ocorre desde a década de 80 e ultimamente tem crescido o número de trabalhos relevantes dentro da engenharia civil com a técnica DIC, como Pour et al. (2020), Li et al. (2021), Wang (2021), Fenge et al. (2022) e Szewczyk et al. (2022).

Nesta dissertação foi conduzida uma análise detalhada de corpos de prova de concreto contendo agregados sintéticos e naturais. O objetivo principal é validar o sistema DIC 2D e 3D, comparando-o a técnicas tradicionais e caracterizar propriedades mecânicas de concretos com agregados naturais e sintéticos. Este novo agregado sintético vem sendo estudado e desenvolvido em um projeto da Faculdade de Engenharia Civil da UFPA em parceria com a empresa HYDRO ALUNORTE.

Para atingir este objetivo, foi escolhida uma abordagem de pesquisa estruturada, que inclui a seguinte ordem: Capítulo 2 aborda o agregado sintético de

resíduo de bauxita, o ensaio do módulo de elasticidade do concreto e destaca a técnica DIC, bem como explora exemplos práticos, estudos comparativos e apresenta uma tabela resumindo técnicas de medição. Capítulo 3 apresenta a metodologia para caracterizar os concretos estudados. Descreve a produção dos corpos de prova e a preparação das superfícies para as medições, abrange o sistema de aquisição e calibração (DIC 2D/3D) e os ensaios mecânicos (compressão axial e módulo de elasticidade), e propõe a otimização dos parâmetros operacionais (intervalo, *subset/step*, pintura e região de interesse), estabelecendo diretrizes para a aplicação da técnica. O capítulo 4 analisa parâmetros para otimizar o DIC (intervalo de medição, *subset/step*, padrões de pintura) e apresentam-se resultados de ensaios em concretos (compressão, módulo de elasticidade, Poisson e  $\alpha_E$ ), comparando técnicas convencionais e DIC, com avaliação de desvios e confiança das técnicas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as propriedades mecânicas do concreto com agregado sintético derivado de resíduo de bauxita, utilizando a técnica de correlação digital de imagens (DIC) e técnicas tradicionais da engenharia civil. Além disso, busca-se definir diretrizes para a aplicação da técnica e avaliar a eficiência do agregado e das metodologias empregadas na caracterização mecânica do material.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar testes para validar o sistema de medição DIC 2D e 3D do laboratório de análise de tensões da UFPA;

- Estabelecer boas práticas para caracterização de CPs de concreto com a técnica DIC;
- Otimizar parâmetros operacionais do DIC (intervalo de medição, *subset*, *step* e padrões de pintura) e validar sua eficácia na determinação do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e fator de correção  $\alpha_E$  concretos com agregados naturais e sintéticos (resíduo de bauxita);
- Comparar os resultados obtidos com a técnica DIC com técnicas tradicionais (Compressômetro, *Clip Gage*, *Strain gage*);
- Caracterizar dois tipos de concretos, um com agregado sintético e outro com agregado natural, através de ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade;
- Comparar os resultados de propriedades dos dois concretos para avaliar a eficácia do agregado sintético.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste tópico será exposta uma breve descrição do agregado sintético proveniente do resíduo de bauxita. Em seguida, será apresentada uma explicação detalhada do ensaio do módulo de elasticidade do concreto. Além disso, serão abordadas as principais técnicas de medição amplamente utilizadas na caracterização de materiais. Uma ênfase especial será dada à técnica de correlação digital de imagens (DIC).

O texto também explorará exemplos práticos do uso da DIC, com destaque na sua aplicação na análise de concretos. Além de abordar estudos que analisaram o módulo de elasticidade por meio de diversas técnicas de medição. Por fim, será apresentada uma tabela comparativa que sintetiza as características distintas de cada técnica de medição discutida, proporcionando uma visão geral das vantagens e limitações de cada abordagem.

### **2.1 AGREGADO SINTÉTICO COM RESÍDUO DE BAUXITA**

O desenvolvimento de um agregado alternativo para utilização na indústria civil é algo essencial para um progresso sustentável com o meio ambiente, em virtude de uma futura escassez dos materiais naturais utilizados atualmente. Tendo em vista o grande potencial da exploração de alumínio no estado do Pará, diversos autores propuseram uma alternativa sustentável para os resíduos oriundos dessa mineração, como Santos (2019) e Ribeiro (2022).

Santos (2019) desenvolveu agregados sintéticos a partir de resíduos de bauxita, visando substituir o seixo rolado. Variações na quantidade de sílica foram implementadas durante o processo de produção, resultando em agregados pesados com 10% de sílica e agregados leves com 30% de sílica. O autor adotou o mesmo traço para fabricar três conjuntos de corpos de prova: um com seixo (CSR) e dois com agregados sintéticos contendo 10% e 30% de sílica (CSM10 e CSM30, respectivamente).

Esses espécimes foram submetidos a quatro ensaios de caracterização, massa específica, porosidade, absorção de água e resistência à compressão axial. Os resultados obtidos neste estudo estão detalhadamente apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados Santos (2019).

Massa específica (g/cm³)	Porosidade (%)	Absorção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)
CSR	7.61	3.73	16.68
CSM10	7.84	3.92	12.38
CSM30	8.29	4.22	9.85

Fonte: Santos (2019)

No estudo conduzido por Ribeiro (2022), foram desenvolvidos concretos com a substituição total dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos sintéticos, com o intuito de analisar as distintas composições e comparar suas características mecânicas com um concreto de seixo rolado como referência.

Dessa forma, a composição dos agregados citados foi ajustada variando a quantidade de resíduo de bauxita nas proporções de 70%, 80% e 90% e a caracterização das amostras incluiu ensaios de compressão axial, tração diametral e módulo de elasticidade.

Os resultados obtidos para cada ensaio estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados Ribeiro (2022).

	Resistência à compressão axial média (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral média (MPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)
REF	31,78	2,50	21,21
ASRB-70	29,16	2,42	21,65
ASRB-80	32,29	2,45	21,78
ASRB-90	19,22	1,78	17,42

Fonte: Adaptado Ribeiro (2022)

## 2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO ( $E_c$ )

### 2.2.1 CONCEITO

O módulo de elasticidade do concreto, conhecido também como módulo de Young, é a propriedade mecânica do material que mede quanto ele deforma sob uma determinada força, ou seja, a rigidez do material.

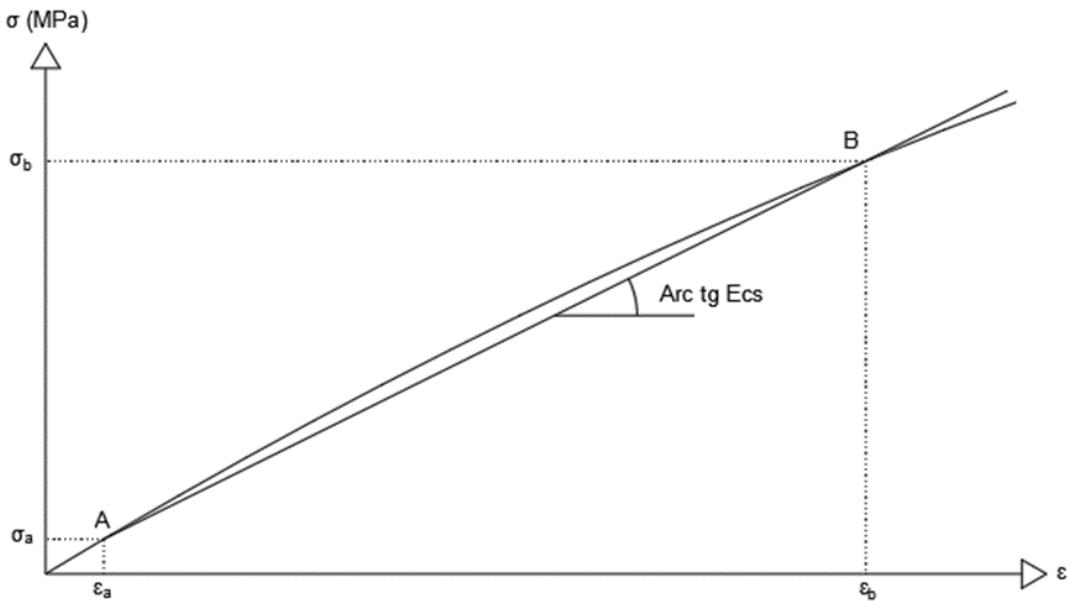
De modo que pode ser entendido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea em um limite proporcional assumido, segundo Mehta e Monteiro (2014). Desta forma, segundo Andrade (1997), para incrementos contínuos de carga em geral tem a forma de uma linha com uma suave curvatura, considerada, para fins práticos, como linear.

### 2.2.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Um valor que precede o cálculo do módulo do concreto é a resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias ( $F_{ck}$ ), conforme a NBR 5739:2018. Este valor é fundamental devido à exigência da NBR 8522:2021 de seguir seus ensaios visando uma resistência característica do concreto.

A NBR 8522:2021 determina o módulo de elasticidade do concreto a partir de uma secante entre uma tensão A ( $\sigma_a$ ) e 30% de  $F_{ck}$  ( $\sigma_b$ ), conforme a Figura 1, sendo a  $\sigma_a$ , prescrita por duas metodologias de ensaio, as quais podem ser descritas como Metodologia A – Tensão  $\sigma_a$  fixa e Metodologia B – Deformação específica  $\epsilon_a$  fixa.

Figura 1 – Representação esquemática do módulo de deformação secante  $E_{cs}$ .



Fonte: Adaptado de NBR 8522:2021.

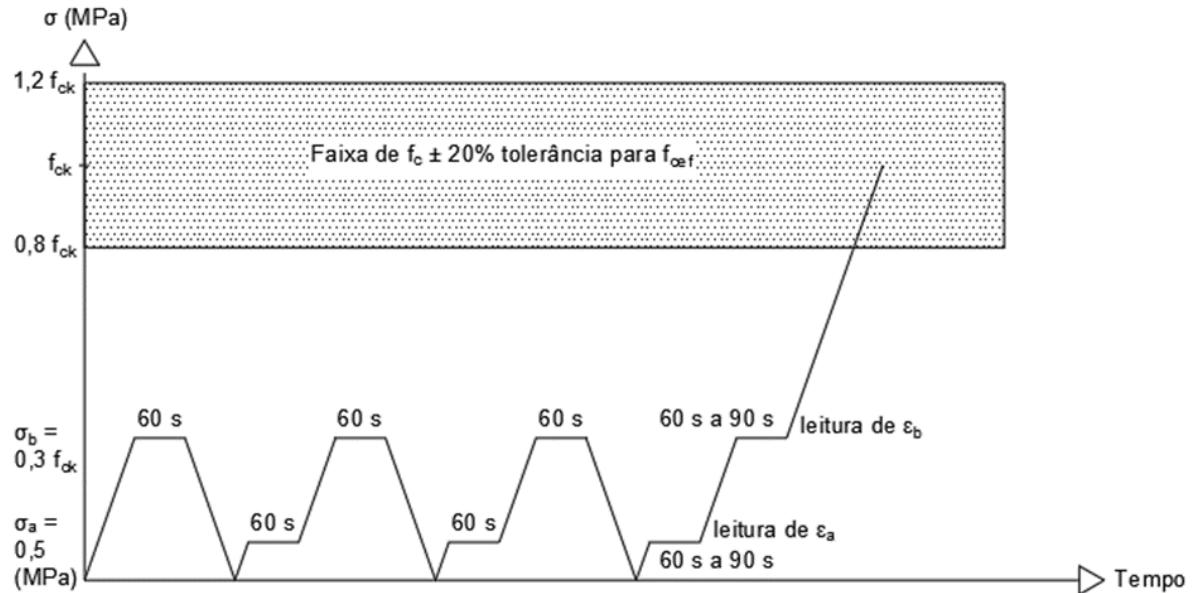
Conforme propõe a NBR 8522:2021, ambas as metodologias apresentam quatro etapas, diferenciando-se apenas na forma de determinar o ponto A na Figura 1. Para o ensaio na metodologia A, a tensão  $\sigma_a$  é fixada a um valor de 0,5 MPa e na metodologia B, o corpo de prova é carregado até uma tensão cuja deformação específica de  $50 \times 10^{-6}$  (ou  $50 \mu\epsilon$ ).

Na primeira etapa, deve-se aplicar uma carga no espécime com uma velocidade de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s até alcançar a tensão  $\sigma_b$  igual a  $0,3F_{ck}$  e mantê-la neste carregamento por 60 s. Em seguida, o carregamento deve ser aliviado até uma tensão próxima de zero ou a uma divisão de escala análoga. É importante que após todos os procedimentos de descarga, o prato superior da máquina de ensaio não perca o contato com o topo do corpo de prova.

Na próxima etapa, o procedimento de carga é repetido, porém, inicialmente até uma tensão  $\sigma_a$ , seja ela 0,5 MPa ou uma tensão correspondente a uma deformação de  $50 \mu\epsilon$ . A carga se mantém novamente por 60 s e então é carregado até a 30% da resistência característica ( $F_{ck}$ ), permanecendo por 60 s até ser descarregado a seguir. O ciclo é reforçado numa 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> etapa, de modo que na última são feitas as leituras de deformações  $\epsilon_a$  e  $\epsilon_b$ , tomando-as em até 30 s para cada carregamento. É obrigatório que a resistência efetiva ( $f_{cef}$ ) encontrada depois do ensaio de módulo esteja entre  $0,8F_{ck}$  e  $1,2F_{ck}$  do valor previsto.

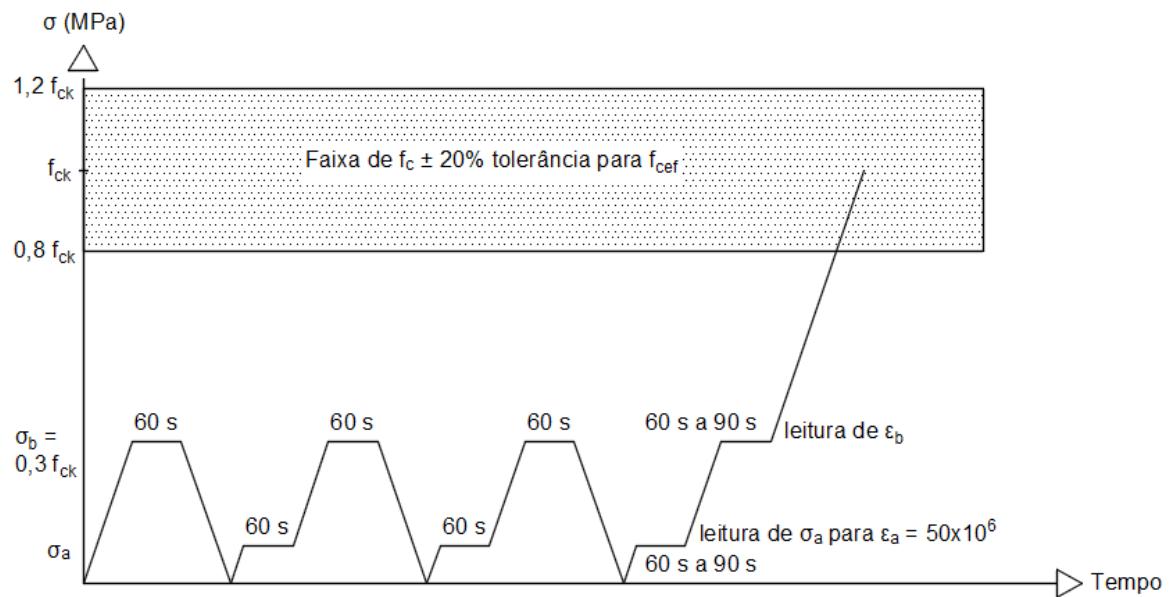
As Figura 2 e Figura 3 demonstram o ciclo de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade para a Metodologia A e B, respectivamente.

Figura 2 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – metodologia A – tensão  $\sigma_a$  fixa.



Fonte: Adaptado de NBR 8522:2021.

Figura 3 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – metodologia B – deformação  $\epsilon_a$  fixa.



Fonte: Adaptado de NBR 8522:2021.

O módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial ( $E_{ci}$ ), em MPa, é considerado equivalente ao módulo de elasticidade secante após os 3 ciclos

de carga e deve ser calculado pelas equações 1 e 2, sendo elas para as metodologias A e B respectivamente.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (1)$$

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \quad (2)$$

Sendo:

$\sigma_a$  – é a tensão referente à deformação específica  $50 \times 10^{-6}$  (MPa);

$\sigma_b$  – é a tensão referente a 30% de  $F_{ck}$  (MPa);

$\varepsilon_a$  – é a deformação específica média dos CPs sob tensão de 0,5 MPa;

$\varepsilon_b$  – é a deformação específica média dos CPs sob tensão de  $0,3F_{ck}$ .

### 2.2.3 RELAÇÃO $F_{ck}$ E $E_c$

Conforme a NBR 6118:2024, o módulo de elasticidade secante do concreto, aos 28 dias, pode ser calculado de forma analítica utilizando as equações 3 e 4. Tal equação depende do  $F_{ck}$  do concreto e de um fator de correção ( $\alpha_E$ ) que leva em consideração o tipo de agregado graúdo utilizado na composição do concreto.

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600\sqrt{f_{ck}} \text{ para } F_{ck} \text{ entre } 20 \text{ MPa e } 50 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_E * \left( \frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \text{ para } F_{ck} \text{ entre } 55 \text{ MPa e } 90 \text{ MPa} \quad (4)$$

Sendo:

$E_{ci}$  – é o módulo de elasticidade secante do concreto (MPa);

$F_{ck}$  – é a resistência característica do concreto aos 28 dias (MPa);

$\alpha_E$  – 1,2 para basalto e diabásio

$\alpha_E$  – 1,0 para granito e gnaisse

$\alpha_E$  – 0,9 para calcário

$\alpha_E$  – 0,7 para arenito

## 2.3 TÉCNICAS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO EM ENSAIOS DE CONCRETO

### 2.3.1 COMPRESSÔMETRO (CPR)

O compressômetro é um medidor de deformação mais tradicional entre os sistemas de medição. É um mecanismo mecânico que apresenta três ponteiros equidistantes que se fixam no corpo de prova para ampliar os deslocamentos entre os pontos de contato analisados. Essa medição pode ser feita por um ou dois relógios comparadores acoplados ao sistema, sejam eles, analógicos ou eletrônicos.

De acordo com a NBR 8522:2021, um compressômetro, ao ser acoplado no corpo de prova, pode ser com bases dependentes ou independentes, conforme a Figura 4. Os anéis devem ser fixados no espécime com uma distância constante entre os fixadores, de modo que a distância entre eles seja igual à base medida do corpo de prova.

Figura 4 – Compressômetro com bases independentes.



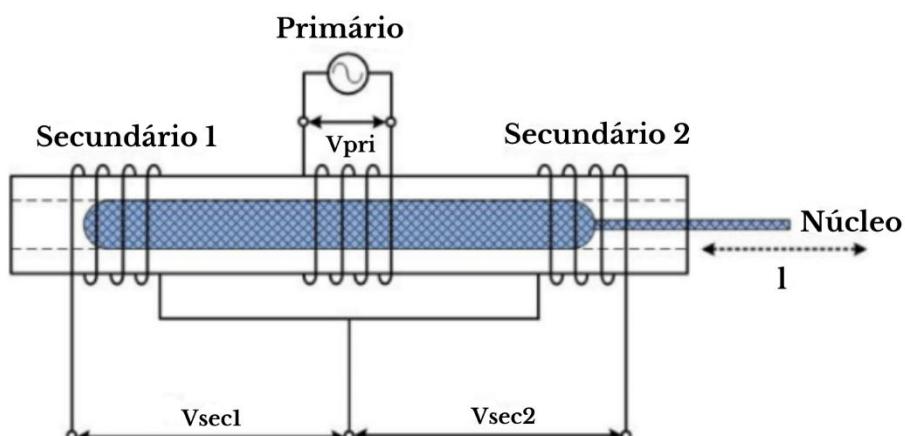
Fonte: Petroonline (2025).

### 2.3.2 TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO VARIÁVEL LINEAR (LVDT)

O LVDT é um sensor utilizado para converter movimento linear em sinal elétrico. Em ensaios de concreto, ele é empregado para medição de deformações, fissuras e deslocamentos em estruturas, sendo valorizado por sua precisão e confiabilidade.

Segundo Rerkratn et al. (2020), seu funcionamento baseia-se no princípio de um transformador, com uma bobina fixa e um núcleo móvel. A bobina é composta por três enrolamentos: um primário, alimentado por corrente alternada, e dois secundários. O movimento do núcleo altera o fluxo magnético, gerando tensões nas bobinas secundárias, cuja amplitude e fase indicam a posição e direção do núcleo, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Circuito LVDT.



Fonte: Rerkratn et al. (2020)

O LVDT mede deformação de modo similar ao compressômetro, no qual dois anéis são fixados ao corpo de prova, formando dois planos paralelos. No entanto, o LVDT assume a função do relógio comparador para as medições.

A Figura 6 representa um LVDT instalado numa base, com dois sensores, um em cada lado.

Figura 6 – LVDT acoplado em um compressômetro.



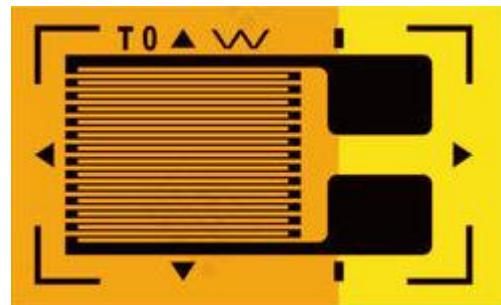
Fonte: Contenco (2025).

### 2.3.3 EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE COLAGEM SUPERFICIAL (*STRAIN GAGE* OU SG)

Os SG são constituídos por um ligamento de metal filme estabilizado, em forma de “fio”, assim como os denominados *foil*. Estes tipos de medidores são colados na superfície dos corpos de prova e, mediante deslocamentos induzidos por um carregamento, é possível determinar a deformação pela variação da resistência elétrica relativa do condutor com a variação relativa do seu comprimento. (Andrade et al., 1997)

A Figura 7 representa um extensômetro axial único que mede as deformações em apenas uma direção. Sua instalação é feita na superfície do corpo de prova após um tratamento, por meio de um lixamento, a fim de eliminar quaisquer impurezas (óleo, graxa, poeira etc.).

Figura 7 – Modelo extensômetro axial único.



Fonte: Directindustry (2025).

#### 2.3.4 EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE FIXAÇÃO EXTERNA (CLIP GAGE OU CG)

O princípio desse medidor é devido a uma deformação elástica do equipamento, que acompanha as deformações de um corpo de prova. Para esta análise o equipamento é constituído por duas hastes posicionadas no corpo de prova e, por meio de um *strain gage* ajustado na parte mais sensível do equipamento, mede as deformações do sistema. (Thanakuna et al., 2020)

A Figura 8 mostra um par de sensores *clip gage* de 10 cm instalados num corpo de prova de concreto para a correlação de deformação por lados diametralmente opostos.

Figura 8 – *Clip gage* instalado em um corpo de prova de concreto.



Fonte: Intermetric (2025).

## 2.4 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (DIC)

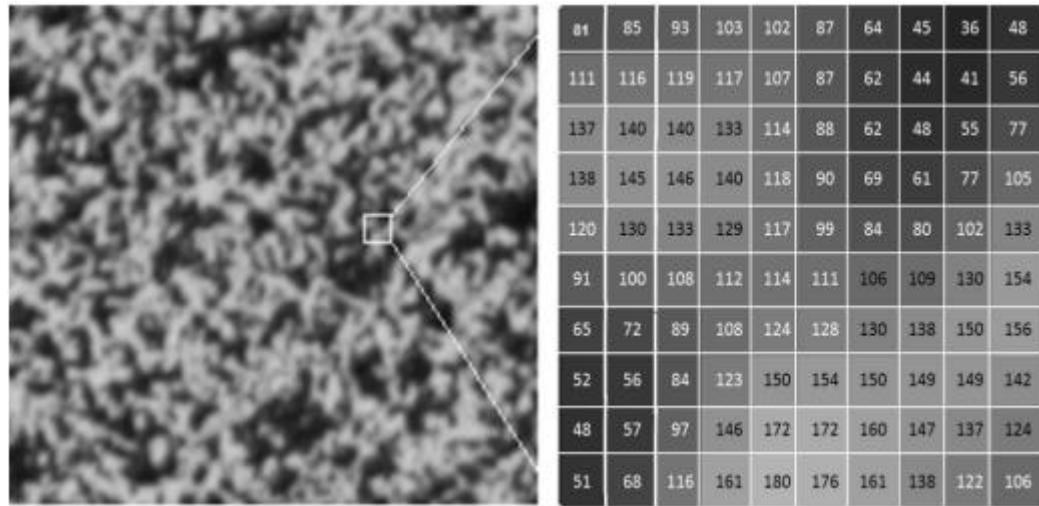
### 2.4.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TÉCNICA DIC

A técnica de correlação digital de imagens (DIC) rastreia pontos na superfície do corpo de prova para medir deformações. Inicialmente, define-se uma região de interesse (ROI) na imagem de referência, que é subdividida em subconjuntos (*subsets*). Cada *subset*, caracterizado por variações de intensidade, é comparado com sua contraparte na imagem deformada, usando critérios como a correlação cruzada normalizada (ZNCC) ou a soma das diferenças dos quadrados (SSD). O algoritmo identifica a posição de máxima similaridade numa área de busca, com resolução inicial de 1 pixel. Em seguida, métodos de registro sub-pixel, como algoritmos iterativos ou ajuste do pico da função de correlação, refinam o deslocamento, gerando um mapa preciso dos deslocamentos e deformações (Pan, 2009).

Na aquisição de imagens, cada pixel é associado a um valor discreto de intensidade, variando de 0 a 255, que determina seu nível de cinza. Com base nessa representação, a imagem de referência é segmentada em *subsets*, diferenciados pelos *speckles*. O algoritmo então procura esses mesmos padrões na imagem deformada e compara as intensidades correspondentes para calcular o deslocamento entre os pontos. Esse procedimento permite mensurar com precisão as deformações na superfície do corpo de prova, fundamentando-se na quantização e na representação digital dos dados (GONZALEZ e WOODS, 2018).

Para exemplificação do procedimento, a Figura 9 representa os níveis de cinza associados a uma imagem para cada pixel de um determinado padrão de *speckles*.

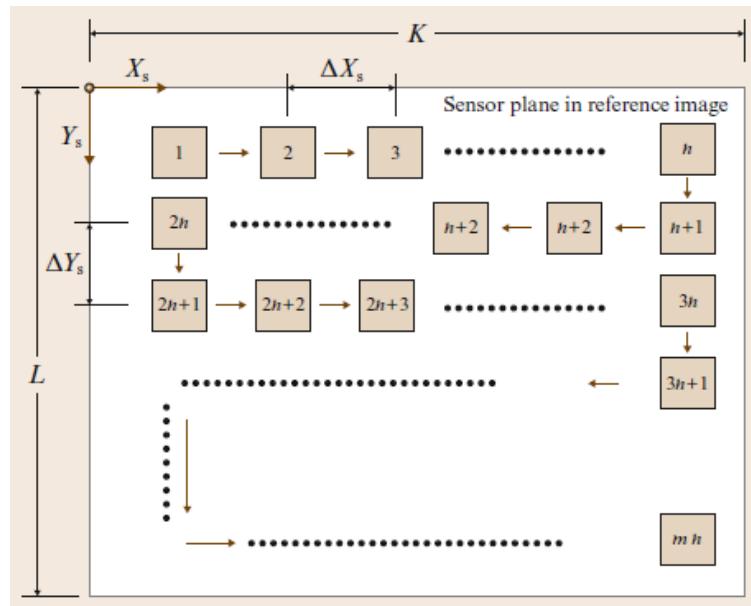
Figura 9 – Ilustração de uma imagem, determinando o valor de nível de cinza para cada pixel.



Fonte: Shen (2009) apud Ferraz (2013).

Segundo Sutton (2009), a Figura 10 mostra uma combinação de *subsets* dentro da imagem de referência ajustada para um processo de busca. Para tanto, um total de  $m \times n$  de *subsets* são escolhidos, sendo que no eixo  $X_s$  os *subsets* apresentam  $\Delta X_s$  de espaçamento e no eixo  $Y_s$  apresentam  $\Delta Y_s$  de espaçamento. O conjunto total de *subsets*  $m \times n$  representa a área total de interesse estudada.

Figura 10 – Processo de seleção de *subsets* na imagem de referência.



Fonte: Sutton (2009).

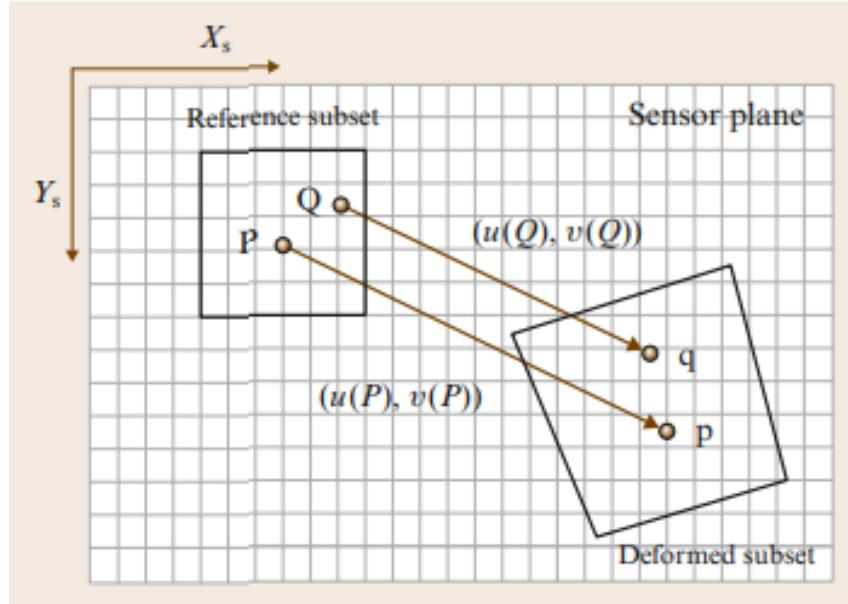
A Figura 11 mostra um esquema do deslocamento do *subset* desejado de um ponto sem deformação para um ponto deformado. Na imagem indeformada os pontos P e Q apresentam as respectivas coordenadas  $(X_S^P, Y_S^P)$  e  $(X_S^P + \Delta X_S, Y_S^P + \Delta Y_S)$  e o

termo Q pode ser reescrito utilizando  $\gamma_s = X_s - X_s^Q$  e  $\eta_s = Y_s - Y_s^Q$ . Assim, as equações 5 e 6 descrevem o valor de intensidade de brilho nos pontos P e Q (Sutton, 2009).

$$I(P) = I(X_s^P, Y_s^P) \quad (5)$$

$$I(Q) = I(X_s^P + y_s^Q, Y_s^P + \eta_s^Q) \quad (6)$$

Figura 11 – Processo de seleção de *subsets* na imagem de referência.



Fonte: Sutton, 2009.

Como mostrado na Figura 11, os pontos P e Q foram transformados em p e q, respectivamente, e não correspondem a regiões inteiras de pixels, devido à deformação do subset. Após a correta correlação de padrões, e considerando o ponto P como o centro do subset na imagem de referência, o campo vetorial de deslocamento para o conjunto de pontos pode ser descrito como o vetor  $\{u(\gamma_s, \eta_s), v(\gamma_s, \eta_s)\}$  e o valor de intensidade resultante de um ponto arbitrário na imagem deformada pode ser escrita como equação 7 (Sutton, 2009).

$$I'(Q) = I(X_s^P + Y_s + u(Y_s^Q, \eta_s^P), Y_s^P + \eta_s + v(Y_s^Q + \eta_s^Q)) \quad (7)$$

A equação 8 representa a primeira ordem da série de Taylor aproximadamente para o campo de deformação.

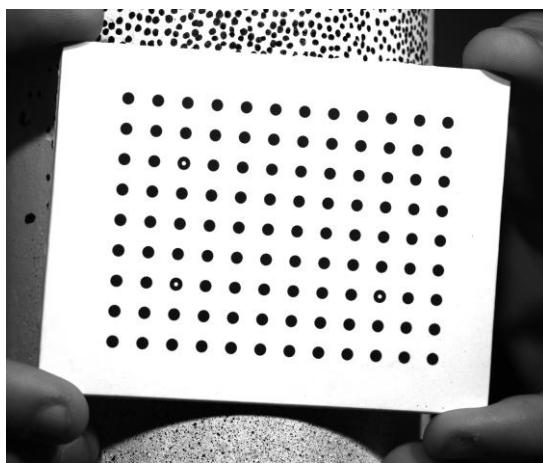
$$\begin{aligned} I'(Q) \cong & I(X_s^P + u(0,0) + \left(1 + \frac{\delta_u}{\delta_{ys}}\right) \Delta y_s + \frac{\delta_u}{\delta_{\eta_s}} \Delta \eta_s, Y_s^P + v(0,0) + \frac{\delta_v}{\delta_{ys}} \Delta y_s \\ & + \left(1 + \frac{\delta_v}{\delta_{\eta_s}}\right) \Delta \eta_s \end{aligned} \quad (8)$$

## 2.4.2 CALIBRAÇÃO

Segundo Xiangqian et al. (2020), o sistema de correlação de imagem precisa ser calibrado para que o sistema possa determinar automaticamente o tamanho real da deformação medida e uma condição importante para uma calibração bem-sucedida é a placa de calibração, que varia conforme o tamanho da zona de medição estudada.

A Figura 12, mostra uma placa de calibração com 7cm de distância entre os pontos e com 3 pontos de referência, utilizada para aferir o sistema estéreo das câmeras.

Figura 12 – Placa de calibração.



Fonte: Autor (2025).

Na Tabela 3, é possível observar parâmetros obtidos após uma calibração no sistema de câmeras do *software* VIC-3D. Entretanto, outros *software* utilizam dos mesmos valores de calibração para aferir seus próprios sistemas.

Tabela 3 – Parâmetros obtidos de calibração do sistema de câmeras.

Câmera 0 (distância em pixels)	Câmera 1 (distância em pixels)
Centro (X): 1124	Centro (X): 1124
Centro (Y): 1024	Centro (Y): 1024
Distância focal (X): 10702,7	Distância focal (X): 10910,3
Distância focal (Y): 10702,7	Distância focal (Y): 10910,3
Kappa 1: -0,0286	Kappa 1: 0,1394
Kappa 2: 55,9335	Kappa 2: -11 2059

Fonte: Autor (2025).

A calibração do sistema VIC-3D permite obter parâmetros fundamentais para a reconstrução tridimensional dos CPs, sendo:

Os parâmetros centro (X, Y) representam a posição do centro óptico da câmera no sensor, expressa em pixels. Esses valores são cruciais para corrigir possíveis deslocamentos da lente em relação ao sensor.

A distância focal (X, Y) define a distância focal da lente em pixels, influenciando diretamente a escala da reconstrução 3D. Valores iguais para X e Y indicam uma projeção uniforme entre os eixos horizontal e vertical.

Os coeficientes kappa 1 e kappa 2 correspondem à distorção radial da lente, utilizada para corrigir aberrações introduzidas pelo sistema óptico. Kappa 1 corrige a distorção principal, enquanto kappa 2 refina a correção para pontos mais distantes do centro da lente. (Correlated Solutions, 2020).

## 2.5 TABELA COMPARATIVA ENTRE TÉCNICAS

A Tabela 4, apresenta uma correlação entre as principais características de cada técnica de medição abordada neste estudo. A resolução refere-se à menor medida de deformação ou deslocamento que cada técnica é capaz de detectar e o alcance representa o limite máximo e mínimo de deformação ou deslocamento que a técnica é capaz de medir. Além disso, serão analisados o tempo de preparo do ensaio, a facilidade na análise dos resultados e o rigor na calibração do sistema.

Tabela 4 – Comparação de técnicas.

	CPR	LVDT	SG	CG	DIC 2D	DIC 3D
Resolução	0,0005 mm <sup>1</sup>	0,1% FS <sup>2</sup>	1µm/m <sup>3</sup>	1µm/m <sup>3</sup>	Variável <sup>4</sup>	Variável <sup>4</sup>
Alcance	0,25 – 300 mm <sup>1</sup>	200 µm – 50 cm <sup>2</sup>	1 µm/m – 50.000 µm/m <sup>3</sup>	1 µm/m – 50.000 µm/m <sup>3</sup>	Variável <sup>4</sup>	Variável <sup>4</sup>
Resultados	Média de deformações	Média de deformações	Média de deformações	Média de deformações	Campo global de deformações	Campo global de deformações

Fonte: (1) Mitutoyo e Fowler High Precision, (2) Honeywell e TE, (3) SINT technology e (4) Reu (2014).

Fonte: Autor (2025).

A resolução e alcance dos relógios comparadores foram obtidos através de pesquisas nos sites de fornecedores como Mitutoyo e Fowler High Precision. No caso do LVDT, os dados foram buscados nos sites de fabricantes como Honeywell e TE.

Em razão da análise de deformação do *clip gage* ser realizada através de um *strain gage*, a resolução e o alcance de ambos são iguais e foram determinados segundo um artigo publicado pela empresa SINT technology. Conforme afirmado por Reu (2014), a acurácia do sistema DIC 2D ou 3D está intrinsecamente vinculada ao desempenho do sistema de aquisição de imagens, que engloba câmeras, lentes e iluminação, assim como ao padrão de pintura do corpo de prova (*speckles*).

Os resultados obtidos pelas técnicas tradicionais correspondem a uma média de deformações entre as extremidades dos pontos de contato dos aparelhos de ensaio no CP, fornecendo dados restritos a essa área específica. Em contraste, na técnica DIC, os resultados correspondem a um campo global de deformações, abrangendo toda a superfície do corpo de prova voltada para as câmeras.

## 2.6 APLICAÇÕES DA TÉCNICA DIC EM ANÁLISES DE CONCRETO

Diversos pesquisadores têm conduzido investigações utilizando a técnica DIC, tanto de forma isolada quanto em conjunto com outros dispositivos de medição de deformação. Na engenharia civil, a técnica DIC desempenha um papel inovador em várias aplicações, destacando-se a caracterização mecânica de corpos de prova e a análise da propagação de fissuras em vigas submetidas a carregamento em 3 ou 4 pontos.

Além disso, a metodologia tem sido aplicada em estudos abrangentes, incluindo análises de deformações em estruturas de concreto expostas ao fogo, investigações em estruturas mistas e análises detalhadas de lajes e painéis de concreto. A versatilidade da DIC tem permitido sua utilização em uma ampla gama de contextos na engenharia civil, contribuindo significativamente para a compreensão e aprimoramento das propriedades mecânicas e do comportamento estrutural de materiais e elementos construtivos.

Lingga et al. (2017) empregaram a correlação digital de imagens juntamente com o transdutor de variação linear (LVDT) para medir as deformações axiais e

laterais em um conjunto de quatro espécimes de rochas cimentadas, frequentemente utilizadas em aterros de minas no Canadá.

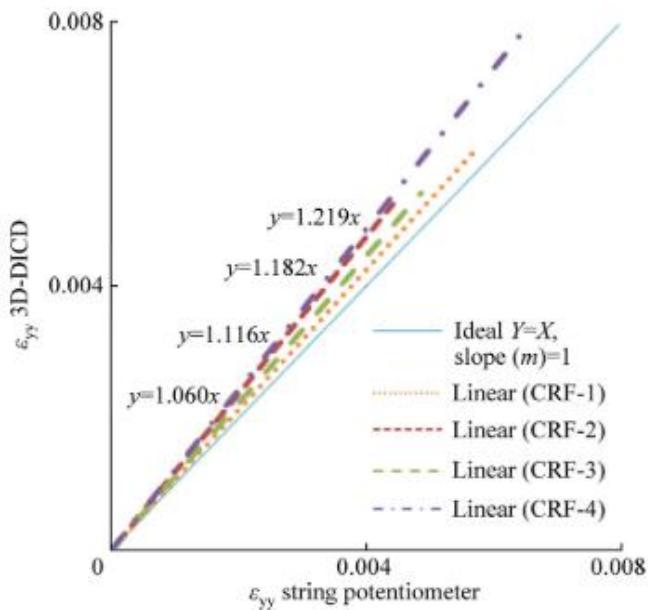
A Figura 13 ilustra o campo de deformações ao longo do eixo x ( $\varepsilon_{xx}$ ) do corpo de prova analisado, enquanto a Figura 14 compara a deformação axial ( $\varepsilon_{yy}$ ) medida pelo DIC-3D com a de potenciômetros de fio. A linha ideal  $y=x$  representa a concordância perfeita, enquanto as linhas tracejadas são as tendências para cada corpo de prova, indicando uma medição de deformação ligeiramente superior pelo DIC.

Figura 13 – Cinco pontos de deformações  $\varepsilon_{xx}$  ao redor da região de interesse, em torno do eixo central do espécime.



Fonte: Lingga et al. (2017).

Figura 14 – Razão da deformação axial 3D-DIC para LVDT.



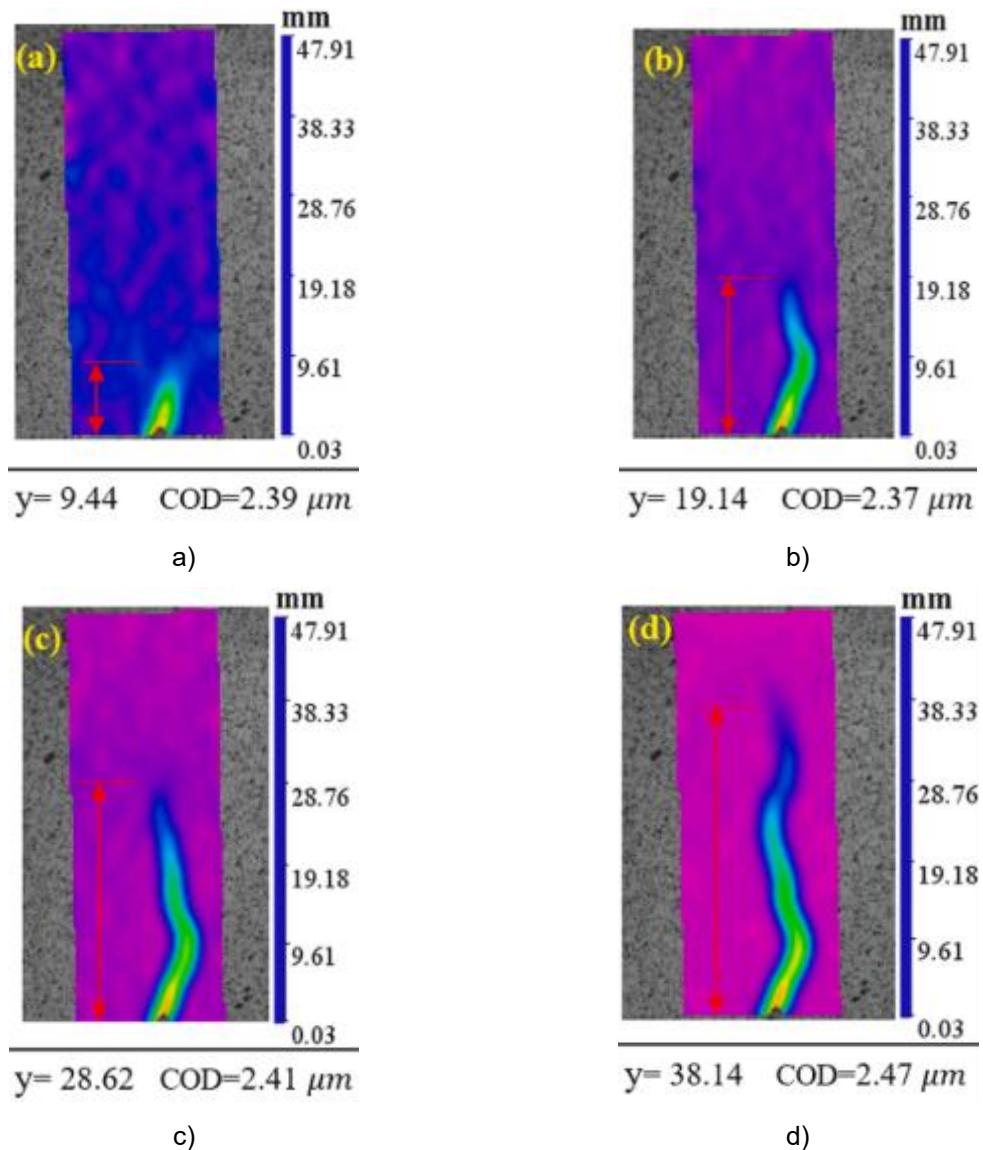
Fonte: Lingga et al. (2017).

Fenge et al. (2022) analisaram uma amostra retirada do concreto estrutural de uma ponte com 60 anos para avaliar a falha característica do espécime sob uma força de compressão axial. A pesquisa empregou a DIC para observar o campo global de deformações na propagação de fissuras. Além disso, Miura et al. (2020), em corpos de prova prismáticos, utilizaram a DIC para avaliar como a presença de fissuras afeta a resistência à compressão e a rigidez tangencial do concreto. Pour et al. (2020) investigaram o comportamento tensão-deformação e os modos de falha em corpos de prova cilíndricos confinados com polímeros reforçados com fibra. Li et al. (2021), em amostras prismáticas, combinaram DIC e emissão acústica para determinar a resistência à tração e a tenacidade à fratura de concretos com borracha. Por fim, Pour et al. (2022) analisaram a transição da falha difusa para a localizada em espécimes cilíndricos de concreto e arenito, identificando a bifurcação da deformação.

Wang et al. (2021) conduziram uma investigação das propriedades mecânicas e de fratura de uma viga reforçada com fibras de basalto, destacando variações nos tamanhos das fibras (3 mm, 6 mm, 12 mm e 18 mm). A viga foi submetida a um carregamento em três pontos e a evolução da fissura principal foi acompanhada por meio da técnica DIC. As avaliações incluíram resistência à compressão, resistência à tração por fendilhamento, carga máxima, tenacidade à fratura e energia de fratura.

A Figura 15 ilustra a expansão da fissura específica de uma viga reforçada com fibras de 6 mm.

Figura 15 – Progresso de deformações  $\epsilon_{xx}$  a) pré-90% da carga máxima, b) carga máxima, c) pós-80% da carga máxima e d) pós-50% da carga máxima.



Fonte: Wang et al. (2021).

Xiangqian et al. (2020) e Sharma et al. (2021) realizaram experimentos ao carregar vigas de concreto armado em 3 e 4 pontos, respectivamente. Esses estudos visaram analisar o comportamento das fissuras no corpo das vigas, utilizando técnicas como DIC e monitoramento por emissão acústica. Os resultados destacaram uma boa correlação entre as duas abordagens, evidenciando uma consistente relação entre os dados obtidos por meio de ambas. Outros autores como Bhosale et al. (2020), Bu et al. (2020) e de Domenico et al. (2021) também desenvolveram trabalhos semelhantes visando analisar o progresso das fissuras.

Mróz et al. (2020), utilizando a técnica DIC, submeteram um painel de concreto à exposição ao fogo, permitindo a análise de deformações na superfície exposta ao calor em comparação com a superfície protegida.

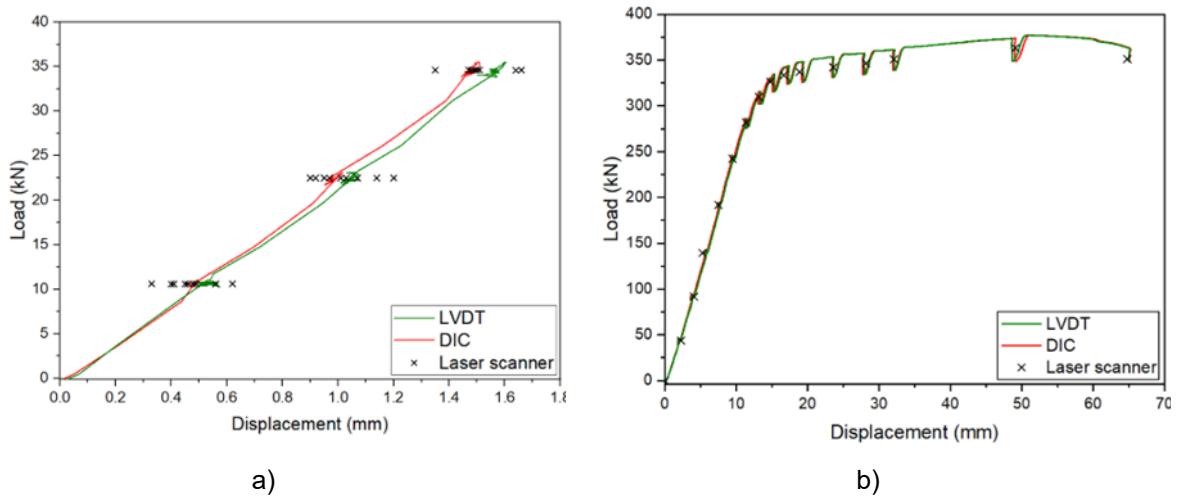
Hadigheh et al. (2021) focaram em uma peça mista de concreto armado e madeira laminada colada (MLC), visando qualificar a ligação da peça. Para isso, empregaram a ferramenta DIC como uma abordagem para monitorar e analisar as características da ligação.

Zdanowicz et al. (2022) realizaram um ensaio de carga em uma laje bi apoiada com o objetivo de acompanhar a abertura de fissuras. Utilizaram a técnica DIC para uma análise detalhada das deformações e fissuras durante o carregamento da laje.

Com o propósito de avaliar a precisão e a resolução de técnicas de medição que dispensam contato com o corpo de prova, como DIC e escaneamento a laser, Szewczyk et al. (2022) empregaram técnicas consolidados na engenharia civil, como extensômetria e LVDTs para comparar os resultados. Para conduzir esta análise, o autor realizou um teste de flexão, em três pontos, em uma viga de concreto armado, submetendo-a a duas fases de carregamento. A primeira fase envolveu uma carga leve para induzir uma deformação de aproximadamente 0,5 mm, enquanto a segunda fase utilizou uma carga significativa com o objetivo de deformar plasticamente a amostra e atingir a carga última do material.

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos por Szewczyk et al. (2022) em suas duas etapas de carregamento: a primeira com uma carga leve e a segunda com uma carga substancial. A comparação realizada pelos autores revelaram que, para baixas cargas, as medições de escaneamento a laser exibem ruídos significativos, ao passo que as medições por LVDT e DIC evidenciam uma notável tendência linear.

Figura 16 – a) Trajetória de equilíbrio estático da viga testada na faixa elástica dos deslocamentos b) Trajetória de equilíbrio estático da viga testada na faixa plástica dos deslocamentos.



Fonte: Szewczyk et al. (2022).

## 2.7 ENSAIOS DE MÓDULO COM MÚLTIPLAS MEDIÇÕES

Entre as técnicas de medição mencionadas neste trabalho, diversos estudos conduziram experimentos em larga escala para avaliar e comparar as principais técnicas de medição, como *Clip gage*, *Strain Gage*, Compressômetro e LVDT, aplicadas no ensaio do módulo de elasticidade.

Montija (2007) conduziu uma análise abrangente das medições de deformação, utilizando a análise de variância (ANOVA) e foram empregadas as técnicas de medição *clip gage*, *strain gages* e compressômetro com um ou dois relógios comparadores acoplados.

O referido estudo teve como objetivo calcular o módulo de elasticidade de dois tipos de concretos com diferentes proporções água/cimento ( $a/c$  0,40 e  $a/c$  0,70) e o experimento envolveu o uso de brita 1 calcária como agregado graúdo, com a confecção de 120 corpos de prova para cada tipo de concreto, os quais foram submetidos às diversas técnicas de medição, a fim de verificar e comparar o módulo de elasticidade entre elas.

A Tabela 5 apresenta os indicadores estatísticos derivados do estudo de Montija (2007) para o cálculo do módulo de elasticidade, destacando os dois tipos de concreto base investigados no trabalho. Observa-se que o autor identificou que as técnicas que utilizam o compressômetro, seja com um ou dois relógios comparadores (RC), exibiram um desvio padrão mais elevado, enquanto o *clip gage* demonstrou maior regularidade média.

Tabela 5 – Agrupamentos de módulo secante ( $E_{cs}$ ) de três betonadas (3bt) do Concreto, por instrumentação: cálculo dos indicadores de precisão.

Indicador	SG	CG	1 RC	2 RC
Média a/c 0,40 (GPa)	35,48	35,06	36,18	37,03
Média a/c 0,70 (GPa)	36,38	36,27	37,74	38,52
Desvio padrão a/c 0,40 (GPa)	1,95	1,57	1,93	2,77
Desvio padrão a/c 0,70 (GPa)	1,89	1,28	1,74	2,22
Incerteza da medida a/c 0,40 (GPa)	0,36	0,29	0,35	0,51
Incerteza da medida a/c 0,70 (GPa)	0,35	0,23	0,32	0,40

Fonte: Adaptado Montija (2007).

Araújo (2011) realizou uma comparação da dispersão do módulo de elasticidade em dois grupos de corpos de prova com resistências de 30 MPa e 60 MPa, utilizando brita 1 granítica. Esses corpos de prova foram moldados em cilindros de 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm, totalizando 148 amostras. Os instrumentos de medição de deformação empregados nos ensaios incluíram o compressômetro com dois relógios comparadores acoplados, extensômetro elétrico resistivo de colagem superficial (*strain gage*), extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (*clip gage*) e o LVDT (transdutor diferencial de variação linear).

A análise revelou uma considerável disparidade entre as técnicas de ensaio, indicando o LVDT como o menos preciso entre as quatro técnicas, enquanto os extensômetros resistivos elétricos foram considerados mais confiáveis. A média do módulo de elasticidade entre as quatro técnicas foi de 25,3 GPa, com o LVDT

apresentando uma média de 19,8 GPa e desvio padrão de 3,6 GPa. Por outro lado, os módulos de elasticidade e desvios padrões obtidos pelo *clip gage*, *strain gage* e compressômetro foram de: 27,6 GPa e 3,05 GPa; 26,3 GPa e 3,8 GPa; e 27,5 GPa e 4,4 GPa, respectivamente.

### **3 METODOLOGIA**

São descritos os materiais e os procedimentos de produção dos corpos de prova, abrangendo o concreto convencional, que serve como base de validação, e o concreto com agregado sintético de resíduo de bauxita. Detalha-se o sistema de medição baseado na técnica DIC (2D e 3D), enfatizando a preparação dos CPs, com técnicas de pintura e definição do padrão de *speckles*, e os procedimentos de aferição para a captação precisa dos campos de deformação.

Também são apresentados os ensaios mecânicos (compressão axial e módulo de elasticidade) e descrito o processo de otimização dos parâmetros operacionais, como intervalo de medição, combinação *subset/step*, região de interesse e padrões de pintura.

#### **3.1 MATERIAS UTILIZADOS**

##### **3.1.1 CONCRETO CONVENCIONAL**

A concepção deste concreto não teve como base um estudo de dosagem, uma vez que a otimização da relação entre os materiais não é o foco deste trabalho. Optou-se por um traço convencional de 1:2:3\|a/c, visando economia no teor de argamassa e melhor imbricamento dos grãos de brita, o que, consequentemente, contribui para uma maior resistência à compressão do concreto. (Moreiras e Araújo, 2023)

Os materiais utilizados na confecção dos concretos convencionais são provenientes de regiões próximas à Região Metropolitana de Belém e estão representados na Figura 17.

Figura 17 – Materiais utilizados, a) Brita tipo 1 granítica, b) areia quartzosa, c) cimento POTY CP II F 40, d) aditivo Sika® Concreto Forte, da família dos plastificantes e segunda geração.



Fonte: Autor (2025)

### 3.1.2 CONCRETO COM AGREGADO SINTÉTICO

O concreto com agregado sintético foi concebido com base nas diretrizes do trabalho de Fernandes et al (2025), utilizando um agregado graúdo alternativo em substituição à brita convencional. Esse agregado sintético, ilustrado na Figura 18, foi desenvolvido a partir de resíduos de bauxita, processados para garantir uma distribuição granulométrica adequada e propriedades mecânicas compatíveis com a aplicação proposta.

Figura 18 – Agregado Sintético.



Fonte: Fernandes et al. (2025).

A formulação desse concreto manteve o cimento utilizado no concreto convencional, o POTY CP II F 40, bem como a mesma areia quartzosa. Diferentemente do concreto convencional, não foi utilizado aditivo nessa composição.

### 3.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO

Foram produzidas quatro famílias de concreto, sendo duas com agregado convencional e duas com agregado sintético.

Os concretos convencionais foram desenvolvidos a partir de um traço base previamente definido e divididos em duas famílias. A primeira e a segunda família apresentaram as seguintes composições finais, respectivamente: 1:2,01:3,03:0,48:1,00%<sup>1</sup> e 1:1,89:2,82:0,40:2,00%. Ambas foram projetadas para atingir uma trabalhabilidade de  $50 \pm 10$  mm, conforme os requisitos da NBR 6118:2024.

Quanto aos concretos com agregado sintético, foram estabelecidas duas famílias distintas. Na terceira família, as proporções de resíduo de bauxita não foram registradas, uma vez que os corpos de prova foram obtidos a partir de sobras de ensaios não bem-sucedidos de absorção de água, sem datas e resistências especificadas. Já a quarta família utilizou um agregado graúdo sintético composto por

---

<sup>1</sup> Cimento : Areia : Pedra : Água/Cimento : Aditivo

90% de resíduo de bauxita, adotando o traço 1:1,42:1,98:0,61 e um teor de argamassa de 55%.

A Tabela 6 representa os corpos de prova convencionais e com agregado sintético, para os diferentes traços propostos.

Tabela 6 – Traços ou  $F_{ck}$  para os concretos.

Família	Traço	Agregado	(%) Resíduo de bauxita
Família 1	1:2,01:3,03:0,48:1,00%	Natural	-
Família 2	1:1,89:2,82:0,40:2,00%	Natural	-
Família 3	Sem traço especificado	Sintético	N/A
Família 4	1:1,42:1,98:0,61	Sintético	90%

Fonte: Autor (2025).

### 3.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de aquisição de imagens foi criado pelo Núcleo de Avançado de Análise de Tensões (NAAT), da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA, coordenado pelo professor Leonardo Dantas Rodrigues, coorientador desta dissertação. Este sistema compreende todos os equipamentos, que serão mostrados neste tópico e um software próprio para aquisição das imagens, que garante a sincronização das imagens das duas câmeras, essencial para o bom funcionamento da técnica DIC 3D.

Além do software de aquisição das imagens, o NAAT também possui um software para tratamento das imagens e cálculo dos campos de deslocamento e deformações para as análises 2D. Porém, este software ainda se encontra em fase de aperfeiçoamento. Assim, para as análises desta dissertação, fez-se uso do software VIC-3D e 2D da Correlated Solution, com uma licença cedida em empréstimo pelo laboratório de fotomecânica da PUC-Rio. Este é um dos softwares mais utilizados mundialmente. Inicialmente, a intenção era usar o software VIC apenas nas análises 3D e utilizar uma ferramenta gratuita para as análises 2D. No entanto, para garantir uma melhor acurácia nos resultados de caracterização, optou-se por utilizar a ferramenta comercial em ambas as análises. Mas, vale salientar que as ferramentas

gratuitas estão em franca evolução, o que tornará o uso da técnica mais barato e ainda com boa precisão.

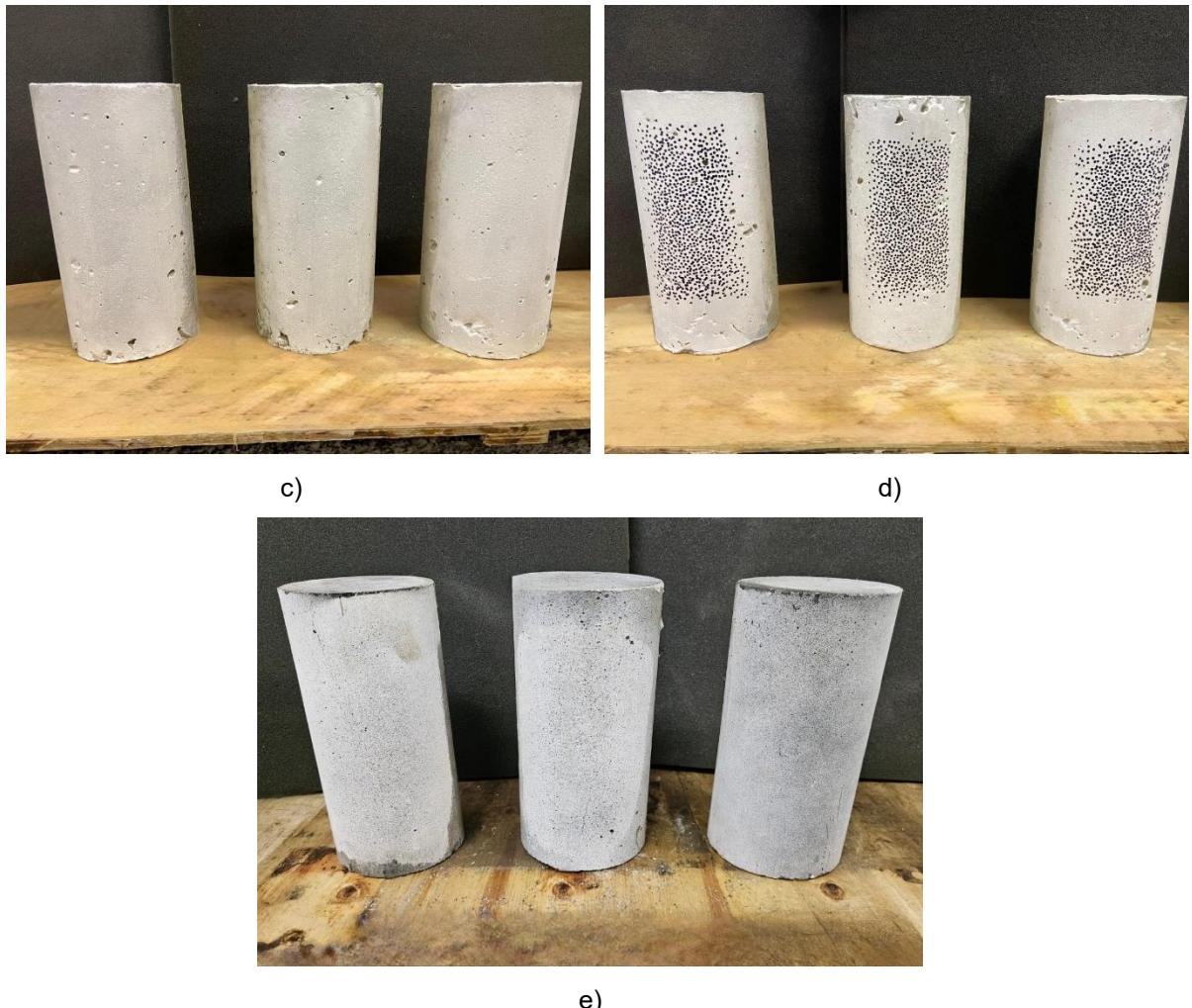
### 3.3.1 PINTURA DOS CORPOS DE PROVA

Após o período de cura, os corpos de prova selecionados para a determinação do módulo de elasticidade foram submetidos a duas diferentes técnicas de pintura, aqui denominadas A e B. O objetivo foi analisar como cada técnica de pintura influencia os padrões de deformação observados nos ensaios.

A técnica A consiste em lixar a área de interesse do CP com lixa de granulometria 120 mm e, em seguida, limpar cuidadosamente a superfície para remover resíduos. Após essa preparação, aplica-se um selador acrílico para minimizar a absorção de tinta pelo concreto, seguido pela aplicação de tinta spray branca fosca para criar uma região uniforme com contraste adequado para o padrão de pontos. Por fim, os pontos são realizados com um pincel marcador de cor preta fosca, conforme proposto por Shih e Sung (2013) e tendo o processo ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Processo de pintura a) CPs lixados com lixa 120mm, b) CPs pintados com selador, c) CPs pintados com tinta spray branco fosco, d) Padrão de speckles técnica A e e) Padrão de speckles técnica B.





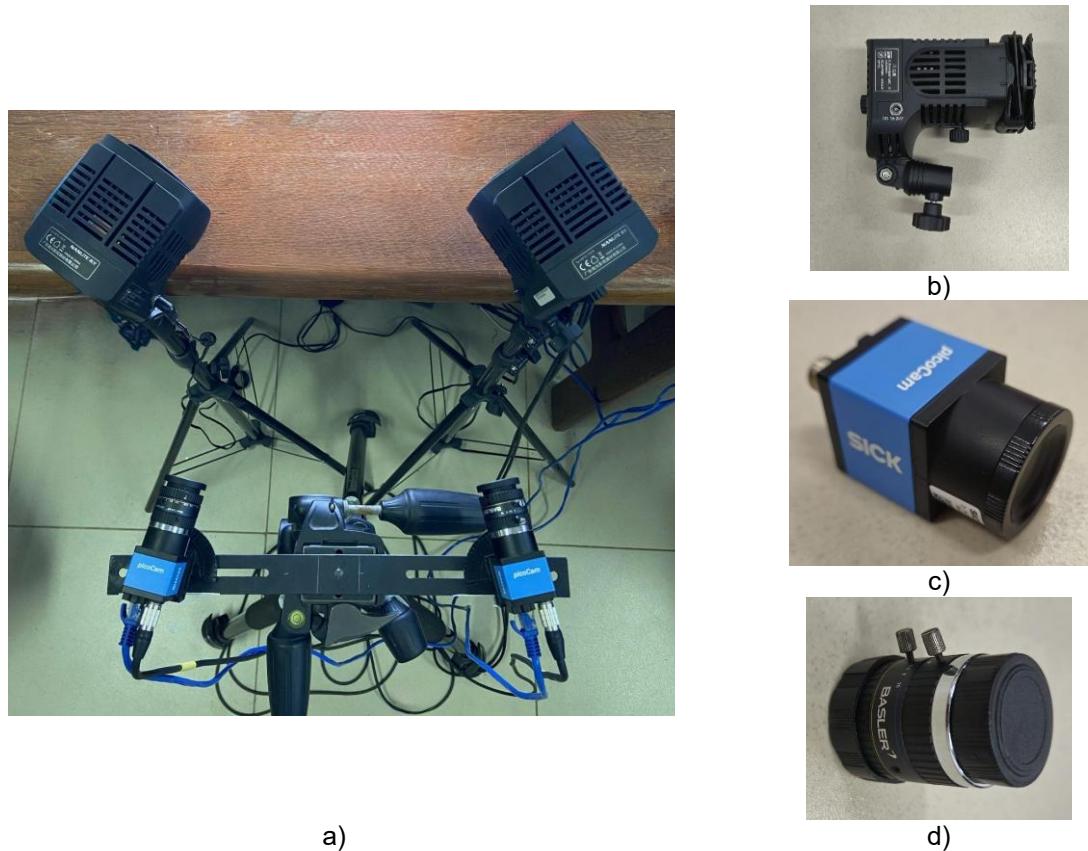
Fonte: Autor (2025).

Técnica B segue os mesmos procedimentos de preparação descritos na Técnica A, conforme ilustrado nas Figura 19 a), b) e c), que incluem a lixagem, limpeza e aplicação do selador acrílico e da base de tinta spray branca fosca. Entretanto, na etapa de criação do padrão de pontos, a Técnica B substitui o uso do pincel marcador (Figura 19 d)) pela aspersão de tinta spray preta fosca (Figura 19 e)), amplamente utilizado nos trabalhos sobre o tema e presente em trabalhos como Lepage et al. (2017), Lingga et al. (2017) e Wang et al. (2021).

### 3.3.2 SISTEMA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (DIC)

Para a montagem do setup ideal, foram utilizados para ambos os sistemas 2D e 3D, os mesmos iluminadores, lentes e câmeras, conforme a Figura 20.

Figura 20 – a) Sistema de aquisição e calibração, b) iluminação, c) câmeras e d) lentes.

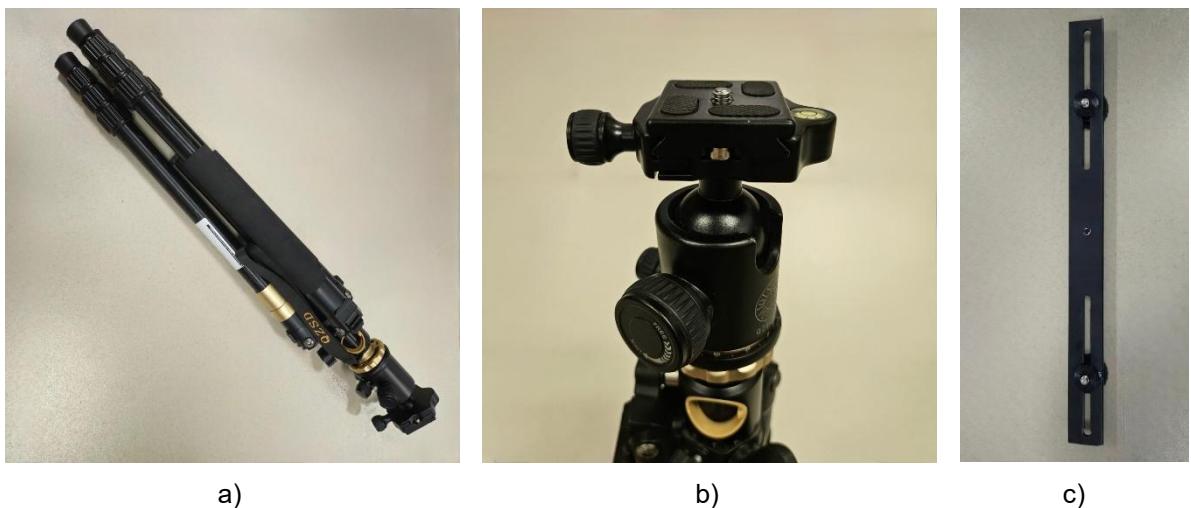


Fonte: Autor (2025).

Sendo as câmeras GigaE da marca Sick, com sensores CMOS da marca sony de resolução 5 MP (2448 x 2048) e taxa de aquisição máxima de 23 imagens por segundo, as lentes da marca Basler com distância focal de 35 mm e aberturas de 2-16 e os Iluminadores Led Fresnel Portátil Cob 28w Cn-28fa Forte 5600k com ajuste fino de intensidade e foco.

Para a fixação do setup, foram utilizados componentes auxiliares, incluindo tripé, cabeça articulada e haste de sustentação para as câmeras, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Componentes auxiliares a) Tripé, b) cabeça articulada e c) haste de sustentação para as câmeras.



Fonte: Autor (2025).

Os componentes auxiliares utilizados foram o tripé multifuncional horizontal monope Q999H - QZSD, a cabeça para tripé Yunteng YE 3 Profissional Ball Head e uma haste frisada de 60 cm, de fabricação do grupo NAAT, com duas roscas fêmeas móveis para fixação das câmeras.

Tanto para os sistemas 2D quanto 3D, as câmeras foram posicionadas a uma distância de 1,15 m do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Posicionamento padrão da câmera a 1,15 metros.



Fonte: Autor (2025).

Para garantir que a câmera estivesse corretamente alinhada com o corpo de prova (CP), foi necessário ajustar a sua inclinação de modo que o plano do CP ficasse

ortogonal à câmera. Levando em consideração que a face exposta do CP deveria estar a 90° em relação à base, a câmera precisou ser ajustada até que sua inclinação coincidisse com a do CP.

Da mesma forma, os ajustes necessários para esse alinhamento, tendo em vista que o eixo que separa a câmera e o CP é o eixo Z, devem garantir que a inclinação no eixo Y esteja a 0°, de acordo com a Figura 23 a), e no eixo X também a 0°, conforme mostrado na Figura 23 b).

Figura 23 – Inclinação da câmera a) Eixo Y a 0° e b) Eixo X a 0°.



a)

b)

Fonte: Autor (2025).

Para o esquema 3D foi idealizado um afastamento de 50 cm entre as câmeras, tendo sido necessário uma rotação nos eixos Y das mesmas em 13°, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Rotação das câmeras a) câmera esquerda e b) câmera direita.



a)

b)

Fonte: Autor (2025).

### 3.3.3 AFERIÇÃO DO SISTEMA

Para garantir a confiabilidade dos dados experimentais, foi imprescindível validar o desempenho do sistema de aquisição e calibração empregado neste estudo. Assim, foram realizados dois ensaios experimentais iniciais, com o objetivo de confirmar se o sistema recém-desenvolvido atendia às expectativas.

O primeiro ensaio foi conduzido em um corpo de prova de alumínio (CPA\_01), material de comportamento mecânico conhecido, visando comparar as medições de deformação obtidas pela técnica DIC com as de um método tradicional (strain gage) e, assim, validar a precisão do sistema.

O segundo ensaio, realizado em um corpo de prova de concreto convencional, buscou verificar a coerência das medições do sistema DIC em um material heterogêneo. Para isso, avaliou-se se a ordem de grandeza das deformações registradas pelo DIC era compatível com os valores teoricamente esperados para o concreto sob ensaio de compressão.

Esses ensaios serviram de base para o desenvolvimento da pesquisa, permitindo a validação inicial das técnicas propostas. Detalhes completos desses experimentos encontram-se descritos no Apêndice A.

## 3.4 ENSAIOS MECÂNICOS DO CONCRETO

### 3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de resistência à compressão do concreto foi determinado de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5739:2018, sob as condições de preparo e cura, e de acordo com a ABNT NBR 5738:2016 para a execução dos ensaios normalizados. Para cada concreto fabricado, foram produzidos 02 corpos de prova com idade de cura de 28 dias para o ensaio de resistência a compressão.

A resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ), deve ser calculada a partir da equação 9.

$$f_c = \frac{F}{A} = \frac{F * 4}{\pi * d^2} \quad (9)$$

Sendo  $f_c$  a resistência à compressão do concreto em Mega Pascais (MPa); F a força máxima alcançada em Newtons (N); e D o diâmetro do corpo de prova em milímetros (mm).

### 3.4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para o registro de deformação utilizando a técnica DIC no ensaio de módulo de elasticidade, foi captada uma foto a cada 5 segundos de ensaio, sobre uma velocidade de carregamento de 0,1 MPa por segundo.

O módulo de elasticidade do concreto foi calculado de formas distintas para medições utilizando SG, CG e DIC. Os valores encontrados pelas técnicas tradicionais foram calculados seguindo os procedimentos delineados pela NBR 8522:2021, utilizando a metodologia A, descrito no item 2.2.2.

Os valores propostos para os módulos de elasticidade do concreto, calculado pela técnica DIC, foram calculados de 3 formas distintas sendo descritos de forma abrangente no tópico 3.5.

### 3.4.3 PROCEDIMENTO DE PREPARO E ANÁLISE DOS CPs

Para a realização dos ensaios mecânicos, as quatro famílias de corpos de prova (CPs) passaram por diferentes procedimentos de preparo e análise. Para os ensaios de resistência à compressão, foram separados dois exemplares de cada uma das Famílias 1, 2 e 4. A Família 3, por sua vez, foi destinada integralmente aos ensaios de módulo de elasticidade.

Visando detalhar os procedimentos aplicados, a Tabela 7 resume as configurações utilizadas especificamente nos corpos de prova destinados ao ensaio de módulo de elasticidade, apresentando o número de amostras, os sistemas de medição (DIC 2D/3D) e o tipo de pintura adotado em cada família.

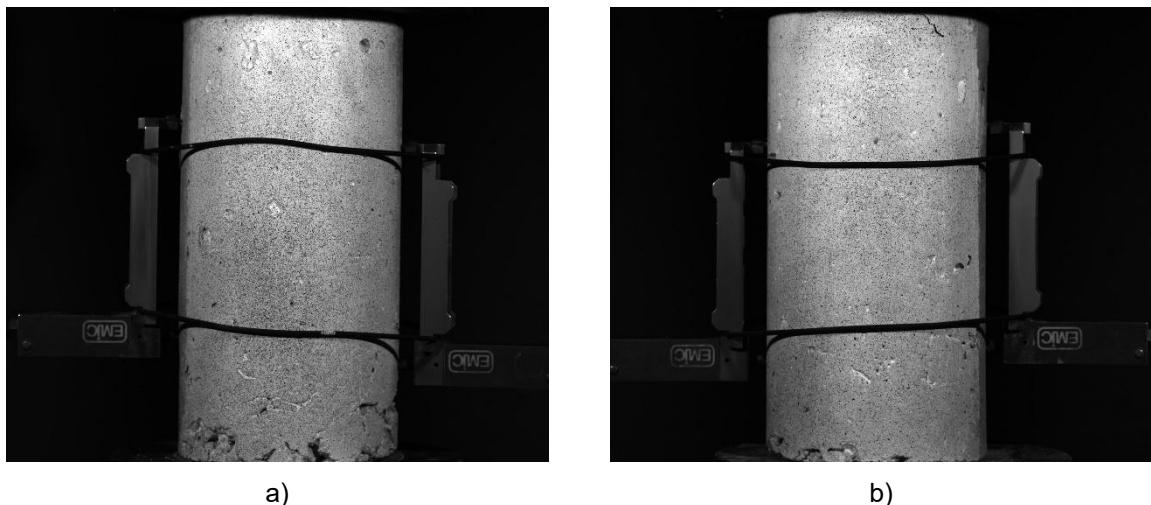
Tabela 7 – Resumo dos procedimentos de preparo e ensaios dos corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade.

Família	Nº de CPs	Sistema de medição	Tipo de pintura	nomenclatura
Família 1	2	2D	Técnica B	CC_F1
Família 2	3	2D	Técnica B	CC_F2
Família 2	3	3D	Técnica B	CC_F2
Família 3	3	3D	Técnica A	CS_F3
Família 3	1	3D	Técnica B	CS_F3
Família 4	3	2D	Técnica A	CS_F4
Família 4	3	3D	Técnica B	CS_F4

Fonte: Autor (2025).

A Família 1 (agregado natural) teve dois CPs ensaiados para o módulo de elasticidade (CC\_F1\_1 e CC\_F1\_2). A superfície de ambos foi preparada com a técnica de pintura B (explicada no item 3.3.1), e os ensaios foram realizados com o sistema 2D, conforme mostra a Figura 25.

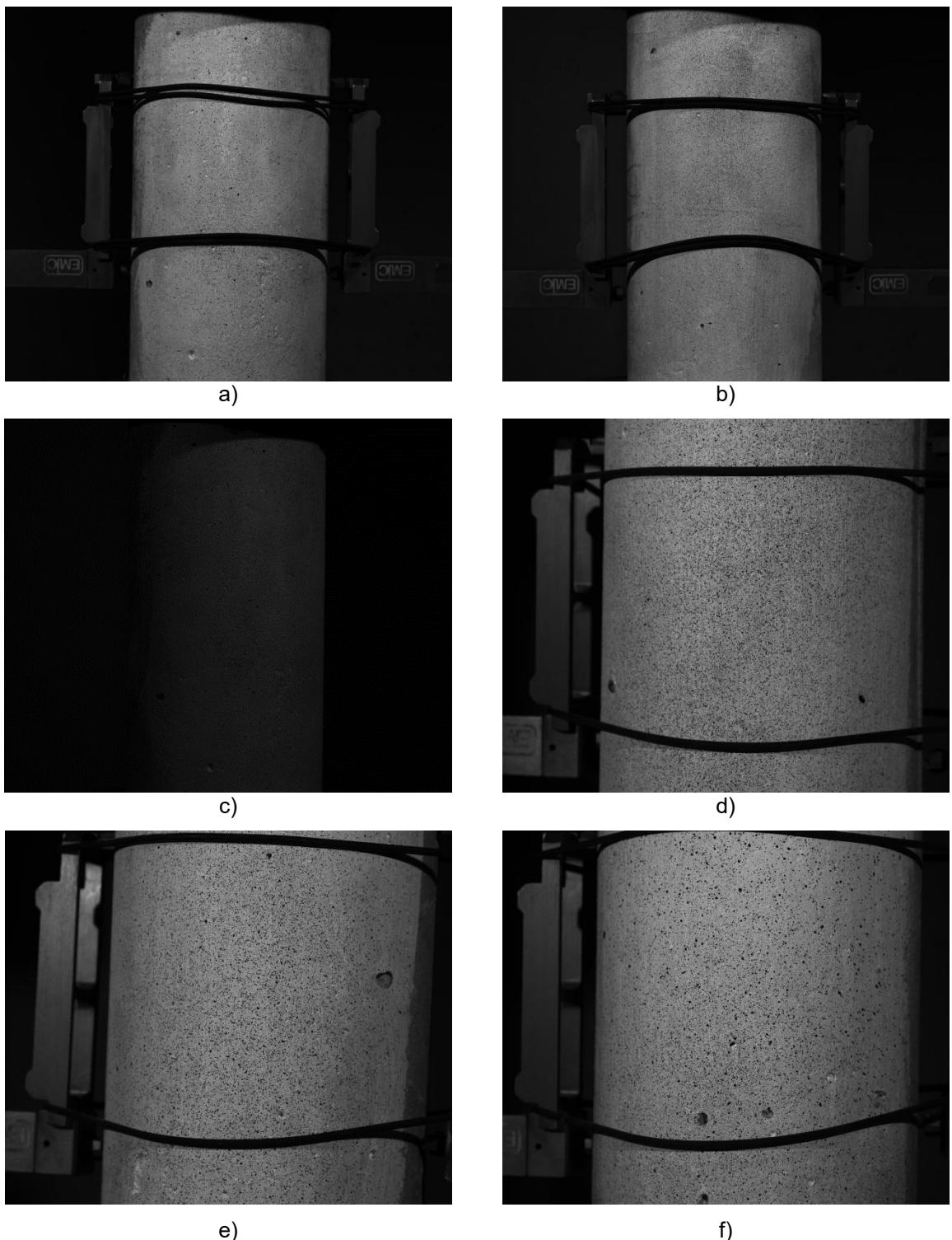
Figura 25 – Corpos de prova da família 1 a) CC\_F1\_1 e b) CC\_F1\_2.



Fonte: Autor (2025).

A Família 2 (agregado natural) contou com seis CPs para o ensaio de módulo, todos preparados com a mesma técnica B, conforme a Figura 26. Destes, três foram analisados pelo sistema 2D (CC\_F2\_1, CC\_F2\_2 e CC\_F2\_3) e os outros três pelo sistema 3D (CC\_F2\_4, CC\_F2\_5 e CC\_F2\_6).

Figura 26 – Corpos de prova da família 2, a) CC\_F2\_1, b) CC\_F2\_2, c) CC\_F2\_3, d) CC\_F2\_4, e) CC\_F2\_5 e f) CC\_F2\_6.



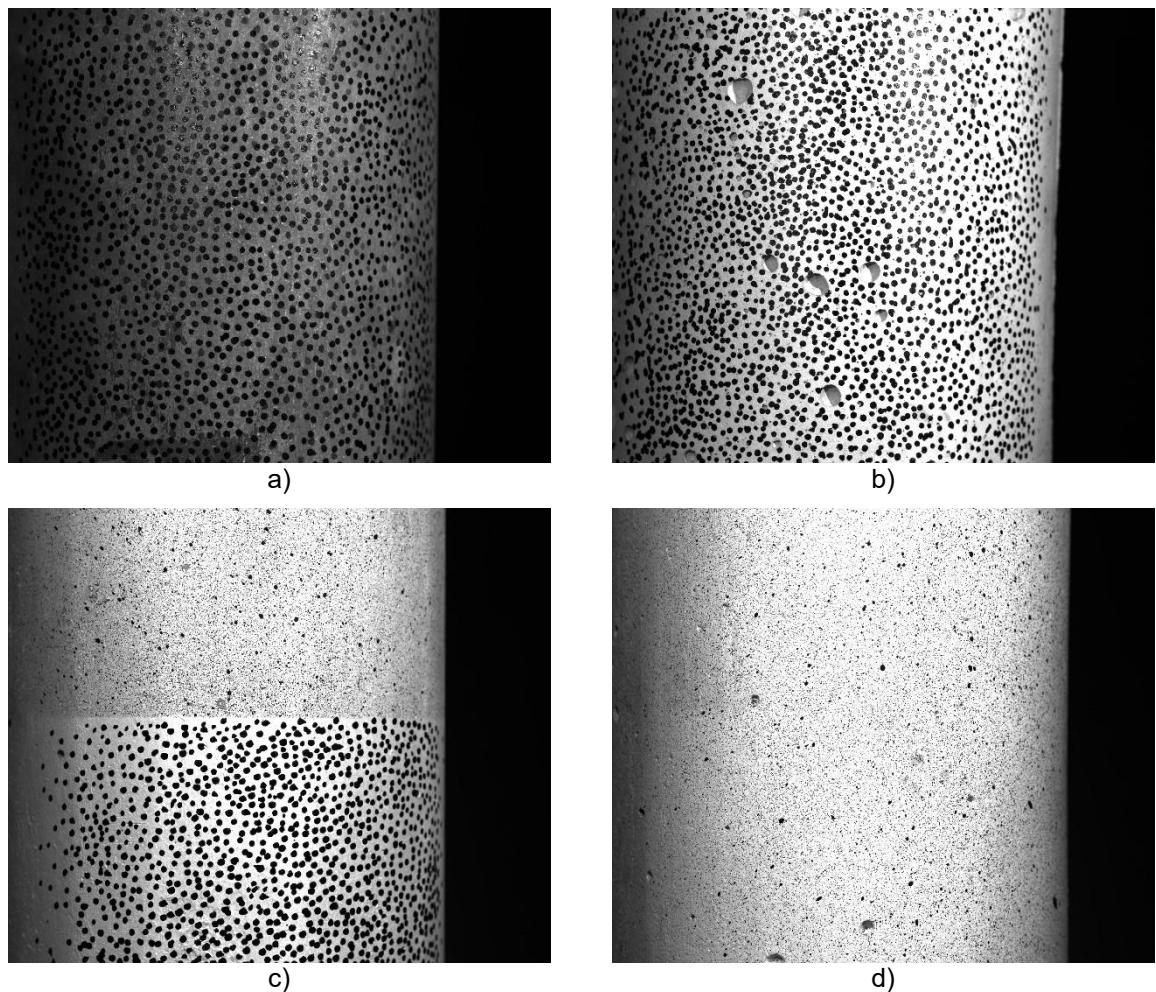
Fonte: Autor (2025).

A Família 3 (agregado sintético) contou com quatro amostras, todas submetidas ao ensaio de módulo de elasticidade, cada uma recebendo um tratamento superficial distinto. O primeiro CP (CS\_F3\_1) foi finalizado apenas com pincel, sem a aplicação

de fundo branco fosco. O segundo (CS\_F3\_2) seguiu o tratamento proposto pela técnica A enquanto o terceiro (CS\_F3\_3) com por ambas as técnicas: técnica A na parte inferior e técnica B na superior. O último CP (CS\_F3\_4) dessa família teve seu acabamento realizado seguindo a técnica B.

Todos os exemplares dessa série estão representados na Figura 27 e foram analisados no sistema 3D.

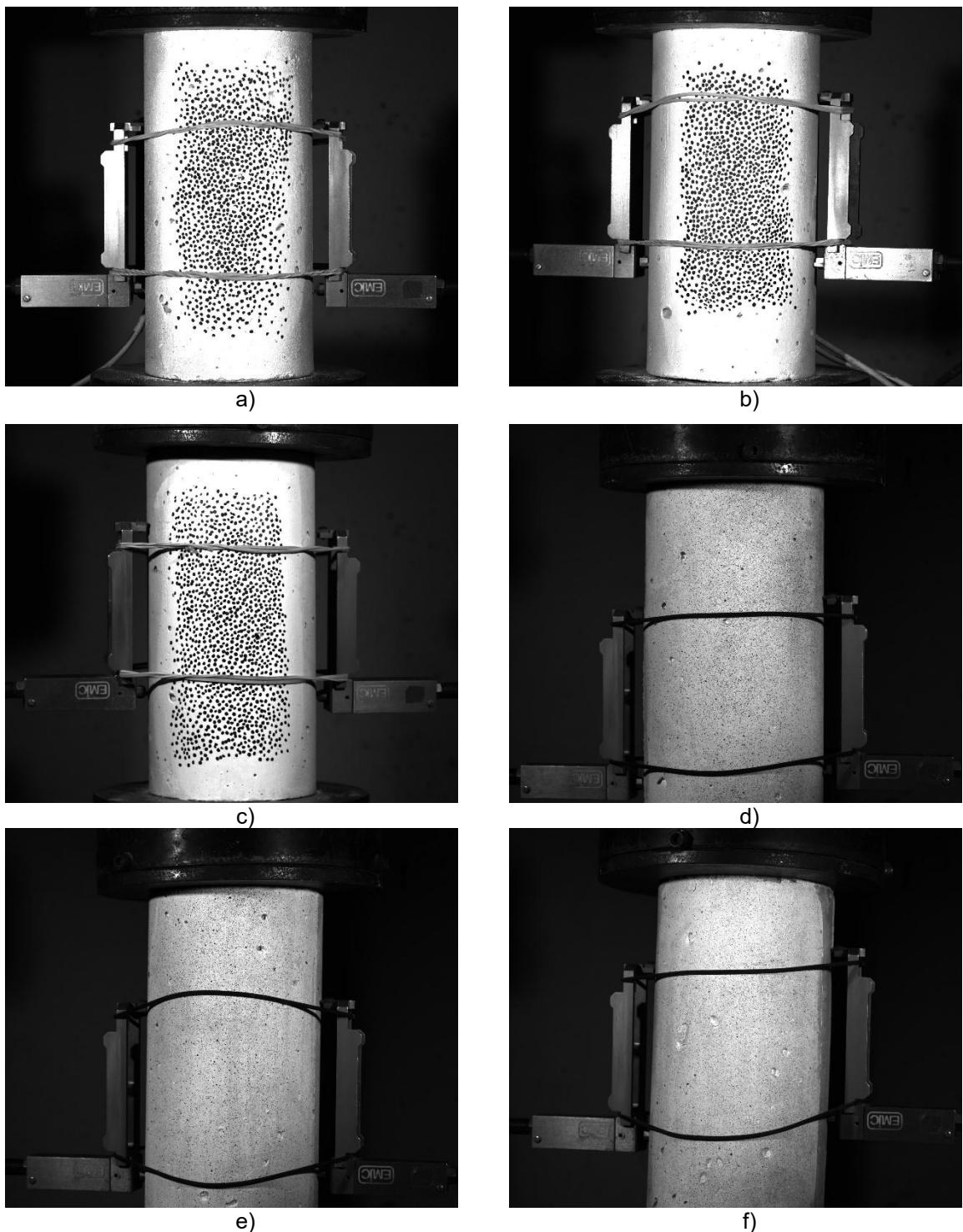
Figura 27 – Corpos de prova da família 3 a) CS\_F3\_1, b) CS\_F3\_2, c) CS\_F3\_3 e d) CS\_F3\_4.



Fonte: Autor (2025).

Por fim, a Família 4 (agregado sintético) destinou seis CPs ao ensaio de módulo. Os três primeiros (CS\_F4\_1, CS\_F4\_2 e CS\_F4\_3), preparados com a técnica A, foram analisados com o sistema 2D. Os outros três (CS\_F4\_4, CS\_F4\_5 e CS\_F4\_6), que receberam a técnica B, foram ensaiados com o sistema 3D, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Corpos de prova da família 4 a) CS\_F4\_1, b) CS\_F4\_2, c) CS\_F4\_3, d) CS\_F4\_4, e) CS\_F4\_5 e f) CS\_F4\_6.



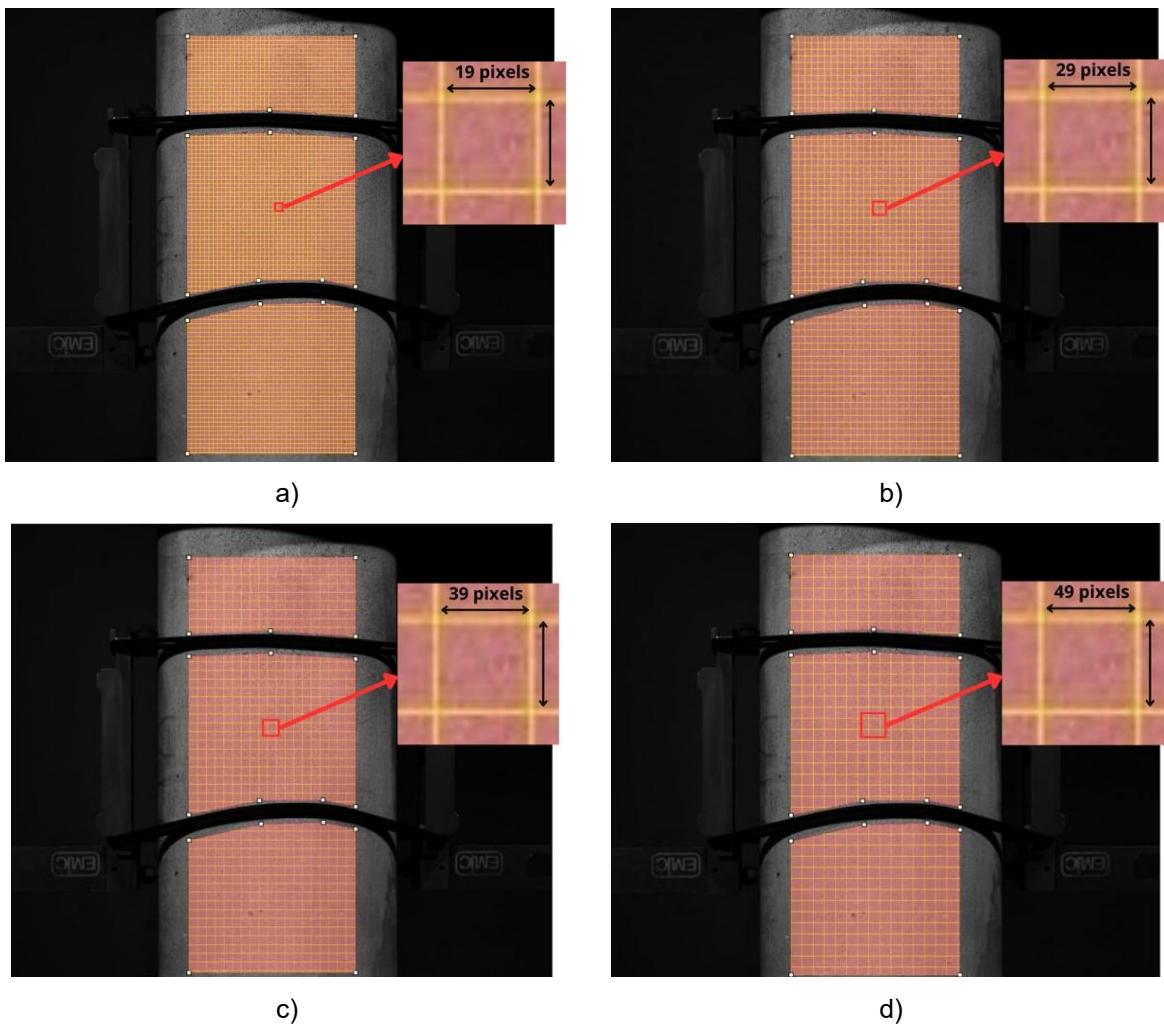
Fonte: Autor (2025).

### 3.5 OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISE DA TÉCNICA DIC

A técnica DIC, apesar de atualmente apresentar boas precisão e confiabilidade, ainda depende de uma adequada seleção de alguns parâmetros de análise para apresentar bons resultados. Rodrigues (2014), mostra que os resultados de uma medição podem variar significativamente apenas alterando-se o *subset* e o *step* com que serão feitas as análises de correlação das imagens deformadas e indeformada.

Para otimizar a seleção de *subset* e *step* na técnica DIC, foram testadas quatro malhas de *subset*: 19x19, 29x29, 39x39 e 49x49 pixels, exemplificados na Figura 29. O *step* foi ajustado para frações de 1/2, 1/3 e 1/4 do *subset*, exceto para o *subset* de 19 pixels, onde o *step* de 1/4 não pôde ser aplicado devido às limitações do sistema. Com base nesses testes, os padrões de *subset/step* selecionados foram: 19/6, 19/9, 29/6, 29/9, 29/15, 39/8, 39/13, 39/19, 49/10, 49/16 e 49/24.

Figura 29 – Malha de *subset* a) 19x19, b) 29x29, c) 39x39 e d) 49x49.



Fonte: Autor (2025).

Para o cálculo do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson, foram definidos três processos distintos. O primeiro processo segue as orientações da NBR 8522:2021, adotando a metodologia A descrita no tópico 2.2.2, na qual o módulo de elasticidade secante do concreto é determinado a partir de dois pontos: no ponto A, a tensão  $\sigma_a$  é igual a 0,5 MPa; e no ponto B, a tensão corresponde a 0,3  $F_{ck}$ .

No segundo processo, o cálculo do módulo de elasticidade a partir da secante do gráfico, propõe-se a definição de novos pontos de interseção para a secante, determinados como porcentagens do  $F_{ck}$ , variando de 10 a 90%. Dessa forma, foram obtidas combinações tais como: 10 -20%, 10 -30%, até 10 -90%; 20 -30% até 20 -90%; 30 -40% até 30-90%, e assim sucessivamente, até alcançar a faixa de 60%-90%, conforme exemplificado na Tabela 8.

Tabela 8 – Layout da tabela de combinação dos  $F_{ck}$ 's.

	$F_{ck}$ (30%)	$F_{ck}$ (40%)	$F_{ck}$ (50%)	$F_{ck}$ (60%)	$F_{ck}$ (70%)	$F_{ck}$ (80%)	$F_{ck}$ (90%)
$F_{ck}$ (10%)	Módulo						
$F_{ck}$ (20%)	Módulo						
$F_{ck}$ (30%)		Módulo	Módulo	Módulo	Módulo	Módulo	Módulo
$F_{ck}$ (40%)			Módulo	Módulo	Módulo	Módulo	Módulo
$F_{ck}$ (50%)				Módulo	Módulo	Módulo	Módulo
$F_{ck}$ (60%)					Módulo	Módulo	Módulo

Fonte: Autor (2025).

O terceiro processo consiste no cálculo do módulo de elasticidade por meio de uma regressão linear do gráfico, onde a inclinação da linha de tendência obtida corresponde ao módulo de elasticidade.

O coeficiente de Poisson ( $n$ ) foi calculado a partir da formula equação 10.

$$n = \frac{E_y}{E_x} \quad (10)$$

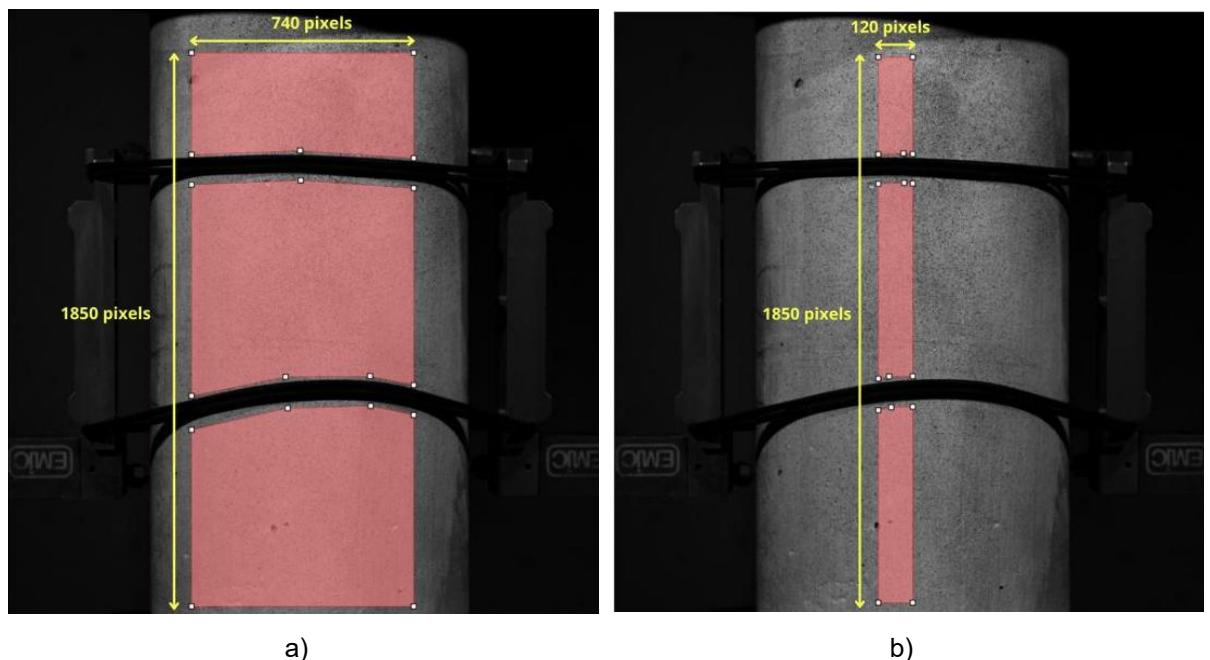
Sendo,  $E_y$  o módulo de elasticidade na direção Y, obtido por meio de um valor de referência melhor discutido no tópico 4.1.1,  $E_x$  o módulo de elasticidade na direção

X. Para o cálculo de  $E_x$ , foram empregados os mesmos três processos utilizados na determinação do módulo de elasticidade, utilizando as deformações em X ( $\varepsilon_{xx}$ ).

Essa abordagem ampla permitiu uma análise detalhada das variações do módulo e do coeficiente de Poisson em diferentes faixas de deformação.

Além dos parâmetros já citados, a análise de dados também considerou variações na região de interesse (ROI) do corpo de prova. Foram avaliadas duas ROIs: uma ampla, que cobre, em média, uma área de 1850 x 740 pixels da superfície, e outra mais estreita, representada por uma faixa vertical central com dimensões médias de 1850 x 120 pixels, conforme ilustrado na figura x. Adicionalmente, variaram-se as configurações das câmeras, empregando tanto *setup* 2D quanto 3D, e o padrão de pintura na superfície do corpo de prova, aplicado com pincel ou spray.

Figura 30 – Amplitude das regiões de interesse a) ROI ampla e b) ROI estreita.



Fonte: Autor (2025).

Para validar a precisão dos valores obtidos, o módulo de elasticidade foi comparado a um valor de referência específico para cada CP. Para os CPs com agregado convencional, seguiu-se o valor analítico indicado na norma NBR 8522:2021, enquanto para os CPs com agregado sintético, utilizou-se como referência os valores calculados por um *clip gage*. Consideraram-se satisfatórios os valores do módulo de elasticidade dentro de um intervalo de  $\pm 10\%$  em relação ao módulo de referência. Para o coeficiente de Poisson, os valores aceitáveis foram definidos entre 0,11 e 0,21, sugeridos por Almeida (2002), assegurando que os parâmetros de *subset* e *step* fossem ajustados para proporcionar resultados mais consistentes.

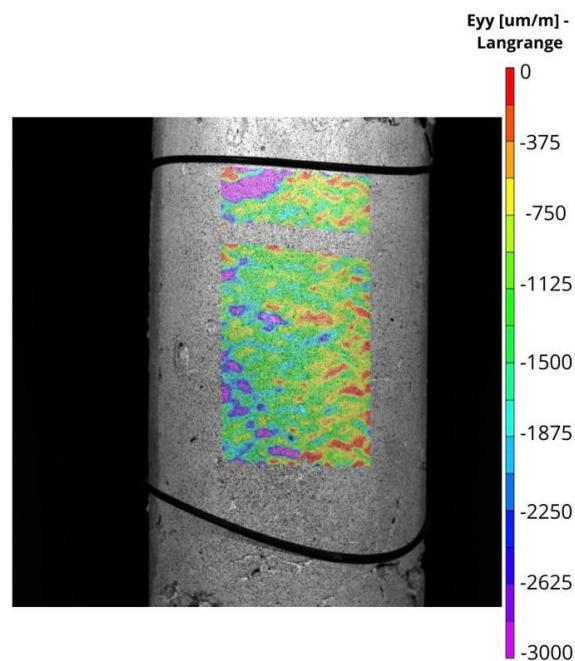
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente serão apresentados os resultados da primeira etapa, que se concentram na definição dos melhores parâmetros de análise empregados na técnica DIC para a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Foram avaliados o melhor intervalo de medição dos valores, com base no gráfico Tensão x Deformação, bem como o conjunto *subset/step* mais adequado nos programas VIC\_2D e VIC\_3D para o cálculo das deformações do CP. Além disso, serão analisados os tipos de padrão de pintura utilizados no estudo, seja pela técnica A ou B. Por fim, será examinada a influência da amplitude da região de interesse no corpo de prova.

Na segunda etapa será abordado os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e fator de correção  $\alpha_E$  das quatro famílias estudadas, evidenciando os desvios padrão delas e o coeficiente de variação. Também será discutida a confiabilidade dos resultados obtidos por meio de ensaios realizados com o sistema de câmera 2D e 3D. Além disso, será destacado que, na família 4, os três primeiros CPs foram ensaiados aos 28 dias, enquanto os três últimos foram ensaiados aos 91 dias, sem passar pelo ensaio de rompimento, devido a uma falta de CPs. Contudo, os CPs CC\_F1\_2, CC\_F2\_3 e CC\_F2\_6 não puderam ser analisados pela técnica DIC devido a problemas operacionais no sistema de aquisição de imagens durante os ensaios.

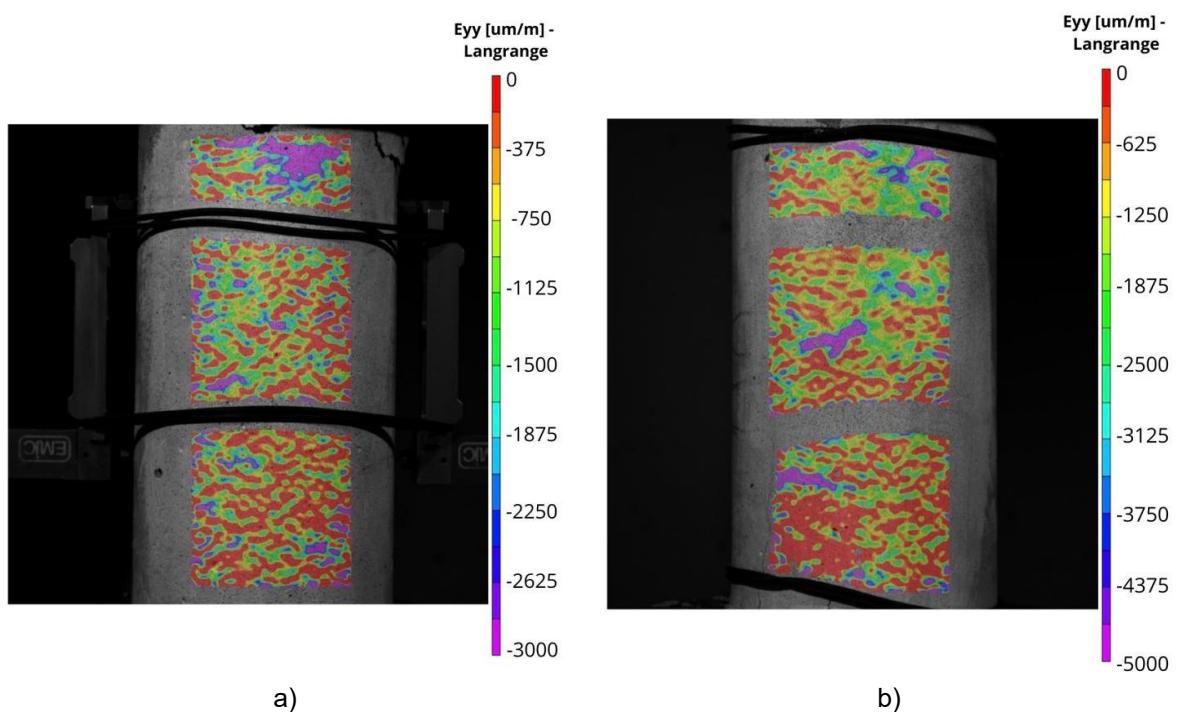
Para a análise dos resultados, a Figura 31, Figura 32, Figura 33 e Figura 34 apresentam o campo de deformação dos CPs das Famílias 1, 2, 3 e 4, respectivamente, permitindo avaliar tanto os melhores parâmetros de medição quanto as propriedades dos materiais. Os valores adotados para o cálculo do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson foram obtidos a partir da média de deformações do campo global registrado na ROI.

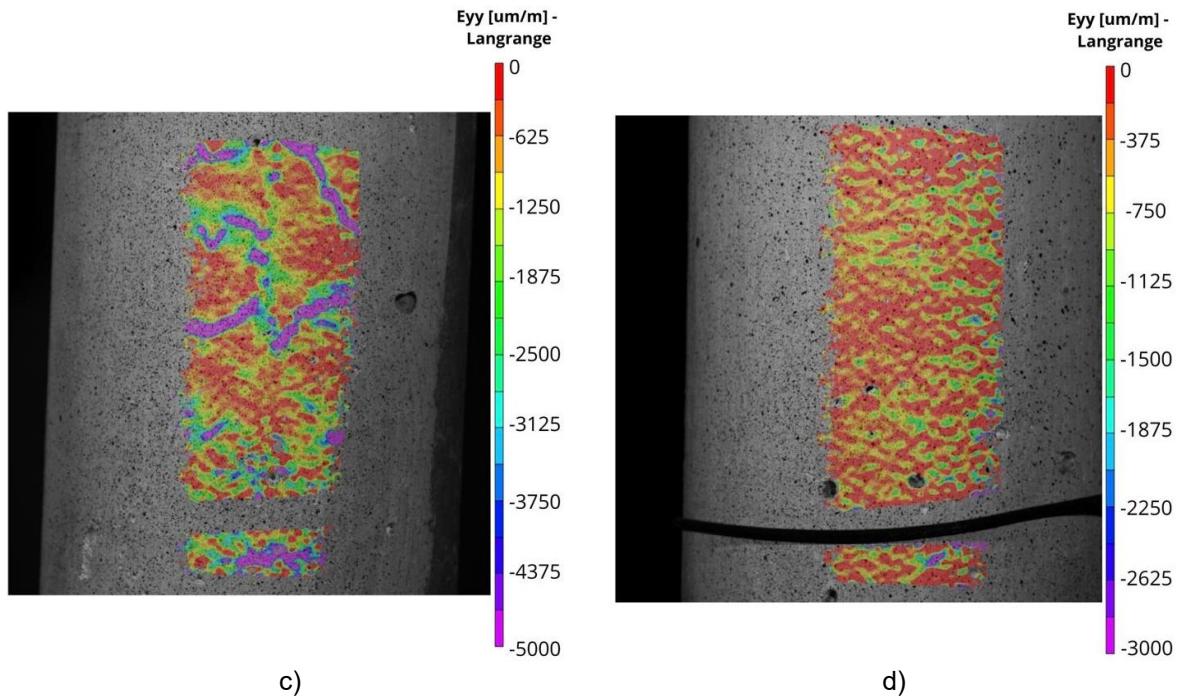
Figura 31 – Campo global de deformação para o ultimo carregamento para cada CP da família 1, CC\_F1\_1.



Fonte: Autor (2025).

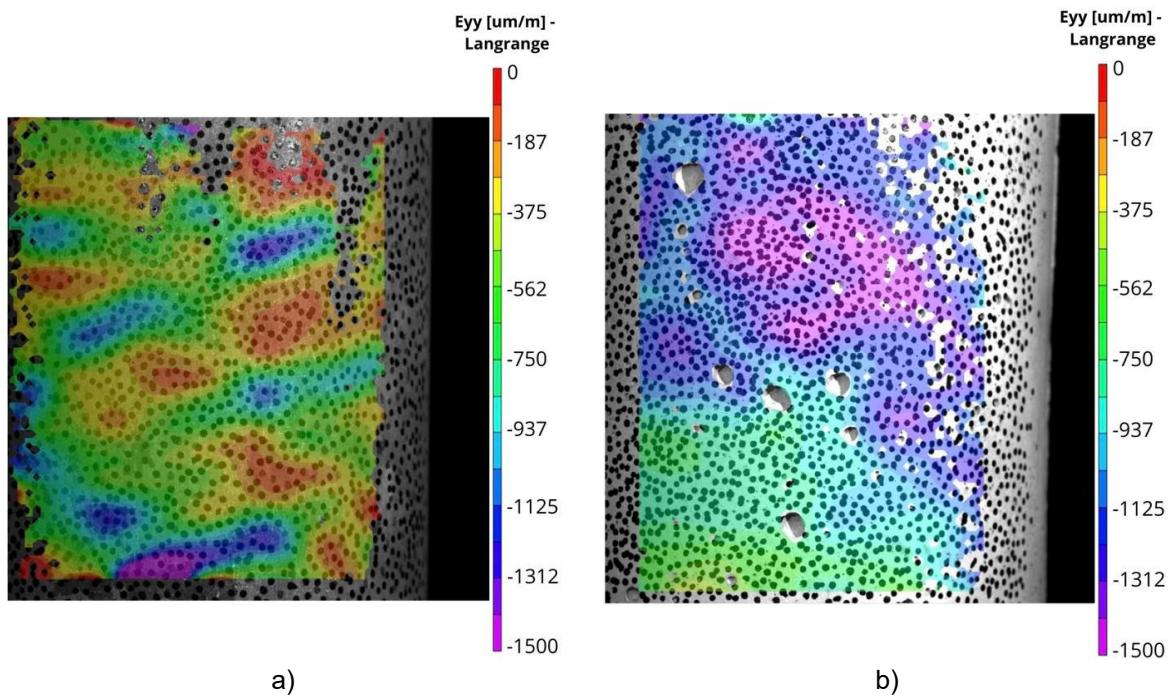
Figura 32 – Campo global de deformação para o ultimo carregamento para cada CP da família 2, a) CC\_F2\_1, b) CC\_F2\_2, c) CC\_F2\_4 e d) CC\_F2\_5.

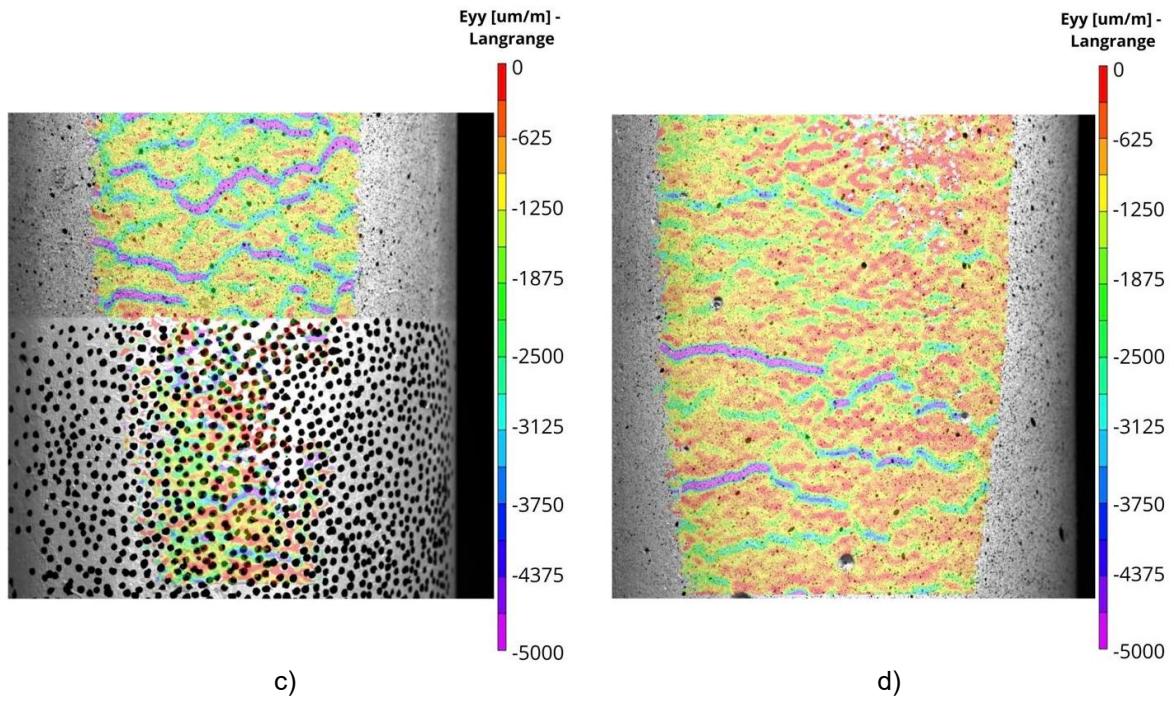




Fonte: Autor (2025).

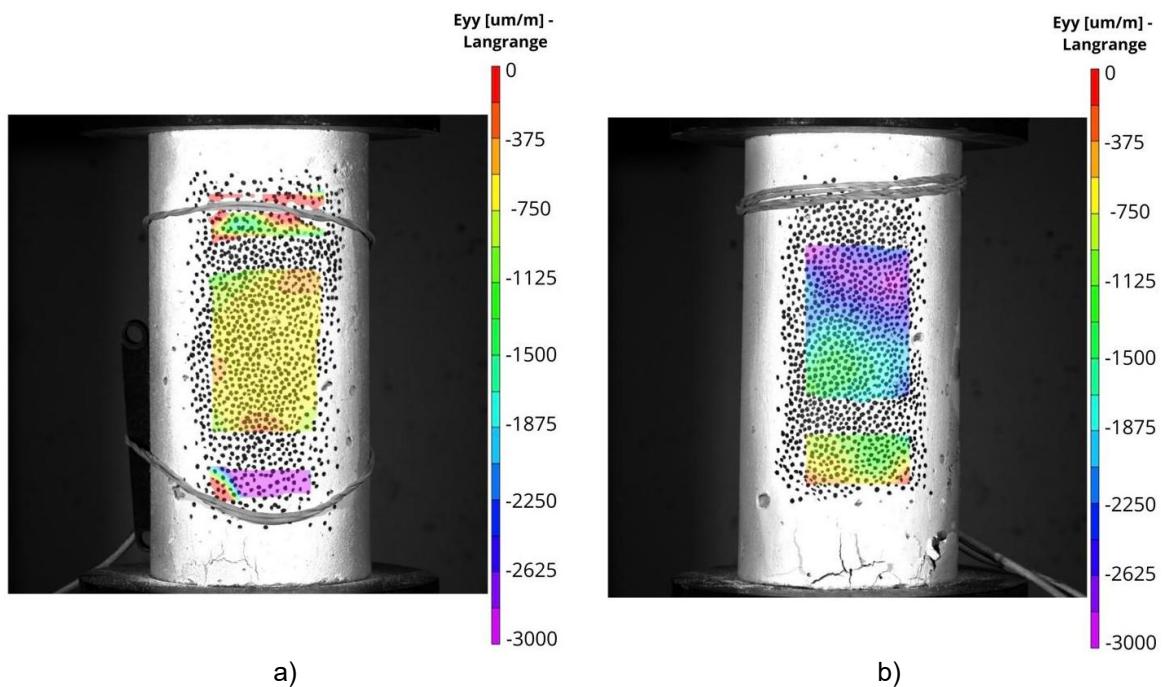
Figura 33 – Campo global de deformação para o ultimo carregamento para cada CP da família 3 a) CS\_F3\_1, b) CS\_F3\_2, c) CS\_F3\_3 e d) CS\_F3\_4.

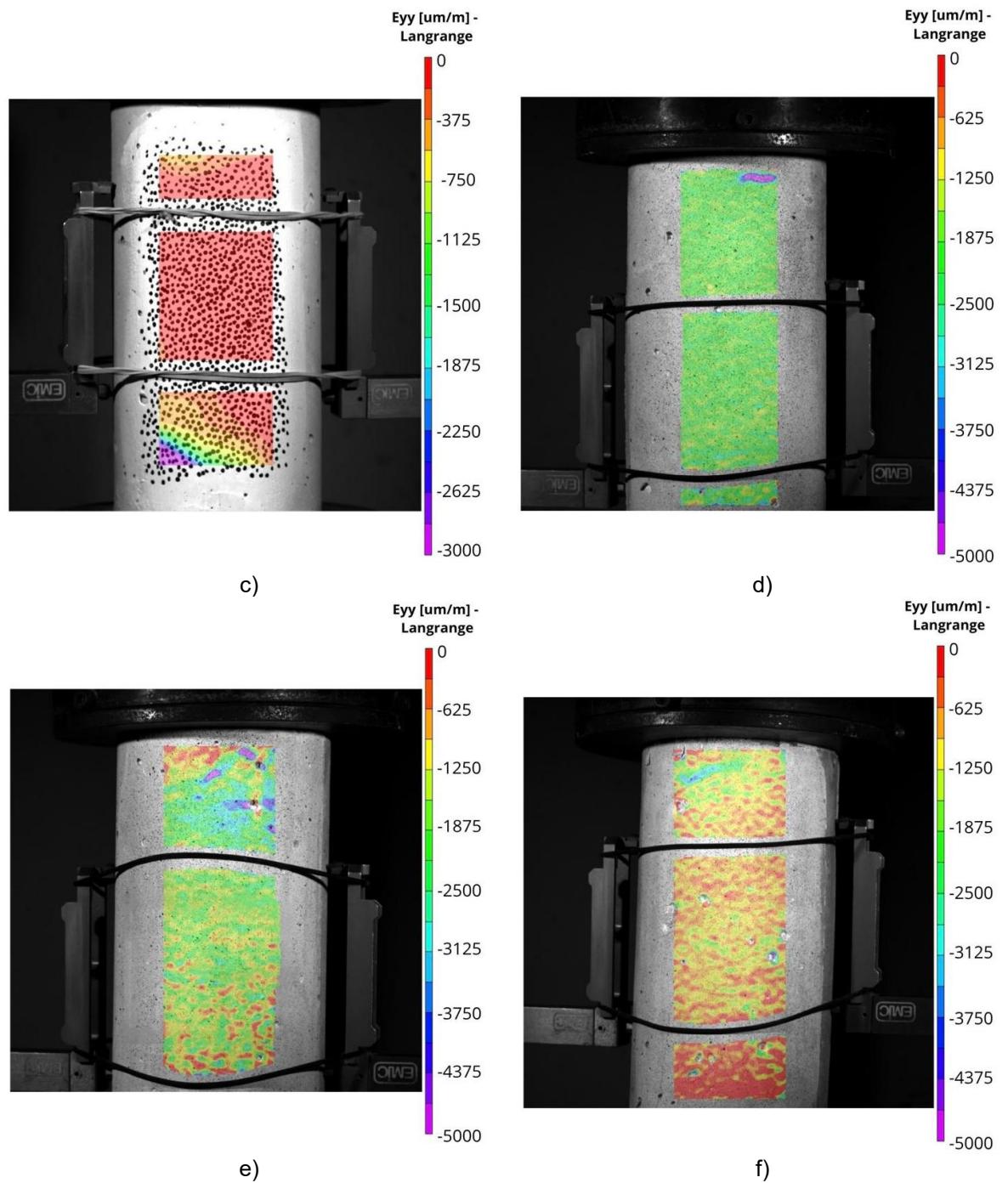




Fonte: Autor (2025).

Figura 34 – Campo global de deformação para o ultimo carregamento para cada CP da família 4 a) CS\_F4\_1, b) CS\_F4\_2, c) CS\_F4\_3, d) CS\_F4\_4, e) CS\_F4\_5 e f) CS\_F4\_6.





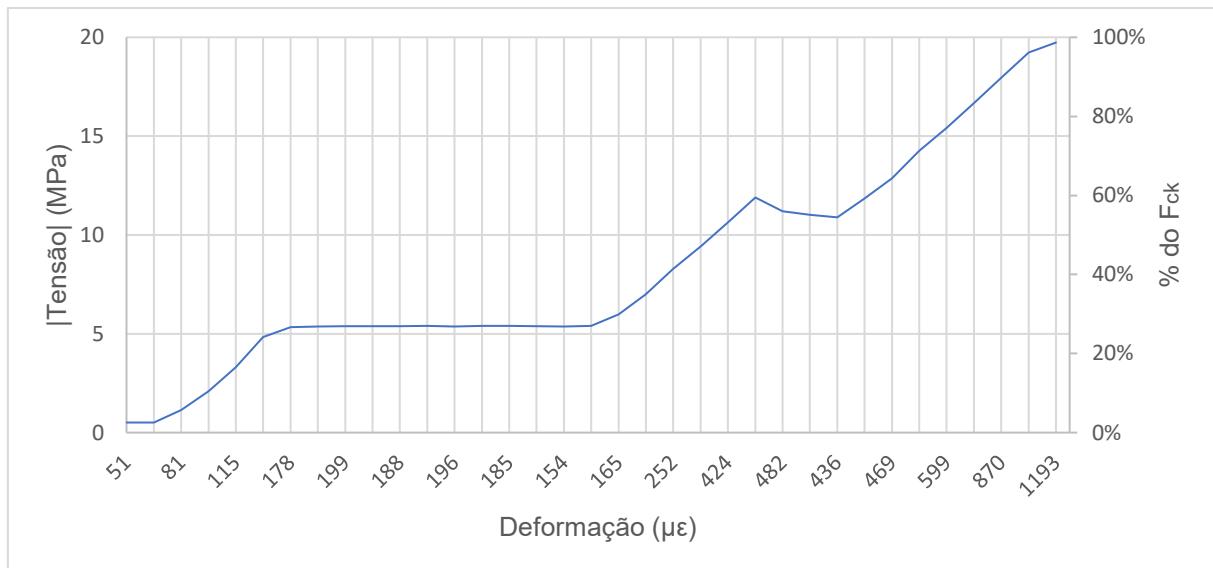
Fonte: Autor (2025).

## 4.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

### 4.1.1 INTERVALO DE MEDIÇÃO A E B

Para determinar com maior precisão os pontos A e B utilizados no cálculo do módulo de elasticidade, descritas no tópico 2.2.2, foram comparados diversos valores em diferentes intervalos de medição. O Gráfico 1 apresenta o comportamento das deformações obtidas no padrão *subset/step* de 19/6, em função do módulo da tensão aplicada e da porcentagem correspondente em relação ao  $F_{ck}$ , durante o último ciclo de carga do ensaio de módulo de elasticidade, conforme descrito no tópico Gráfico 1.

Gráfico 1 – |Tensão| x Deformação ( $\mu\epsilon$ ) (CC\_F2\_2 – 19/6).



Fonte: Autor (2025).

Com base no Gráfico 1, na Tabela 9 estão correlacionados os valores do módulo de elasticidade calculados para cada intervalo apresentado e sua respectiva porcentagem em relação ao valor de referência, determinado pela fórmula (módulo calculado / módulo de referência - 1). O valor de referência, neste caso, é 24,88 GPa, calculado com base na NBR 6118:2024, a partir do  $F_{ck}$  obtido no ensaio de resistência à compressão do CP.

Em complemento, são apresentados os valores do módulo de elasticidade para o intervalo definido pela NBR (0,5 MPa – 0,3  $F_{ck}$ ) e pelo coeficiente de inclinação da linha de tendência da regressão linear da curva Tensão x Deformação.

Tabela 9 – Relação do módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_2 – 19/6)

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	42,68 GPa 72%	43,01 GPa 73%	31,88 GPa 28%	27,44 GPa 10%	30,26 GPa 22%	27,57 GPa 11%	23,53 GPa -5%
Fck (20%)	31,81 GPa 28%	36,13 GPa 45%	27,08 GPa 9%	23,59 GPa -5%	27,03 GPa 9%	25,02 GPa 1%	21,34 GPa -14%
Fck (30%)	- -	43,91 GPa 76%	25,13 GPa 1%	21,48 GPa -14%	25,94 GPa 4%	23,96 GPa -4%	20,12 GPa -19%
Fck (40%)	- -	- -	19,58 GPa -21%	17,74 GPa -29%	23,32 GPa -6%	22,05 GPa -11%	18,46 GPa -26%
Fck (50%)	- -	- -	- -	15,35 GPa -38%	26,95 GPa 8%	23,23 GPa -7%	18,97 GPa -27%
Fck (60%)	- -	- -	- -	- -	61,29 GPa 146%	27,86 GPa 12%	18,97 GPa -24%
NBR (DIC)		63,29 GPa 154%		Rregressão linear (DIC)		43,31 GPa 74%	

Fonte: Autor (2025).

Para proporcionar uma análise mais ampla dos parâmetros aplicados, o Apêndice B reúne todas as tabelas obtidas para cada par de *subset/step* testado (19/6, 19/9, 29/6, 29/9, 29/15, 39/8, 39/13, 39/19, 49/10, 49/16 e 49/24) em todos os CPs. A Tabela 10 apresenta a média dos desvios padrões ( $S_d$ ) e a média das porcentagens dos módulos de elasticidade em relação ao valor de referência, considerados para cada intervalo de medição analisado para o CC\_F2\_2.

Tabela 10 – Conjunto de média dos desvios padrões e médias das porcentagens dos módulos de elasticidade em relação ao valor de referência (CC\_F2\_2).

		Fck -30%	Fck -40%	Fck -50%	Fck -60%	Fck -70%	Fck -80%	Fck -90%
Fck (10%)	S <sub>d</sub> Média	11%	9%	4%	5%	6%	5%	2%
Fck (20%)	S <sub>d</sub> Média	19%	8%	5%	5%	5%	5%	2%
Fck (30%)	S <sub>d</sub> Média		52%	3%	5%	7%	6%	2%
Fck (40%)	S <sub>d</sub> Média			-19%	4%	6%	4%	2%
Fck (50%)	S <sub>d</sub> Média				8%	13%	8%	2%
Fck (60%)	S <sub>d</sub> Média				-45%	-15%	-18%	-31%
NBR	S <sub>d</sub> Média	5%	75%	Regressão linear			S <sub>d</sub> Média	23% 126%

Fonte: Autor (2025).

Junto à amostragem total de dados de todos os corpos de prova ensaiados, a Tabela 11 apresenta a média calculada entre os desvios padrão (S<sub>d</sub>) e as médias correspondentes para cada intervalo de medição analisado para o módulo de elasticidade.

Tabela 11 – Conjunto médias dos desvios padrões e médias para o cálculo do módulo de elasticidade em relação ao valor de referência de todos os CPs.

		Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck	S <sub>d</sub>	9%	24%	5%	4%	17%	9%	5%
(10%)	Média	3%	-4%	2%	8%	6%	14%	28%
Fck	S <sub>d</sub>	133%	90%	6%	4%	8%	6%	5%
(20%)	Média	22%	-36%	7%	12%	12%	19%	29%
Fck	S <sub>d</sub>		53%	100%	7%	21%	10%	8%
(30%)	Média		32%	-46%	7%	2%	16%	28%
Fck	S <sub>d</sub>			38%	56%	9%	9%	5%
(40%)	Média			23%	-7%	18%	23%	35%
Fck	S <sub>d</sub>				9%	30%	10%	6%
(50%)	Média				21%	21%	24%	34%
Fck	S <sub>d</sub>					27%	22%	10%
(60%)	Média					20%	15%	34%
NBR	S <sub>d</sub>	11%		Rregressão	S <sub>d</sub>		8%	
DIC	Média	-97%		linear	Média		-4%	

Fonte: Autor (2025).

Para o cálculo do coeficiente de Poisson, foram analisadas as deformações  $\epsilon_{xx}$  e o processo de cálculo para este parâmetro seguiu os mesmos procedimentos aplicados ao módulo de elasticidade.

Ao analisar o conjunto de tabelas referentes a todos os pares de *subset/step* avaliados para este CP, mostrados no apêndice B. A Tabela 12 apresenta a média calculada entre os desvios padrão ( $S_d$ ) e as médias correspondentes para cada intervalo de medição analisado.

Tabela 12 – Conjunto de médias dos desvios padrões e médias para o cálculo coeficiente de Poisson de todos os CPs.

		Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	S <sub>d</sub> Média	0,11	0,07	0,04	0,05	0,39	0,57	0,08
Fck (20%)	S <sub>d</sub> Média	0,22	0,13	0,09	0,06	0,16	0,23	0,09
Fck (30%)	S <sub>d</sub> Média		0,23	0,11	0,08	0,15	0,20	0,10
Fck (40%)	S <sub>d</sub> Média			0,00	0,18	0,27	0,21	0,22
Fck (50%)	S <sub>d</sub> Média				0,21	0,12	0,14	0,18
Fck (60%)	S <sub>d</sub> Média					0,17	0,31	0,35
Fck (50%)	S <sub>d</sub> Média						0,42	0,58
Fck (60%)	S <sub>d</sub> Média							0,32
								0,66
								0,60
								1,25

Fonte: Autor (2025).

No cálculo do módulo de elasticidade, os dados indicaram que o melhor desempenho foi obtido utilizando o segundo processo de cálculo proposto para analisar as deformações com a técnica DIC. Neste processo, a determinação da secante do gráfico a partir das deformações relativas às tensões na faixa de 10-60% do Fck correspondeu às medições mais precisas. Essa configuração gerou valores médios próximos aos de referência, apresentando um desvio padrão médio de 4%.

No caso do coeficiente de Poisson, o processo indicado segue o mesmo intervalo de medição, sendo o padrão de 10 a 50% do F<sub>ck</sub> o mais adequado para ambos os tipos de pintura. Em média, os coeficientes obtidos foram de 0,18 com um desvio padrão médio de 0,04.

Recomenda-se, no entanto, considerar intervalos alternativos caso os valores medidos nas faixas de referência se afastem significativamente do esperado. Fatores como variações no sistema de imagem (incluindo flutuações mecânicas como vibrações, variações térmicas nas câmeras e oscilações na iluminação) podem comprometer a aquisição das imagens e gerar discrepâncias. Em tais casos, intervalos como de 30 a 70% e de 20 a 50% também demonstraram resultados satisfatórios para o cálculo do módulo de elasticidade. Para o coeficiente de Poisson, as faixas de 20 a 60% e de 10 a 40% também se mostraram alternativas eficazes.

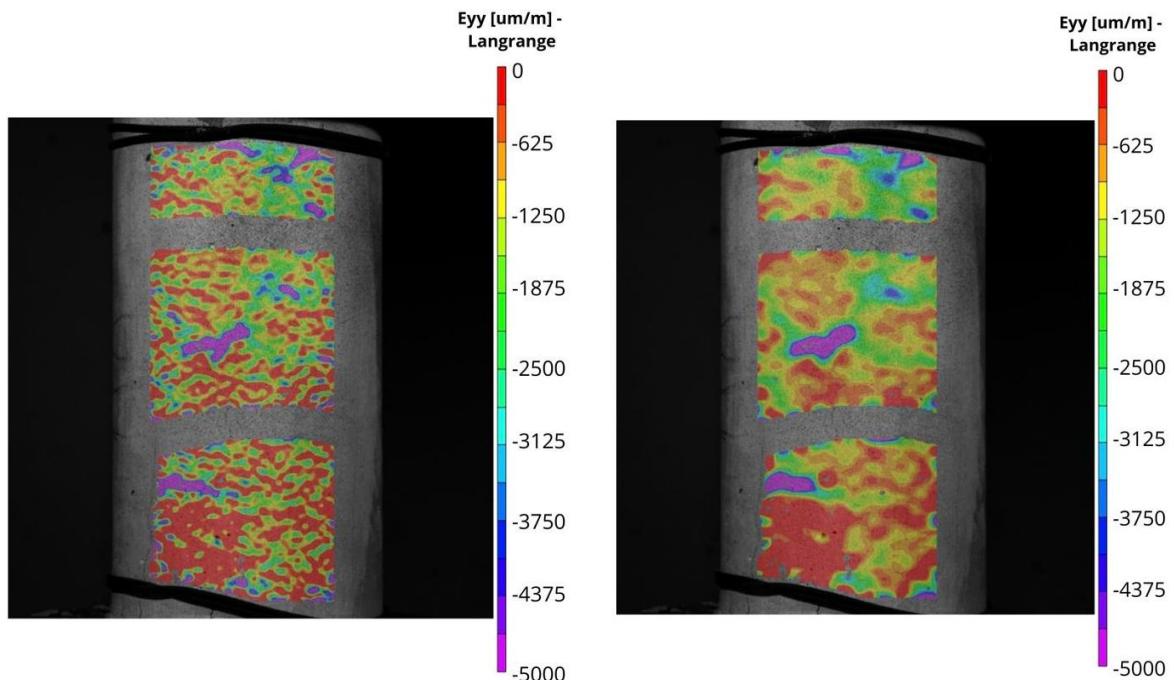
Com base na análise geral dos dados, observou-se que os intervalos de medição influenciam diretamente a precisão dos resultados obtidos. Diante dos desempenhos consistentes, foram adotados nesta dissertação os intervalos de 10-60% do  $F_{ck}$  para o cálculo do módulo de elasticidade e de 10-50% para a determinação do coeficiente de Poisson. Essas faixas mostraram-se as mais adequadas para a caracterização do comportamento mecânico dos CPs, proporcionando resultados alinhados aos valores de referência e com baixos desvios padrão.

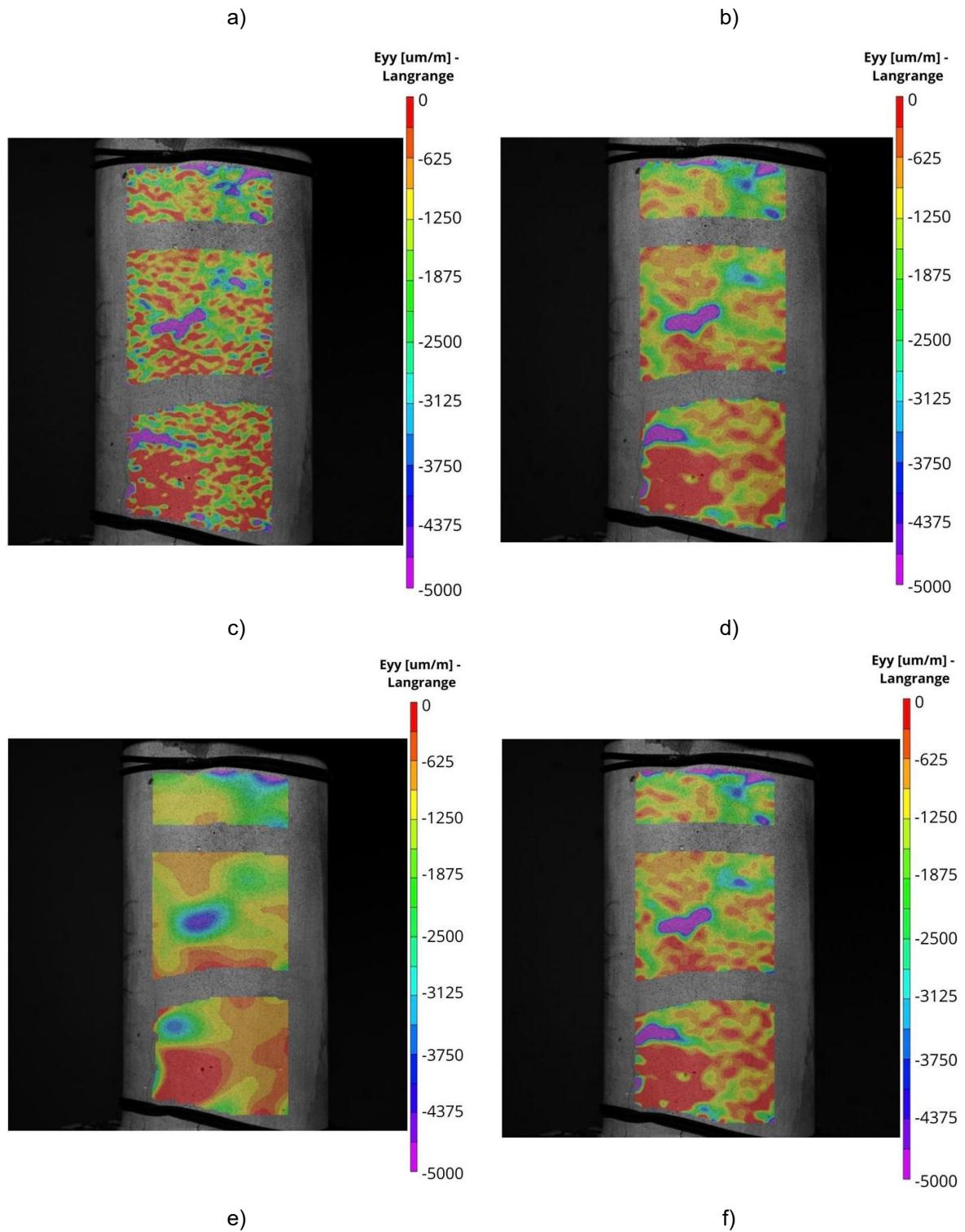
#### 4.1.2 SUBSET E STEP IDEAIS

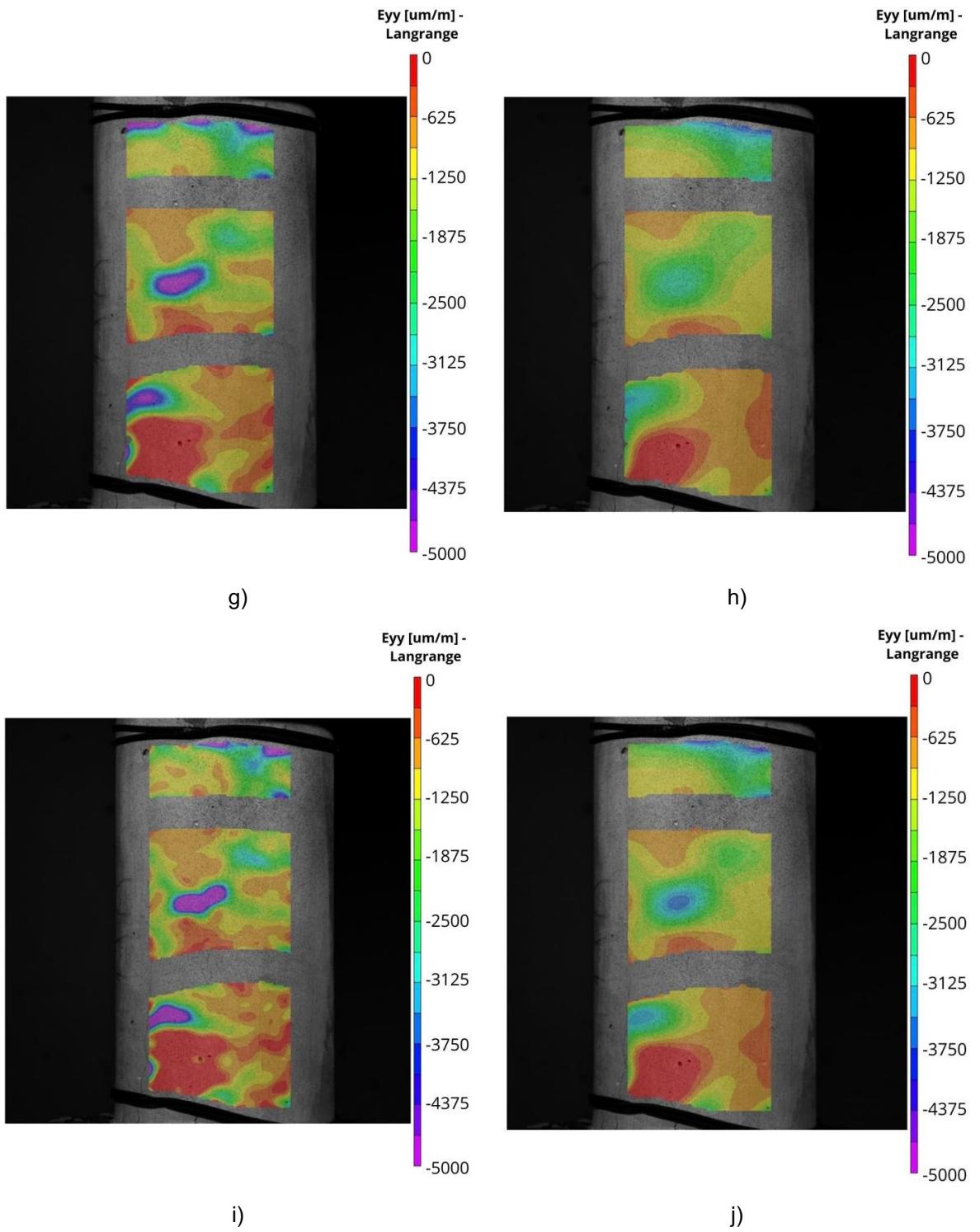
A Figura 35 ilustra a variação do campo global para cada par *subset/step* adotados neste trabalho, evidenciando as alterações decorrentes da modificação dos parâmetros de medição do CC\_F2\_2. Em complemento, o Gráfico 2 quantifica a variação do *subset* para uma fração de *step* fixa (1/3), apresentando as distribuições de  $|Tensão| \times$  Deformação ( $\epsilon_{yy}$ ) para os pares 19/6, 29/9, 39/13 e 49/16.

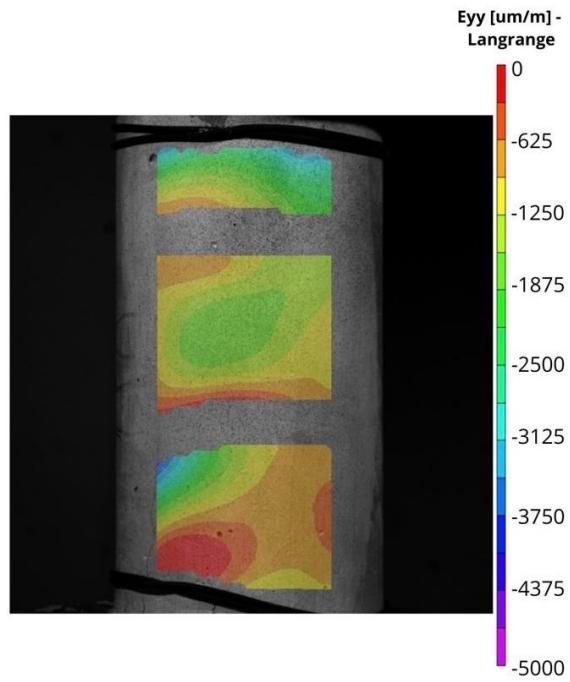
Figura 35 – Variação do campo global para cada par *subset/set* do CC\_F2\_2 a) 19/6, b) 19/9, c) 29/6, d) 29/9, e) 29/15, f) 39/8, g) 39/13 h) 39/19, i) 49/10, j) 49/16 e l)

49/24.





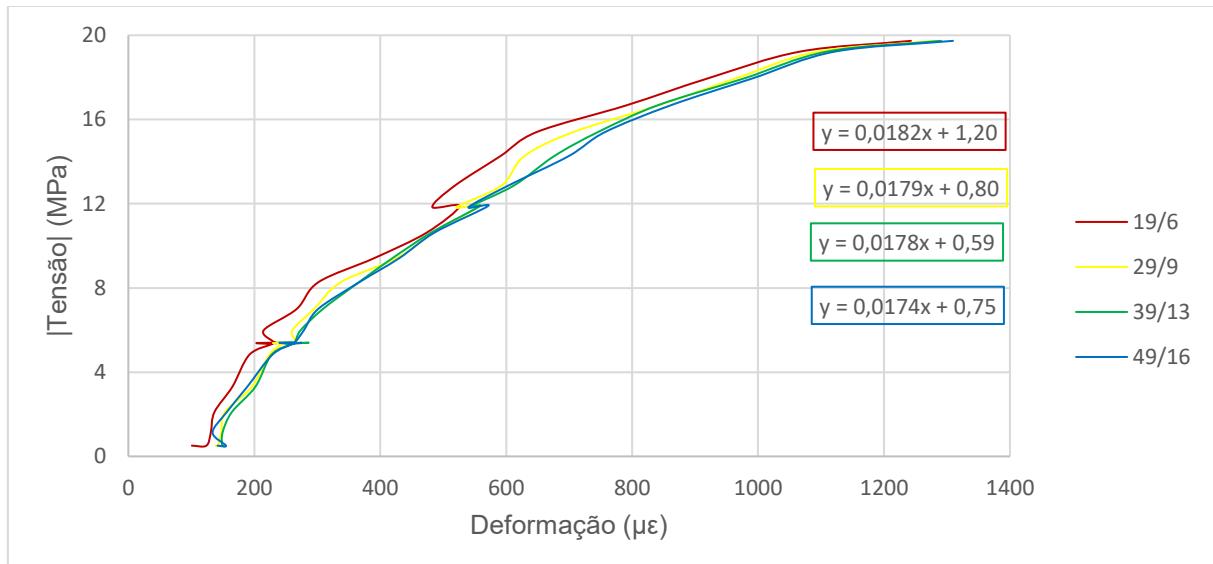




i)

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 2 – Distribuição |Tensão| x Deformação ( $\epsilon_{yy}$ ) do CC\_F2\_2 para os pares subset/step 19/6, 29/9, 39/13 e 49/16.



Fonte: Autor (2025).

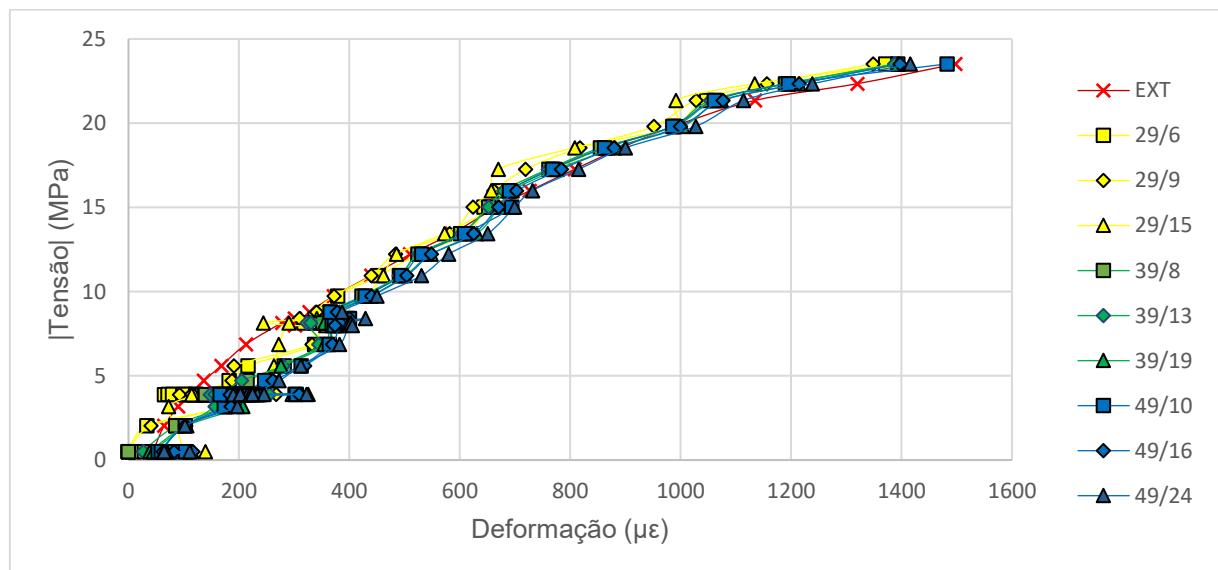
A partir da Figura 35, observa-se que os parâmetros *subset* e *step* influenciam consideravelmente a resolução e a precisão dos dados. Com um *step* mais elevado, a capacidade de identificar zonas com maior deformação é comprometida, resultando na captação de menos deformações na ROI analisada. Por outro lado, um aumento no *subset* tende a suavizar a curva, conforme demonstrado no Gráfico 2. Essa suavização reflete-se na análise do módulo de elasticidade, indicado pelo coeficiente

linear do gráfico, que apresentou uma redução de até 5% ao comparar os pares 19/6 e 49/16.

Nos Gráfico 3 e Gráfico 4, são apresentadas as distribuições de  $|Tensão| \times$  Deformação ( $\epsilon_{yy}$ ) e Tensão x Deformação ( $\epsilon_{xx}$ ), respectivamente, do CP analisado, evidenciando as flutuações de deformação associadas aos diferentes padrões de *subset/step* utilizados. Também são mostradas as deformações obtidas por meio de um *strain gage* (SG) fixado na superfície do CP.

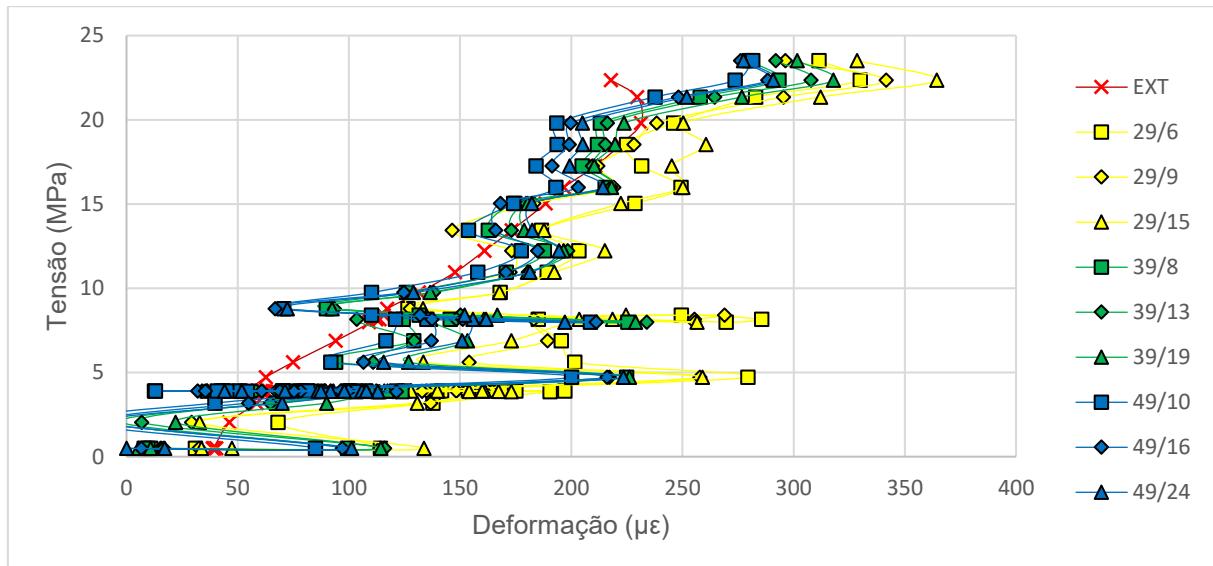
As cores representam: vermelho para o *strain gage* (SG), amarelo para as deformações dos *subsets* de malha 29x29, verde para os *subsets* 39x39 e azul para os *subsets* 49x49. Para cada *subset*, foram testados três tamanhos de *step*, indicados no gráfico.

Gráfico 3 – Distribuição  $|Tensão| \times$  Deformação ( $\epsilon_{yy}$ ) por par *subset/step* (CS\_F4\_2).



Fonte: Autor (2025).

Gráfico 4 – Distribuição Tensão x Deformação ( $\epsilon_{xx}$ ) por par *subset/step* (CS\_F4\_2).



Fonte: Autor (2025).

Ao analisar o Gráfico 3 e o Gráfico 4, observou-se que o uso de *subsets* menores na análise (ou seja, um refinamento maior) resultou em valores de deformação mais elevados. Nas faixas iniciais de carregamento, foi identificado uma grande oscilação das deformações medidas através da técnica DIC. Entretanto, na etapa final do carregamento, todas as curvas de deformação convergiram, indicando que, apesar das diferenças iniciais, os resultados tendem a se aproximar quando o material atinge níveis de tensão mais elevados.

Isso já era esperado, pois a técnica DIC tende a trabalhar melhor com deformações mais elevadas, onde a precisão na detecção de deslocamentos e deformações é maior devido à maior magnitude das mudanças na superfície do material. Portanto, a convergência das curvas no estágio final do carregamento reforça a confiabilidade da técnica DIC em cenários de alta deformação.

A Tabela 13 apresenta taxa de sucesso de cada intervalo de medição identificados em todos os pares de *subset* e *step*, analisados e expostos no apêndice B.

Os resultados mostram taxa de sucesso em cada intervalo utilizado no cálculo do módulo de elasticidade, variando a combinação de *subset* e *step*, assim como a amplitude da região de interesse (ROI) para as deformações em X e Y. Considerando o exemplo da Tabela 9, na qual representa todos os dados obtidos a partir do conjunto 19/6 (*subset/step*) de uma ROI ampla, e nela é possível observar uma taxa de sucesso de 12 casos para o módulo de elasticidade, vindos dos intervalos: 10 - 60%, 10 - 90%,

20 - 50%, 20 - 60%, 20 - 70%, 20% - 70%, 30% - 50%, 30% - 70%, 30% - 80%, 40% - 70%, 50% - 70% e 50% - 80%.

Na tabela, a notação "E" representa uma ROI estreita localizada no centro do CP, enquanto "A" indica uma ROI ampla. Esses dados correspondem a um recorte da Tabela B 31, apresentada no Apêndice B, que reúne os melhores resultados obtidos para todos os CPs analisados.

Tabela 13 – Resultados Satisfatórios de Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson (CC\_F2\_2).

	19/6	19/9	29/6	29/9	29/15	39/8	39/13	39/19	49/10	49/16	49/24
CC_F2_2_E_ε <sub>yy</sub>	13	4	4	6	13	10	14	0	5	2	9
CC_F2_2_E_ε <sub>xx</sub>	1	1	5	2	5	4	6	0	2	3	0
CC_F2_2_A_ε <sub>yy</sub>	12	15	10	12	10	6	8	9	7	6	11
CC_F2_2_A_ε <sub>xx</sub>	1	2	2	2	3	6	6	8	7	10	10

Fonte: Autor (2025).

O somatório de todos os valores validos, considerando todos os 15 CPs analisados, para cada combinação de *subset* e *step* e amplitude da ROI, é exibido na Tabela 14.

Tabela 14 – Somatório de valores válidos para as deformações  $\epsilon_{yy}$  e  $\epsilon_{xx}$  em todos os CPs.

	19/6	19/9	29/6	29/9	29/15	39/8	39/13	39/19	49/10	49/16	49/24
ε <sub>yy</sub>	105	91	124	141	153	147	140	134	133	142	152
ε <sub>xx</sub>	104	107	182	171	133	180	200	186	198	208	192

Fonte: Autor (2025).

A análise geral indicou que as combinações de *step* equivalentes a 1/2 e 1/3 do *subset* apresentaram os melhores resultados. Como mostrado na Tabela 14, foram obtidos 528 valores válidos para a configuração 1/3 do *subset*, 530 valores válidos para 1/2 do *subset* e 404 para 1/4 do *subset*.

A escolha dos pares de medição influencia a precisão dos resultados do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson pela técnica DIC. Com base nos resultados observados, optou-se nesta dissertação por adotar diferentes combinações de *subset* e *step* para cada técnica avaliada.

Para os CPs com pintura pela técnica A, a configuração *subset/step* 49/16 demonstrou maior eficiência na determinação do módulo de elasticidade, enquanto para os CPs com padrão de *speckles* da técnica B, a combinação 19/6 apresentou o melhor desempenho.

Seguindo a mesma tendência, para o coeficiente de Poisson, os CPs com pintura pela técnica A tiveram melhores resultados com a configuração *subset/step* 49/16. Já para os CPs com padrão de *speckles* da técnica B, a configuração 49/10 mostrou-se a mais adequada para essa determinação.

#### 4.1.3 AMPLITUDE DA REGIÃO DE INTERESSE E PADRÃO DE PINTURA

Como exemplo, a Tabela 14, a Tabela 15 e a Tabela 16 apresentam o somatório dos valores adequados para os CPs tratados pelo técnica A e B de pintura, respectivamente, separando os resultados obtidos com uma ROI ampla e uma ROI estreita.

Tabela 15 – Somatório de valores válidos com *speckle* gerado por spray para as deformações  $\varepsilon_{yy}$  e  $\varepsilon_{xx}$ .

	19/6	19/9	29/6	29/9	29/15	39/8	39/13	39/19	49/10	49/16	49/24
E_ $\varepsilon_{yy}$	49	35	31	42	43	39	45	28	31	38	43
E_ $\varepsilon_{xx}$	44	44	30	31	32	31	42	28	36	33	42
A_ $\varepsilon_{yy}$	51	47	40	41	46	35	36	36	35	35	44
A_ $\varepsilon_{xx}$	30	31	40	46	32	52	54	53	56	61	55

Fonte: Autor (2025).

Tabela 16 – Somatório de valores válidos com *speckle* gerado por pincel para as deformações  $\varepsilon_{yy}$  e  $\varepsilon_{xx}$ .

	19/6	19/9	29/6	29/9	29/15	39/8	39/13	39/19	49/10	49/16	49/24
E_ $\varepsilon_{yy}$	2	7	22	30	29	38	27	39	33	32	31
E_ $\varepsilon_{xx}$	6	4	42	23	15	25	30	26	26	34	26
A_ $\varepsilon_{yy}$	1	1	31	28	35	35	32	31	34	37	34
A_ $\varepsilon_{xx}$	11	11	38	41	37	34	34	38	42	37	31

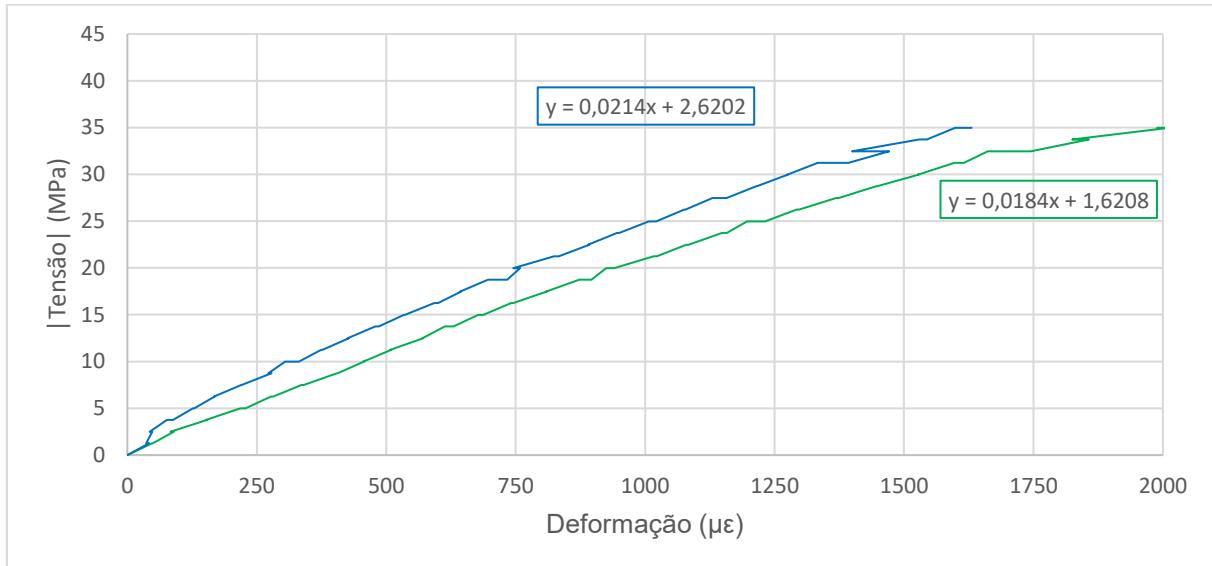
Fonte: Autor (2025).

Ao considerar os dois níveis de análise da amplitude da ROI, verificou-se, por meio da Tabela 15 e Tabela 16, que os valores obtidos com uma ROI ampla foram mais consistentes, independentemente do padrão de pintura utilizado nos CPs.

O Gráfico 5 ilustra claramente as divergências no módulo de elasticidade do CS\_F3\_3 em função da técnica de pintura utilizado. Nele, observa-se que as áreas de deformação associadas ao acabamento com a técnica B (linha azul) e técnica A (linha

verde) apresentam variações notáveis nas medições, representando diferenças nas deformações registradas em função do padrão de *speckle* gerado.

Gráfico 5 –  $|Tensão| \times Deformação (\mu\epsilon)$  (CS\_F3\_3 – 49/16).



Fonte: Autor (2025).

É importante salientar que, ao analisar o CS\_F3\_3, todos os seus conjuntos de *step/subset* apresentaram divergências no módulo de elasticidade, destacando-se o par 49/16, ilustrado no Gráfico 4. O padrão associado à técnica A exibiu deformações inferiores em comparação à técnica B, impactando diretamente os resultados do módulo de elasticidade, refletindo uma redução de 14%, evidenciado pelo coeficiente linear da regressão linear das curvas. Essa variação evidencia a sensibilidade dos ajustes de parâmetros e da técnica de pintura na precisão das medições.

Com base na análise realizada, nesta dissertação foram utilizadas ROIs amplas e ambas as técnicas de medição para a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Observou-se que a técnica de pintura B apresentou maior precisão na medição das deformações, porém essa característica não se mostrou tão determinante quanto a escolha do intervalo de medição e a configuração do par *step/subset*. Esse fatores tiveram um impacto mais significativo na qualidade dos resultados, evidenciando a importância de ajustes adequados na parametrização do DIC para garantir medições mais consistentes e representativas.

## 4.2 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Foram definidos os parâmetros mais adequados para a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson por meio da técnica DIC. Os intervalos de medição de 10-60% do  $F_{ck}$  para o módulo de elasticidade e 10-50% para o coeficiente de Poisson mostraram-se mais precisos. O par *step/subset* 49/16 foi o mais adequado para ambos os cálculos na técnica A, enquanto na técnica B, 19/6 e 49/10 apresentaram melhor desempenho para o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, respectivamente. O uso de ROIs amplas garantiu maior consistência nos resultados.

### 4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão são fundamentais na caracterização do concreto endurecido, sendo amplamente utilizados devido à facilidade de execução e à importância da resistência à compressão no projeto estrutural. Este tipo de ensaio permite avaliar a qualidade potencial do concreto e sua adequação às especificações projetadas. (Neville, 2016).

A Tabela 17 apresenta as resistências médias à compressão das quatro famílias ensaiadas, juntamente com os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação. No entanto, para a família 1, que possui apenas um exemplar, tanto o desvio padrão quanto o coeficiente de variação são iguais a zero. O mesmo ocorre para o grupo de 91 dias da família 4, onde foi utilizada uma resistência esperada como referência para os ensaios, sem a realização de rompimentos.

Tabela 17 – Resultados de resistência a compressão.

Família	Resistência à compressão axial média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
F1 (CC)	25,61	-	-
F2 (CC)	18,48	0,88	0,05
F3 (CS)	32,16	4,18	0,13
F4 D-28 (CS)	18,81	4,57	0,24
F4 D-91 (CS)	20,00	-	-

Fonte: Autor (2025).

Entre as famílias que utilizam agregado natural, observa-se que a Família 1 apresentou o melhor desempenho em termos de resistência. Em contrapartida, a Família 2 obteve resultados inferiores, fato que pode ser atribuído a uma leve inconsistência na mistura dos componentes, o que comprometeu a coesão interna do material e reduziu sua resistência.

No caso das famílias com agregado sintético, os resultados apresentaram maior dispersão. A Família 3, composta por espécimes que não necessariamente seguiram um mesmo traço, conforme detalhado no item 3.1.2, demonstrou uma dispersão considerável nos valores de resistência à compressão. Já a Família 4 exibiu uma variabilidade ainda mais acentuada, a qual pode ser justificada por falhas no processo de fabricação e moldagem dos corpos de prova, possivelmente ocasionando a formação de vazios internos que prejudicaram a integridade dos ensaios.

Em síntese, os resultados obtidos reforçam a importância de um controle rigoroso dos traços e dos processos de mistura, cura e moldagem dos corpos de prova, visto que pequenas variações ou inconsistências operacionais podem ter impactos significativos na resistência do concreto.

#### 4.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Determinar o módulo de elasticidade é essencial para prever o comportamento estrutural do concreto, influenciando a rigidez, deflexão e distribuição de tensões sob carregamento. Segundo Li et al. (2009), esse parâmetro é fundamental para o dimensionamento e a segurança das estruturas, assegurando desempenho e durabilidade.

A Tabela 18 apresenta os valores do módulo de elasticidade (em GPa) obtidos para as quatro famílias (F1, F2, F3 e F4) por diferentes técnicas: NBR, DIC, CG e SG, além dos respectivos desvios padrão e coeficientes de variação (CV). Vale destacar que, para determinadas famílias, não foi possível realizar ensaios utilizando as técnicas devido a problemas nos aparelhos de medição no momento dos testes.

Tabela 18 – Resultados médios de módulo de elasticidade.

Família		Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)
F1 (2D)	NBR	28,34	-	-
	DIC	29,76	-	-
	CG	24,30	-	-
	SG	-	-	-
F2 (2D)	NBR	24,47	0,41	0,02
	DIC	24,38	0,90	0,04
	CG	-	-	-
	SG	-	-	-
F2 (3D)	NBR	23,66	0,40	0,02
	DIC	21,40	0,95	0,04
	CG	20,67	0,31	0,02
	SG	-	-	-
F3 (3D)	NBR	31,68	2,15	0,07
	DIC	23,91	4,74	0,20
	CG	-	-	-
	SG	-	-	-
F4 D-28 (2D)	NBR	24,11	2,92	0,12
	DIC	20,57	1,55	0,08
	CG	21,45	1,32	0,06
	SG	27,13	3,48	0,13
F4 D-91 (3D)	NBR	25,04	-	-
	DIC	26,97	1,43	0,05
	CG	26,01	1,67	0,06
	SG	-	-	-

Fonte: Autor (2025).

Nas famílias F1 e F2, o agregado graúdo utilizado é conhecido, o que permite o uso adequado do fator de correção  $\alpha_E$ , tornando a técnica NBR 6118:2024 uma referência importante para avaliar os resultados obtidos pelos demais técnicas.

Na Família F1 (2D), o módulo de elasticidade obtido pela NBR foi 28,34 GPa, enquanto o DIC apresentou 29,76 GPa, com uma diferença pequena em relação à referência. Já o CG registrou 24,30 GPa, representando uma redução significativa em comparação ao DIC e à NBR.

Para a Família F2, dos 6 CPs ensaiados, 3 foram analisados no sistema 2D e 3 no sistema 3D. Conforme detalhado anteriormente no tópico 2.2.3, o terceiro e o sexto CP apresentaram problemas de medição e, por isso, não foram incluídos nos cálculos das suas características.

Para a Família F2 (2D), os valores de módulo de elasticidade foram 24,47 GPa e 24,38 GPa para os valores obtidos pela NBR e pelo DIC, respectivamente, demonstrando uma grande proximidade entre o DIC e a referência estabelecida pela NBR.

Já para a Família F2 (3D), os valores registrados foram 23,66 GPa, 21,40 GPa e 20,67 GPa, para as técnicas NBR, DIC e CG, respectivamente. Observa-se que tanto o DIC quanto o CG apresentaram valores abaixo do esperado pela NBR, sendo que os valores obtidos pelo DIC são mais próximos da referência.

Nas famílias F3 e F4, a situação é diferente, pois os agregados sintéticos utilizados têm um fator  $\alpha_E$  desconhecido, o que impossibilita utilizar os resultados da NBR como referência direta. Nesses casos, a comparação se concentra nos valores obtidos pelas técnicas DIC, CG e SG.

Na Família F3 (3D), não foi possível comparar os valores obtidos com a técnica CG devido a problemas nos sensores durante os ensaios, impossibilitando a coleta adequada dos dados. Como essa família não apresenta uma produção com características conhecidas, seus resultados têm apenas um caráter expositivo, sem função comparativa.

Na Família F4 D-28 (2D), os valores obtidos pelo DIC e pelo CG apresentaram resultados similares e abaixo do indicado pela NBR (24,11 GPa), sendo 20,57 GPa e 21,45 GPa, respectivamente. Por outro lado, a técnica SG apresentou resultados relativamente superiores em relação ao DIC e ao CG, devido a um problema não identificado nas deformações iniciais.

Já na Família F4 D-91 (3D), ambos os valores de DIC e CG ficaram novamente parecidos, sendo 26,97 GPa e 26,01 GPa, respectivamente, ligeiramente acima do indicado em norma, que foi de 25,04 GPa.

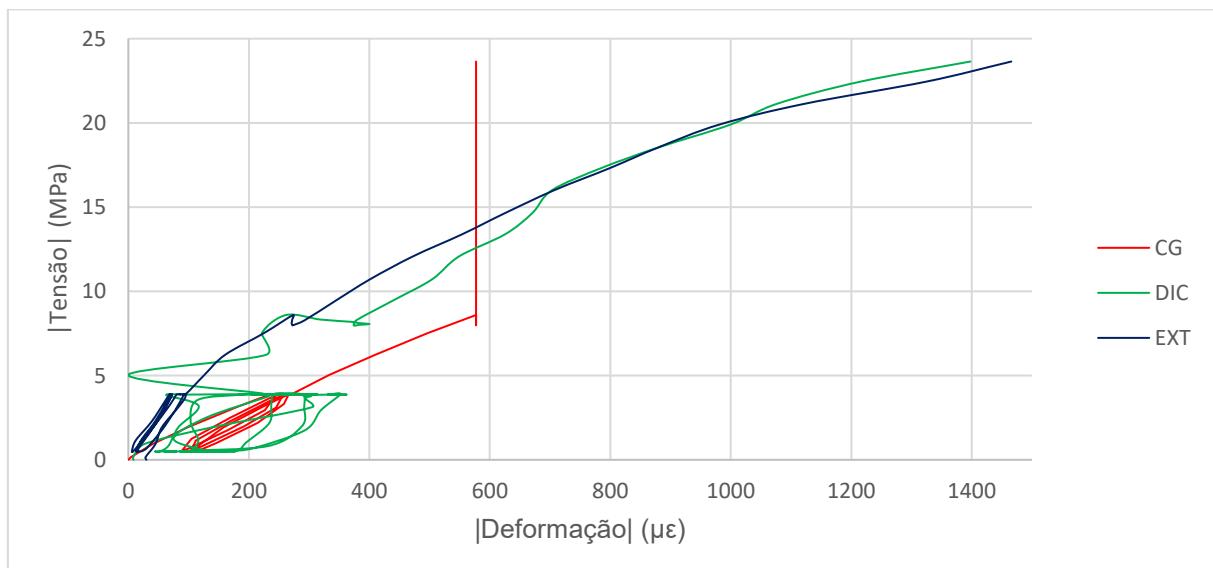
De forma geral, as técnicas DIC e CG apresentaram pequenas dispersões, com desvio padrão variando entre 0,31 e 1,67. Em contrapartida, a técnica SG, que foi ensaiado apenas na Família F4 D-28, exibiu uma dispersão elevada, com um desvio padrão de 3,48, indicando menor consistência nos resultados obtidos.

É possível observar também que, nas famílias de referência, F1 e F2, houve uma maior proximidade dos valores obtidos pelo DIC em relação ao indicado pela NBR, o que demonstra confiança na técnica. Por outro lado, os valores obtidos pelo CG foram ligeiramente menores em comparação à NBR e ao DIC. Já para as famílias F3 e F4, os valores encontrados indicaram módulos menores do que os indicados na NBR, sugerindo um fator de correção  $\alpha_E$  menor que 1, que será explorado no próximo tópico.

Outro ponto observado foi que, de modo geral, os valores obtidos tanto pelo sistema 2D quanto pelo sistema 3D são satisfatórios para o cálculo do módulo de elasticidade, observando-se que ambas as técnicas obtiveram desvios padrões e coeficiente de variações semelhantes. Isso é um resultado importante, pois a aplicação da técnica 2D é bem mais simples e barata, sendo que já há muitos softwares gratuitos que apresentam resultados satisfatórios para análises 2D.

O Gráfico 6 apresenta o diagrama |Tensão| x |Deformação| ao longo dos ciclos de carga do CS\_F4\_2, medido pelas três técnicas utilizados neste estudo.

Gráfico 6 – |Tensão| (MPa) x Deformação ( $\mu\epsilon$ ) com ciclos de carga CS\_F4\_2.



Fonte: Autor (2025).

Nota-se que o DIC apresentou instabilidade nas faixas iniciais de deformação (0 – 7 MPa), o que pode ser atribuído à baixa resolução associada aos parâmetros

adotados neste trabalho. Apesar dessa limitação inicial, em faixas intermediárias (7 – 15 MPa) de deformação, o DIC apresentou intervalos que se aproximam aos valores obtidos pelo SG.

Nas faixas superiores (15 - 25 MPa) de deformação, o DIC evidenciou um comportamento mais estável e linear, indicando que a técnica funciona de forma mais confiável para o cálculo do módulo de elasticidade em faixas maiores de deformação. O Gráfico 6 mostra que a curva da distribuição das deformações, medida pelo SG no intervalo utilizado para o cálculo do módulo (0,5 MPa - 0,3  $F_{ck}$ ), apresenta uma inclinação mais acentuada em comparação com os demais métodos. Essa característica resulta em valores elevados de módulo de elasticidade, evidenciando as limitações na interpretação dos dados obtidos por essa técnica.

#### 4.2.3 FATOR DE CORREÇÃO $\alpha_E$ E COEFICIENTE DE POISSON

Segundo Beshr et al. (2003), a qualidade do agregado graúdo, quantificada pelo fator de correção  $\alpha_E$ , afeta significativamente as propriedades mecânicas do concreto. Agregados mais fracos, com um fator de correção menor, tendem a resultar em um concreto mais dúctil, influenciando também o módulo de elasticidade, já que a maior parte da carga compressiva é suportada pelo agregado.

Segundo Mane e Patil (2024), o coeficiente de Poisson é um parâmetro essencial para avaliar o comportamento do concreto, refletindo a relação entre as deformações lateral e axial. Valores mais baixos desse parâmetro indicam maior fragilidade, impactando diretamente o dimensionamento seguro e a performance estrutural.

A Tabela 19 apresenta os resultados dos fatores de correção ( $\alpha_E$ ) e a Tabela 20 os valores dos coeficientes de Poisson ( $n$ ) em relação ao valor de referência para cada CP, juntamente com análises de desvio padrão e coeficiente de variação (CV).

Tabela 19 – Fatores de correção  $\alpha_E$ .

Família		Fator de correção $\alpha_E$	Desvio Padrão	CV (%)
F1 (2D)	DIC	1,05		
	CG	0,86		
F2 (2D)	DIC	1,00	0,02	0,02
	CG	-	-	-
F2 (3D)	DIC	0,93	0,02	0,03
	CG	0,87	0,03	0,03
F3 (3D)	DIC	0,78	0,15	0,19
	CG	-	-	-
F4 D-28 (2D)	DIC	0,86	0,06	0,07
	CG	0,90	0,09	0,10
	SG	1,15	0,24	0,21

Fonte: Autor (2025).

Nos resultados das famílias F1 e F2, os valores apresentados pelo DIC se aproximaram mais do valor esperado, que é 1. Esse valor corresponde ao coeficiente  $\alpha_E$  normatizado para brita granítica, utilizada nesses CPs. Em comparação, o CG apresentou valores de correção ligeiramente abaixo de 1, sugerindo menor precisão na avaliação em relação ao DIC, que demonstrou maior conformidade ao comportamento esperado.

Ao comparar as técnicas 2D e 3D, observa-se que a técnica 2D alcançou valores de  $\alpha_E$  extremamente próximos ao ideal normativo de 1, indicando uma alta precisão nas medições. Por outro lado, a técnica 3D apresentou valores ligeiramente inferiores ao ideal, mas ainda assim dentro de uma faixa aceitável, mostrando que ambos as técnicas têm capacidade satisfatória de avaliar o coeficiente, embora o 2D tenha demonstrado maior exatidão.

Ao analisar o coeficiente  $\alpha_E$  nas famílias F3 e F4, entende-se que, como a família F3 não apresenta uma produção com características normatizadas ou conhecidas, seus valores de  $\alpha_E$  são avaliados de forma mais ampla, aceitando uma maior dispersão. Ainda assim, os resultados indicam consistentemente um fator de correção inferior a 1, sugerindo um concreto de menor rigidez.

Para a família F4, observa-se que nos CPs de 91 dias não houve rompimento. Assim, o cálculo analítico do coeficiente  $\alpha_E$  torna-se ineficaz, já que a tensão de ruptura é um parâmetro essencial para o cálculo do coeficiente. Nos CPs de 28 dias, tanto o DIC quanto o CG apresentaram valores próximos e menores que 1, sugerindo

que um concreto com esse agregado apresentaria baixo módulo de elasticidade. Por outro lado, o SG indicou um fator de correção superior a 1, o que gera uma interpretação oposta às obtidas pelo DIC e CG, destacando a sensibilidade das técnicas às condições do ensaio.

Tabela 20 – Coeficientes de Poisson.

Família		Coeficiente de Poisson (n)	Desvio Padrão	CV (%)
F1 (2D)	DIC	0,19		
F2 (2D)	DIC	0,14	0,07	0,47
F2 (3D)	DIC	0,19	0,06	0,30
F3 (3D)	DIC	0,12	0,01	0,10
F4 D-28 (2D)	DIC	0,18	0,09	0,48
	SG	0,16	-	-
F4 D-91 (3D)	DIC	0,20	0,02	0,11

Fonte: Autor (2025).

Em relação aos coeficientes de Poisson (n), os resultados, de forma geral, estão em conformidade com os intervalos reportados pela NBR 6118:2024 (que estabelece o Poisson igual a 0,20) e por Almeida (2002) (que reporta valores entre 0,11 e 0,21), apresentando valores consistentes e sem grandes discrepâncias entre as diferentes famílias ou técnicas de medição.

Em síntese, a técnica DIC se destaca por possibilitar a obtenção simultânea do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson, o que simplifica o procedimento experimental. Nos ensaios realizados, especialmente para as famílias de referência (F1 e F2), os valores de  $\alpha_E$  aproximaram-se do ideal normativo de 1, conforme previsto pela NBR, evidenciando uma compatibilidade relevante com os parâmetros estabelecidos. Ademais, a boa performance dos resultados obtidos pela abordagem 2D ressalta o potencial de extensão dos métodos empregados, os quais podem ser adaptados e integrados a software de código aberto para a análise do comportamento mecânico dos concretos.

#### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES COM AGREGADO NATURAL E SINTÉTICO

A Tabela 21 apresentada sintetiza a comparação de quatro famílias de concreto (F1, F2, F3 e F4) a partir de parâmetros para a avaliação de seu comportamento mecânico, como a resistência à compressão ( $F_{ck}$ ) e os parâmetros obtidos por meio da técnica DIC: o módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), o coeficiente de Poisson ( $n$ ) e os fatores de correção ( $\alpha_E$ ). Os valores ilustrados correspondem às medianas, acompanhadas de seus respectivos coeficientes de variação (CV).

Tabela 21 – Análise comparativa das propriedades mecânicas dos concretos (Famílias F1, F2, F3 e F4).

	$F_{ck}$ (MPa)		$E_{ci}$ DIC (GPa)		$n$ DIC		$\alpha_E$ DIC	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
F1	25,61	-	29,76	-	0,19	-	1,05	-
F2	18,48	0,05	23,71	0,05	0,24	0,41	0,97	0,04
F3	32,16	0,13	23,91	0,20	0,12	0,10	0,78	0,19
F4	18,81	0,24	20,57	0,12	0,18	0,48	0,86	0,07

Fonte: Autor (2025).

Ao analisar as resistências dos concretos e os módulos de elasticidade, foi possível identificar diferentes classes de desempenho. Notavelmente, os concretos com agregado sintético (F3 e F4) alcançaram valores significativos de resistência, demonstrando que tais materiais podem, potencialmente, ser empregados em elementos estruturais, conforme a NBR 6118:2024, que indica que concretos com classe de resistência superior a 20 MPa podem ser classificados como estruturais.

Os parâmetros  $n$  apresentaram menor variação entre as famílias, com valores oscilando entre 0,12 e 0,24. Essa uniformidade indica que, apesar das diferenças observadas na resistência e no módulo de elasticidade, o comportamento elástico global dos concretos, em termos de deformação transversal, se mantém relativamente consistente.

Nas famílias com agregado natural (F1 e F2), os fatores de correção  $\alpha_E$  -DIC se mantiveram em conformidade com as expectativas estabelecidas pela NBR 6118:2024. Em contrapartida, os fatores observados nas famílias com agregado sintético (F3 e F4) sugerem uma menor rigidez do concreto para concretos de mesma

classe de resistência, que, segundo a NBR 6118:2024, influencia diretamente a fluênci a do material. Tais características podem comprometer o desempenho estrutural e devem ser cuidadosamente consideradas no projeto.

Embora o número de amostras seja limitado, os resultados fornecem uma estimativa promissora de que os concretos com agregado sintético atingem níveis de resistência compatíveis com funções estruturais, evidenciando o potencial deste novo material. A análise da rigidez, inclusive, aponta para um desempenho superior ao de agregados tradicionais como o seixo rolado, amplamente utilizado no Pará. Como referência, Ribeiro (2022) registrou um fator de correção de 0,7 para o seixo rolado, enquanto o agregado sintético deste estudo apresentou valores entre 0,86 e 0,90, o que o qualifica como um bom indicativo para aplicação em construções de pequeno e médio porte.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÃO SOBRE OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS EXPERIMENTAIS PARA A TÉCNICA DIC

Neste tópico apresenta uma síntese dos melhores parâmetros obtidos na primeira etapa experimental, destacando suas implicações para a precisão das medições realizadas.

- A análise dos dados demonstrou que os intervalos de medição adotados influenciam diretamente a precisão dos ensaios. Foram utilizados intervalos de 10 a 60% do  $F_{ck}$  para o cálculo do módulo de elasticidade e de 10 a 50% para a determinação do coeficiente de Poisson, proporcionando resultados coerentes com os valores de referência e apresentando baixos desvios padrão. Além disso, outros intervalos identificados também demonstraram resultados satisfatórios.
- A escolha adequada das combinações *subset/step* foi determinante para a qualidade dos resultados obtidos. Nos corpos de prova com pintura pela técnica A, onde os pontos foram aplicados com um pincel marcador, a configuração 49/16 apresentou o melhor desempenho na determinação tanto do módulo de elasticidade quanto do coeficiente de Poisson. Isso evidencia que, para *speckles* formados por pontos maiores, malhas de *subset* menores geram maiores ruído e dispersão nos resultados.
- Na técnica de pintura B, caracterizada pela aspersão de spray, a combinação 19/6 foi mais eficiente para a determinação do módulo de elasticidade, enquanto a combinação 49/10 apresentou melhores resultados para o cálculo do coeficiente de Poisson. Isso indica que, para *speckles* menores e mais densos, malhas de *subset* refinadas são mais adequadas para determinar o módulo de elasticidade. Por outro lado, para o coeficiente de Poisson, malhas maiores parecem favorecer a avaliação de um número maior de deformações por *subset*, reduzindo a

dispersão decorrente da baixa magnitude das deformações e aumentando a precisão média das medições.

- Ao comparar as duas técnicas de pintura, observou-se que a técnica B, que apresenta maior densidade de pontos, permitiu a medição de deformações mais detalhadas. Essa técnica conseguiu captar regiões específicas, como áreas com concentração ou ausência de agregados, que influenciam significativamente as deformações medidas, mas poderiam não ser detectadas pela técnica A, que utiliza pontos maiores e mais espaçados. Portanto, a técnica B mostrou-se mais eficaz para medições precisas tanto do módulo de elasticidade quanto do coeficiente de Poisson.
- Ao analisar a variação da região de interesse, verificou-se que regiões com maior amplitude resultaram em medições mais eficazes das deformações. Isso ocorre porque, nas bordas da ROI, o aumento dos erros é capturado pela soma dos quadrados dos erros (SQE), métrica altamente sensível a pontos que se afastam consideravelmente do valor de referência. (Faveri, 2021).

## 5.2 CONCLUSÃO SOBRE AS CARACTERIZAÇÕES

As conclusões a seguir apresentam os resultados obtidos na segunda etapa experimental, destacando a influência do tipo de agregado nos ensaios realizados e ressaltando a relação entre as técnicas de medições.

- Ao analisar os resultados de resistência à compressão das famílias 1 e 2, foram observados valores de 25,61 MPa e 18,48 MPa, respectivamente. Embora o resultado da família 2 seja inferior ao da família 1, ambos contribuíram para o cálculo dos demais parâmetros.
- Na análise dos ensaios de resistência à compressão, a família 3, embora composta por agregado sintético com um processo de fabricação pouco definido, apresentou resultados significativos, com resistência média de 32,16 MPa. Já a família 4 exibiu grande dispersão devido a problemas

na moldagem dos CPs, entretanto, alguns espécimes atingiram uma resistência de 24,86 MPa, evidenciando o potencial deste agregado para elementos estruturais, visto que a NBR 6118:2024 classifica concretos com resistência superior a 20 MPa como estruturais.

- Nos ensaios de módulo de elasticidade com agregado natural, a família 1, apresentou os valores de 29,76 GPa e 24,30 GPa, para as medições DIC 2D e CG, respectivamente. Na família 2, os resultados medidos foram 24,38 GPa, 21,40 GPa e 20,67 GPa, respectivamente para os métodos DIC 2D, DIC 3D e CG. Os resultados da família 2 foram inferiores ao da família 1, porém próximos relativamente ao  $F_{ck}$ .
- Nos ensaios de módulo de elasticidade com agregado sintético, na Família 3 o DIC 3D mediu 23,91 GPa. Na Família 4, os ensaios registraram 20,57 GPa pelo DIC 2D, 26,97 GPa pelo DIC 3D e 23,73 GPa pelo CG. Tais resultados, embora baseados em poucas amostras, sugerem que o agregado sintético gera concretos com menor rigidez quando comparados a concretos com brita granítica de mesma classe de resistência.
- Ao analisar os fatores de correção  $\alpha_E$ , as famílias 1 e 2 (concreto com agregado natural, brita granítica) serviram de referência para a calibração dos parâmetros da técnica DIC. Os resultados obtidos foram bastante próximos aos valores analíticos indicados pela NBR 6118:2024, que estabelece um fator igual a 1 para este agregado. Na família 1, composta por um único espécime, o valor medido no sistema DIC 2D foi de 1,05. Já os espécimes da família 2, avaliados nos sistemas DIC 2D e DIC 3D, apresentaram, respectivamente, os valores de 1,00 e 0,93. Em comparação com as medições realizadas por CG, os valores divergiram cerca de 1% em ambas as famílias e ficaram 13% abaixo do valor normativo.
- Quanto às famílias 3 e 4 (concreto com agregado sintético de resíduo de bauxita), o fator de correção foi de 0,78 na família 3. Já na família 4, os valores foram 0,86 pelo DIC 2D, 0,90 pelo CG e 1,15 pelo SG. Destaca-se a similaridade entre os resultados do DIC 2D e do CG na família 4, com divergências não superiores a 5%, enquanto o SG apresentou valores até 30% superiores aos demais.

- Os valores obtidos para o coeficiente de Poisson ( $n$ ) apresentaram regularidade e coerência com a literatura existente, variando entre 0,12 e 0,20 nas quatro famílias analisadas, não sendo observada variação significativa deste parâmetro ao mudar o tipo de agregado. Para o único espécime testado com SG, os resultados foram similares à técnica DIC 2D, com valores de 0,16 (SG) e 0,18 (DIC-2D), evidenciando a boa precisão da técnica DIC 2D na medição do coeficiente de Poisson.
- Apesar do número reduzido de amostras, pode se concluir que o agregado sintético avaliado demonstrou bom potencial comparativamente a outros agregados amplamente utilizados, como o seixo rolado, muito empregado no Pará. Ribeiro (2022), ao caracterizar o seixo rolado, obteve valores de rigidez inferiores aos encontrados neste estudo com o agregado sintético, relativamente ao  $F_{ck}$ , com fator de correção para o módulo de elasticidade igual a 0,7, enquanto o agregado sintético apresentou valore de 0,86. Destaca-se que melhorias nos processos de fabricação podem aprimorar ainda mais as propriedades do agregado sintético. Neste sentido, a técnica DIC pode ser muito útil na otimização de parâmetros de fabricação dos agregados, pois permite uma análise mais completa do comportamento do material quando comparada com técnicas tradicionais.

### 5.3 SUGESTÕES

Com base nos resultados e nas limitações identificadas, apresentam-se sugestões para trabalhos futuros que visam aprofundar a caracterização do concreto com agregado sintético e aprimorar os métodos de ensaio. Tais propostas envolvem a otimização da técnica DIC, a exploração de novas metodologias analíticas e a avaliação de outros resíduos industriais como substitutos dos agregados convencionais, contribuindo para o avanço de alternativas sustentáveis na construção civil.

Desta forma, apresentam-se a seguir algumas propostas de trabalhos que visem a continuidade no estudo desse material:

- Investigar a aplicação da técnica DIC em ensaios sob condições de carregamento variáveis e em escala real, ampliando a análise para diferentes tipos de estruturas, utilizando o concreto com agregado sintético.
- Realizar um estudo com uma amostragem maior para possibilitar uma comparação mais detalhada dos parâmetros abordados, ampliando a robustez e a confiabilidade dos resultados.
- Explorar o uso de softwares de código aberto para a análise DIC, possibilitando a comparação de resultados e a redução de custos na implementação da técnica.
- Avaliar o desempenho de outros resíduos industriais como substitutos parciais dos agregados tradicionais, visando ampliar o leque de alternativas sustentáveis para a construção civil.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2024

ABNT, **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT, **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021

ALMEIDA, L. C. **Notas de aula da disciplina Estruturas IV – Concreto armado**. Universidade Estadual de Campinas, campinas, 2002.

ANDRADE, W. **Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo (Ensaios e Propriedades)**. Editora PINI, São Paulo, 1997.

ARAUJO. S. da S. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, 2011.

BESHR, H.; ALMUSALLAM, A. A.; MASLEHUDDIN, M. **Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete**. Construction and Building Materials, v. 17, n. 2, p. 97-103, 2003.

BHOSALE, A.; PRAKASH, S. S. **Crack Propagation Analysis of Synthetic vs. Steel vs. Hybrid Fibre-Reinforced Concrete Beams Using Digital Image Correlation Technique**. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 14, p. 939-957, 2020.

BU, J.; CHEN, X.; HU, L.; YANG, H.; LIU, S. **Experimental Study on Crack Propagation of Concrete Under Various Loading Rates with Digital Image Correlation Method**. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 14(3), p. 375-399 2020.

CONTENCO. Contenco – Website oficial. Disponível em: <https://www.contenco.com/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

CORRELATION SOLUTIONS. Manual da Correlation Solutions, 2020.

DE DOMENICO, D.; QUATTROCCHI, A.; ALIZZIO, D.; MONTANINI, R.; URSO, S.; RICCIARDI, G.; RECUPERO, A. **Experimental Characterization of the FRCM-Concrete Interface Bond Behavior Assisted by Digital Image Correlation**. Sensors, 21(4), p. 11542, 021.

DIRECTINDUSTRY. DirectIndustry – Website oficial. Disponível em: <https://www.directindustry.com/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

FAVERI, G. **Calibração em sistemas abertos de correlação de imagem digital (DIC) por superfícies polinomiais interpoladas.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2021.

FENG, Z.; CHEN, X.; FENG, L.; NING, Y.; SHI, Z. **Uniaxial compression failure characteristics of 60-year-old bridge concrete under different loading rates.** Case Studies in Construction Materials, v. 17, p. e01276, 2022.

FERNANDES, R. D. S.; DE LIMA, J. C. L.; DE AGUIAR NETO, S. A.; DA CUNHA, R. R.; DA SILVA, K. R. M.; DE REZENDE FARIAS, C. L.; FARIAS, M. M.; SANTOS, E. S.; DE MIRANDA MORAES, C.; DE SOUSA, E. O.; DUARTE, L. S.; DE CARVALHO, A. S.; DE SOUSA, A. B. T.; PICANÇO, M. D. S.; MACEDO, A. N. **Use Of Mining Waste For The Production Of Coarse Aggregate For Concrete Manufacturing.** IOSR Journal of Business and Management, v. 27, p. 09-22, 2025.

FERRAZ, D. H. S. **Aplicação da técnica DIC a espécimes com diferentes formas, materiais e gradientes de deformação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

FOWLER HIGH PRECISION. Fowler High Precision – Website oficial. Disponível em: <https://www.fowlerprecision.com/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing.** 4<sup>a</sup> ed. Upper Saddle River: Pearson, 2018.

HADIGHEH, S. A.; MCDOUGALL, R.; WISEMAN, C.; REID, L. **Evaluation of composite action in cross laminated timber-concrete composite beams with CFRP reinforcing bar and plate connectors using Digital Image Correlation (DIC).** Engineering Structures journal, v. 232, p. 111791, 2021.

HONEYWELL. Honeywell – Website oficial. Disponível em: <https://www.honeywell.com/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

INTERMETRIC. Intermetric – Website oficial. Disponível em: <https://www.intermetric.com/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

LEPAGE, W. S.; SHAW, J. A.; DALY, S. H. **Optimum Paint Sequence for Speckle Patterns in Digital Image Correlation.** Experimental Techniques, v. 41, n. 5, p. 517-526, 2017.

LI, H. W.; HOU, X. L.; YAN, Y. F. **Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete.** Cement and Concrete Research, v. 39, n. 3, p. 54-60, 2009.

LI, X.; CHEN, X.; JIVKOV, A. P.; HU, J. **Investigation of tensile fracture of rubberized self-compacting concrete by acoustic emission and digital image correlation.** Structural Control Health Monitoring, v. 28, p. e2744, 2021.

LINGGA, B. A.; APEL, D. B.; SPEHRI M.; PU, Y. **Assessment of digital image correlation method in determining large scale cemented rockfill strains.** International Journal of Mining Science and Technology, v. 29, p. 771-776, 2018.

MANE, B. V.; PATIL, A. N. **An experimental study of the relationship between modulus of elasticity, Poisson's ratio, and the mechanical properties of high-performance concrete.** Discover Civil Engineering, v. 1, n. 4, 2024.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, J. M. Paulo. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MITUTOYO. Mitutoyo – Website oficial. Disponível em: <https://www.mitutoyo.com/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

MIURA, T.; SATO, K.; NAKAMURA, H. **The role of microcracking on the compressive strength and stiffness of cracked concrete with different crack widths and angles evaluated by DIC.** Cement and Concrete Composites journal, v. 114, p. 103768, 2020.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007

MOREIRAS, S. T. F.; ARAÚJO, J. R. S. **Ensino das etapas de produção de concreto: metodologia de aprendizagem baseada em problemas (ABP).** Revista de ensino de engenharia. v. 42, p. 212-222, 2023.

MRÓZ, K.; TEKIELI, M.; HAGER, I. **Feasibility Study of Digital Image Correlation in Determining Strains in Concrete Exposed to Fire.** Materials, v. 13(11), p. 2516, 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016

PAN, B.; QIAN, K.; XIE, H.; ASUNDI, A. **Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review.** Measurement Science and Technology, v. 20, n. 6, p. 062001, 2009.

PETROONLINE. Petroonline – Website oficial. Disponível em: <https://www.petroonline.com.br/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

POUR, A. F.; NGUYEN, G. D.; VINCENT, T.; OZBAKKALOGLU, T. **Investigation of the compressive behavior and failure modes of unconfined and FRP-confined concrete using digital image correlation.** Composite Structures journal, v. 252, p. 112642, 2020.

POUR, A. F.; VERMA, R. K.; NGUYEN, G. D.; BUI, H. H. **Analysis of transition from diffuse to localized failure in sandstone and concrete using Digital Image correlation.** Engineering Fracture Mechanics journal, v. 267, p. 108465 2022.

REU, P. **Digital image correlation for measurement of strain fields.** Experimental Techniques, v. 38, n. 10, p. 115-123, 2014.

RERKRATN, A.; LUANGPOL, A.; PETCHMANEELUMKA, W.; RIEWRUJA, V. **Position signal detector for linear variable differential transformer.** Energy Reports, v. 6, p. 603-607, 2020.

RIBEIRO, M. C. D. **Agregado sintético de resíduo de bauxita para produção de concreto.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

RODRIGUES, L. D. **Aplicação da técnica DIC a espécimes com diferentes formas, materiais e gradientes de deformação.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, D. H. **Influência da Sílica e Temperatura nas Propriedades Físicas dos Agregados Sintéticos Produzidos com Resíduos do Processo Bayer.** Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

SHARMA, G.; SHARMA, S.; SHARMA, S. K. **Fracture monitoring of steel and GFRP reinforced concrete beams using acoustic emission and digital image correlation techniques.** Structural Concrete, v. 22, p. 1962-1976, 2021.

SHIH, M.; SUNG, W. **Application of digital image correlation method for analysing crack variation of reinforced concrete beams.** Sadhana, v. 38, p. 723– 741, 2013.

SINT TECHNOLOGY. Sint Technology – Website oficial. Disponível em: <http://www.sinttechnology.com/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

SOUZA, P. H. R. Et al. **Utilização da lama vermelha para Produção de agregado sintético.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 03, Vol. 06, pp. 30-43. 2019. ISSN: 2448-0959.

SUTTON, M. A. **Digital image correlation for shape and deformation measurements.** 1. ed. Springer Verlag: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, 2009.

SZEWCZYK, P.; KUDYBA, P. **Effectiveness of selected strain and displacement measurement techniques in civil engineering.** Buildings v. 12, p. 172, 2022.

THANAKUNA, P.; KASIVITAMNUAYB, J.; SINGHATANADGIDC, P. **Optimum Design of a Ring-Shaped Clip Gauge.** Energy Reports, v. 6, p. 603-607, 2020.

XIANGQIAN, F.; SHENGTAO, L.; XUDING, C.; SAISAI, L.; YUZHU, G. **Fracture behaviour analysis of the full-graded concrete based on digital image correlation**

**and acoustic emission technique.** Fatigue e Fracture of Engineering Materials e Structures, v. 43, p. 1274-1289, 2020.

WANG, Y.; HU, S.; HE, Z. **Mechanical and fracture properties of geopolymmer concrete with basalt fiber using digital image correlation.** Theoretical and Applied Fracture Mechanics, v.112, p. 102909, 2021.

ZDANOWICZ, K.; MARX, S. **Technische Flexural behaviour of thin textile reinforced concrete slabs enhanced by chemical prestressing.** Engineering Structures, V. 256, p. 113946, 2022.

## **APÊNDICE A – RESULTADOS E ANÁLISES DO ENSAIO DE VALIDAÇÃO.**

### **A.1 ENSAIO ALUMINIO**

O corpo de prova de alumínio (CPA\_01) foi ensaiado no laboratório de ecocompósitos, da faculdade de engenharia mecânica da UFPA, numa prensa de carga controlada de forma contínua e ininterrupta e se estendeu até uma carga de 4.500 newtons, utilizando o sistema 2D.

O CPA\_01 apresenta as dimensões 100x20x5 mm e conta com um entalhe central, reduzindo sua seção transversal para 10x5 mm. Para este ensaio, optou-se pelo Técnica B de pintura, visto que a região estudada apresenta dimensões reduzidas e o uso do spray se mostrou ideal ao gerar um padrão de pintura composto por pequenos pontos. A Figura A 1 ilustra o espécime após a aplicação da pintura.

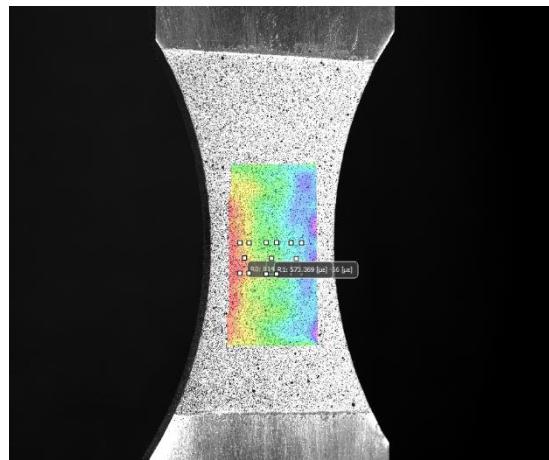
Figura A 1 – Espécime de alumínio.



Fonte: Autor (2025).

Além disso, foram definidas três áreas de medição R0, R1 e R2 em torno do entalhe central, sendo a área R1 posicionada exatamente no lado oposto ao extensômetro, o que permitiu a captura precisa das variações mecânicas durante o teste, conforme ilustrado na Figura A 2.

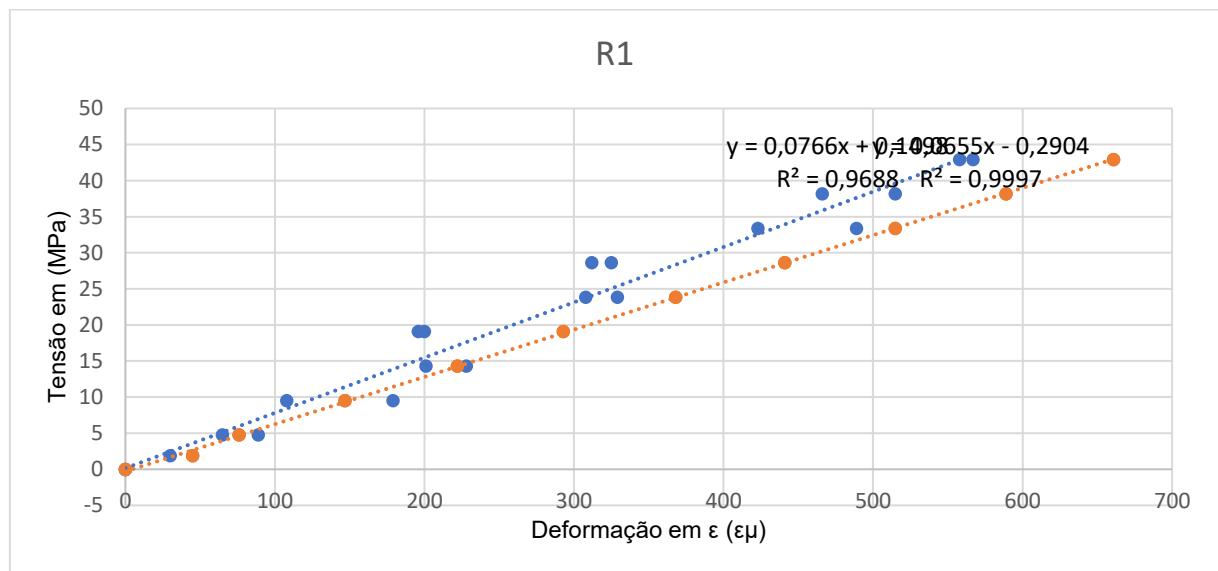
Figura A 2 – Campo global de deformação CPA\_01.



Fonte: Autor (2025).

O Gráfico A 1 representa as deformações computadas para o CPA\_01, os valores em azul correspondem aos valores resultantes do DIC e os valores em laranja, representam aos dados do extensômetro.

Gráfico A 1 – Tensão x deformação  $\epsilon_{yy}$  CPS\_03.



Fonte: Autor (2025).

Ao ensaiar o corpo de prova de alumínio, uma excentricidade entre a garra de atracação da prensa com o espécime foi registrada. Devido a esses fatores, gerou-se um momento em z, sendo este o eixo de profundidade da peça, ocasionando em um gradiente de cores identificado na Figura A 2. Por isso, observou-se uma imprecisão ao analisar as tensões reais nas regiões R0 e R2.

A Tabela A 1 mostra o módulo de elasticidade junto com o coeficiente de Poisson para as três regiões analisadas no CPA\_01.

Tabela A 1 – Relação do módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do CPA\_01.

Região	CPA_01	
	Módulo de elasticidade	Poisson
R0	69,1	0,33
R1	76,6	0,27
R2	89,6	N/A
SG	65,5	N/A

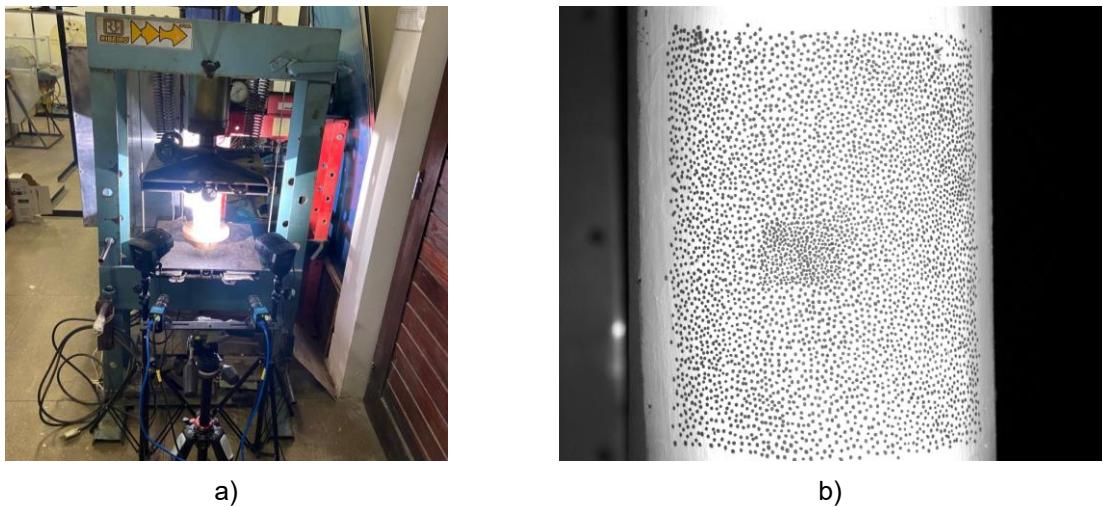
Fonte: Autor (2025).

A divergência encontrada entre os resultados de R1 e do extensômetro que representam a mesma região de análise, porém em faces opostas, pode ser explicada por uma imperfeição no corpo de prova, no qual ele não possuiu uma simetria entre seus eixos, provocando tensões não prescritas.

## A.2 ENSAIO CONCRETO

O corpo de prova de concreto de referência (CPR\_01), foi ensaiado no mesmo laboratório, que o corpo de prova de alumínio, foi realizado um ensaio de compressão axial no corpo de prova de concreto CPC\_01, um cilindro de 10x 20 cm, com o objetivo de avaliar a eficiência do sistema de medição em CPs cilíndricos de concreto. Para o experimento, utilizando o mesmo *setup* exposto no tópico 3.3.3, com o sistema 3D, conforme ilustrado na Figura A 3 a). Para a pintura do CP, foi utilizado a técnica de pintura A, conforme a Figura A 3 b).

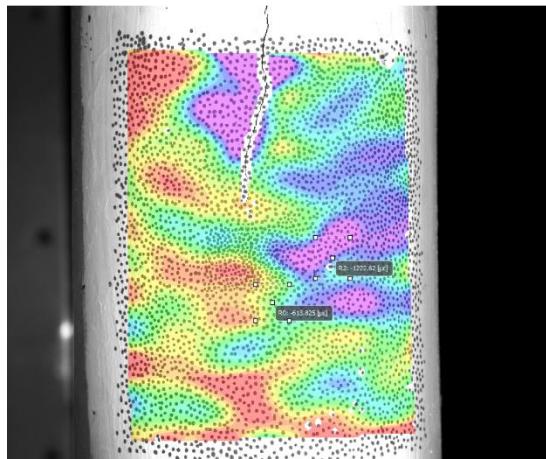
Figura A 3 – a) Setup do ensaio e b) espécime de concreto.



Fonte: Autor (2025).

A aplicação da carga no CPC\_01 foi conduzida em uma prensa hidráulica de incremento mecânico de carga, de 5 em 5 MPa, registrando-se um par de imagens a cada etapa, até que o corpo de prova atingisse o rompimento a 24,2 MPa toneladas. Para a análise das deformações, foi observado a média das tensões do CP, conforme ilustrado na Figura A 4.

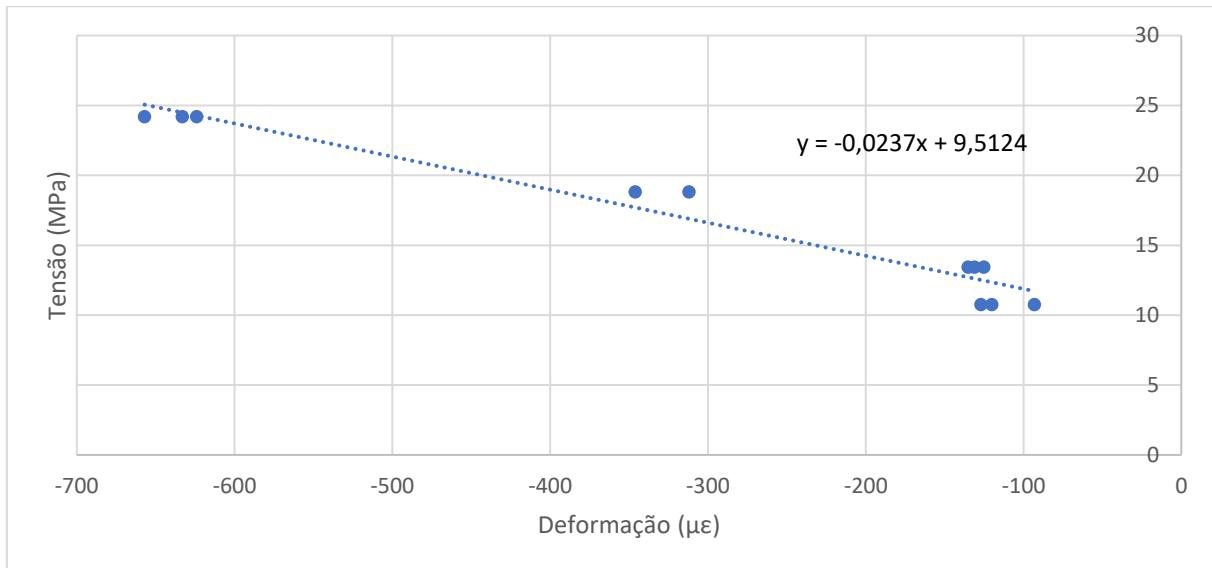
Figura A 4 – Campo global de deformação CPR\_01.



Fonte: Autor (2025).

O módulo de elasticidade apresentou um comportamento satisfatório para a média das deformações, conforme demonstrado no Gráfico A 2.

Gráfico A 2 – Tensão x Deformação CPR\_01 (29/9).



Fonte: Autor (2025).

Observando o Gráfico A 2, nota-se que as deformações evoluem de forma linear com o aumento das cargas aplicadas, utilizando uma malha de *subset* 29x29 com *step* de 9. Por meio de uma regressão linear do gráfico, obteve-se a equação da reta, cuja inclinação representa o módulo de elasticidade do concreto, medido em TPa.

Assim, o valor experimental determinado foi de 0,0237 TPa (23,7 MPa), aproximadamente 5% superior ao valor analítico previsto pela NBR 6118:2024 (22,50 MPa), considerando um concreto com brita granítica como agregado graúdo.

Entretanto, as deformações  $\varepsilon_{xx}$  obtidas neste ensaio não foram satisfatórias para a análise do coeficiente de Poisson.

Em conclusão, considerando os dois ensaios apresentados neste anexo, observou-se que o sistema de aquisição e calibração proposto pela equipe NAAT oferece resultados confiáveis para ensaios em concreto e outros materiais. Os dados indicam uma boa precisão e robustez no processo de cálculo das propriedades dos materiais, evidenciando o potencial do método para aplicação em diferentes contextos experimentais.

## APÊNDICE B – CONJUNTO DE TABELAS DE AUXÍLIO

### B.1 TABELAS DE PARES DE STEP/SUBSET

As tabelas apresentadas a seguir correspondem às utilizadas na segunda etapa deste trabalho, enquanto as demais estão disponíveis sob solicitação.

Tabela B 1 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F1\_1 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-30,9 GPa -9%	-32,0 GPa -13%	-33,8 GPa -19%	-29,8 GPa -5%	-58,9 GPa -108%	-48,2 GPa -70%	-39,4 GPa -39%
Fck (20%)	-24,5 GPa 14%	-27,5 GPa 3%	-31,2 GPa -10%	-29,9 GPa -5%	-62,5 GPa -121%	-48,6 GPa -72%	-38,6 GPa -36%
Fck (30%)		-37,1 GPa -31%	-38,2 GPa -35%	-33,1 GPa -17%	-136 GPa -382%	-67,1 GPa -137%	-44,7 GPa -58%
Fck (40%)			-38,8 GPa -37%	-32,2 GPa -14%	-289 GPa -921%	-76,4 GPa -169%	-45,9 GPa -62%
Fck (50%)				-26,1 GPa 8%	77,7 GPa 374%	-142 GPa -403%	-49,3 GPa -74%
Fck (60%)					14,3 GPa 151%	106,0 GPa 474%	-72,7 GPa -157%
NBR (DIC)		-37,4 GPa -32%		Rregressão linear (DIC)		-30,3 GPa -7%	

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 2 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F1\_1 – 49/10).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	152,9 GPa 19%	112,6 GPa 25%	160,1 GPa 18%	125,1 GPa 23%	164,2 GPa 17%	126,5 GPa 22%	102,6 GPa 28%
Fck (20%)	-3634 GPa -1%	182,3 GPa 16%	294,2 GPa 10%	160,7 GPa 18%	236,5 GPa 12%	150,4 GPa 19%	112,1 GPa 25%
Fck (30%)		56,3 GPa 50%	169,9 GPa 17%	109,0 GPa 26%	172,2 GPa 16%	116,5 GPa 24%	90,0 GPa 31%
Fck (40%)			2781 GPa 1%	146,0 GPa 19%	289,3 GPa 10%	138,9 GPa 20%	97,3 GPa 29%
Fck (50%)				63,0 GPa 45%	174,8 GPa 16%	95,5 GPa 30%	71,7 GPa 40%
Fck (60%)					-180 GPa -16%	130,9 GPa 22%	75,5 GPa 38%
NBR (DIC)		13,6 GPa 208%			Regressão linear (DIC)		71,4 GPa 40%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 3 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_1 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-24,4 GPa -1%	-12,9 GPa 46%	-25,8 GPa -7%	-23,5 GPa 2%	-15,0 GPa 38%	-15,0 GPa 38%	-15,0 GPa 38%
Fck (20%)	-21,9 GPa 9%	-10,8 GPa 55%	-24,7 GPa -3%	-22,4 GPa 7%	-13,9 GPa 42%	-13,9 GPa 42%	-13,9 GPa 42%
Fck (30%)		-4,0 GPa 83%	-27,9 GPa -16%	-22,7 GPa 5%	-11,8 GPa 51%	-11,8 GPa 51%	-11,8 GPa 51%
Fck (40%)			26,1 GPa 208%	276,2 GPa 1248%	-17,9 GPa 25%	-17,9 GPa 25%	-17,9 GPa 25%
Fck (50%)				-15,2 GPa 37%	-6,5 GPa 73%	-6,5 GPa 73%	-6,5 GPa 73%
Fck (60%)					-3,9 GPa 84%	-3,9 GPa 84%	-3,9 GPa 84%
NBR (DIC)		-24,9 GPa -4%			Regressão linear (DIC)		-16,4 GPa 32%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 4 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_1 – 49/10).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	95,0 GPa 25%	-37,8 GPa -64%	265,3 GPa 9%	57,2 GPa 42%	36,4 GPa 66%	36,4 GPa 66%	36,4 GPa 66%
Fck (20%)	70,6 GPa 34%	-27,8 GPa -87%	244,5 GPa 10%	49,9 GPa 48%	32,1 GPa 75%	32,1 GPa 75%	32,1 GPa 75%
Fck (30%)		-5,0 GPa -483%	-222 GPa -11%	42,2 GPa 57%	25,3 GPa 95%	25,3 GPa 95%	25,3 GPa 95%
Fck (40%)			15,6 GPa 154%	13,2 GPa 183%	12,1 GPa 199%	12,1 GPa 199%	12,1 GPa 199%
Fck (50%)				10,0 GPa 240%	9,8 GPa 246%	9,8 GPa 246%	9,8 GPa 246%
Fck (60%)					9,5 GPa 253%	9,5 GPa 253%	9,5 GPa 253%
NBR (DIC)		135,7 GPa 18%			Regressão linear (DIC)		25,9 GPa 93%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 5 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_2 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-42,7 GPa -72%	-43,0 GPa -73%	-31,9 GPa -28%	-25,3 GPa -2%	-30,3 GPa -22%	-27,6 GPa -11%	-23,5 GPa 5%
Fck (20%)	-31,8 GPa -28%	-36,1 GPa -45%	-27,1 GPa -9%	-23,7 GPa 5%	-27,0 GPa -9%	-25,0 GPa -1%	-21,3 GPa 14%
Fck (30%)		-43,9 GPa -76%	-25,1 GPa -1%	-21,5 GPa 14%	-25,9 GPa -4%	-24,0 GPa 4%	-20,1 GPa 19%
Fck (40%)			-19,6 GPa 21%	-17,6 GPa 29%	-23,3 GPa 6%	-22,0 GPa 11%	-18,5 GPa 26%
Fck (50%)				-14,6 GPa 42%	-26,9 GPa -8%	-23,2 GPa 7%	-18,1 GPa 27%
Fck (60%)					-50,1 GPa -102%	-27,4 GPa -10%	-19,0 GPa 23%
NBR (DIC)		-63,3 GPa -154%			Regressão linear (DIC)		-28,6 GPa -15%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 6 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_2 – 49/10).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	125,7 GPa 20%	107,1 GPa 23%	118,3 GPa 21%	112,9 GPa 22%	96,4 GPa 26%	65,1 GPa 38%	51,7 GPa 48%
Fck (20%)	164,0 GPa 15%	109,9 GPa 23%	125,1 GPa 20%	116,3 GPa 21%	95,0 GPa 26%	61,1 GPa 41%	47,8 GPa 52%
Fck (30%)		76,9 GPa 32%	111,4 GPa 22%	104,2 GPa 24%	85,0 GPa 29%	54,0 GPa 46%	42,2 GPa 59%
Fck (40%)			158,6 GPa 16%	123,7 GPa 20%	87,6 GPa 28%	51,1 GPa 49%	39,3 GPa 63%
Fck (50%)				85,9 GPa 29%	66,6 GPa 37%	40,1 GPa 62%	31,4 GPa 79%
Fck (60%)					59,4 GPa 42%	35,4 GPa 70%	27,9 GPa 89%
NBR (DIC)		264,7 GPa 9%			Rregressão linear (DIC)		17,5 GPa 142%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 7 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_3 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-22,1 GPa 5%	-18,2 GPa 22%	-13,9 GPa 40%	-11,4 GPa 51%	-6,5 GPa 72%	-6,3 GPa 73%	-5,1 GPa 78%
Fck (20%)	-20,4 GPa 12%	-15,2 GPa 35%	-11,5 GPa 51%	-9,4 GPa 59%	-5,2 GPa 78%	-5,3 GPa 77%	-4,4 GPa 81%
Fck (30%)		-12,2 GPa 48%	-9,9 GPa 57%	-8,2 GPa 65%	-4,5 GPa 80%	-4,7 GPa 80%	-4,0 GPa 83%
Fck (40%)			-8,9 GPa 62%	-7,3 GPa 69%	-3,9 GPa 83%	-4,2 GPa 82%	-3,6 GPa 84%
Fck (50%)				-5,4 GPa 77%	-2,7 GPa 88%	-3,4 GPa 85%	-3,1 GPa 87%
Fck (60%)					-2,0 GPa 92%	-3,1 GPa 87%	-2,8 GPa 88%
NBR (DIC)		-20,5 GPa 12%			Rregressão linear (DIC)		-4,8 GPa 79%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 8 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_3 – 49/10).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	80,9 GPa 29%	92,9 GPa 25%	64,5 GPa 36%	46,5 GPa 50%	14,2 GPa 164%	12,0 GPa 194%	5,5 GPa 424%
Fck (20%)	-10433 GPa 0%	315,1 GPa 7%	72,6 GPa 32%	44,2 GPa 53%	11,4 GPa 203%	10,0 GPa 233%	4,6 GPa 504%
Fck (30%)		159,0 GPa 15%	53,1 GPa 44%	34,7 GPa 67%	9,5 GPa 245%	8,7 GPa 268%	4,1 GPa 565%
Fck (40%)			37,6 GPa 62%	26,4 GPa 88%	7,6 GPa 307%	7,4 GPa 316%	3,6 GPa 645%
Fck (50%)				16,9 GPa 138%	4,7 GPa 499%	5,4 GPa 430%	2,8 GPa 826%
Fck (60%)					3,1 GPa 759%	4,5 GPa 521%	2,4 GPa 963%
NBR (DIC)		155,7 GPa 15%			Regressão linear (DIC)		2,2 GPa 1053%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 9 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_4 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-20,7 GPa 14%	-32,0 GPa -33%	-38,1 GPa -58%	-22,4 GPa 7%	-22,4 GPa 7%	-22,4 GPa 7%	-22,4 GPa 7%
Fck (20%)	-14,2 GPa 41%	-24,4 GPa -2%	-31,9 GPa -33%	-30,6 GPa -27%	-19,5 GPa 19%	-19,5 GPa 19%	-19,5 GPa 19%
Fck (30%)		38,8 GPa 261%	-1357 GPa -5540%	-91,2 GPa -279%	-23,6 GPa 2%	-23,6 GPa 2%	-23,6 GPa 2%
Fck (40%)			-67,7 GPa -181%	-42,6 GPa -77%	-16,7 GPa 31%	-16,7 GPa 31%	-16,7 GPa 31%
Fck (50%)				-25,7 GPa -7%	-9,8 GPa 59%	-9,8 GPa 59%	-9,8 GPa 59%
Fck (60%)					-5,8 GPa 76%	-5,8 GPa 76%	-5,8 GPa 76%
NBR (DIC)		-29,9 GPa -24%			Regressão linear (DIC)		-30,3 GPa -26%

Fonte: Autor (2025).

**Tabela B 10 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F2\_4 – 49/10).**

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	89,4 GPa 27%	195,0 GPa 12%	176,3 GPa 14%	107,4 GPa 22%	100,7 GPa 24%	100,7 GPa 24%	100,7 GPa 24%
Fck (20%)	103,0 GPa 23%	479,9 GPa 5%	259,3 GPa 9%	118,5 GPa 20%	107,9 GPa 22%	107,9 GPa 22%	107,9 GPa 22%
Fck (30%)		-65,8 GPa -37%	-1360 GPa -2%	129,7 GPa 19%	110,3 GPa 22%	110,3 GPa 22%	110,3 GPa 22%
Fck (40%)			144,5 GPa 17%	64,6 GPa 37%	65,4 GPa 37%	65,4 GPa 37%	65,4 GPa 37%
Fck (50%)				32,4 GPa 74%	43,2 GPa 56%	43,2 GPa 56%	43,2 GPa 56%
Fck (60%)					68,1 GPa 35%	68,1 GPa 35%	68,1 GPa 35%
NBR (DIC)		99,2 GPa 24%			Regressão linear (DIC)		105,4 GPa 23%

Fonte: Autor (2025).

**Tabela B 11 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F3\_1 – 49/16).**

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-15,8 GPa 20%	-16,0 GPa 19%	-17,8 GPa 10%	-17,9 GPa 10%	-18,8 GPa 5%	-20,9 GPa -6%	-20,1 GPa -1%
Fck (20%)	-18,7 GPa 6%	-17,4 GPa 12%	-19,7 GPa 0%	-19,3 GPa 2%	-20,3 GPa -3%	-22,9 GPa -16%	-21,5 GPa -8%
Fck (30%)		-16,3 GPa 18%	-20,3 GPa -2%	-19,5 GPa 1%	-20,8 GPa -5%	-24,0 GPa -21%	-22,0 GPa -11%
Fck (40%)			-26,9 GPa -36%	-21,7 GPa -10%	-22,9 GPa -16%	-27,2 GPa -37%	-23,7 GPa -20%
Fck (50%)				-18,2 GPa 8%	-21,3 GPa -8%	-27,3 GPa -38%	-23,0 GPa -16%
Fck (60%)					-25,6 GPa -29%	-36,3 GPa -83%	-25,2 GPa -27%
NBR (DIC)		-15,8 GPa 20%			Regressão linear (DIC)		-20,9 GPa -5%

Fonte: Autor (2025).

**Tabela B 12 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F3\_1 – 49/16).**

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	133,4 GPa 15%	-130 GPa -15%	-129 GPa -15%	78,3 GPa 25%	-916 GPa -2%	162,5 GPa 12%	149,5 GPa 13%
Fck (20%)	21,3 GPa 93%	223,3 GPa 9%	3092 GPa 1%	41,8 GPa 47%	197,0 GPa 10%	80,0 GPa 25%	81,9 GPa 24%
Fck (30%)		-26,3 GPa -75%	-43,5 GPa -45%	61,4 GPa 32%	-185 GPa -11%	178,1 GPa 11%	155,7 GPa 13%
Fck (40%)			-125 GPa -16%	23,0 GPa 86%	182,7 GPa 11%	60,6 GPa 33%	65,4 GPa 30%
Fck (50%)				10,5 GPa 188%	81,9 GPa 24%	40,5 GPa 49%	47,3 GPa 42%
Fck (60%)					-14,2 GPa -139%	-96,2 GPa -21%	-290 GPa -7%
NBR (DIC)		133,4 GPa 15%			Regressão linear (DIC)		48,6 GPa 41%

Fonte: Autor (2025).

**Tabela B 13 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F3\_2 – 49/16).**

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-30,0 GPa 8%	-34,3 GPa -6%	-32,2 GPa 1%	-33,1 GPa -2%	-27,3 GPa 16%	-26,7 GPa 18%	-24,4 GPa 25%
Fck (20%)	-26,9 GPa 17%	-34,6 GPa -6%	-31,5 GPa 3%	-32,9 GPa -1%	-26,2 GPa 19%	-25,6 GPa 21%	-23,3 GPa 28%
Fck (30%)		-48,4 GPa -49%	-35,2 GPa -8%	-36,0 GPa -11%	-26,0 GPa 20%	-25,4 GPa 22%	-22,8 GPa 30%
Fck (40%)			-25,0 GPa 23%	-31,2 GPa 4%	-22,2 GPa 32%	-22,2 GPa 32%	-20,3 GPa 38%
Fck (50%)				-37,4 GPa -15%	-21,4 GPa 34%	-21,6 GPa 34%	-19,6 GPa 40%
Fck (60%)					-15,0 GPa 54%	-17,3 GPa 47%	-16,6 GPa 49%
NBR (DIC)		-30,0 GPa 8%			Regressão linear (DIC)		-24,0 GPa 26%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 14 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F3\_2 – 49/16).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-279 GPa -12%	203,0 GPa 16%	855,0 GPa 4%	785,5 GPa 4%	258,9 GPa 13%	195,0 GPa 17%	108,2 GPa 30%
Fck (20%)	-39,0 GPa -83%	-539 GPa -6%	-187 GPa -17%	-292 GPa -11%	1371 GPa 2%	381,2 GPa 9%	128,5 GPa 25%
Fck (30%)		45,6 GPa 71%	145,7 GPa 22%	203,8 GPa 16%	126,3 GPa 26%	109,4 GPa 30%	71,2 GPa 46%
Fck (40%)			-63,6 GPa -51%	-188 GPa -17%	375,0 GPa 9%	188,4 GPa 17%	81,8 GPa 40%
Fck (50%)				605,2 GPa 5%	113,6 GPa 29%	94,6 GPa 34%	57,7 GPa 56%
Fck (60%)					62,7 GPa 52%	62,8 GPa 52%	43,1 GPa 75%
NBR (DIC)		-279,8 GPa -12%			Regressão linear (DIC)		103,7 GPa 31%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 15 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F3\_3 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-20,1 GPa 39%	-19,6 GPa 41%	-21,6 GPa 35%	-20,4 GPa 38%	-20,0 GPa 40%	-19,1 GPa 42%	-18,4 GPa 45%
Fck (20%)	-21,1 GPa 36%	-19,9 GPa 40%	-22,4 GPa 32%	-20,7 GPa 38%	-20,2 GPa 39%	-19,1 GPa 42%	-18,3 GPa 45%
Fck (30%)		-18,8 GPa 43%	-23,1 GPa 30%	-20,5 GPa 38%	-19,9 GPa 40%	-18,7 GPa 43%	-17,9 GPa 46%
Fck (40%)			-29,7 GPa 10%	-21,5 GPa 35%	-20,3 GPa 39%	-18,7 GPa 44%	-17,7 GPa 47%
Fck (50%)				-16,8 GPa 49%	-17,1 GPa 48%	-16,4 GPa 50%	-16,0 GPa 52%
Fck (60%)					-17,6 GPa 47%	-16,2 GPa 51%	-15,7 GPa 53%
NBR (DIC)		-20,1 GPa 39%			Regressão linear (DIC)		-18,1 GPa 45%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 16 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F3\_3 – 49/10).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	299,1 GPa 11%	248,0 GPa 13%	207,2 GPa 16%	222,1 GPa 15%	173,9 GPa 19%	160,3 GPa 21%	215,5 GPa 15%
Fck (20%)	231,0 GPa 14%	210,4 GPa 16%	182,4 GPa 18%	202,4 GPa 16%	158,6 GPa 21%	148,1 GPa 22%	203,4 GPa 16%
Fck (30%)		193,1 GPa 17%	165,0 GPa 20%	194,4 GPa 17%	146,1 GPa 23%	137,6 GPa 24%	199,2 GPa 17%
Fck (40%)			144,1 GPa 23%	195,0 GPa 17%	133,9 GPa 25%	127,5 GPa 26%	200,5 GPa 17%
Fck (50%)				301,7 GPa 11%	128,5 GPa 26%	122,3 GPa 27%	224,5 GPa 15%
Fck (60%)					69,0 GPa 48%	90,1 GPa 37%	204,9 GPa 16%
NBR (DIC)		299,1 GPa 11%			Regressão linear (DIC)		129,6 GPa 26%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 17 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F3\_4 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-21,1 GPa 25%	-21,0 GPa 25%	-22,8 GPa 18%	-21,8 GPa 22%	-22,0 GPa 21%	-22,2 GPa 21%	-21,9 GPa 22%
Fck (20%)	-19,2 GPa 31%	-20,0 GPa 28%	-22,6 GPa 19%	-21,4 GPa 23%	-21,8 GPa 22%	-22,0 GPa 21%	-21,8 GPa 22%
Fck (30%)		-21,0 GPa 25%	-24,9 GPa 11%	-22,3 GPa 20%	-22,5 GPa 20%	-22,7 GPa 19%	-22,3 GPa 20%
Fck (40%)			-30,6 GPa -9%	-23,0 GPa 18%	-23,1 GPa 17%	-23,2 GPa 17%	-22,5 GPa 20%
Fck (50%)				-18,5 GPa 34%	-20,6 GPa 26%	-21,5 GPa 23%	-21,1 GPa 24%
Fck (60%)					-23,2 GPa 17%	-23,4 GPa 16%	-22,2 GPa 21%
NBR (DIC)		-21,1 GPa 25%			Regressão linear (DIC)		-21,7 GPa 22%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 18 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F3\_4 – 49/10).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-1376 GPa -2%	-203 GPa -14%	-188 GPa -15%	-221 GPa -13%	-163 GPa -17%	-138 GPa -20%	-156 GPa -18%
Fck (20%)	-239 GPa -12%	-114,3 GPa -24%	-125 GPa -22%	-158 GPa -18%	-126 GPa -22%	-112,2 GPa -25%	-130 GPa -22%
Fck (30%)		-75,1 GPa -37%	-101 GPa -28%	-142 GPa -20%	-113,3 GPa -25%	-101 GPa -28%	-120 GPa -23%
Fck (40%)			-154 GPa -18%	-257 GPa -11%	-136 GPa -21%	-111,2 GPa -25%	-137 GPa -20%
Fck (50%)				-784 GPa -4%	-129 GPa -22%	-101 GPa -28%	-134 GPa -21%
Fck (60%)					-70,3 GPa -40%	-70,9 GPa -39%	-105 GPa -27%
NBR (DIC)		-1376,3 GPa -2%			Regressão linear (DIC)		-116,4 GPa -24%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 19 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_1 – 49/16).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-17,3 GPa 17%	-65,0 GPa -211%	-18,6 GPa 11%	-18,4 GPa 12%	-18,0 GPa 14%	-21,7 GPa -4%	-18,2 GPa 13%
Fck (20%)	-14,2 GPa 32%	-588 GPa -2712%	-17,6 GPa 16%	-17,6 GPa 16%	-17,3 GPa 17%	-21,6 GPa -3%	-17,7 GPa 15%
Fck (30%)		14,9 GPa 171%	-19,9 GPa 5%	-19,2 GPa 8%	-18,4 GPa 12%	-24,2 GPa -16%	-18,5 GPa 11%
Fck (40%)			-6,2 GPa 70%	-8,8 GPa 58%	-10,3 GPa 51%	-14,3 GPa 32%	-12,5 GPa 40%
Fck (50%)				-17,5 GPa 16%	-16,9 GPa 19%	-28,9 GPa -38%	-17,8 GPa 15%
Fck (60%)					-16,3 GPa 22%	-41,8 GPa -100%	-17,9 GPa 14%
NBR (DIC)		-17,9 GPa 15%			Regressão linear (DIC)		-10,1 GPa 52%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 20 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_1 – 49/16).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	321,3 GPa 7%	50,8 GPa 41%	62,0 GPa 34%	49,9 GPa 42%	131,5 GPa 16%	46,0 GPa 45%	56,3 GPa 37%
Fck (20%)	40,2 GPa 52%	26,1 GPa 80%	36,7 GPa 57%	33,8 GPa 62%	77,2 GPa 27%	35,1 GPa 60%	43,4 GPa 48%
Fck (30%)		19,3 GPa 108%	35,3 GPa 59%	32,0 GPa 65%	101,4 GPa 21%	34,1 GPa 61%	44,0 GPa 48%
Fck (40%)			158,7 GPa 13%	48,5 GPa 43%	-210 GPa -10%	42,9 GPa 49%	60,4 GPa 35%
Fck (50%)				26,4 GPa 79%	-88,8 GPa -24%	33,3 GPa 63%	51,2 GPa 41%
Fck (60%)					-17,3 GPa -121%	38,2 GPa 55%	73,1 GPa 29%
NBR (DIC)		-1376,3 GPa -2%			Rregressão linear (DIC)		-116,4 GPa -24%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 21 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_2 – 49/16).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-29,6 GPa -6%	-21,1 GPa 24%	-21,8 GPa 22%	-21,6 GPa 22%	-21,9 GPa 21%	-20,8 GPa 25%	-19,3 GPa 31%
Fck (20%)	-318 GPa -1040%	-25,2 GPa 10%	-24,8 GPa 11%	-23,8 GPa 15%	-23,7 GPa 15%	-22,2 GPa 21%	-20,1 GPa 28%
Fck (30%)		-15,3 GPa 45%	-18,2 GPa 35%	-19,0 GPa 32%	-19,9 GPa 29%	-18,9 GPa 32%	-17,6 GPa 37%
Fck (40%)			-24,0 GPa 14%	-22,5 GPa 20%	-22,8 GPa 18%	-20,6 GPa 26%	-18,3 GPa 34%
Fck (50%)				-21,1 GPa 24%	-22,2 GPa 20%	-19,5 GPa 30%	-17,2 GPa 39%
Fck (60%)					-23,4 GPa 16%	-18,6 GPa 33%	-16,0 GPa 43%
NBR (DIC)		-20,1 GPa 28%			Rregressão linear (DIC)		-18,4 GPa 34%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 22 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_2 – 49/16).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	24,5 GPa 114%	37,0 GPa 75%	38,4 GPa 73%	51,4 GPa 54%	56,8 GPa 49%	59,7 GPa 47%	58,7 GPa 48%
Fck (20%)	108,8 GPa 26%	111,9 GPa 25%	74,3 GPa 38%	115,3 GPa 24%	115,2 GPa 24%	118,0 GPa 24%	99,5 GPa 28%
Fck (30%)		114,2 GPa 24%	66,1 GPa 42%	117,1 GPa 24%	116,6 GPa 24%	119,9 GPa 23%	98,2 GPa 28%
Fck (40%)			43,3 GPa 64%	119,1 GPa 23%	117,6 GPa 24%	122,0 GPa 23%	94,5 GPa 30%
Fck (50%)				-154 GPa -18%	806,8 GPa 3%	453,2 GPa 6%	143,1 GPa 20%
Fck (60%)					114,9 GPa 24%	126,2 GPa 22%	81,2 GPa 34%
NBR (DIC)		45,2 GPa 62%			Regressão linear (DIC)		64,9 GPa 43%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 23 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_3 – 49/16).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-41,0 GPa -74%	-45,7 GPa -94%	-42,4 GPa -80%	-35,6 GPa -51%	-41,2 GPa -75%	-34,8 GPa -47%	-34,8 GPa -47%
Fck (20%)	-21,7 GPa 8%	-33,6 GPa -42%	-34,9 GPa -48%	-32,5 GPa -38%	-36,5 GPa -55%	-30,7 GPa -30%	-30,7 GPa -30%
Fck (30%)		-63,0 GPa -167%	-43,9 GPa -86%	-37,2 GPa -58%	-41,3 GPa -75%	-32,7 GPa -39%	-32,7 GPa -39%
Fck (40%)			-36,5 GPa -55%	-31,6 GPa -34%	-38,1 GPa -61%	-29,8 GPa -26%	-29,8 GPa -26%
Fck (50%)				-25,2 GPa -7%	-39,1 GPa -66%	-27,4 GPa -16%	-27,4 GPa -16%
Fck (60%)					-53,0 GPa -125%	-28,2 GPa -20%	-28,2 GPa -20%
NBR (DIC)		-43,0 GPa -82%			Regressão linear (DIC)		-39,5 GPa -67%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 24 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_3 – 49/16).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-514 GPa -5%	81,7 GPa 29%	124,8 GPa 19%	193,7 GPa 12%	-1,9 GPa -1230%	-1,9 GPa -1230%	-1,9 GPa -1230%
Fck (20%)	-144 GPa -16%	46,1 GPa 51%	88,6 GPa 27%	147,9 GPa 16%	-5,7 GPa -417%	-5,7 GPa -417%	-5,7 GPa -417%
Fck (30%)		21,7 GPa 108%	57,4 GPa 41%	97,5 GPa 24%	-7,6 GPa -309%	-7,6 GPa -309%	-7,6 GPa -309%
Fck (40%)			-713 GPa -3%	-194 GPa -12%	-11,3 GPa -209%	-11,3 GPa -209%	-11,3 GPa -209%
Fck (50%)				-81,4 GPa -29%	-15,3 GPa -154%	-15,3 GPa -154%	-15,3 GPa -154%
Fck (60%)					-17,0 GPa -139%	-17,0 GPa -139%	-17,0 GPa -139%
NBR (DIC)		147,9 GPa 16%			Regressão linear (DIC)		69,0 GPa 34%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 25 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_4 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-28,5 GPa -9%	-28,6 GPa -10%	-25,9 GPa 0%	-25,5 GPa 2%	-26,2 GPa 0%		
Fck (20%)	-24,0 GPa 8%	-26,4 GPa -1%	-24,0 GPa 8%	-23,8 GPa 9%	-24,7 GPa 5%		
Fck (30%)		-28,9 GPa -11%	-23,9 GPa 8%	-23,7 GPa 9%	-24,9 GPa 4%		
Fck (40%)			-20,9 GPa 20%	-21,6 GPa 17%	-23,5 GPa 10%		
Fck (50%)				-23,0 GPa 12%	-27,0 GPa -4%		
Fck (60%)					-32,9 GPa -26%		
NBR (DIC)		-24,3 GPa 7%			Regressão linear (DIC)		-14,8 GPa 43%

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 26 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_4 – 49/10).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	719,0 GPa 4%	307,3 GPa 8%	-232 GPa -11%	303,4 GPa 9%	73,8 GPa 35%		
Fck (20%)	125,9 GPa 21%	133,7 GPa 19%	-208 GPa -13%	183,4 GPa 14%	54,3 GPa 48%		
Fck (30%)		141,0 GPa 18%	-103 GPa -25%	212,5 GPa 12%	47,6 GPa 55%		
Fck (40%)			-42,2 GPa -62%	296,9 GPa 9%	37,1 GPa 70%		
Fck (50%)				17,2 GPa 152%	12,6 GPa 206%		
Fck (60%)					9,9 GPa 262%		
NBR (DIC)		176,7 GPa 15%		Regressão linear (DIC)		53,1 GPa 49%	

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 27 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_5 – 19/6).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-23,5 GPa 15%	-24,1 GPa 13%	-20,0 GPa 28%	-18,7 GPa 33%			
Fck (20%)	-16,2 GPa 42%	-19,6 GPa 29%	-16,9 GPa 39%	-16,0 GPa 42%			
Fck (30%)		-25,7 GPa 7%	-17,4 GPa 37%	-15,9 GPa 42%			
Fck (40%)			-13,3 GPa 52%	-12,8 GPa 54%			
Fck (50%)				-11,7 GPa 58%			
Fck (60%)							
NBR (DIC)		-24,7 GPa 11%		Regressão linear (DIC)		-19,6 GPa 29%	

Fonte: Autor (2025).

**Tabela B 28 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_5 – 49/10).**

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	91,9 GPa 30%	44,1 GPa 63%	31,9 GPa 87%	44,3 GPa 62%			
Fck (20%)	41,7 GPa 66%	28,4 GPa 97%	23,5 GPa 118%	33,6 GPa 82%			
Fck (30%)		21,1 GPa 131%	19,1 GPa 145%	31,0 GPa 89%			
Fck (40%)			17,5 GPa 158%	44,8 GPa 62%			
Fck (50%)				-18,6 GPa -149%			
Fck (60%)							
NBR (DIC)		104,0 GPa 27%		Regressão linear (DIC)		30,6 GPa 90%	

Fonte: Autor (2025).

**Tabela B 29 – Relação de módulo de elasticidade para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_6 – 19/6).**

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	-35,8 GPa -47%	-37,9 GPa -56%	-29,0 GPa -19%	-30,1 GPa -24%	-28,4 GPa -17%	-23,2 GPa 5%	
Fck (20%)	-79,0 GPa -224%	-47,9 GPa -97%	-31,0 GPa -27%	-31,7 GPa -30%	-29,4 GPa -21%	-23,3 GPa 4%	
Fck (30%)		-40,1 GPa -65%	-25,7 GPa -6%	-28,3 GPa -16%	-26,5 GPa -9%	-21,0 GPa 14%	
Fck (40%)			-14,4 GPa 41%	-23,3 GPa 4%	-22,4 GPa 8%	-17,3 GPa 29%	
Fck (50%)				-33,4 GPa -37%	-27,4 GPa -13%	-18,2 GPa 25%	
Fck (60%)					-20,1 GPa 18%	-11,9 GPa 51%	
NBR (DIC)		-24,3 GPa 7%		Regressão linear (DIC)		-14,8 GPa 43%	

Fonte: Autor (2025).

Tabela B 30 – Relação de coeficiente de Poisson para cada intervalo de medição  
(CC\_F4\_6 – 49/10).

	Fck (30%)	Fck (40%)	Fck (50%)	Fck (60%)	Fck (70%)	Fck (80%)	Fck (90%)
Fck (10%)	62,2 GPa 39%	51,4 GPa 47%	140,2 GPa 17%	157,1 GPa 15%	84,6 GPa 29%	-1290 GPa -2%	
Fck (20%)	80,4 GPa 30%	51,7 GPa 47%	249,9 GPa 10%	242,3 GPa 10%	93,8 GPa 26%	-290 GPa -8%	
Fck (30%)		43,9 GPa 55%	863,7 GPa 3%	412,4 GPa 6%	96,5 GPa 25%	-170 GPa -14%	
Fck (40%)			-21,6 GPa -112%	-82,4 GPa -30%	272,5 GPa 9%	-53,1 GPa -46%	
Fck (50%)				228,0 GPa 11%	50,1 GPa 49%	-85,3 GPa -29%	
Fck (60%)					19,2 GPa 127%	-33,0 GPa -74%	
NBR (DIC)		79,0 GPa 31%		Regressão linear (DIC)		29,6 GPa 82%	

Fonte: Autor (2025).

## B.2 TABELA DE RESULTADOS SATISFATORIOS PARA OS CPs

Tabela B 31 – Conjunto total de resultados satisfatórios para os CPs.

	19.6	19.9	26.6	26.9	29.15	39.8	39.13	39.19	49.10	49.16	49.24
CC_F1_1_A_Eyy	8	10	3	7	5	7	6	5	4	15	10
CC_F1_1_E_Exx	5	2	4	5	1	5	8	5	6	1	8
CC_F1_1_A_Eyy	6	5	5	4	10	4	5	4	5	5	10
CC_F1_1_E_Exx	9	8	9	9	6	11	10	9	12	12	11
CC_F2_1_A_Eyy	2	1	3	5	5	4	4	2	3	2	3
CC_F2_1_E_Exx	0	2	1	1	0	0	3	0	2	3	1
CC_F2_1_A_Eyy	8	9	7	6	8	6	4	6	5	5	4
CC_F2_1_E_Exx	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1
CC_F2_2_A_Eyy	13	4	4	6	13	10	14	0	5	2	9
CC_F2_2_E_Exx	1	1	5	2	5	4	6	0	2	3	0
CC_F2_2_A_Eyy	12	15	10	12	10	6	8	9	7	6	11
CC_F2_2_E_Exx	1	2	2	2	3	6	6	8	7	10	10

Tabela B 32 – Conjunto total de resultados satisfatórios para os CPs. (Continuação)

	19.6	19.9	26.6	26.9	29.15	39.8	39.13	39.19	49.10	49.16	49.24
CC_F2_3_A_Eyy	1	2	0	1	1	1	1	1	1	0	1
CC_F2_3_E_Exx	2	2	0	1	0	0	1	1	0	1	0
CC_F2_3_A_Eyy	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
CC_F2_3_E_Exx	1	1	2	3	1	2	3	2	1	2	1
CC_F2_4_A_Eyy	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CC_F2_4_E_Exx	14	12	7	8	10	7	7	7	6	7	9
CC_F2_4_A_Eyy	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CC_F2_4_E_Exx	3	6	6	5	6	7	7	7	5	4	3
CS_F3_1_A_Eyy			7	8	8	9	7	8	8	8	8
CS_F3_1_E_Exx			4	4	1	3	3	3	2	3	1
CS_F3_1_A_Eyy			11	8	9	11	11	10	9	13	8
CS_F3_1_E_Exx			0	1	2	2	2	4	3	1	1
CS_F3_2_A_Eyy			3	6	9	10	7	10	10	9	9
CS_F3_2_E_Exx			6	4	3	5	3	4	5	5	5
CS_F3_2_A_Eyy			6	6	6	9	9	9	11	10	11
CS_F3_2_E_Exx			4	4	3	4	3	4	4	3	3
CS_F3_3_A_Eyy			0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS_F3_3_E_Exx	10	10	7	7	6	9	9	8	11	10	12
CS_F3_3_A_Eyy	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS_F3_3_E_Exx	8	5	16	18	9	18	18	16	21	20	18
CS_F3_4_A_Eyy	3	1	2	2	2	2	2	2	1	1	0
CS_F3_4_E_Exx	3	6	2	3	3	4	3	2	4	3	2
CS_F3_4_A_Eyy	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CS_F3_4_E_Exx	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2
CS_F4_1_A_Eyy			2	5	1	7	2	10	8	6	4
CS_F4_1_E_Exx			2	0	1	3	3	2	1	1	0
CS_F4_1_A_Eyy			9	6	4	8	4	3	4	4	11
CS_F4_1_E_Exx			1	2	0	1	2	2	4	3	2
CS_F4_2_A_Eyy			4	8	4	10	9	8	5	7	7
CS_F4_2_E_Exx			9	5	1	2	8	4	5	10	5
CS_F4_2_A_Eyy			2	5	11	2	5	4	4	5	2
CS_F4_2_E_Exx			3	2	6	3	4	4	5	7	4
CS_F4_3_A_Eyy			5	3	6	2	2	3	2	2	3
CS_F4_3_E_Exx			3	2	1	3	6	4	1	3	2
CS_F4_3_A_Eyy			3	3	5	5	3	5	6	5	2
CS_F4_3_E_Exx			5	0	3	3	3	2	3	3	4
CS_F4_4_A_Eyy	9	8	7	8	5	5	4	5	5	5	7
CS_F4_4_E_Exx	5	4	0	1	4	0	3	2	3	2	4
CS_F4_4_A_Eyy	13	7	7	8	5	6	5	4	5	4	4
CS_F4_4_E_Exx	1	2	1	3	1	2	2	3	5	4	4

Tabela B 33 – Conjunto total de resultados satisfatórios para os CPs. (Continuação)

	19.6	19.9	26.6	26.9	29.15	39.8	39.13	39.19	49.10	49.16	49.24
CS_F4_5_A_Eyy	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
CS_F4_5_E_Exx	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS_F4_5_A_Eyy	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CS_F4_5_E_Exx	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
CS_F4_6_A_Eyy	10	5	8	9	8	6	9	8	7	8	8
CS_F4_6_E_Exx	4	5	4	3	3	2	2	3	2	3	6
CS_F4_6_A_Eyy	4	4	6	6	7	7	8	7	8	10	8
CS_F4_6_E_Exx	4	5	2	4	3	3	4	5	3	7	5

Fonte: Autor (2025).

## APÊNDICE C – ANÁLISE CAMPO GLOBAL DE DEFORMAÇÃO

A análise do campo global de deformações permite identificar padrões de comportamento mecânico, avaliar variações estruturais nos CPs testados e compreender os fatores que influenciam a distribuição das tensões. Nos ensaios realizados, foram adquiridos campos de deslocamento e deformação em toda a superfície dos CPs, possibilitando uma investigação detalhada das regiões críticas e fornecendo informações precisas sobre o comportamento mecânico global e local do material.

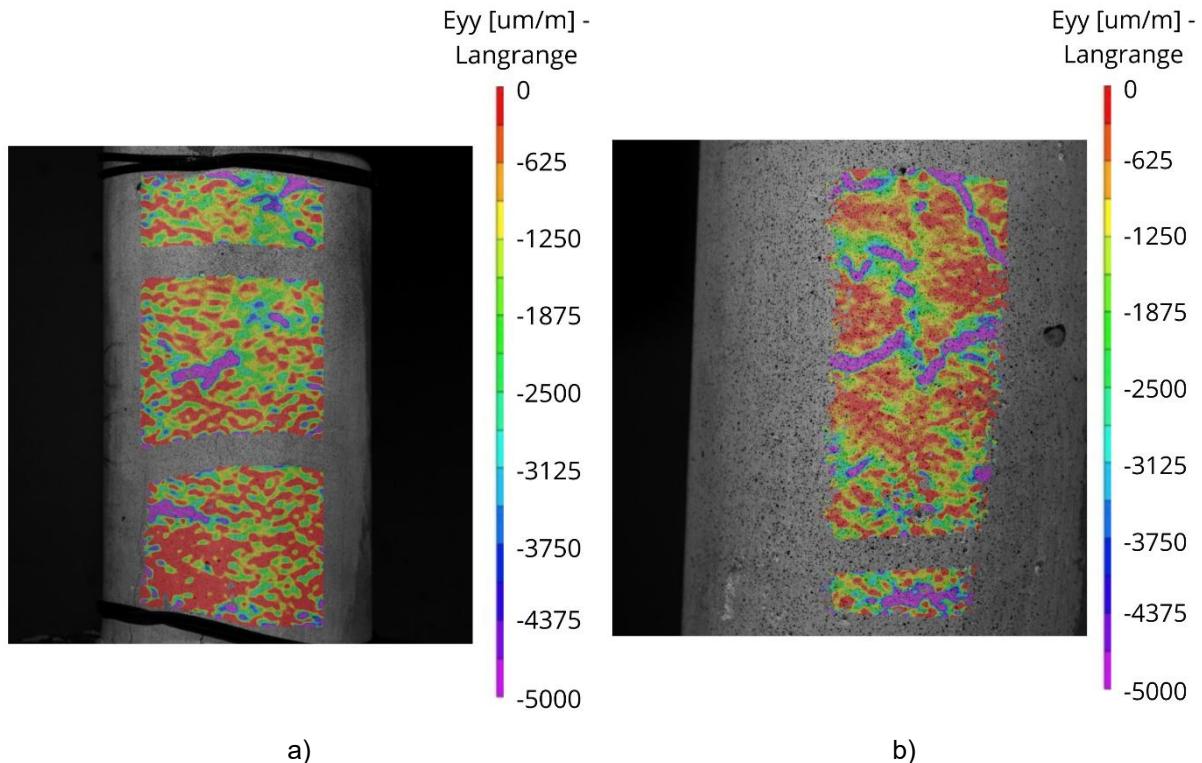
A metodologia adotada seguiu práticas já estabelecidas na literatura, como nos estudos de Lingga et al. (2019) e Wang et al. (2021), que demonstraram a eficácia do DIC na identificação de regiões críticas em materiais heterogêneos. Essa técnica não destrutiva viabilizou a avaliação contínua das deformações em toda a superfície do concreto, superando as limitações de técnicas de contato, que se restringem a pontos específicos.

Entre os CPs analisados, os CPs CC\_F2\_2 e CC\_F2\_3, do grupo com agregado natural, apresentaram resultados mais padronizados. Assim, a análise do campo global dessas amostras destaca as regiões críticas e investiga os fatores que influenciam as variações detectadas.

A Figura C 1 a) e a Figura C 1 b) ilustram zonas horizontais de maior deformação (em violeta), destacadas nas figuras, cuja formação pode estar associada à heterogeneidade do concreto e ao processo de micro fissuração descrito por Lingga et al. (2019). Segundo esse estudo, após o concreto atingir o pico de resistência, as fissuras iniciam-se na interface entre o agregado e a pasta de cimento, propagando-se posteriormente pela matriz de pasta devido à acomodação dos agregados, exsudação da água de mistura e tensões de retração.

Outra hipótese para a formação dessas faixas está na compactação inadequada durante a moldagem dos CPs. Caso a compactação das três camadas de concreto tenha sido insuficiente, podem ter surgido zonas de menor densidade, resultando em maior deformabilidade local. Essa hipótese reforça a importância do controle rigoroso do processo de adensamento para minimizar variações estruturais no material.

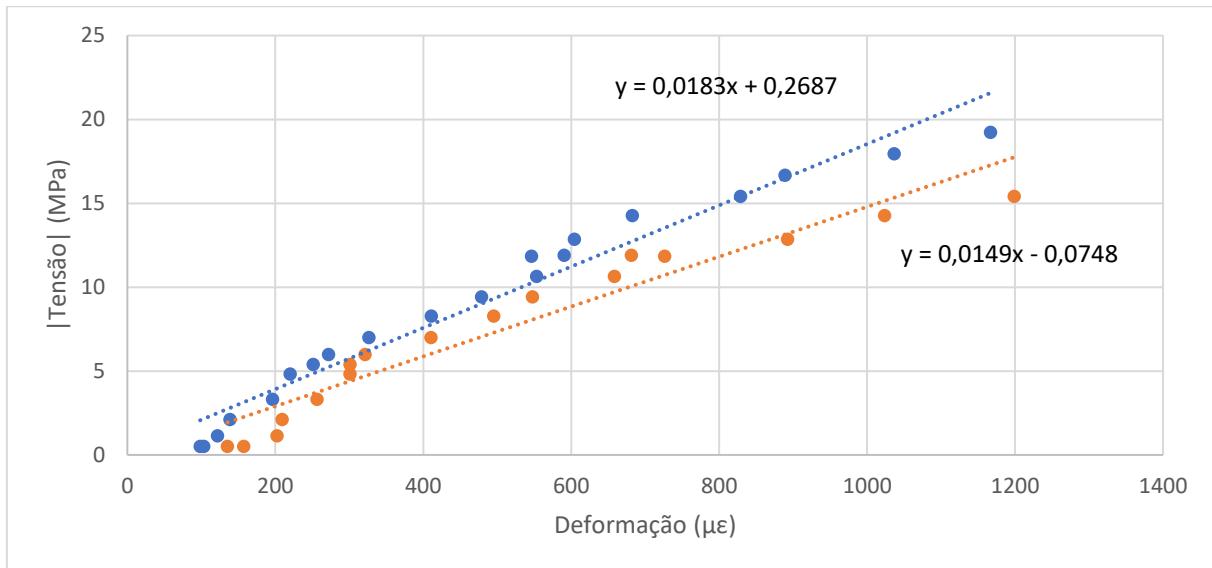
Figura C 1 – Campo global de deformação a) CC\_F2\_2 e b) CC\_F2\_3.



Fonte: Autor (2025).

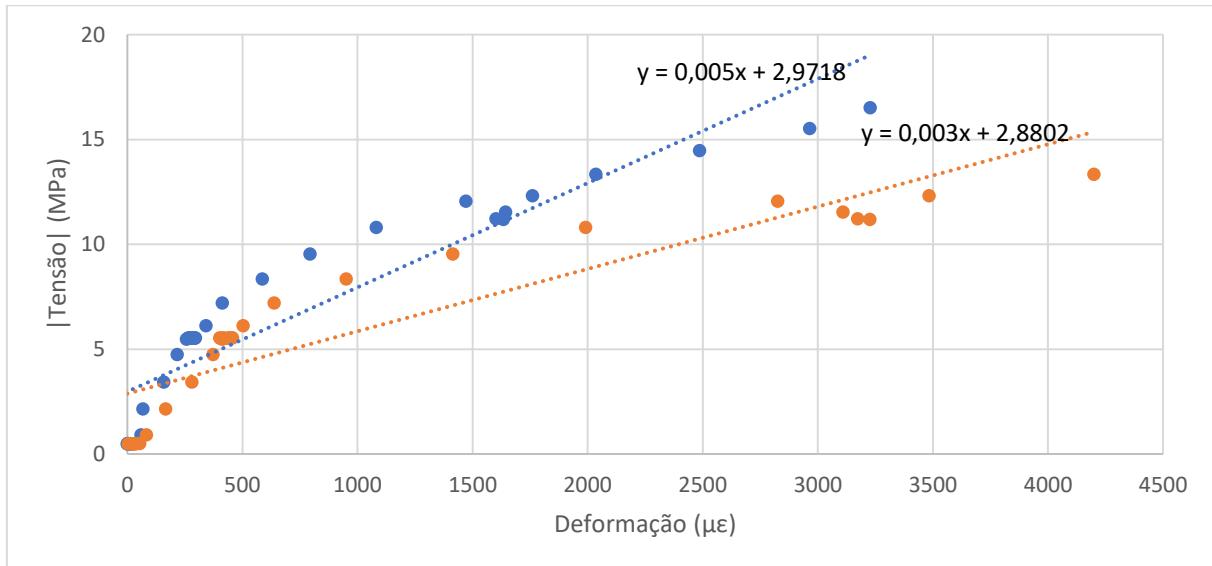
Para avaliar a influência das zonas críticas nos CPs CC\_F2\_2 e CC\_F2\_3, o Gráfico C 1 e o Gráfico C 2 ilustram as deformações desses CPs, respectivamente, utilizando o padrão *subset/step* 19/6. Essas zonas geram uma redução local no módulo de elasticidade, o que pode comprometer a análise da resistência dos CPs e afetar medições que utilizam técnicas baseados em áreas restritas e fixas no CP. Essa fragilidade foi quantificada por meio da regressão linear dos dados obtidos a partir dos gráficos, revelando uma diminuição local do módulo de elasticidade de 18% e 40% para os CC\_F2\_2 e CC\_F2\_3, respectivamente, em relação ao módulo geral do material.

Gráfico C 1 –  $|\text{Tensão}| \times \text{deformação} \varepsilon_{yy}$  CC\_F2\_2 (19/6).



Fonte: Autor (2025).

Gráfico C 2 –  $|\text{Tensão}| \times \text{deformação} \varepsilon_{yy}$  CC\_F2\_3 (19/6).



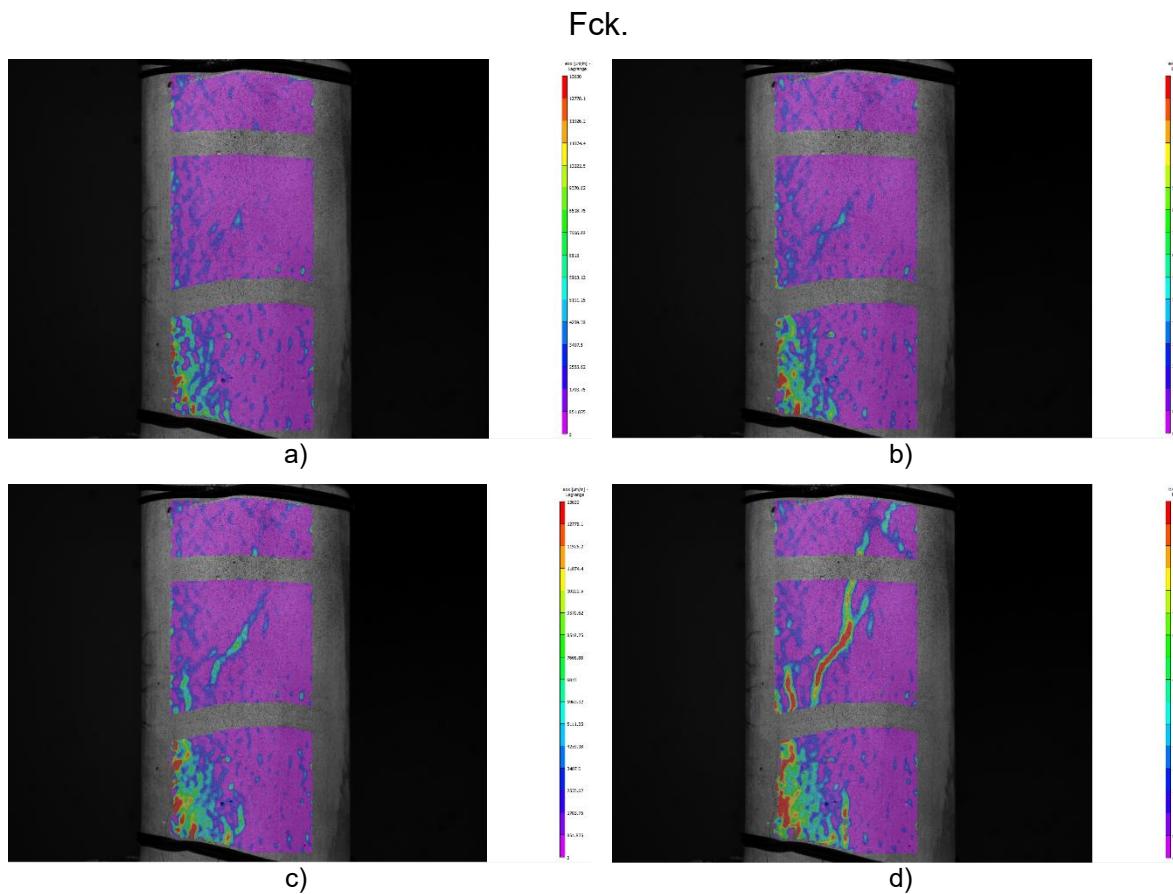
Fonte: Autor (2025).

Além da análise das propriedades do concreto utilizando o campo global da técnica DIC, foi possível observar o surgimento de fissuras na superfície dos CPs e acompanhar sua evolução. Conforme destacado por Wang et al. (2021), esse monitoramento é essencial para compreender o comportamento mecânico do material, pois permite associar a propagação das fissuras aos mecanismos de falha do concreto e suas implicações estruturais.

A Figura C 2 e a Figura C 3 ilustram a propagação das fissuras identificadas nos CPs CC\_F2\_2 e CC\_F2\_3, respectivamente. Essas imagens demonstram

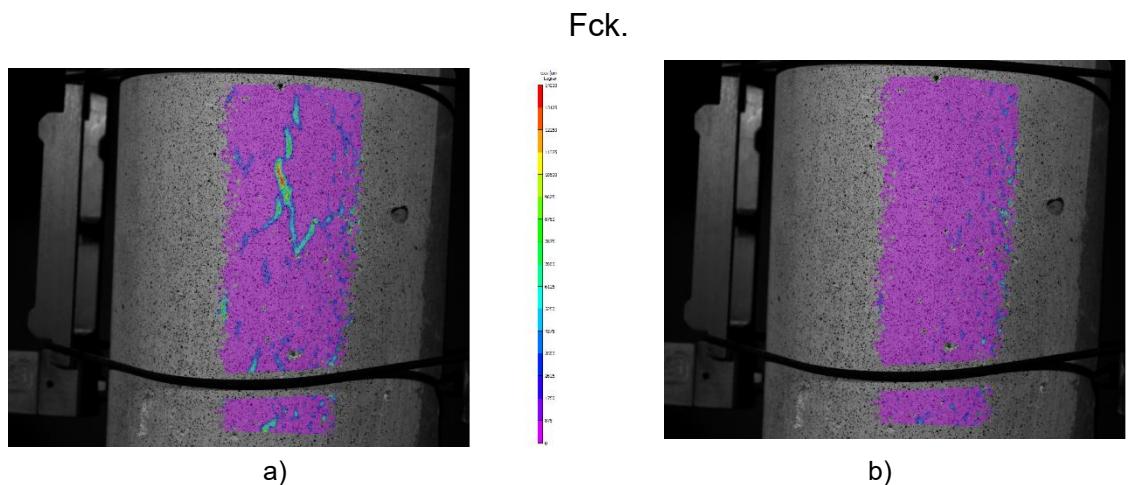
visualmente o processo de degradação do material, além de fornecer indicativos de fissura antes mesmo de seu surgimento evidente.

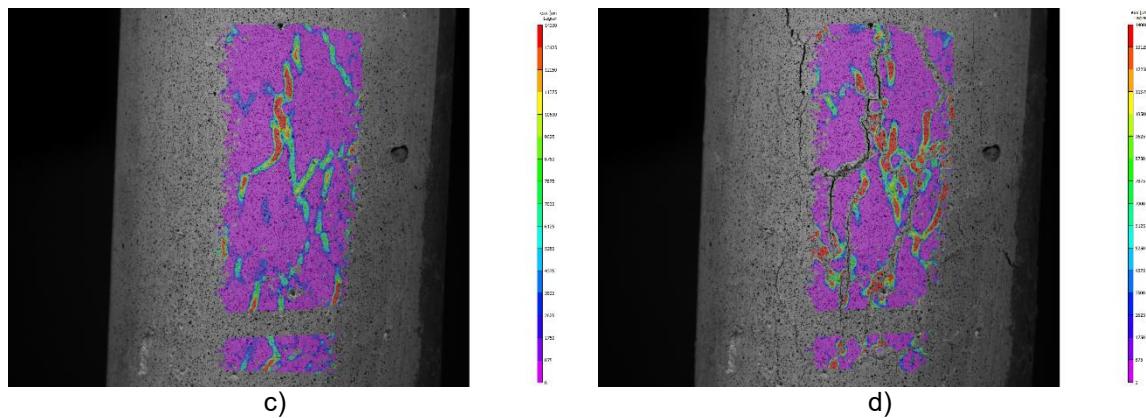
Figura C 2 – Progressão de carga do CC\_F2\_2 a) 0,7 Fck, b) 0,8 Fck, c) 0,9 Fck e d)



Fonte: Autor (2025).

Figura C 3 – Progressão de carga do CC\_F2\_3 a) 0,7 Fck, b) 0,8 Fck, c) 0,9 Fck e d)





Fonte: Autor (2025).