

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Tobias Pigatto Ottoni

**DEFORMAÇÕES E MODO DE RUPTURA EM PRISMAS DE
ALVENARIA DE BLOCOS CERÂMICOS: ANÁLISE
EXPERIMENTAL COM EXTENSOMETRIA E CORRELAÇÃO DE
IMAGEM**

**Santa Maria, RS, Brasil
2020**

Tobias Pigatto Ottoni

**DEFORMAÇÕES E MODO DE RUPTURA EM PRISMAS DE ALVENARIA DE
BLOCOS CERÂMICOS: ANÁLISE EXPERIMENTAL COM
EXTENSOMETRIA E CORRELAÇÃO DE IMAGEM**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Materiais de Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Gihad Mohamad
Coorientador: Prof. Dr. André Lübeck

Santa Maria, RS, Brasil
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Ottoni, Tobias Pigatto
DEFORMAÇÕES E MODO DE RUPTURA EM PRISMAS DE ALVENARIA
DE BLOCOS CERÂMICOS: ANÁLISE EXPERIMENTAL COM
EXTENSOMETRIA E CORRELAÇÃO DE IMAGEM / Tobias Pigatto
Ottoni.- 2020.
214 p.; 30 cm

Orientador: Gihad Mohamad
Coorientador: André Lübeck
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2020

1. Alvenaria estrutural 2. Modo de ruptura 3.
Correlação digital de imagem 4. Curva tensão-deformação
I. Mohamad, Gihad II. Lübeck, André III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, TOBIAS PIGATTO OTTONI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Tobias Pigatto Ottoni

**DEFORMAÇÕES E MODO DE RUPTURA EM PRISMAS DE ALVENARIA
DE BLOCOS CERÂMICOS: ANÁLISE EXPERIMENTAL COM
EXTENSOMETRIA E CORRELAÇÃO DE IMAGEM**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 27 de fevereiro de 2020:

Gihad Mohamad, Dr. (UFSM)
(Presidente - Orientador)

André Lübeck, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Almir Barros da Silva Santos Neto, Dr. (UFSM)

Guilherme Aris Parsekian, Dr. (UFSCar)
(videoconferência)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e avós, que sempre me apoiaram em todas decisões da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas, instituições e empresas que contribuíram para a elaboração desta pesquisa e de maneira muito especial:

Aos professores orientador Gihad Mohamad e Coorientador André Lübeck por terem aceitado fazer parte desta jornada, pela orientação, dedicação, paciência e ensinamentos ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos professores Almir Barros da Silva Santos Neto, Claudius de Sousa Barbosa, Fernando Soares Fonseca e Guilherme Aris Parsekian pela disponibilidade em comporem a banca examinadora.

Agradeço ao colega Engenheiro Mestre Rodrigo Teixeira Schossler que foi um grande parceiro de pesquisa e conversas nessa caminhada que compartilhamos juntos entre 2018-2020.

Agradeço aos profissionais do LMCC, José Pedro, Willian, Diego e Vilson, e ao professor Alisson S. Milani, da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA – Alegrete/RS), que auxiliaram na prestação de materiais e serviços para a pesquisa.

Agradeço a todos os bolsistas, em especial a Eduardo Steffler Werner e Heliton Weide e demais voluntários que participaram assiduamente em todas etapas da pesquisa, sendo essenciais para o progresso da mesma.

Aos colegas e demais professores do PPGEC e do DECC, pelo conhecimento compartilhado e pelo companheirismo.

E finalmente, mas não menos importante, agradeço a minha família e a minha namorada, Eduarda, que estiveram comigo durante todo o caminho, sempre me apoiando em todas as decisões.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

DEFORMAÇÕES E MODO DE RUPTURA EM PRISMAS DE ALVENARIA DE BLOCOS CERÂMICOS: ANÁLISE EXPERIMENTAL COM EXTENSOMETRIA E CORRELAÇÃO DE IMAGEM

AUTOR: Tobias Pigatto Ottoni
ORIENTADOR: Gihad Mohamad
COORIENTADOR: André Lübeck

Este trabalho tem por objetivo principal analisar a curva tensão-deformação dos materiais componentes da alvenaria em prismas moldados com dois diferentes tipos de blocos cerâmicos e duas argamassas com diferentes resistências, verificando o comportamento mecânico dos prismas e o modo de ruptura de cada tipologia quando submetidos à compressão axial. Os dois blocos cerâmicos utilizados são de parede maciça e parede vazada. As resistências médias à compressão dos blocos são de 9,85 MPa para o bloco cerâmico de parede vazada e 22,50 MPa para o bloco cerâmico de parede maciça. Os prismas foram moldados com argamassa produzida em laboratório, de cimento, cal e areia, visando obter argamassas com relação de resistência em relação ao bloco (f_a/f_{bm} , líquida) igual a 0,30 e 0,70. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial em prismas instrumentados para analisar o comportamento e a deformação específica axial separadamente de cada material do conjunto, além dos mesmos serem também filmados para a avaliação do modo de ruptura e das deformações através da correlação digital de imagem. Além dos prismas, os blocos cerâmicos e argamassas também foram instrumentados e filmados durante os ensaios de resistência à compressão individualmente de maneira a correlacioná-los com o comportamento em conjunto nos prismas. A partir da análise dos resultados, observou-se a influência da proporção que existe entre a resistência à compressão da argamassa e do bloco sobre a resistência e o modo de ruptura dos prismas cerâmicos. Verificou-se que a resistência da argamassa não teve interferência significativa na resistência última dos prismas, mas sim no desencadeamento do processo do modo de ruptura, podendo acelerar ou retardar o início do processo de ruptura. As deformações dos componentes dos prismas registradas através dos strain gauges e através da técnica DIC apresentaram diferenças, sendo que se verificou que as deformações registradas através da técnica DIC representam de maneira mais adequada o comportamento das tipologias avaliadas. Além disso, conclui-se que a técnica DIC torna-se um mecanismo apropriado para a avaliação de deslocamentos e deformações para alvenaria.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Modo de ruptura. Correlação digital de imagem. Curva tensão-deformação.

ABSTRACT

DEFORMATIONS AND FAILURE MODE IN MASONRY PRISMS OF CERAMIC BLOCKS: EXPERIMENTAL ANALYSIS WITH EXTENSOMETRY AND IMAGE CORRELATION

AUTHOR: Tobias Pigatto Ottoni

ADVISOR: Gihad Mohamad

Co-ADVISOR: André Lübeck

The main objective of this work is to analyze the stress-strain curve of masonry materials in prisms with two different hollow clay blocks and two mortars with different strengths, verifying the mechanical behavior of the prisms and the rupture mode of each typology when submitted to axial compression. This study used two clay block types, hollow face shell and solid face shell. The compressive strengths of the blocks are 9.85 MPa for the hollow face shell and 22.50 MPa for the solid face shell. The prisms were molded with mortar produced in the laboratory, made of cement, lime and sand, aiming to obtain a mortar with a $f_a/f_{b,m,liq}$ relationships = 0.30 and another with a $f_a/f_{b,m,liq}$ = 0.70. For this purpose, tests of resistance to axial compression were performed on instrumented prisms to analyze the behavior and specific axial deformation separately of each material in the set, in addition to being also filmed for the evaluation of the rupture mode and deformations through digital image correlation. Besides to the prisms, the ceramic blocks and mortars were also instrumented and filmed during the compressive strength tests individually in order to correlate them with the behavior together in the prisms. From the analysis of the results, the influence of the proportion that exists between the compressive strength of the mortar and the block on the strength and the rupture mode of the ceramic prisms was observed. It was found that the strength of the mortar did not have significant interference in the ultimate strength of the prisms, but in the triggering of the rupture mode process, which could accelerate or delay the start of the rupture process. The deformations of the components of the prisms recorded through the strain gauges and through the DIC technique showed differences, and it was found that the deformations recorded through the DIC technique more adequately represent the behavior of the evaluated typologies. In addition, it is concluded that the DIC technique becomes an appropriate mechanism for the evaluation of displacements and deformations for masonry.

Key-words: Structural masonry. Failure mode. Digital image correlation. Stress-strain curve

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometrias de blocos cerâmicos encontrados no Rio Grande do Sul.....	39
Figura 2 – Variação dimensional de um corpo quando submetido a um carregamento uniaxial.	40
Figura 3 – Definição dos diferentes tipos de avaliação do módulo de elasticidade.	43
Figura 4 – Junta de argamassa comprimida triaxialmente (a) e bloco comprimido e tracionado biaxialmente (b).....	46
Figura 5 – Geometria dos blocos e dos prismas em escala reduzida ensaiados por Rizzatti (2003)	48
Figura 6 – Relação entre a resistência do bloco e a resistência do prisma	50
Figura 7 – Relação observada entre a resistência à compressão uniaxial da argamassa e a do prisma	51
Figura 8 – Variação da resistência do prisma em função da resistência da argamassa e do bloco	52
Figura 9 – Deformações em um prisma submetido ao carregamento (a) e tensões laterais que se desenvolvem em função da aderência argamassa-bloco (b).....	54
Figura 10 – Envoltória de ruptura das argamassas confinadas ensaiadas por Khoo (1972)	56
Figura 11 – Comportamento tensão-deformação axial e lateral das argamassas confinadas de traço 1:0,5:4,5 (a) e 1:1:6 (b) encontrados por Atkinson <i>et al.</i> (1985).....	58
Figura 12 – Envoltória de ruptura das argamassas confinadas ensaiadas à compressão triaxial por Mohamad (1998).....	59
Figura 13 – Idealização do esmagamento da junta de argamassa por meio tensões de compressão	60
Figura 14 – Geometria de montagem dos prismas testados por De Marco (2016)	61
Figura 15 – Exemplo de discretização das posições dos pontos e das intensidades dos pixels	65
Figura 16 – Aplicação de três padrões estocásticos diferentes.....	66
Figura 17 – Exemplo de deslocamento de um ponto durante a deformação da peça.....	67
Figura 18 – Importação de imagem e criação de escala	70
Figura 19 – Delimitação de superfície de interesse e criação de retas de avaliação.	71
Figura 20 – Representação do comportamento de pontos de interesse.	71
Figura 21 – Ensaios dimensionais. (a) largura; (b) comprimento; (c) altura.....	74
Figura 22 – Blocos submetidos à compressão axial.....	76
Figura 23 – Fluxograma das combinações dos prismas avaliados	81
Figura 24 – Preparação dos prismas para avaliação do método DIC	82
Figura 25 – Geometria dos prismas moldados. (a) Prisma cerâmico de parede maciça – PPM; (b) Prisma cerâmico de parede vazada – PPV	82
Figura 26 – Posicionamento dos strain gauges para os prismas avaliados.....	83
Figura 27 – Posicionamento dos strain gauges nos CPs 5x10 cm.....	84
Figura 28 – Instrumentação e teste de blocos instrumentados	84
Figura 29 – Posicionamento e montagem dos aparelhos para captura de deformações dos blocos e prismas avaliados	85
Figura 30 – Exemplo de posicionamento das retas criadas no software Gom Correlate para medição de deslocamentos dos componentes de um prisma.....	86
Figura 31 - Exemplo de posicionamento das retas criadas no software Gom Correlate para medição do módulo de elasticidade de um prisma.....	87

Figura 32 – Comportamento médio tensão/resistência-deformação específica axial para o bloco BPM4, (a) obtido pelo DIC; (b) Suavizada	88
Figura 33 – Curva tensão/resistência-deformação específica axial dos blocos BPM, em tensão e em nível de tensão	90
Figura 34 – (a) Curva média tensão/resistência-deformação específica axial dos blocos BPM 1, BPM 2 e BPM 3, BPM 4 e BPM 5 obtidas a partir do DIC	91
Figura 35 – Cenário pós-ruptura observado para os blocos BPM.....	93
Figura 36 – Comportamento médio tensão/resistência-deformação específica axial para extensômetros e DIC para blocos BPM.....	94
Figura 37 – Curva média tensão/resistência-deformação específica axial dos blocos BPV instrumentados, em nível de tensão e em tensão absoluta.....	94
Figura 38 – Comportamento médio curva tensão/resistência-deformação específica axial dos blocos BPV avaliados pelo DIC.....	96
Figura 39 – Comportamento médio tensão/resistência-deformação específica axial para extensômetros e DIC para blocos BPV	97
Figura 40 – Cenário pós-ruptura observado para os blocos BPV	98
Figura 41 – Comportamento tensão/resistência-deformação específica axial das argamassas de traço T1	99
Figura 42 – Comportamento tensão/resistência-deformação específica axial das argamassas de traço T2.....	99
Figura 43 – Comportamento tensão/resistência-deformação específica axial das argamassas de traço T3.....	100
Figura 44 – Comportamento tensão/resistência-deformação específica axial das argamassas de traço T4.....	100
Figura 45 – Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPM – T1, além dos blocos BPM isolados.....	106
Figura 46 – Comportamento médio curva tensão-deformação específica axial obtidos através do DIC para os prismas PPM – T1, além dos blocos BPM isolados	108
Figura 47 – Idealização da forma de ruptura da argamassa das juntas de assentamento	110
Figura 48 – Formação de fissuras cônicas em corpos de prova prismáticos.....	110
Figura 49 – Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPM – T2, além dos blocos BPM isolados.....	111
Figura 50 - Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos através do DIC para os prismas PPM – T2, além dos blocos BPM isolados	113
Figura 51 – Comportamento médio das curvas para o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas para a tipologia PPM – T1 obtido através do DIC	117
Figura 52 – Comportamento médio das curvas para o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas para a tipologia PPM – T2 obtido através do DIC	118
Figura 53 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 7 – T1 através da imagem quadro a quadro, parte traseira	121
Figura 54 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM7 – T1 – DIC – Parte frontal	122
Figura 55 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 10 – T1 através de imagem quadro a quadro, parte traseira	124
Figura 56 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM10 – T1 – DIC – Parte traseira	124
Figura 57 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 11 – T1 através de imagem quadro a quadro, parte traseira	125

Figura 58 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T1 – DIC – Parte traseira	126
Figura 59 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 9 – T2 através da imagem quadro a quadro, parte frontal.....	128
Figura 60 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM9 – T2 – DIC – Parte Frontal	129
Figura 61 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 10 – T2 através da imagem quadro a quadro, parte frontal.....	130
Figura 62 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM10 – T2 – DIC – Parte Frontal	131
Figura 63 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 11 – T2 através da imagem quadro a quadro, parte traseira	132
Figura 64 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T2 – DIC – Parte traseira	133
Figura 65 – Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPV – T3, além dos blocos BPV isolados.....	136
Figura 66 - Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos através do DIC para os prismas PPV - T3, além dos blocos BPV isolados	138
Figura 67 – Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPV – T4, além dos blocos BPV isolados.....	140
Figura 68 - Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos através do DIC para os prismas PPV – T4, além dos blocos BPV isolados.....	141
Figura 69 – Comportamento médio das curvas para o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas para a tipologia PPV – T3 obtido através do DIC	145
Figura 70 – Comportamento médio das curvas para o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas para a tipologia PPV – T4 obtido através do DIC	146
Figura 71 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 9 – T3 através da imagem quadro a quadro, parte frontal.....	150
Figura 72 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV9 – T3 – DIC - Parte Frontal	150
Figura 73 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 10 – T3 através da imagem quadro a quadro	152
Figura 74 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV10 – T3 – DIC – Parte Traseira	152
Figura 75 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 11 – T3 através da imagem quadro a quadro, parte frontal.....	153
Figura 76 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV11 – T3 – DIC – Parte Frontal	154
Figura 77 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 5 – T4 através da imagem quadro a quadro, parte traseira	156
Figura 78 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV5 – T4 – DIC – Parte Traseira	157
Figura 79 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 10 – T4 através da imagem quadro a quadro, parte frontal.....	158
Figura 80 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV10 – T4 – DIC – Parte frontal	158
Figura 81 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 11 – T4 através da imagem quadro a quadro, parte frontal.....	160
Figura 82 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV11 – T4 – DIC – Parte Frontal	160

Figura 83 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPM – T1, além dos blocos BPM. 183	183
Figura 84 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPM – T2, além dos blocos BPM. 184	184
Figura 85 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPV – T3, além dos blocos BPV .. 185	185
Figura 86 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPV – T4, além dos blocos BPV .. 187	187
Figura 87 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtido através do DIC para os prismas PPM – T1, além dos blocos BPM 188	188
Figura 88 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtido através do DIC para os prismas PPM – T2, além dos blocos BPM 189	189
Figura 89 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtido através do DIC para os prismas PPV – T3, além dos blocos BPV 190	190
Figura 90 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtido através do DIC para os prismas PPV – T4, além dos blocos BPV 192	192
Figura 91 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T1 – DIC – Parte Frontal 193	193
Figura 92 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T1 – DIC – Parte traseira 194	194
Figura 93 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T1 – DIC – Parte frontal 195	195
Figura 94 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM10 – T1 – DIC – Parte frontal 195	195
Figura 95 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM8 – T1 – DIC – Parte traseira 196	196
Figura 96 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM8 – T1 – DIC – Parte frontal 197	197
Figura 97 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM7 – T1 – DIC – Parte traseira 198	198
Figura 98 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM10 – T2 – DIC – Parte traseira 199	199
Figura 99 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM9 – T2 – DCI – Parte traseira 200	200
Figura 100 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM8 – T2 – DIC – Parte traseira 201	201
Figura 101 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM7 – T2 – DIC – Parte traseira 201	201
Figura 102 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV11 – T3 – DIC – Parte traseira 203	203
Figura 103 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV10 – T3 – DIC – Parte Frontal 204	204
Figura 104 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV9 – T3 – DIC – Parte traseira 205	205
Figura 105 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV8 – T3 – DIC – Parte frontal 205	205
Figura 106 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV8 – T3 – DIC – Parte traseira 206	206
Figura 107 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV7 – T3 – DIC – Parte frontal 207	207

Figura 108 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV7 – T3 – DIC – Parte traseira	208
Figura 109 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV11 – T4 – DIC – Parte traseira	209
Figura 110 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV10 – T4 – DIC – Parte traseira	210
Figura 111 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV6 – T4 – DIC – Parte frontal	211
Figura 112 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV6 – T4 – DIC – Parte traseira	213

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporções em volume e as resistências médias à compressão propostas pelas normas ASTM C 270-07 (2007) e BS 5628 (2005)	34
Tabela 2 – Traços em volume para as classes de argamassas e propriedades desejadas para cada classe	36
Tabela 3 - Valores de \emptyset em função da quantidade de blocos.....	37
Tabela 4 – Resultados médios dos blocos e prismas encontrados por Rizzatti (2003) ..	49
Tabela 5 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Khoo (1972).....	56
Tabela 6 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Atkinson <i>et al.</i> (1985).....	57
Tabela 7 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Mohamad (1998)	59
Tabela 8 – Normas adotadas para os procedimentos experimentais	73
Tabela 9 – Tipologia e dimensões nominais dos blocos ensaiados	74
Tabela 10 – Dimensões médias dos blocos utilizados.....	75
Tabela 11 – Características físicas médias dos blocos avaliados	75
Tabela 12 – Resistências à compressão dos blocos na área bruta e na área líquida	77
Tabela 13 – Traços de argamassa utilizados, em massa.....	78
Tabela 14 – Definição das resistências das argamassas adotadas	78
Tabela 15 – Resumo das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido .	79
Tabela 16 – Deformação específica axial máxima dos blocos BPM obtidos através da instrumentação.....	90
Tabela 17 – Módulo de elasticidade dos blocos de parede maciça obtido através da instrumentação.....	91
Tabela 18 – Deformação específica axial máxima dos blocos BPM obtido através do DIC	92
Tabela 19 – Módulo de elasticidade dos blocos de parede maciça obtido através da técnica DIC	92
Tabela 20 - Deformação específica axial máxima dos blocos BPV obtidos através da instrumentação.....	95
Tabela 21 – Módulo de elasticidade dos blocos BPV obtidos através da instrumentação	95
Tabela 22 – Deformação específica axial máxima dos blocos BPV obtido através do DIC	96
Tabela 23 – Módulo de elasticidade dos blocos de parede vazada obtido através do DIC	97
Tabela 24 – Resistências dos corpos de prova de argamassa instrumentados.....	98
Tabela 25 – Deformação Específica axial dos corpos de prova de argamassa.....	102
Tabela 26 – Módulo de elasticidade das argamassas de traços T1, T2, T3 e T4.....	103
Tabela 27 - Resistência à compressão axial dos prismas de blocos de parede maciça	104
Tabela 28 – Módulo de elasticidade dos componentes dos prismas PPM - T1 e PPM - T2 obtidos através da instrumentação e DIC	116
Tabela 29 – Módulo de elasticidade inicial dos prismas PPM – T1 e PPM – T2 obtidos através do DIC	119
Tabela 30 - Resistência à compressão dos prismas de blocos de parede vazada	135
Tabela 31 – Módulo de elasticidade dos componentes dos prismas PPV - T3 e PPV - T4 obtidos através da instrumentação e do DIC	144

Tabela 32 – Módulo de elasticidade dos prismas PPV - T3 e PPV - T4 obtidos através do DIC	147
Tabela 33 – Resistências mecânicas e módulos de elasticidades das tipologias avaliadas através dos strain gauges	149
Tabela 34 – Resistências médias (MPa) e eficiência prisma/bloco.....	163
Tabela 35 – Resistência à compressão axial dos blocos cerâmicos de parede vazada.	180
Tabela 36 – Resistência à compressão axial dos blocos cerâmicos de parede maciça.	180
Tabela 37 – Composição granulométrica da areia.....	181
Tabela 38 – Ensaio dimensionais dos blocos cerâmicos BPM.....	181
Tabela 39 – Ensaio dimensionais dos blocos cerâmicos BPV.....	182

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Materiais utilizados na moldagem dos prismas por Lübeck (2016).....	62
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{brut}	Área bruta da seção transversal
A_{liq}	Área líquida da seção transversal
E_{sec}	Módulo de elasticidade secante
E_{tg}	Módulo de elasticidade tangente
M_{seca}	Massa seca
f_a	Resistência à compressão média da argamassa
f_{arg^*}	Resistência à compressão da argamassa confinada;
f_{arg}	Resistência à compressão uniaxial da argamassa;
$f_{bk,bruta}$	Resistência característica à compressão do bloco na área bruta
$f_{bk,liq}$	Resistência característica à compressão do bloco na área líquida
f_{bk}	Resistência característica à compressão do bloco
f_{pi}	Resistência à compressão do prisma
f_a	Tensões de confinamento transversal.
σ_{inf}	Tensão inferior ou inicial
σ_{sup}	Tensão superior ou final
$f_{bm,liq}$	Resistência à compressão média do bloco na área líquida
f_{tm}	Tensões de confinamento transversal
f_{ck}	Resistência característica à compressão da argamassa
$f_{pi,bru}$	Resistência à compressão do prisma na área bruta
$f_{pi,liq}$	Resistência à compressão do prisma na área líquida
$f_{pk,liq}$	Resistência característica à compressão do prisma na área líquida
$f_{pm,liq}$	Resistência à compressão média do prisma na área líquida
L	Comprimento
\emptyset	Fator de correção para o cálculo da resistência característica
T	Dimensão original do corpo-de-prova no sentido transversal
Δl	Variação do comprimento do corpo-de-prova no sentido longitudinal.
Δt	Variação do comprimento do corpo-de-prova no sentido transversal.
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão ou tensão axial
$\sigma_{pi,liq}$	Tensão inicial de ruptura na área líquida
f_{bm}	Resistência média à compressão dos blocos
f_p/f_b	Fator de Eficiência
f_{pm}	Resistência média do prisma
f_{pk}	Resistência característica do prisma
Δ	Variação
ε_L	Deformação específica axial ou longitudinal
ε_T	Deformação específica lateral ou transversal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	CONTRIBUIÇÕES PARA O TEMA	28
1.2	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	31
1.3	OBJETIVOS	32
1.3.1	Objetivos específicos	32
2	REVISÃO DA LITERATURA	33
2.1	COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL.....	33
2.1.1	Bloco estrutural	33
2.1.2	Argamassa de assentamento	34
2.2	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS QUE INFLUENCIAM NO MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL	36
2.2.1	Resistência característica à compressão dos blocos	37
2.2.2	Caracterização das alvenarias segundo normas brasileiras, ABNT NBR 15961:2011 e ABNT NBR 15812:2010	38
2.2.3	Deformação específica e coeficiente de Poisson	39
2.2.4	Curva tensão-deformação e módulo de elasticidade	41
2.2.5	Fator de eficiência	44
2.2.6	Formas de ruptura na alvenaria estrutural	45
2.3	INFLUÊNCIA DA TIPOLOGIA DO BLOCO E DA ARGAMASSA NO MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL	48
2.3.1	Influência do bloco estrutural no modo de ruptura	48
2.3.2	Influência da junta de argamassa de assentamento no modo de ruptura	50
2.3.2.1	<i>O fenômeno de confinamento da argamassa</i>	53
2.3.2.2	<i>O fenômeno de esmagamento da junta de argamassa</i>	60
3	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (DIGITAL IMAGE CORRELATION – DIC)	65
3.1	IMAGENS DIGITAIS	65
3.1.1	Correspondência de pontos	67
3.1.2	Medição de deformações através do DIC	67
3.1.3	Software GOM Correlate	70
3.1.4	Metodologia de análise das imagens	70
4	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	73
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	73
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	74
4.2.1	Bloco estrutural	74
4.2.2	Características dimensionais dos blocos	74
4.2.3	Determinação de absorção d'água e determinação da área líquida	75
4.2.4	Resistência dos blocos cerâmicos	76
4.2.5	Argamassa moldada em laboratório	77
4.2.6	Preparação dos prismas avaliados	79
4.2.7	Instrumentação dos prismas	82
4.3	ENSAIOS INSTRUMENTADOS	83
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	89
5.1	COMPORTAMENTO DOS BLOCOS AXIALMENTE COMPRIMIDOS	89
5.1.1	Bloco estrutural de parede maciça	89
5.1.2	Bloco estrutural de parede vazada	94
5.2	AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES EM ARGAMASSAS	98

5.3	AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DOS COMPONENTES DOS PRISMAS	103
5.4	PRISMA DE BLOCO ESTRUTURAL DE PAREDE MACIÇA.....	104
5.4.1	Avaliação do modo de ruptura	120
5.5	PRISMA DE BLOCO ESTRUTURAL DE PAREDE VAZADA.....	134
5.5.1	Avaliação do modo de ruptura	149
5.6	FATOR DE EFICIÊNCIA MÉDIO.....	162
6	CONCLUSÕES.....	165
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	168
	REFERÊNCIAS	169
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	180
	APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DOS COMPONENTES DO PRISMA EM NÍVEL DE TENSÃO ATRAVÉS DA EXTENSOMETRIA	183
	APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DOS COMPONENTES DOS PRISMAS EM NÍVEL DE TENSÃO ATRAVÉS DO DIC.....	188
	APÊNDICE D – AVANÇO DO PROCESSO DE RUPTURA DOS PRISMAS AVALIADOS ATRAVÉS DO DIC.....	193
	AVANÇO DO MODO DE RUPTURA DE PRISMAS DA TIPOLOGIA PPM – T1.....	193
	AVANÇO DO MODO DE RUPTURA DE PRISMAS DA TIPOLOGIA PPM – T2.....	199
	AVANÇO DO MODO DE RUPTURA DE PRISMAS DA TIPOLOGIA PPV – T3.....	203
	AVANÇO DO MODO DE RUPTURA DE PRISMAS DA TIPOLOGIA PPV – T4.....	209

1 INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo onde a parede além da função de vedação exerce ao mesmo tempo a função estrutural. As paredes de alvenaria são formadas pela união de diferentes materiais entre os quais têm-se os blocos, argamassa e, às vezes, graute. A variabilidade de composição desses materiais aliada às características físicas e geométricas diferentes, impõe certas dificuldades em estabelecer modelos que representem o modo de ruptura da parede (MOHAMAD, 2007).

Pela necessidade cada vez maior de rapidez de execução de obras e prazos curtos de entrega, aliada ao incentivo ao fomento nos bancos públicos, a alvenaria estrutural tem se tornado uma alternativa construtiva largamente empregada, tanto com blocos de concreto, quanto com blocos cerâmicos, alcançando torres com mais de 20 pavimentos (TAUIL, 2013). Porém, ela se torna ainda mais competitiva em edifícios com pequenas dimensões, onde a diminuição do uso de formas de madeira e a rapidez de execução acabam gerando uma grande economia de custo quando comparada ao sistema construtivo em concreto armado.

Dessa forma, houve uma intensificação nas pesquisas sobre o tema, ao mesmo tempo que universidades adequaram os seus currículos de graduação em Engenharia Civil para a prática de projeto e dimensionamento em alvenaria estrutural. Assuntos como um projeto arquitetônico racional e modular além do cálculo estrutural da alvenaria aparecem como atividade prática nos cursos de graduação.

A norma brasileira ABNT NBR 15812:2010 regulamentariza o projeto, a execução, o controle e os métodos de ensaios para a alvenaria estrutural executada em blocos cerâmicos. Para a execução com blocos de concreto, a norma brasileira é a ABNT NBR 15961:2011, que estabelece os requisitos mínimos de projeto, controle e execução de obras. Pela falta de conhecimento em alguns aspectos dos materiais empregados na alvenaria estrutural, estas normas limitam o comportamento da estrutura apenas com relação à resistência última, praticamente desconsiderando as deformações específicas dos materiais sob carregamento.

Santana e Araújo (2017) afirmam que o conhecimento sobre o comportamento da alvenaria estrutural ainda precisa ser aprofundado para que seja possível alcançar níveis de desenvolvimento tecnológico similares aos que podem ser vistos sobre outras estruturas convencionais utilizadas. Lübeck (2016) afirma que as pesquisas que têm

permitido avançar o conhecimento da alvenaria estrutural, também revelaram a carência de conhecimento do comportamento do material sob alguns aspectos, mais precisamente próximo a ruptura.

Essa carência de conhecimento acarreta impactos no dimensionamento e nas práticas das atividades do projeto estrutural, uma vez que o comportamento do material compósito é dependente das propriedades dos materiais analisados separadamente, bloco e argamassa, assim como da interação entre eles.

A Norma Europeia EN 1996-1-1 (2002) relaciona, por exemplo, as resistências dos materiais constituintes e as características físicas dos blocos através de equações. Além disso, propõe valores para módulo de elasticidade e idealiza um comportamento tensão-deformação para a alvenaria comprimida quando realizados ensaios em pequenas paredes.

Entender o comportamento da alvenaria estrutural sob diferentes níveis de carregamento fará possível estabelecer níveis de segurança para a estrutura em análise. Considerar a resistência da alvenaria estrutural apenas no estado limite último, pode fazer com que a estrutura apresente um grau de segurança menor que o exigido ou possa romper de maneira abrupta, sem aviso. Dessa forma, a verificação das deformações torna-se fundamental, pois permite estimar o comportamento da estrutura.

1.1 CONTRIBUIÇÕES PARA O TEMA

Mohamad, Lourenço e Roman (2006) avaliaram ensaios de prismas à compressão confeccionados com diferentes blocos de concreto e argamassas e propuseram um modelo que estabelecesse a relação entre o modo de ruptura e as características mecânicas dos materiais isolados. Os pesquisadores concluíram que a não linearidade da curva tensão-deformação do conjunto depende da argamassa utilizada. Houve uma redução do coeficiente de Poisson das argamassas com o aumento do confinamento. Além disso, salientaram a existência de dois modos de ruptura, o primeiro caracterizado pela indução de tração no bloco, quando era atingida a sua resistência à tração, e o segundo caracterizado pelo esmagamento da junta de assentamento, quando a argamassa atingia o seu limite da resistência à compressão confinada.

Mohamad (2007), analisou o comportamento de prismas de blocos de concreto utilizando duas resistências de argamassas com o intuito de avaliar o modo de ruptura e o comportamento tensão-deformação de cada conjunto. O pesquisador concluiu que a

argamassa comanda a forma de ruptura da alvenaria. Apesar da tensão última nos dois tipos de prismas terem valores próximos, pouco acima de 14 MPa, o comportamento tensão-deformação dos materiais foi completamente diferente. Para os prismas com argamassa mais resistente, onde tinha-se a resistência da argamassa muito próxima à resistência do bloco, a ruptura se deu por tração no bloco e o comportamento tensão-deformação foi linear até aproximadamente 60% da carga última. Para os prismas com argamassa mais fraca, entretanto, observou-se um comportamento não-linear desde um nível de tensão próximo a 30% da resistência à compressão e o esmagamento localizado das juntas de argamassa para níveis de tensão de 50% da resistência, caracterizando-se, dessa forma, a ruptura, iniciada pelo esmagamento da junta e, posteriormente, a propagação de fissuras nos blocos.

Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015) avaliaram o desempenho de argamassas industrializadas e traços de argamassas mistas empregados no Brasil para alvenarias estruturais de blocos de concreto, com resistência nominal de 16 MPa. Os pesquisadores concluíram que as argamassas comumente utilizadas no Brasil, não possuem a capacidade de gerar alvenarias com desempenho totalmente satisfatório. Os prismas moldados com argamassas industrializadas apresentaram ruptura por esmagamento da junta, que se iniciava em níveis de tensões inferiores à de ruptura. As argamassas mistas melhoraram a performance dos prismas, dada a presença de retentores de água, alcançando maiores fatores de eficiência quando comparadas com as argamassas industrializadas. Além disso, percebeu-se que é necessário a utilização de traços mais ricos do que habitualmente empregado na construção civil para que se alcance fatores de eficiência acima de 0,70 e ocorra a ruptura por tração no bloco.

Há uma carência nas normas brasileiras que delimitem as propriedades da argamassa de assentamento para cada tipologia de parede utilizada, principalmente à resistência à compressão (Mohamad et al., 2018). Torna-se necessário estabelecer uma resistência para a argamassa de assentamento que não seja tão alta a ponto de comprometer a ductilidade da alvenaria e nem tão baixa para que não sofra esmagamento e induza a ruptura da parede por meio da concentração de tensões.

Fortes, Parsekian e Fonseca (2014) afirmam que apesar das vantagens proporcionadas pela atual versão da NBR 15961:2011 nas partes 1 e 2, ainda há uma carência de parâmetros técnicos e conceitos de projeto de alvenaria estrutural, o que contribui para o pouco conhecimento geral sobre o comportamento mecânico da alvenaria.

O fenômeno de esmagamento da junta tende a ocorrer devido ao fechamento dos macroporos do material, resultando na compactação da junta e destruição do esqueleto resistente da argamassa (Lübeck, 2016). A destruição da estrutura do material resulta na quebra da aderência entre a argamassa e os blocos assentados, havendo a dessolidarização entre os blocos, fazendo com que alvenaria deixe de funcionar como um sistema monolítico antes de atingir a carga última de ruptura.

Mohamad et al. (2017) avaliaram os modos de ruptura de prismas moldados com blocos de concreto e três argamassas com diferentes resistências, considerando o comportamento tensão-deformação do bloco e da argamassa. Para todas as situações analisadas, a argamassa comandou a forma de ruptura da alvenaria. A relação entre os módulos de elasticidade da alvenaria e do bloco, utilizada como medida da perda de rigidez, indica que a alvenaria construída utilizando uma argamassa forte se comporta praticamente como um material homogêneo. Para os prismas moldados utilizando argamassa de alta resistência, o modo de ruptura deu-se devido às tensões de tração desenvolvidas no bloco. Para os prismas construídos com duas argamassas fracas, observou-se que à medida que a relação tensão/resistência aumentava, a razão entre os módulos de elasticidade da alvenaria e argamassa diminuíram para proporções de 0,32 e 0,55 para a argamassa fraca e a mais fraca, respectivamente. Para esta situação, a resistência da argamassa não teve grande importância, uma vez que, para ambas as situações, os prismas romperam devido ao esmagamento da junta de argamassa. Além disso, os autores concluíram que o uso do comportamento tensão-deformação não-linear dos materiais torna-se uma previsão confiável para estimar a resistência à compressão da alvenaria. Alvarenga et al. (2017), observaram o mesmo tipo de comportamento utilizando blocos cerâmicos.

De Lima (2010) e Mota et al. (2012) também constataram a influência da resistência da argamassa na forma de ruptura da alvenaria. Esses autores verificam que quanto maior a espessura da junta de assentamento, maior foi a tendência de ocorrer esmagamento. Caldeira (2018), ao avaliar prismas de bloco de concreto submetidos à compressão com argamassas de diferentes resistências também verificou que o aumento da espessura da argamassa promovia uma redução da resistência à compressão dos prismas avaliados.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A influência das propriedades da argamassa de assentamento no desempenho das alvenarias estruturais já foi apontada por diferentes autores e a sua negligência pode provocar problemas na edificação devido ao uso incorreto ou desconhecimento do comportamento do material.

Entender como a espessura e a resistência à compressão da argamassa de assentamento podem influenciar na resistência final da alvenaria pode levar a otimização da utilização dos materiais associados, prevendo melhor seu comportamento de acordo com o nível de tensão atuante, bem como atingir maiores níveis de eficiência bloco/argamassa.

As normas brasileiras vigentes de alvenaria estrutural tratam a argamassa como um elemento de ligação dos blocos estruturais, sugerindo que a resistência máxima da argamassa seja 0,70 da resistência à compressão do bloco na área líquida e não estabelecendo relações de resistência de blocos por resistências das argamassas a serem utilizadas. Portanto, existe uma lacuna devido as múltiplas formas de blocos estruturais existentes para serem empregados atualmente nesse sistema construtivo.

Mohamad et al. (2018) constataram que há diferenças significativas nos resultados experimentais dos ensaios de resistência à compressão da argamassa, variando conforme o tipo de argamassa e/ou das dimensões dos corpos de prova. Após ensaios preliminares, os autores verificaram a dificuldade de avaliar as deformações específicas axiais e variações mecânicas sofridas pela argamassa quando unidas aos blocos e confinadas em juntas de assentamento de alvenarias.

Dessa forma, justifica-se a necessidade desse estudo para correlacionar e entender como as propriedades da argamassa e dos blocos podem influenciar a forma de ruptura da alvenaria, analisando a curva tensão-deformação dos materiais componentes diante de diferentes tipologias de blocos e resistências de argamassa quando avaliados separadamente e em conjunto. Conhecendo-se melhor as propriedades dos materiais constituintes da alvenaria e o comportamento do conjunto bloco-argamassa, busca-se alcançar melhores especificações e projetos de qualidade, atingindo fatores de eficiência mais elevados e prevendo o comportamento em diferentes níveis de tensões atuantes na alvenaria estrutural.

1.3 OBJETIVOS

Avaliar a curva tensão-deformação e o modo de ruptura de prismas cerâmicos de alvenaria através da instrumentação e da técnica DIC confeccionados com argamassas de diferentes resistências combinadas com diferentes tipos de blocos cerâmicos quando submetidos à compressão axial.

1.3.1 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento tensão-deformação das argamassas quando comprimidas axialmente. Avaliar se o comportamento não linear da curva tensão-deformação das argamassas comprimidas relaciona o início de ruptura das mesmas.
- Avaliar o comportamento tensão-deformação dos blocos quando comprimidos axialmente.
- Avaliar o comportamento tensão-deformação de prismas comprimidos axialmente através da instrumentação e da técnica DIC, alternando os tipos de argamassa e blocos, e determinar a influência da resistência da argamassa nas deformações sofridas durante o carregamento à compressão axial.
- Avaliar a influência da argamassa e do tipo de bloco no modo de ruptura dos prismas submetidos à compressão.
- Avaliar se a geometria e a resistência à compressão do bloco resultam no esmagamento da junta de argamassa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem por finalidade abordar, a partir do referencial teórico, os principais tópicos que irão direcionar a metodologia da pesquisa. Dessa forma, aqui serão abordados os assuntos relacionados ao trabalho, desde as conceituações dos componentes da alvenaria estrutural até as propriedades mecânicas do conjunto que determinam diferentes deformações. Além disso, a pesquisa bibliográfica discute as pesquisas já realizadas sobre a influência dos componentes no modo de ruptura da alvenaria e os diferentes comportamentos da junta de assentamento.

2.1 COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL

2.1.1 Bloco estrutural

Atualmente, tem-se produzido diversas tipologias de blocos estruturais, para diferentes finalidades, variando a forma e os materiais utilizados na sua produção, podendo ser de concreto, concreto celular auto-clavado, cerâmico e sílico-calcário. No Rio Grande do Sul, os blocos mais utilizados são os cerâmicos e de concreto. A ABNT NBR 15812:2010 traça diretrizes sobre os blocos do tipo cerâmicos e a ABNT NBR 15961:2011 aborda os blocos de concreto.

Tratando-se da geometria do bloco estrutural, existem inúmeras variedades. De Marco (2016) e Lübeck (2016) constataram que o tipo de material do bloco interfere no modo de ruptura do prisma, uma vez que os blocos cerâmicos possuem uma ruptura mais explosiva quando comparados aos blocos de concreto. Além disso, Rizzatti (2003), Steil (2003), Nascimento, Raupp-Pereira e Roman (2010) e Thamboo, Dhanasekar e Yan (2013) avaliaram diferentes geometrias de blocos, constatando que essa propriedade interfere diretamente na resistência última da alvenaria.

A área líquida do bloco é determinada pela geometria da seção transversal do mesmo, que corresponde a área da face do bloco onde desconta-se as áreas dos vazios; e a área bruta é a própria área da seção transversal (NBR 15812:2010; NBR 15961:2011).

Mohamad (1998) afirma que as características mecânicas dos blocos que mais influenciam no comportamento de ruptura da alvenaria são: resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

2.1.2 Argamassa de assentamento

Além do estudo dos blocos estruturais e de vedação, é importante destacar o comportamento da argamassa de assentamento, pois é através desta que se garantem o monolitismo e a solidez necessária à parede (Mohamad, 2007). Uma das principais funções da argamassa é a de transmitir todas as ações atuantes na estrutura para a fundação. Além disso, as argamassas de assentamento exercem outras funções, como assimilar as deformações e compensar as irregularidades provenientes das unidades de alvenaria.

De acordo com a literatura, as principais funções das juntas de argamassa em uma parede de alvenaria são:

- Unir solidamente as unidades de alvenaria e ajuda-las a resistir aos esforços verticais e laterais;
- Distribuir de forma uniforme as cargas atuantes na parede para toda a área resistente dos componentes de alvenaria;
- Absorver as deformações naturais a que a alvenaria esteja sujeita no tempo;

As normas brasileiras carecem de informações com relação as propriedades das argamassas empregadas para assentamento, principalmente quando se refere à resistência à compressão (Lübeck, 2016). Por outro lado, realizando-se uma tabela comparativa das resistências à compressão das classes de argamassas fixadas pela norma ASTM C 270-07 (2007) e BS 5628 (2005), é possível avaliar que a norma britânica é mais conservadora em termos de valores propostos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Proporções em volume e as resistências médias à compressão propostas pelas normas ASTM C 270-07 (2007) e BS 5628 (2005)

Classes de argamassa		Cimento	Cal	Areia	Resistência à compressão aos 28 dias
ASTM C 270-07 (2007)	M	1	0,25	3,12 a 3,75	17,2
	S	1	0,5	3,75 a 4,5	12,4
	N	1	1,25	5,62 a 6,75	5,2
	O	1	2,25	8,12 a 9,75	2,4
BS 5628 (1192)	i	1	0 a 0,25	3	16
	ii	1	0,5	4 a 4,5	6,5
	iii	1	1	5 a 6	3,6
	iv	1	2	8 a 9	1,5

Fonte: Elaboração própria.

Quando se aumenta a proporção de cimento na argamassa, tem-se no estado fresco uma maior exsudação, menor tempo de endurecimento e aumento da retração e coesão. No estado endurecido, tem-se aumento da resistência à compressão, da aderência superficial e a diminuição da capacidade de acomodar as deformações (MOHAMAD, 2007).

A cal tem como principal função aumentar a trabalhabilidade, aumentar a retenção de água e aumentar a coesão da argamassa. Também diminui a retração na secagem e gera diminuição da exsudação. No estado endurecido, tem-se um aumento na aderência superficial, na capacidade de deformação e da resistência com o passar do tempo.

As normas internacionais, de maneira geral, estabelecem que uma argamassa deve ter bom desempenho tanto no seu estado fresco quanto endurecido. Para o estado fresco, a argamassa deve ser trabalhável e possuir boa retenção de água. No estado endurecido, deve apresentar boa aderência, durabilidade, elasticidade e resistência à compressão suficiente. Além disso, as normas ressaltam a importância da aderência bloco-argamassa, sendo esta condição tão ou mais relevante do que a resistência à compressão.

A trabalhabilidade e a capacidade de retenção de água são propriedades fundamentais para as argamassas utilizadas em alvenaria estrutural. A trabalhabilidade reflete propriedades como a coesão, a trabalhabilidade e a habilidade da argamassa para manter a forma e espessura da junta sobre o bloco e para ser facilmente aplicada e manuseada. A retenção de umidade torna-se fundamental para que não haja o enfraquecimento da ligação entre a argamassa e os blocos pela rápida perda de água da argamassa para o bloco (Lübeck, 2016). Os blocos, principalmente cerâmicos, tendem a retirar a água da argamassa, e essa migração de umidade pode, caso ocorra em demasia, prejudicar a ligação bloco-argamassa (Mohamad, 2013; Parsekian, Hamid e Drysdale, 2012; Carasek, 2010; Parsekian e Soares, 2010).

A norma americana ACI 530-01 (2002) apresenta as proporções de cimento, cal e areia, medidos em volume, para alguns traços de argamassas identificados como M, S, N e O. Além disso, para cada um dos traços, é especificada uma resistência à compressão média esperada, índice de retenção de água mínimo e teor de ar incorporado. A delimitação do índice de retenção de água e teor de ar incorporado para cada um dos traços de argamassa tem como objetivo garantir um adequado comportamento do material no estado fresco e endurecido. A Tabela 2 apresenta as classes de argamassa e suas propriedades desejadas conforme a ACI 530-01 (2002).

Tabela 2 – Traços em volume para as classes de argamassas e propriedades desejadas para cada classe

Classe da Argamassa	Materiais em volume			Resistência à compressão média aos 28 dias (Mpa)	Retenção de água mínima (%)	Teor máximo de ar incorporado (%)
	Cimento	Cal	Areia			
M	1	0,25	2,5 a 3 vezes a soma dos aglomerantes	17,2	75	12
S	1	0,25 a 0,50		12,4		12
N	1	0,50 a 1,25		5,2		14
O	1	1,25 a 2,25		2,4		14

Fonte: ASTM C 270-07, 2007.

Com relação à espessura da junta de argamassa, em qualquer uma das normas internacionais, existe a recomendação de que o valor seja o menor possível, desde que o assentamento do bloco seja apropriado, acomodando suas irregularidades. O valor de espessura indicado como ideal é de aproximadamente 10 mm. A norma ACI 530-05 (2005) afirma que, quando adotado uma altura para a junta de argamassa próxima a 10 mm, a resistência à compressão da argamassa em juntas de alvenaria, supera em mais de duas vezes a resistência medida em cubos de 50mm de lado. Recomenda-se adotar a menor espessura possível da junta para manter o estado de confinamento da argamassa das juntas.

A capacidade de retenção de água é uma das propriedades mais desejáveis e importantes para a argamassa para que não haja enfraquecimento na ligação e na aderência bloco/argamassa, como apontam autores como Parsekian e Soares (2010), Carasek (2010), Parsekian, Hamid e Drysdale (2012) e Mohamad (2013). Segundo esses autores, mais água que o necessário deve ser acrescentado na mistura para a hidratação do cimento, permitindo que a água em excesso possa ser absorvida pelos blocos.

2.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS QUE INFLUENCIAM NO MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL

Diversas propriedades afetam diretamente o comportamento da alvenaria estrutural e as principais são discutidas na sequência.

2.2.1 Resistência característica à compressão dos blocos

A resistência característica deve atingir os requisitos mínimos que a norma especifica, bem como as exigências do projeto estrutural. De acordo com a ABNT NBR 15270-2:2017, a resistência característica à compressão (f_{bk}) dos blocos cerâmicos estruturais deve ser considerada a partir de 3,0 MPa, considerando a área bruta.

O valor estimado da resistência à compressão da amostra dos blocos é calculado pela Equação 1:

$$f_{bk, est.} = 2. [(f_{b(1)} + f_{b(2)} + \dots + f_{b(i-1)}) / (i-1)] - f_{bi} \quad (1)$$

Onde, tem-se:

$f_{bk, est.}$ = é a resistência característica estimada da amostra, em MPa;

$f_b(1), \dots, f_b(2), \dots, f_{bi}$ = são os valores de resistência à compressão individual dos corpos de prova (CP) da amostra, ordenados de forma crescente;

$i = n/2$, se n for par;

$i = (n-1)/2$, se n for ímpar;

$n = é$ a quantidade de blocos da amostra

Após realizado o cálculo do $f_{bk, est.}$, deve-se realizar a seguinte análise:

- se o valor do $f_{bk, est.} \geq f_{bm}$ (média da resistência à compressão de todos os corpos de prova da amostra), adota-se f_{bm} como a resistência característica do lote (f_{bk});
- se o valor do $f_{bk, est.} < \emptyset \cdot f_b(1)$ (menor valor da resistência à compressão de todos os corpos de prova da amostra), adota-se a resistência característica à compressão (f_{bk}) determinada pela expressão $\emptyset \cdot f_b(1)$, estando os valores de \emptyset indicados na Tabela 3.
- caso o valor calculado de $f_{bk, est.}$ esteja entre os limites mencionados acima ($\emptyset \cdot f_b(1)$ e f_{bm}), adota-se este valor como a resistência característica à compressão (f_{bk}).

Tabela 3 - Valores de \emptyset em função da quantidade de blocos

Quantidade de blocos	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	≥ 18
\emptyset	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1	1,01	1,02	1,04	

NOTA: Recomenda-se adotar $n \geq 13$

Fonte: ABNT NBR 15270-2:2017.

Para a determinação das características geométricas dos blocos e para a determinação da resistência característica à compressão, as amostras devem ser

constituídas de pelo menos 13 corpos de prova. Para o ensaio de determinação do índice de absorção de água, a amostra deve ser constituída de seis corpos de prova.

2.2.2 Caracterização das alvenarias segundo normas brasileiras, ABNT NBR 15961:2011 e ABNT NBR 15812:2010

As normas brasileiras se subdividem em função do tipo de material dos blocos utilizados. Para blocos de concreto, tem-se a ABNT NBR 15961:2011, para blocos cerâmicos, tem-se a ABNT NBR 15812:2010. Ambas se dividem em duas partes, uma para projeto e outra para execução e controle.

Para as normas brasileiras, não há forma de estimar a resistência por ábacos, tabelas ou equações como adotado nas normas estrangeiras. A previsão da resistência da alvenaria à compressão deve ser realizada através de ensaios de rupturas de paredes em escala real, pequenas paredes ou prismas.

Para as normas brasileiras, há três formas correspondentes para medição da resistência à compressão da alvenaria. A resistência característica da alvenaria (f_k) pode ser medida nas paredes, ou igual a 85% da medida nas pequenas paredes (f_{ppk}), ou 70% da medida nos prismas (f_{bk}).

Diversos pesquisadores por meio de ensaios à compressão de prismas, pequenas paredes e paredes propuseram modelos para prever a resistência à compressão axial da alvenaria. Sarhat e Sherwood (2014) desenvolveram uma fórmula empírica simples para prever a resistência à compressão da alvenaria de blocos de concreto oco e não grauteados, através de uma revisão de banco de dados. Os autores verificaram que os principais fatores que interferem na resistência para as diferentes alvenarias avaliadas foram a resistência do bloco, o tipo e a resistência da argamassa e a altura da junta de argamassa de assentamento.

Thaickavil e Thomas (2017), considerando diferentes tipos de materiais de blocos e através de dados experimentais de outros autores, desenvolveram uma equação de previsão de resistência à compressão axial de prismas. Por meio do modelo proposto, os autores consideram que, para obter resultados com maior precisão, deve-se levar em conta a fração volumétrica do bloco utilizado e a razão de volume da junta de assentamento da argamassa.

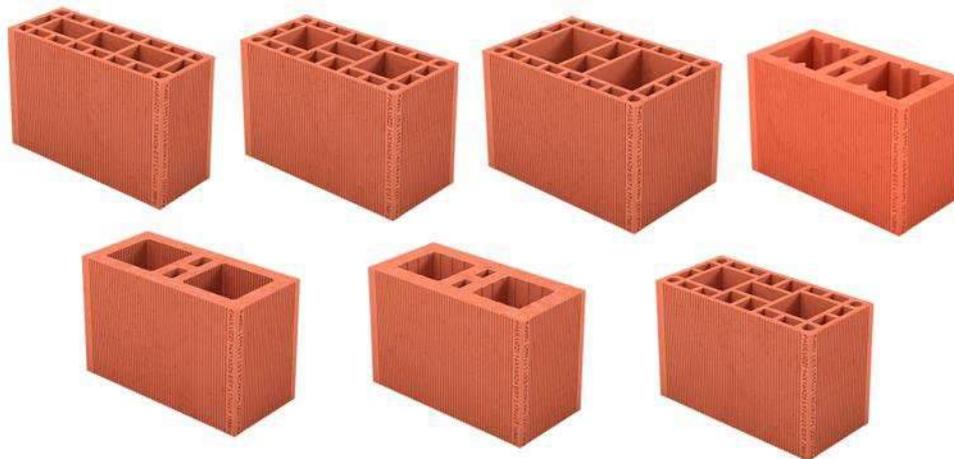
Sabendo-se que a resistência do prisma depende da argamassa utilizada, a resistência só será conhecida após os blocos serem adquiridos para a obra. Diante disso,

os projetistas ficam na dúvida de qual valor de resistência de bloco indicar ao proprietário da obra para que a resistência do prisma seja atingida e, por fim, a resistência à compressão da alvenaria. Dessa forma, tem-se trabalhado com valores médios de fator de eficiência prisma-bloco, que é a razão entre a resistência à compressão do prisma e o bloco que o compõe.

As normas brasileiras não fornecem nenhum indicativo de carga como as normas internacionais comentadas. Ramalho e Corrêa (2003), apontam uma justificativa para essa situação como sendo a extensa territorialidade brasileira, onde a variabilidade dos constituintes dos blocos é muito grande. Diante disso, torna-se difícil estabelecer uma resistência para a alvenaria a partir do conhecimento das propriedades dos componentes.

Os blocos de concreto costumam ter uma variabilidade menor em seus formatos, variando muito pouco entre um fabricante e outro. Porém, o mesmo não ocorre para os blocos cerâmicos. Cada fabricante costuma ter uma gama de geometrias, o que acaba acarretando diferentes relações área líquida-área bruta para os blocos cerâmicos estruturais. Na Figura 1 apresentam-se algumas das geometrias de blocos cerâmicos encontrados para alvenaria estrutural no Rio Grande do Sul.

Figura 1 – Geometrias de blocos cerâmicos encontrados no Rio Grande do Sul



Fonte: <https://pauluzzi.com.br/produtos/>

2.2.3 Deformação específica e coeficiente de Poisson

A variação nas dimensões de um corpo-de-prova por unidade da dimensão quando submetido a um carregamento é denominada de deformação específica. Quando medida no sentido longitudinal do corpo-de-prova, é denominada deformação específica axial ou

longitudinal (ε_L). Quando medida transversalmente ao sentido do carregamento, é dita deformação específica transversal ou lateral (ε_T).

Um prisma submetido à compressão axial sofre variação de comprimento no sentido do carregamento e no sentido transversal da aplicação de carga. As Equações 2 e 3 e a Figura 2 definem a forma de cálculo da deformação específica.

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta l}{L} \quad (2)$$

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta t}{T} \quad (3)$$

Onde:

ε_L - Deformação específica longitudinal.

ε_T - Deformação específica transversal.

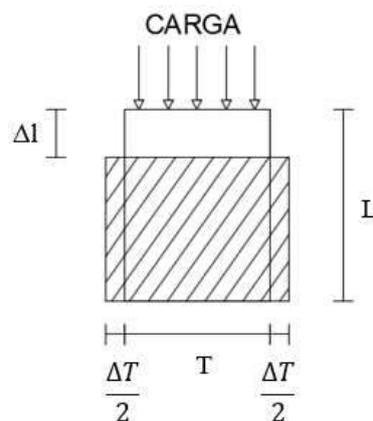
Δl - Variação do comprimento do corpo-de-prova no sentido longitudinal.

Δt - Variação do comprimento do corpo-de-prova no sentido transversal.

L - Dimensão original do corpo-de-prova no sentido longitudinal.

T - Dimensão original do corpo-de-prova no sentido transversal.

Figura 2 – Variação dimensional de um corpo quando submetido a um carregamento uniaxial.



Fonte: Elaboração própria.

A razão entre a deformação específica transversal e a deformação específica longitudinal é denominada de coeficiente de Poisson (ν). O coeficiente de Poisson é uma grandeza estabelecida para materiais elásticos, porém é utilizado também para análises inelásticas, sendo assim denominado de coeficiente de Poisson aparente. O coeficiente de Poisson também se trata de uma grandeza adimensional e é calculado de acordo com a equação 4.

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (4)$$

2.2.4 Curva tensão-deformação e módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade representa a inclinação da curva tensão-deformação para um material submetido a um determinado carregamento uniaxial. A curva tensão-deformação ilustra se o material apresenta um comportamento frágil ou dúctil. Um material frágil sofre pouca ou nenhuma deformação até o instante da ruptura, já um material dúctil sofre grandes deformações durante seu período de carregamento antes de romper. Portanto, é fundamental avaliar o módulo de elasticidade, pois essa propriedade é importante na previsão da capacidade de deformação à compressão das alvenarias, que define como se dá a transferência de tensões entre os materiais bloco e argamassa.

O mecanismo de ruptura dos prismas de alvenaria está relacionado às deformações dos componentes da alvenaria. Avaliando curvas tensão-deformação de prismas sob compressão, Mohamad et al. (2012) observaram descontinuidades em níveis de tensão de aproximadamente 50% da resistência última, o que esteve relacionado à propagação de fissuras localizadas. Dessa forma, os autores constataram que o modo de ruptura dos prismas avaliados começava no início do comportamento não linear da curva tensão-deformação.

Alguns pesquisadores procuram correlacionar o modo de ruptura da alvenaria com o módulo de elasticidade dos prismas. Fortes et al. (2017), avaliaram a compressão axial de diferentes configurações de paredes e prismas de blocos de concreto de elevada resistência, alterando as resistências dos blocos e da argamassa. Através dos gráficos tensão-deformação específica, os autores concluíram que havia ruptura frágil de todas as paredes com deformação específica na ruptura entre 0,10 e 0,15% à compressão simples.

Mohamad et al. (2017) avaliaram através de um procedimento experimental com blocos estruturais de elevada resistência e três argamassas de diferentes resistências o comportamento da curva tensão-deformação específica dos prismas. Os autores observaram que para os prismas moldados com argamassa de resistência mais fraca, o comportamento não linear da curva tensão-deformação específica começava em um nível de tensão bem inferior quando comparado com os prismas executados com argamassa de resistência maior.

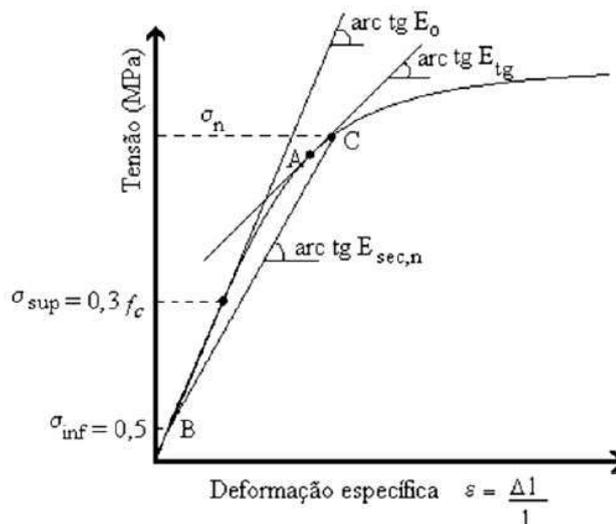
Zhou et al. (2017) realizaram um procedimento experimental com 23 paredes de alvenaria utilizando quatro diferentes combinações de blocos de concreto e argamassas para avaliar o mecanismo de ruptura e as características das curvas tensão-deformação específica. Com base na análise de resultados experimentais obtidos na pesquisa, os autores perceberam que as paredes de alvenaria submetidas à compressão axial exibiram um comportamento de ruptura consistindo predominantemente de fissuras verticais dispersas. Após a tensão máxima de compressão, as paredes apresentaram ruptura frágil com pequenas deformações. Além disso, os autores constataram que o pico de tensão aumenta à medida que a resistência à compressão da argamassa diminui. Tal observação, permitiu a conclusão de que a argamassa tem um papel significativo no controle das deformações da alvenaria.

A ABNT NBR 8522:2017 estabelece as diretrizes para a determinação do módulo de elasticidade. Além disso, a norma estabelece os diferentes tipos de avaliação dessa propriedade que podem ser obtidos em função dos pontos selecionados no diagrama de tensão-deformação, de acordo com o gráfico da Figura 3.

Os tipos de módulos de elasticidade são:

- Módulo de elasticidade inicial E_0 : é a inclinação da reta que passa pelo ponto com tensão igual a 0,5MPa (σ_{inf}) e que passa por um ponto com uma tensão correspondente a 0,3 da tensão de ruptura (σ_{sup}).
- Módulo de elasticidade secante E_{sec} ou E_s : é a declividade de uma reta traçada de um nível de tensão de 0,5 MPa e por outro ponto qualquer com tensão maior que esta (σ_n).
- Módulo de elasticidade tangente E_{tg} : é a declividade de uma reta tangente à curva em um ponto qualquer da mesma.

Figura 3 – Definição dos diferentes tipos de avaliação do módulo de elasticidade.



Fonte: ABNT NBR 8522:2017.

Para determinar o módulo de elasticidade dos componentes da alvenaria é usual utilizar-se do comportamento do gráfico tensão-deformação para uma carga de 40% a 60% da carga última para o módulo secante e de 30% para o módulo tangente inicial. É para esse intervalo que ocorre um comportamento linear do sistema (Mohamad, 2007).

Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015) testaram à compressão axial prismas de blocos de concreto de elevada resistência à compressão, utilizando diferentes traços de argamassa. Os autores concluíram que os módulos de elasticidade dos prismas apresentam uma relação diretamente proporcional com a resistência à compressão dos mesmos.

Özhan e Cagatay (2014) investigaram a resistência à compressão, módulo de elasticidade e as deformações de três pequenas paredes de alvenaria utilizando uma argamassa de alta resistência, na proporção 1:3, em volume, de cimento e areia, e outras três utilizando uma argamassa de baixa resistência, na proporção de 1:6, em volume, de cimento e areia. Para o procedimento experimental, os autores utilizaram tijolos cerâmicos furados de 19x19x35 cm. Entre as amostras avaliadas para cada tipo de argamassa, os resultados foram compatíveis. Para os painéis moldados com argamassa de alta resistência, os autores observaram maiores valores de resistência e maiores deformações para a alvenaria. Por outro lado, para os painéis moldados com argamassa fraca, menores resistências e menores deformações foram registradas. Os autores constataram que o módulo de elasticidade para os painéis de alvenaria produzidos com argamassa de menor resistência foi muito inferior ao registrado para os painéis moldados com argamassa de alta resistência. Os autores afirmam que, apesar da argamassa não ser

o único parâmetro que governa a resistência do painel de alvenaria, sua influência não pode ser ignorada.

Kohees, Sanjayan e Rajeev (2019) avaliaram o comportamento da curva tensão-deformação de duas misturas de argamassas de cimento de resistência à compressão de 38 MPa e 45 MPa submetidas a ensaios triaxiais e pressões confinantes de 0, 5, 10 e 15 MPa. Os autores constataram que a resistência à compressão e a deformação específica axial aumentaram com a pressão confinante. Além disso, os autores observaram que o coeficiente de Poisson variava, apresentando primeiramente uma diminuição em função do confinamento lateral e posteriormente um aumento devido a expansão do volume específico devido ao avanço da fissuração e propagação dos danos internos no material.

A alvenaria estrutural possui um comportamento linear até determinado nível de tensão, quando submetida à tensão de compressão. Fonseca et al. (2015), com o objetivo de avaliar o modo de ruptura e a capacidade de deformação de paredes de alvenaria, analisaram as propriedades mecânicas do conjunto argamassa-bloco submetidos à compressão axial. O estudo desenvolveu-se em etapas. Na primeira etapa, foram ensaiados prismas de 3 blocos de altura, contrafiados e não contrafiados. Posteriormente, foram ensaiadas à compressão axial e lateral pequenas paredes contrafiadas de 5 blocos de altura. Os autores concluíram que o início da não-linearidade da alvenaria corresponde a um aumento das tensões laterais e da proporção do coeficiente de Poisson devido às fissuras da junta horizontal da argamassa e de fissuras verticais que ocorreram na interface bloco-argamassa. Esse processo foi observado quando as paredes atingiram aproximadamente 60% da resistência máxima à compressão.

2.2.5 Fator de eficiência

O fator de eficiência é obtido através da razão entre a resistência à compressão do prisma ou da parede (f_{pk}) pela resistência à compressão do bloco (f_{bk}), representado pela Equação 5.

$$\text{fator de eficiência} = \frac{f_{pk}}{f_{bk}} \quad (5)$$

O fator de eficiência da resistência prisma-bloco é um dos principais parâmetros para se conseguir uma especificação adequada de materiais. Essa razão demonstra a eficiência do prisma em relação ao bloco no quesito resistência à compressão. O fator de eficiência depende do tipo de material empregado, da qualidade da mão-de-obra na

execução dos prismas e nos ensaios de caracterização (Portella, 2015). O mesmo autor calculou o fator de eficiência para prismas moldados com blocos cerâmicos ensaiados à compressão axial, entre os anos de 2007 e 2014 no laboratório de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria. A pesquisa avaliou a eficiência para blocos cerâmicos de parede vazada, não grauteados. O pesquisador encontrou valores próximos a 0,5 para blocos com resistência de até 8,5 MPa e 0,35 para blocos com resistência acima de 15 MPa.

As normas brasileiras, atualmente em vigor, não se preocupam em agrupar os blocos e argamassas em termos de propriedade, nem de buscar uma melhor compatibilização entre os mesmos. Apenas a resistência à compressão da argamassa é sugerida como, no mínimo de 1,5 MPa e, no máximo, 70% da resistência do bloco na área líquida. Da mesma forma, não há nenhuma forma de obtenção da resistência da alvenaria de maneira indireta, a partir das propriedades de seus elementos. Assim, projetistas acabam por utilizar o fator de eficiência como uma forma de prever a resistência da parede.

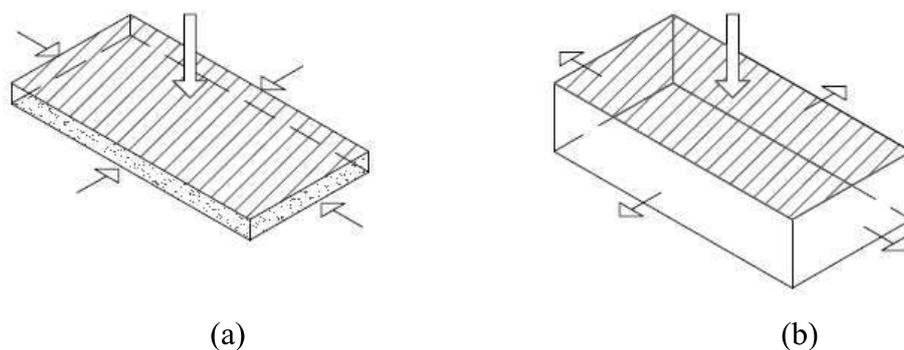
2.2.6 Formas de ruptura na alvenaria estrutural

O entendimento do comportamento da alvenaria quando carregada e os mecanismos desenvolvidos que resultam na ruptura depende das unidades que a compõem e como os materiais da mesma interagem entre si.

A aderência entre os blocos e a argamassa é essencial para o funcionamento do conjunto, pois permite que as tensões e deformações sejam compatibilizadas na interface entre os dois materiais, ocasionando o confinamento da argamassa (Lübeck, 2016).

Dessa forma, para que seja possível analisar o comportamento mecânico da alvenaria, torna-se necessário avaliar as propriedades de resistência, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos materiais em um estado de tensão multiaxial. Conforme Mohamad et al. (2006), o mecanismo de ruptura das alvenarias comprimidas considera o bloco em um estado de tensão biaxial de tração e a argamassa sob um estado de tensão triaxial de compressão. A Figura 4 ilustra esse comportamento.

Figura 4 – Junta de argamassa comprimida triaxialmente (a) e bloco comprimido e tracionado biaxialmente (b)



Fonte: Lübeck, 2016.

Na resistência máxima da alvenaria e para a determinação do modo de ruptura, a proporção de rigidez entre os componentes é fundamental. Mohamad (2007) afirma que a capacidade de deformação da junta de argamassa e a aderência entre o bloco e a argamassa de assentamento influenciam diretamente a resistência da parede.

De Lima (2010) elenca quatro variáveis que influenciam diretamente o modo de ruptura da alvenaria, sendo elas a resistência da aderência do conjunto argamassa-bloco, resistência à compressão da argamassa, resistência à compressão do bloco e resistência à tração do bloco. Torna-se fundamental analisar o modo de ruptura da alvenaria para estabelecer uma compatibilidade entre os componentes, melhorando o desempenho à compressão da alvenaria (Mohamad, Lourenço e Roman, 2006).

Gams e Tomažević (2012) avaliaram seis paredes de alvenaria construídas com blocos cerâmicos e junta de argamassa com pequena espessura submetidas a carregamentos laterais cíclicos ensaiadas com três diferentes condições de contorno, modificando as condições das extremidades livres. Os resultados demonstraram que, sob determinadas condições, as paredes apresentaram um comportamento de flambagem. Dois tipos de flambagem foram observados: flambagem de toda a parede, comportando-se como um corpo rígido, e flambagem de unidades individuais dentro da parede de alvenaria. Além disso, os autores constataram que quanto maior for a carga de pré-compressão, menor a probabilidade de flambagem se desenvolver e, a flambagem pode se desenvolver mesmo com condições de contorno simetricamente fixadas e com carregamento vertical constante. Os autores constataram que o mecanismo de colapso das paredes com flambagem ocorre devido ao cisalhamento e não necessariamente devido ao esmagamento do topo ou da base da parede.

Nalon et al. (2020) investigaram a influência de propriedades mecânicas de blocos de concreto, argamassa mista de cimento e cal e grautes sobre o comportamento estrutural de prismas de concreto submetidos à compressão, flexão e cisalhamento, considerando situações específicas de projetistas e blocos consideravelmente mais resistentes e rígidos que argamassas e vice-versa. Os autores constataram que o aumento da resistência dos blocos e argamassas resultaram em aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade da alvenaria, independente da relação entre a resistência da argamassa e dos blocos. Ganhos de resistência à compressão de prismas grauteados e não grauteados moldados com blocos de alta resistência foram maiores quando combinados com argamassas de alta resistência.

Além disso, os autores observaram que para os prismas construídos com blocos de alta resistência e não grauteados, o aumento da rigidez foi maior quando a resistência da argamassa aumentou. Entretanto, para prismas de blocos de alta resistência grauteados, o aumento da rigidez não foi significativo ao alterar as propriedades mecânicas da argamassa utilizada. Com relação ao comportamento dos prismas submetidos à flexão, os autores constataram a ruptura da interface bloco-argamassa e uma ruptura frágil foi observada devido à fragilidade na região de interface bloco-argamassa. Os autores constataram que ao final dos ensaios, os blocos estavam intactos. Argamassas com maiores teores de cimento em suas composições proporcionaram melhor intertravamento mecânico entre bloco e argamassa, melhorando o desempenho do conjunto frente à resistência à flexão. Por outro lado, um aumento na resistência do bloco não causou aumento na resistência à flexão de prismas. Quando a resistência da argamassa utilizada foi maior que 70% da resistência à compressão do bloco na área líquida, o uso de blocos com alta resistência causou aumento na resistência à flexão dos prismas.

Com relação ao desempenho frente ao cisalhamento, os autores constataram que houve aumento da resistência ao cisalhamento inicial com o aumento da resistência à compressão da argamassa utilizada. O ganho observado foi maior quando utilizado blocos de altas resistências. Quando a resistência da argamassa foi aumentada em 4 vezes, ganhos de 185% a 350% na resistência ao cisalhamento inicial foram observados em prismas moldados com blocos de elevada resistência. Dessa forma, constatou-se que devido ao fato da resistência ao cisalhamento estar atrelada a ligação entre bloco e argamassa, uma mistura com maior quantidade de cimento é melhor absorvida pelos poros dos blocos, o que melhora a resistência ao cisalhamento da ligação.

2.3 INFLUÊNCIA DA TIPOLOGIA DO BLOCO E DA ARGAMASSA NO MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL

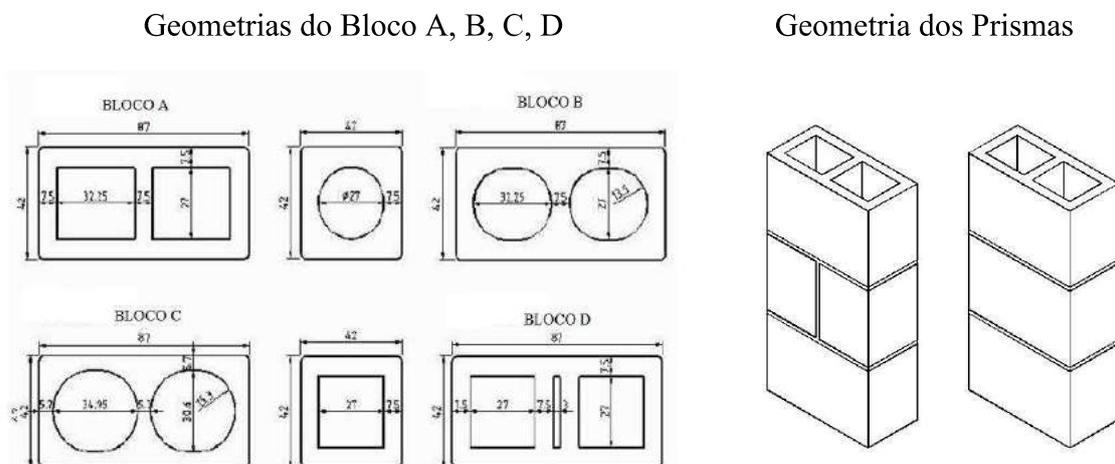
2.3.1 Influência do bloco estrutural no modo de ruptura

De acordo com Santos (2008), as formas, dimensões e material do bloco empregado em alvenaria estrutural geram diferentes comportamentos na estrutura quando sujeita ao carregamento axial.

De Marco (2016) afirma que a resistência à compressão e o modo de ruptura da alvenaria são diferentes quando utilizado bloco cerâmico e bloco de concreto. As unidades cerâmicas possuem uma faixa de resistência maior e um modo de ruptura frágil. Além disso, apresentam um fator de eficiência prisma-bloco menor. Por outro lado, de forma geral, os blocos de concreto apresentam uma faixa de resistência menor, apresentando uma ruptura mais dúctil e fator de eficiência maior. Assim, o modo de ruptura pode ocorrer por tensões de tração no bloco, por esmagamento da junta de argamassa ou pela combinação de ambos os efeitos.

Rizzatti (2003) avaliou diferentes geometrias de blocos, ensaiando prismas e paredes de blocos cerâmicos, em escala reduzida na proporção 1:3 das dimensões nominais. As geometrias A, B, C e D dos blocos e a geometria dos prismas testados estão na Figura 5. Os resultados encontrados para a resistência de cada composição são dados na Tabela 4.

Figura 5 – Geometria dos blocos e dos prismas em escala reduzida ensaiados por Rizzatti (2003)



Fonte: Rizzatti, 2003.

Tabela 4 – Resultados médios dos blocos e prismas encontrados por Rizzatti (2003)

Tipos de blocos	A	B	C	D
Área líquida (cm ²)	18,70	20,92	17,50	20,87
Resistência à compressão (MPa)	29,43	32,95	30,31	33,57
Resistência à tração (MPa)	1,81	1,57	1,67	1,80
Resistência dos prismas (MPa)	10,56	13,61	11,18	11,67
Fator de eficiência	0,36	0,41	0,37	0,35

Fonte: Rizzatti, 2003.

O bloco tipo D apresentou-se mais eficiente, uma vez que as paredes apresentaram melhor capacidade de absorver esforços verticais, pois a geometria deste bloco garante a coincidência dos septos entre as fiadas subsequentes, devido ao duplo septo central. O autor concluiu que a forma, o tipo e a disposição dos furos podem acarretar concentrações de tensões, reduzindo a resistência e podendo até mesmo levar a uma ruptura frágil, sem aviso.

Steil (2003) avaliou a influência da geometria de blocos de concreto através do comportamento mecânico de prismas de blocos de concreto com diferentes composições de argamassa. O pesquisador moldou cinco diferentes geometrias de bloco de mesma resistência nominal com três diferentes argamassas de assentamento. Através dos ensaios experimentais e análises por elementos finitos, o autor concluiu que os fatores de eficiência mais baixos foram observados em blocos com geometria com furos mais cônicos.

Casali et al. (2012) avaliaram a influência da geometria dos blocos e do tipo de argamassa em prismas de 3 blocos submetidos à compressão. Para o procedimento experimental, os autores utilizaram quatro tipos de argamassa e dois tipos de blocos. Os autores constataram que a geometria dos blocos e o tipo de argamassa influenciaram a resistência da alvenaria. Além disso, os autores sugerem que existe uma combinação adequada de blocos, argamassa e graute que maximiza a eficiência da alvenaria.

Machado (2019) avaliou o modo de ruptura de prismas de dois blocos submetidos à compressão axial com três diferentes tipos de blocos, sendo eles cerâmicos de parede maciça, cerâmico de parede vazada e blocos de concreto, combinando cada tipo de bloco com três argamassas industrializadas de diferentes resistências. A autora verificou distintos modos de ruptura para as diferentes composições ensaiadas. Para prismas de bloco cerâmico de parede maciça, verificou-se que para uma razão $f_a/f_{bk,liq}$ de até 49%, o modo de ruptura se deu pelo esmagamento da junta de argamassa; já para prismas com uma relação $f_a/f_{bk,liq}$ acima de 61% a ruptura se deu por tração no bloco.

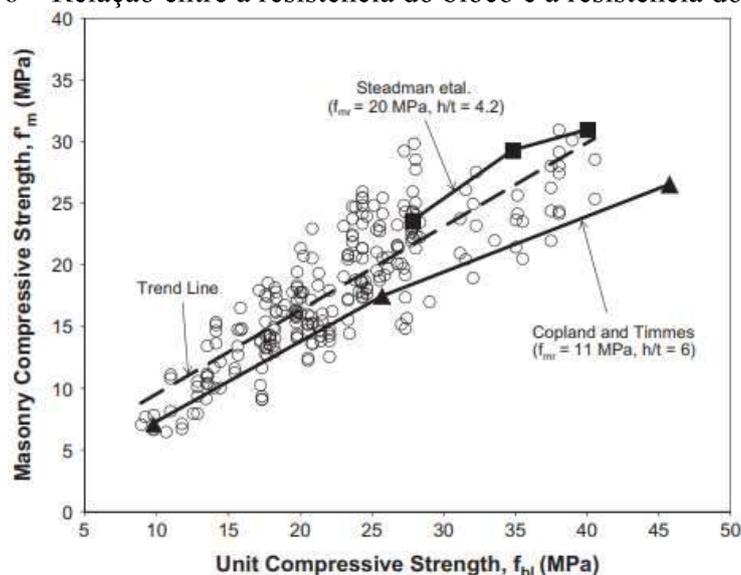
Para os prismas com blocos de parede vazada, a autora constatou que para uma razão $f_a/f_{bk,liq}$ de até 47% o modo de ruptura se deu pelo esmagamento da junta de argamassa; já para prismas com uma relação acima de 59%, a ruptura se deu por tração no bloco. Para os prismas com blocos de concreto testados, a autora verificou que para uma relação $f_a/f_{bk,liq}$ de até 84%, a ruptura se deu pelo esmagamento da junta de argamassa, enquanto não foi possível observar a partir de que nível de tensão ocorreu a ruptura por tração no bloco.

2.3.2 Influência da junta de argamassa de assentamento no modo de ruptura

Sarhat e Sherwood (2014) avaliaram 40 trabalhos anteriores que estudaram a resistência de prismas confeccionados com blocos de concreto, com até 6 blocos de altura, capeamento rígido, com blocos com faixa de resistência entre 9 e 50 MPa com dois ou três furos verticais e relação área líquida/área bruta entre 0,25 e 0,60. As resistências foram calculadas considerando a área líquida de assentamento e corrigidas em função da esbelteza dos prismas.

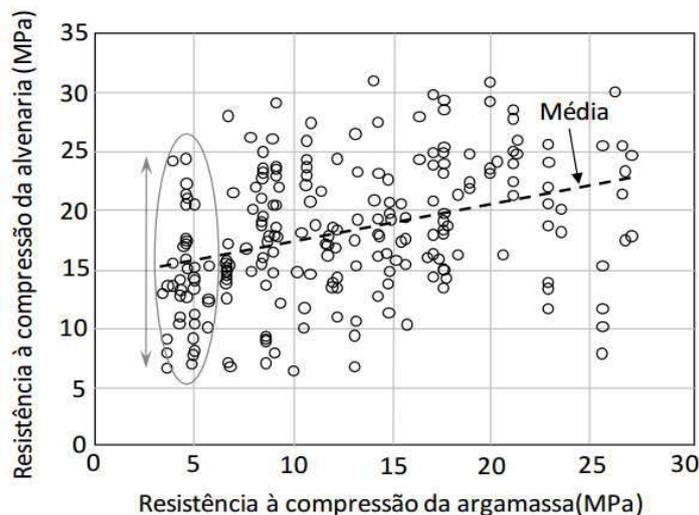
A correlação entre a resistência à compressão dos prismas com a resistência dos blocos usados pelos autores é apresentada na Figura 6, enquanto que na Figura 7 apresenta-se a correlação entre a resistência do prisma e a resistência à compressão da argamassa.

Figura 6 – Relação entre a resistência do bloco e a resistência do prisma



Fonte: Sarhat e Sherwood, 2014.

Figura 7 – Relação observada entre a resistência à compressão uniaxial da argamassa e a do prisma



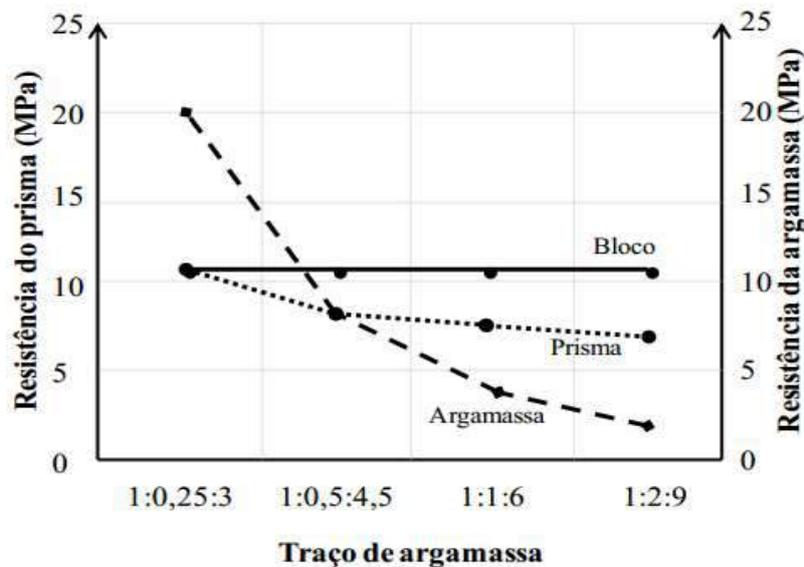
Fonte: Sarhat e Sherwood, 2014.

Analisando-se as Figuras 6 e 7, observa-se que a relação entre a resistência do prisma e a resistência dos blocos é aproximadamente linear, porém a relação entre a resistência do prisma e da argamassa não teve uma tendência de comportamento. Além disso, observa-se que a resistência dos prismas em função da argamassa tem variações da ordem de 5 vezes.

A resistência do bloco é, sem dúvida, o fator de maior contribuição para a resistência da alvenaria, de maneira direta. A argamassa exerce papel fundamental com relação às propriedades no estado fresco e à resistência de aderência no estado endurecido (Parsekian, Hamid e Drysdale, 2012; Carasek, 2010; Parsekian e Soares, 2010).

Mohamad (1998) avaliou a influência da argamassa sobre a resistência à compressão e o modo de ruptura de prismas não grauteados com blocos de concreto. A resistência dos prismas em função da resistência do bloco e da argamassa é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Variação da resistência do prisma em função da resistência da argamassa e do bloco



Fonte: Adaptado de Mohamad, 1998.

O autor observou que, mantendo-se a resistência do bloco constante, quanto maior a resistência da argamassa, maior a resistência do prisma; porém, esse aumento não aconteceu de maneira proporcional. Conclui-se que o aumento da resistência do prisma é menor que o aumento da resistência da argamassa, para alguns traços estudados.

O estudo de Mohamad (1998) revela que existe uma máxima resistência do prisma atingível, que é função da resistência da argamassa para uma resistência de bloco especificado. Ao especificar valores de resistência para a argamassa mais elevados, o projetista estará aumentando a resistência do prisma, contudo estará diminuindo sua ductilidade e, ao mesmo tempo, aumentando o custo da alvenaria. Por outro lado, ao especificar valores de resistência para a argamassa mais baixos, diminuirá a resistência do prisma e poderá dar margem à plastificação e esmagamento das juntas de argamassa.

Yang, Lee e Hwang (2019) avaliaram prismas de blocos de concreto com argamassas de três diferentes resistências mecânicas fazendo-se uso do mesmo bloco de concreto quando submetidos à compressão axial. Os autores constataram que a resistência à compressão dos prismas variou conforme a resistência à compressão da argamassa. Entretanto, os autores afirmam que a taxa de acréscimo da resistência do prisma não aumenta proporcionalmente ao aumento da resistência da argamassa utilizada. Além disso, os autores verificaram que as condições de ligação de ambos os materiais não homogêneos propagam fissuras localizadas quando submetidos à compressão axial.

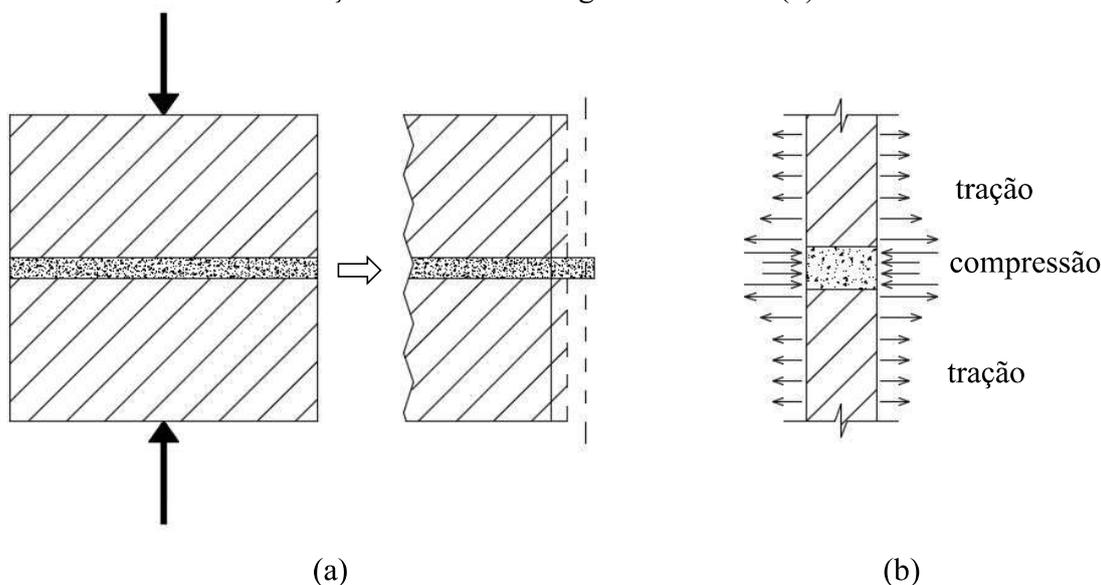
Fonseca et al. (2019) avaliaram a influência do graute na resistência à compressão de prismas de concreto moldados com blocos de concreto de alta resistência. Para a pesquisa, os autores utilizaram três argamassas com diferentes resistências, que foram moldadas com prismas com e sem graute. Os autores constataram que dentro de uma faixa considerável, a resistência à compressão da argamassa não tem efeito considerável na resistência de prismas de concreto grauteados e não grauteados. Por outro lado, Fortes, Parsekian e Fonseca (2014) também ao avaliarem a resistência de prismas de concreto com e sem grauteamento constataram que a resistência à compressão da argamassa e do graute influenciam consideravelmente a resistência à compressão da alvenaria, com maior destaque quando se usa blocos de maiores resistências.

Caldeira (2018) avaliou a influência da resistência da argamassa de assentamento e da espessura da junta horizontal em prismas de blocos de concreto submetidos à compressão axial. O autor constatou a influência da argamassa na resistência à compressão e no módulo de elasticidade dos prismas avaliados. O aumento da resistência à compressão da argamassa gerou aumento da resistência à compressão do prisma, enquanto que o aumento da espessura da junta de argamassa gerou uma redução da resistência à compressão do prisma. Além disso, o autor verificou que a variação da espessura das juntas apresentou maior influência nos prismas moldados com blocos mais resistentes.

2.3.2.1 O fenômeno de confinamento da argamassa

O confinamento da argamassa ocorre devido a aderência entre bloco-argamassa e pelo fato da argamassa ser mais deformável que o bloco (Figura 9), fazendo com que não haja possibilidade de haver deformações laterais da argamassa, uma vez que o bloco impede esse movimento. Dessa forma, surge o que se denomina de tensão de confinamento que faz com que a capacidade resistente da argamassa aumente consideravelmente.

Figura 9 – Deformações em um prisma submetido ao carregamento (a) e tensões laterais que se desenvolvem em função da aderência argamassa-bloco (b)



Fonte: Adaptado de Lübeck, 2016; Afshari e Kaldjan, 1989.

As tensões laterais são maiores próximo à interface, pois elas se desenvolvem de maneira não uniforme ao longo da altura dos elementos. Afshari e Kaldjan (1989) afirmam que a resistência à compressão da alvenaria será menor quanto maiores forem as tensões horizontais desenvolvidas. Assim sendo, quanto maior a espessura da junta, quanto maior o coeficiente de Poisson dos dois materiais, ou ainda, quanto menor a proporção de rigidez entre o módulo de elasticidade da argamassa e do bloco, maiores as tensões horizontais desenvolvidas.

O fenômeno do confinamento, muito embora seja responsável por incrementar a resistência da argamassa, acaba por alterar outras propriedades. O fato da pressão lateral impedir a livre expansão de um corpo-de-prova comprimido axialmente, acaba por modificar todas as propriedades mecânicas do material (Lübeck, 2016).

Khoo (1972) iniciou a discussão sobre o confinamento da argamassa, sendo o primeiro a verificar o comportamento triaxial de argamassas. Posteriormente, outros autores como Atkinson et al. (1985), McNary e Abrams (1985), Afshari e Kaldjian (1989), Stöckl, Bierwirth e Kupfer (1994), Mohamad (1998), Hayen et al. (2001), Hayen, Van Balen e Van Gemert (2003), Mohamad (2007), Mohamad et al. (2015), Lübeck (2016) confirmaram o comportamento de confinamento em argamassas.

Sabendo-se da existência do fenômeno de confinamento, que determina o aumento da resistência da argamassa presente nas juntas, acaba que as normas determinam resistências mais baixas para que as juntas funcionem como válvula de

escape ao acúmulo de tensões. Dessa forma, a argamassa acaba exercendo o papel de garantir a ductilidade do comportamento da alvenaria (Lübeck, 2016).

Os pesquisadores que avaliaram esse fenômeno descrevem que a resistência à compressão da argamassa ensaiada aumenta em função do confinamento lateral. Dessa forma, há um entendimento geral que a resistência à compressão da argamassa aumenta linearmente entre a tensão de compressão da argamassa confinada e a resistência à compressão uniaxial da argamassa, conforme a Equação 6.

$$f_m^* = f_a + k\sigma_3 \quad (6)$$

Onde:

f_m^* é a tensão de compressão da argamassa confinada

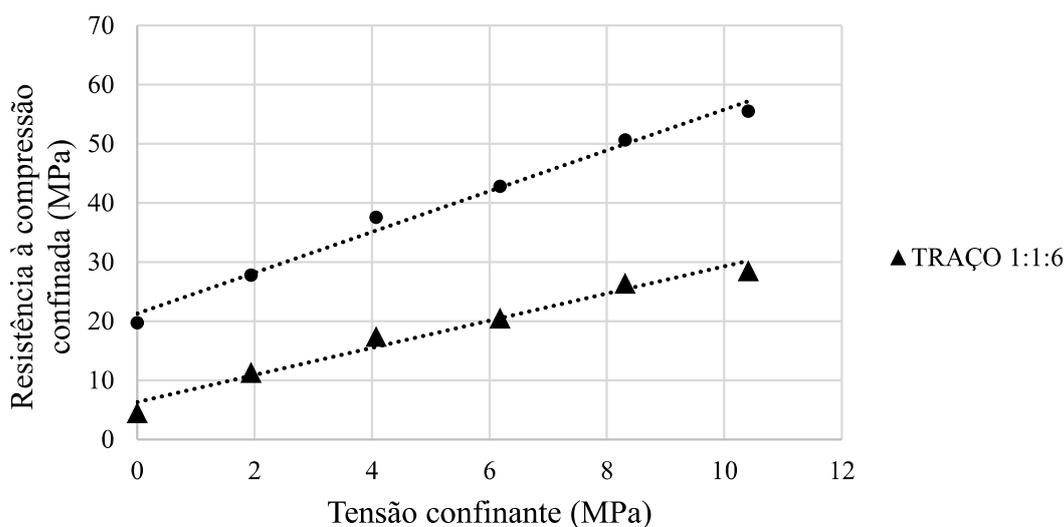
f_a é a resistência à compressão uniaxial da argamassa

σ_3 é a tensão de confinamento lateral

k é o coeficiente angular da reta

Khoo (1972) avaliou a influência do confinamento da argamassa sobre a sua resistência à compressão. O pesquisador utilizou dois diferentes traços de argamassa com proporções volumétricas de cimento:cal:areia de 1:0,25:3 e 1:1:6, utilizando relações água/cimento de 0,64 e 1,29 respectivamente. O pesquisador verificou o aumento da tensão confinante com o aumento da resistência à compressão triaxial, conforme o gráfico da Figura 10.

Figura 10 – Envoltória de ruptura das argamassas confinadas ensaiadas por Khoo (1972)



Fonte: Khoo, 1972.

O coeficiente angular da reta (k) é dependente das propriedades da argamassa avaliada. Para o traço 1:0,25:3, o coeficiente angular da reta de envoltória (k) encontrado pelo pesquisador ficou estabelecido no valor de 3,30. Para o traço 1:1:6, o coeficiente foi de 2,17. Além disso, o autor também analisou o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, e verificou que ambas propriedades diminuem com o aumento da tensão confinante e, somente para o traço 1:0,25:3 o módulo de elasticidade não se alterava com a presença do confinamento. A envoltória de ruptura encontrada pelo autor está descrita na Tabela 5.

Tabela 5 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Khoo (1972)

Traço 1:0,25:3	$f_{arg}^* = f_{arg} + 3,3f_{tm}$
Traço 1:1:6	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,17f_{tm}$

f_{arg}^* : resistência à compressão da argamassa confinada; f_{arg} : resistência à compressão uniaxial da argamassa; f_{tm} : tensões de confinamento transversal.

Fonte: Khoo, 1972.

Atkinson *et al.* (1985) também pesquisaram o fenômeno de confinamento, dessa vez com quatro traços diferentes de argamassa. As argamassas foram confinadas triaxialmente e também se constatou uma relação linear entre a resistência da argamassa e as tensões de confinamento. A Tabela 6 mostra as envoltórias de ruptura e os valores do coeficiente angular da reta de envoltória (k), respectivamente, para cada traço.

Tabela 6 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Atkinson *et al.* (1985)

Traço 1:0,25:3	$f_{arg}^* = f_{arg} + 5,1f_{tm}$
Traço 1:0,5:4,5	$f_{arg}^* = f_{arg} + 3,3f_{tm}$
Traço 1:1:6	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,3f_{tm}$
Traço 1:2:9	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,2f_{tm}$

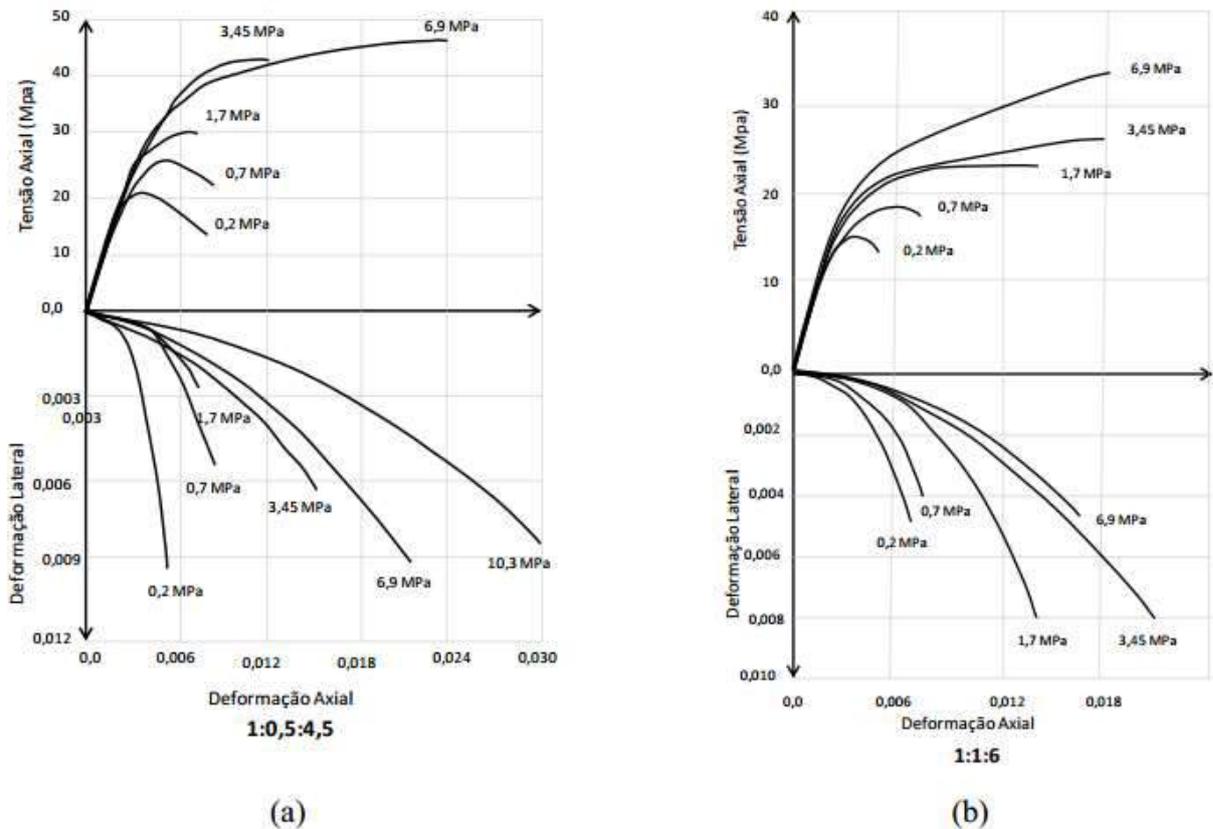
f_{arg}^* : resistência à compressão da argamassa confinada; f_{arg} : resistência à compressão uniaxial da argamassa; f_{tm} : tensões de confinamento transversal.

Fonte: Atkinson *et al.*, 1985.

Os pesquisadores também avaliaram o comportamento tensão-deformação axial e transversal dos traços de argamassa em função do confinamento lateral. Os traços das argamassas testados tinham as proporções de 1:0,5:4,5 e 1:1:6, medidos em volume de cimento, cal e areia. As curvas obtidas pelos autores são mostradas na Figura 11. Os valores que estão junto as curvas indicam a tensão lateral confinante aplicada.

Observou-se que, para ambas as argamassas, o comportamento foi não linear para carregamentos acima de 50% da carga última. Para a argamassa de proporções de 1:1:6, considerado traço fraco, foi observado um comportamento bilinear para níveis maiores de confinamento. Para a argamassa com proporções de 1:0,5:4,5 houve uma mudança de comportamento de frágil para dúctil quando submetida a níveis elevados de confinamento.

Figura 11 – Comportamento tensão-deformação axial e lateral das argamassas confinadas de traço 1:0,5:4,5 (a) e 1:1:6 (b) encontrados por Atkinson *et al.* (1985)

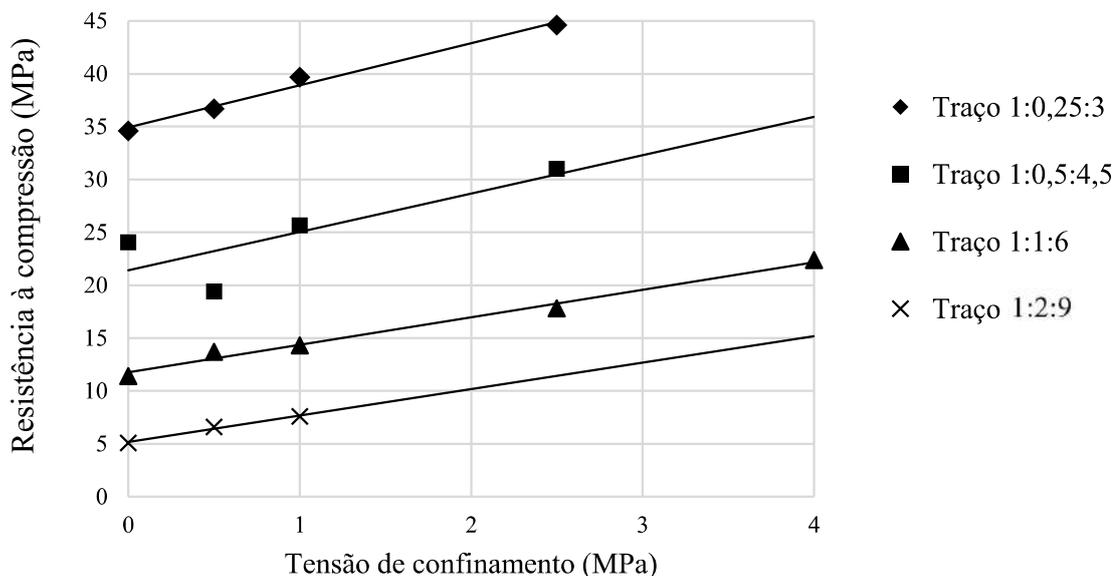


Fonte: Atkinson *et al.*, 1985.

O coeficiente de Poisson das argamassas ensaiadas decresceu com o acréscimo da pressão confinante até um valor crítico e após esse ponto, houve um crescimento. Em relação ao módulo de elasticidade, houve variações conforme os níveis de tensões axiais aplicados. Com valores baixos de pressão confinante, apresentou-se um decréscimo pouco acentuado; no entanto, com o aumento da pressão axial, houve uma queda brusca no valor do módulo de elasticidade.

Mohamad (1998) avaliou o módulo de elasticidade para quatro traços de argamassa apresentados na Figura 12, sendo dois deles considerados traços fortes. O pesquisador aplicou diferentes tensões laterais constantes e determinou as envoltórias de ruptura da argamassa confinada triaxialmente. Os valores encontrados para os coeficientes angulares da reta (k) estão mostrados na Tabela 7.

Figura 12 – Envoltória de ruptura das argamassas confinadas ensaiadas à compressão triaxial por Mohamad (1998)



Fonte: Mohamad, 1998.

Tabela 7 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Mohamad (1998)

Traço 1:0,25:3	$f_{arg}^* = f_{arg} + 4,0f_{tm}$
Traço 1:0,5:4,5	$f_{arg}^* = f_{arg} + 3,6f_{tm}$
Traço 1:1:6	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,6f_{tm}$
Traço 1:2:9	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,5f_{tm}$

f_{arg}^* : resistência à compressão da argamassa confinada; f_{arg} : resistência à compressão uniaxial da argamassa; f_{tm} : tensões de confinamento transversal.

Fonte: Mohamad, 1998.

Para os traços fortes de argamassa, nas proporções de 1:0,25:3 e 1:0,5:4,5 respectivamente, o pesquisador conclui que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento do confinamento. Já para o traço 1:1:6, considerado fraco, houve diminuição do módulo de elasticidade, apresentando um comportamento dúctil. Tal mudança no módulo de elasticidade já era esperada em função da presença do confinamento, pois este impede a livre deformação lateral do corpo-de-prova comprimido.

Mohamad et al. (2015) afirmam que as argamassas com resistência próxima à resistência do bloco apresentam um comportamento linear, mantendo o coeficiente de Poisson constante até uma tensão próxima a 80% da sua resistência à compressão. A partir desse nível de tensão, forma-se uma malha de fissuras que se traduz em um aumento de volume e, conseqüentemente, causa um aumento do coeficiente de Poisson. Dessa forma, os autores afirmam que a argamassa é determinante na forma de ruptura da alvenaria.

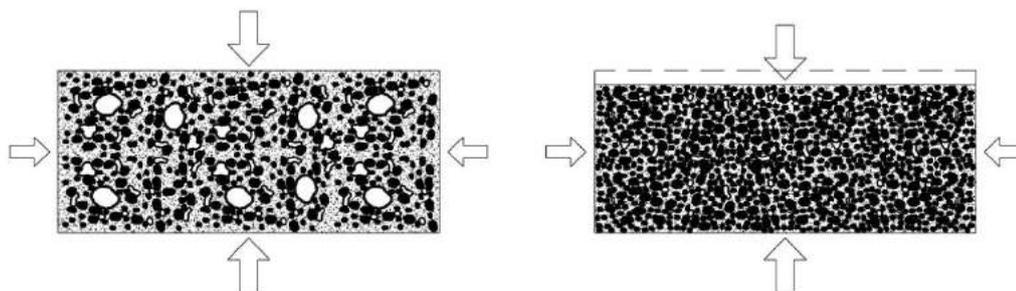
Segundo Lübeck (2016), pesquisadores têm realizado testes com corpos de prova de pequenas alturas para estudar os efeitos do confinamento da argamassa. Dessa forma, o que permite o estado confinado no corpo de prova ensaiado é o atrito dos pratos das prensas conforme a carga é aplicada.

Vários pesquisadores observaram que quando a espessura da argamassa é reduzida, verifica-se um aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de prismas de alvenaria, o que está relacionado ao aumento do confinamento lateral da junta de argamassa (Francis, Horman e Jerrems, 1972; Cassinello, 2006; Reddy, Lal e Kenkere, 2009; Lima, Lima e Assis, 2012; Thamboo, Dhanasekar e Yan, 2013).

2.3.2.2 O fenômeno de esmagamento da junta de argamassa

O fenômeno de esmagamento da junta de argamassa ocorre devido ao fechamento dos macroporos do material, fazendo com que haja o encolhimento da junta e a destruição do esqueleto resistente da argamassa. Na Figura 13 mostra-se a idealização do esmagamento de um volume de argamassa confinado por tensões de compressão.

Figura 13 – Idealização do esmagamento da junta de argamassa por meio tensões de compressão



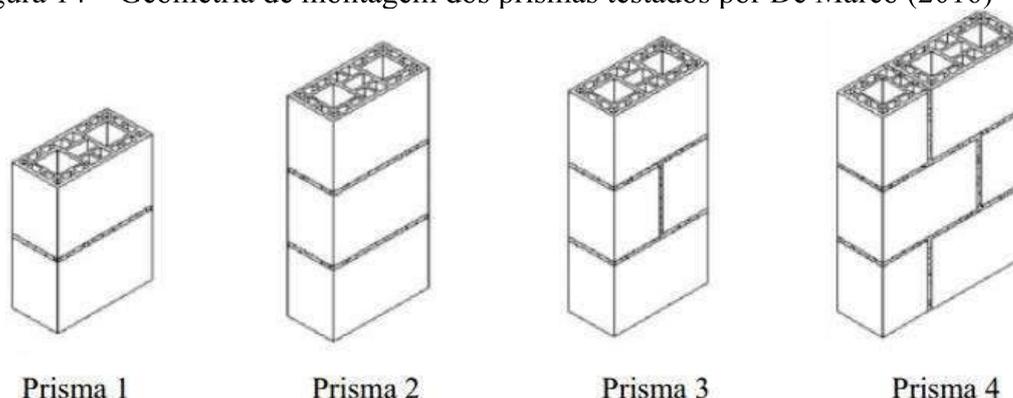
Fonte: Lübeck, 2016.

A identificação visual do fenômeno de esmagamento da junta não é prática e facilmente identificável quando se tem casos em que ocorre ruptura de forma abrupta, quase instantânea. A utilização de prismas de blocos cerâmicos, a depender das propriedades dos blocos e argamassas, tende a ocasionar uma ruptura frágil, sem aviso. Quando se usam blocos de concreto, com comportamento dúctil, com determinados traços de argamassas, é possível visualizar o fenômeno de esmagamento da junta.

Embora de difícil medição e acompanhamento, a identificação do fenômeno de esmagamento é primordial para o entendimento da mecânica de ruptura da alvenaria comprimida.

De Marco (2016) avaliou os modos de ruptura de diferentes configurações de prismas de blocos cerâmicos, os quais foram dependentes do tipo de prisma e do tipo de bloco utilizado. O pesquisador utilizou cinco tipos de blocos cerâmicos, com argamassas de resistências nominais de 4 e 12 MPa, chamadas de argamassa fraca e forte, construindo e ensaiando prismas de quatro geometrias diferentes, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Geometria de montagem dos prismas testados por De Marco (2016)



Fonte: De Marco, 2016.

Para prismas de blocos de paredes maciças com argamassa forte, o autor constatou a presença de fissuras verticais nos blocos, ou seja, a forma de ruptura dos prismas deu-se pela tração no bloco. Para os prismas moldados com blocos cerâmicos de parede vazada com argamassa fraca, constatou-se que houve o esmagamento da junta de argamassa.

O pesquisador constatou que o modo de ruptura foi influenciado pela geometria dos prismas. A presença da junta vertical de argamassa, nas configurações 3 e 4, induziram a ruptura, havendo concentração de tensões entre a junta horizontal e vertical, acarretando o esmagamento da junta dos prismas moldadas com argamassa fraca.

Ressalta-se que De Marco (2016) não realizou combinações de prismas com bloco cerâmicos de parede vazada com argamassa forte e prismas com bloco cerâmico de parede maciça com argamassa fraca, assim não sendo possível avaliar a influência da argamassa e da área de contato na junta devido a geometria das paredes dos blocos, no modo de ruptura dos prismas.

Lübeck (2016) realizou uma análise visual do modo de ruptura de prismas, utilizando-se do mesmo procedimento de filmagem para os ensaios de compressão realizados por De Marco (2016), porém analisando prismas constituídos por dois blocos, variando a resistência da argamassa e a tipologia do bloco. Foram utilizados três

diferentes tipos de blocos, sendo dois cerâmicos (bloco cerâmicos de parede maciça e bloco cerâmico de parede vazada), e um de concreto. Os blocos utilizados para a pesquisa bem como a resistência das argamassas estão representados no Quadro 1.

Quadro 1 – Materiais utilizados na moldagem dos prismas por Lübeck (2016).

Blocos estruturais	Bloco cerâmico de parede maciça	
	Bloco cerâmico de parede vazada	
	Bloco de concreto	
Argamassa	Argamassa “fraca”	$f_{ck} = 4 \text{ MPa}$
	Argamassa “forte”	$f_{ck} = 15 \text{ MPa}$

Fonte: Lübeck, 2016.

Determinou-se a tensão na qual começam a aparecer fissuras pelo esmagamento da junta de argamassa ou por tração no bloco, denominada de tensão de início de ruptura do prisma na área líquida ($\sigma_{pi,liq}$) além das resistências à compressão dos prismas (f_p). Para medir a ductilidade do conjunto, adotou-se a relação entre a tensão do início da ruptura e a resistência à compressão do prisma (σ_{pi}/f_p), estabelecendo-se que quanto menor essa relação, mais dúctil é a ruptura.

Para estabelecer matematicamente quando ocorre o esmagamento da junta, o autor estabeleceu a relação entre a tensão de início de ruptura e a resistência da argamassa confinada (σ_{pi}/f_a^*) sendo igual a 1 para essa situação. Quando essa relação assumisse valores menores que 1, a ruptura seria por tração no bloco.

Observou-se que, em prismas com blocos cerâmicos com argamassa fraca, a relação (σ_{pi}/f_a^*) assumiu valores maiores que 1, teoricamente impossíveis para essa relação. Dessa forma, subestimou-se a resistência da argamassa confinada.

O pesquisador aponta que a perda de água da argamassa para os blocos acabou influenciando significativamente a resistência à compressão. Barbosa e Hanai (2009) também mencionam que a forma de ruptura dos prismas é influenciada diretamente pela

capacidade de retenção de água da argamassa e pelo nível de confinamento na qual ela estará sujeita.

Para os prismas de concreto com argamassa fraca testados por Lübeck (2016), a relação (σ_{pi}/f_a^*) assumiu valores bem abaixo de 1, inclusive quando o modo de ruptura se deu por esmagamento da junta. Para essa situação superestimou-se a resistência da argamassa.

Observou-se, pelos dados, que a argamassa teve grande influência sobre o modo de ruptura dos prismas. Nos prismas moldados com argamassa fraca, a argamassa tendeu ao esmagamento, induzindo a ruptura prematura dos prismas. Constatou-se que, o fator de eficiência para os casos onde ocorreu o esmagamento da junta de argamassa, foi visivelmente menor.

Além disso, Lübeck (2016) observou que, para os prismas confeccionados com blocos de concreto houve um comportamento distinto para as argamassas fraca e forte. Os testes revelaram que a argamassa mais fraca teve menor influência na resistência do prisma quando comparada a argamassa mais resistente.

Com relação ao modo de ruptura para os blocos de concreto, observou-se que para os prismas com argamassa mais fraca a ruptura aconteceu devido ao esmagamento da junta, enquanto que para os prismas com argamassa mais forte, a ruptura ocorreu por fissuração nos blocos, com formato aproximado ao tronco-cônico.

Além disso, o pesquisador analisou a forma de ruptura com relação aos blocos cerâmicos de parede maciça e parede vazada. Os prismas moldados com blocos cerâmicos de paredes maciças apresentaram um comportamento de maior ductilidade, com formação de fissuras antes da ruptura dos prismas. Para os prismas confeccionados com blocos cerâmicos de parede vazada, observou-se uma ruptura explosiva, sem aviso prévio.

Diante disso, pelas análises visuais dos prismas ensaiados, o autor conclui que há uma mudança na forma de ruptura da alvenaria comprimida, onde há um limite de proporção entre as resistências da argamassa e resistência do bloco. Esse limite de proporção é dependente da área de contato entre a parede do bloco e a junta da argamassa, implicando no confinamento e, conseqüentemente, alterando a resistência da argamassa. Assim sendo, para resistências de argamassas utilizadas abaixo desse suposto limite, a ruptura ocorre por esmagamento da junta. Para argamassas com resistência superiores a esse suposto limite, a ruptura ocorre por tração no bloco.

3 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (DIGITAL IMAGE CORRELATION – DIC)

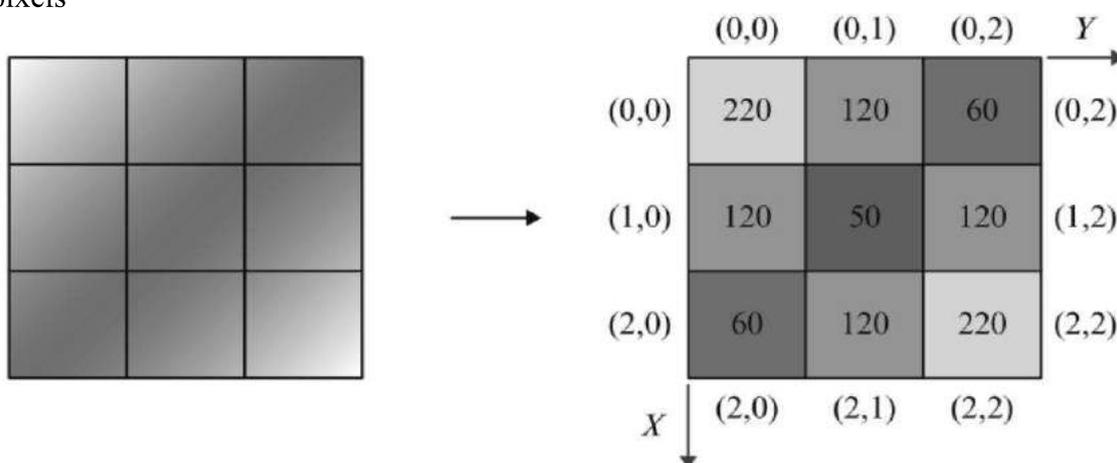
3.1 IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem digital é formada por um conjunto finito de elementos – comumente designados de pixels – que, por sua vez, são associados a uma posição (x,y) e uma intensidade. Assim sendo, uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional que associa a cada par de valores (x,y) , uma intensidade $f(x,y)$.

O desenvolvimento da técnica DIC, como é conhecida atualmente, tem sua origem na Universidade da Carolina do Sul nos Estados Unidos, com pesquisadores como Peters e Ranson (1982) e Anderson (1984). O artigo escrito por Peters e Ranson (1982) publicado na revista *Optical Engineering* em maio de 1983, pode ser citado como primeiro trabalho relevante para alavancar as pesquisas nessa área. No Brasil, pela pesquisa bibliográfica realizada, há poucas instituições de ensino explorando a técnica DIC.

De acordo com Beleza (2017), as imagens digitais são a base do funcionamento do método DIC e, para poderem ser utilizadas pelo algoritmo, tem que ser possível discretizar seus elementos unitários – os pixels. O objetivo deste método é extrair de cada imagem a matriz de intensidade de um bloco $N \times N$ pixels e procurar essas identidades na imagem seguinte.

Figura 15 – Exemplo de discretização das posições dos pontos e das intensidades dos pixels

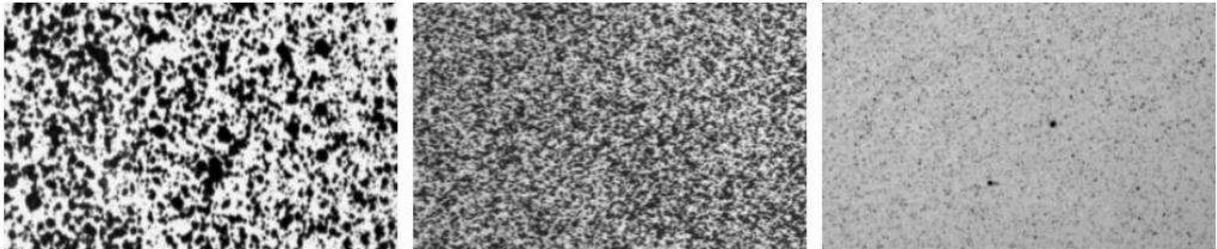


Fonte: Beleza, 2017.

A intensidade de cada pixel é definida baseada numa escala. Considerando uma imagem monocromática, numa escala representada por 8 bits, existem 2^8 combinações possíveis de cores. Dessa forma, para níveis de cor cinza (gray level), a escala varia de 0 (preto) a 255 (branco), podendo ser definida dessa forma por uma matriz. Para um formato RGB (Red-Green-Blue), são necessárias três matrizes para definir a intensidade de um único pixel, sendo que cada matriz define uma das três cores: vermelho, verde e azul (Moreira, 2015). Para maior praticidade de utilização e menor tempo de cálculo, a utilização de imagens monocromáticas é mais interessante. Dessa forma, alguns softwares somente aceitam como input imagens monocromáticas, sendo que outros fazem a conversão antes de iniciar a análise da imagem.

Vale ressaltar a importância da aplicação de um padrão estocástico na superfície do corpo de prova (Figura 16). Além da pintura de preparação ser a mais aleatória possível e com alto contraste, ela deve possuir muitas outras características para assegurar a precisão do método, como por exemplo, o tamanho de grão do padrão e a escolha de parâmetros inerentes ao software (Lecompte et al., 2006). O padrão pode ser facilmente aplicado com tinta de spray preta sob um fundo branco, mantendo um padrão de diâmetro semelhante.

Figura 16 – Aplicação de três padrões estocásticos diferentes



Fonte: Beleza, 2017.

Crammond et al. (2014) afirmam que a precisão na medição dos deslocamentos utilizando DIC é limitada pelo número de pixels dentro da imagem e da dimensão das regiões (subconjuntos). Além disso, relatam que é essencial realizar experimentos com câmeras de alta resolução, a fim de aumentar a confiabilidade das medições.

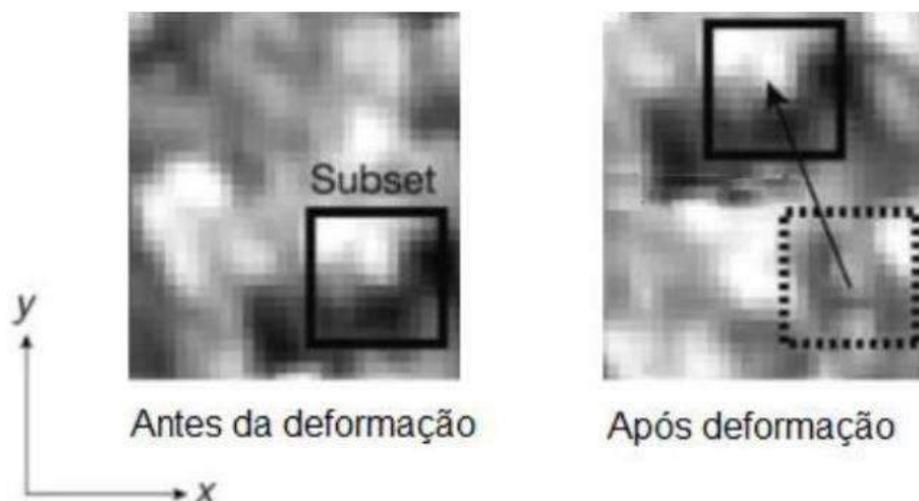
Entre as técnicas envolvendo metrologia óptica, a abordagem não destrutiva proporcionada pela técnica DIC, permite que o campo de deslocamento seja obtido sem danos à estrutura. Pela simplicidade de uso, a técnica DIC pode ser aplicada em experimentos de materiais e em estruturas industriais em geral (Hedan et, al., 2014)

Quando se faz uso de apenas uma câmera nos experimentos, a técnica é conhecida como 2D-DIC, a qual permite obter a medição de deslocamentos sobre um plano perpendicular ao eixo óptico. Por outro lado, quando se emprega duas câmeras, a técnica é conhecida como 3D-DIC, a qual permite a medição de deslocamentos sofridos pelo objeto nas três direções espaciais (Felipé-sesé et al., 2014).

3.1.1 Correspondência de pontos

Para medição do deslocamento sofrido pelo ponto de interesse, torna-se necessário entender como é que o algoritmo faz a correspondência de pontos na região de interesse assinalada. Obtendo a matriz de intensidades do ponto de interesse, o algoritmo analisa outras matrizes de intensidade na imagem seguinte até o momento em que encontra uma semelhança entre elas.

Figura 17 – Exemplo de deslocamento de um ponto durante a deformação da peça



Fonte: Beleza, 2017.

3.1.2 Medição de deformações através do DIC

As deformações acarretadas pelos carregamentos aplicados num objeto tornam-se um aspecto importante para entender as propriedades do material de que é feito. Para o projeto e dimensionamento de estruturas é fundamental quantificar a deformação que estas podem suportar para que não atinjam a ruptura e cumpram com a finalidade para as quais foram concebidas (Ramos et al., 2015). As deformações medidas num corpo-de-prova permitem ainda determinar as distribuições de tensões e, através das relações

tensão-deformação, determinar propriedades que são importantes no estudo da Mecânica dos Materiais.

Conforme Aydin et al. (2018), instrumentos de medições tradicionais fornecem apenas valores médios em ensaios de materiais e esses valores médios não são suficientes para entender o comportamento mecânico dos materiais. No entanto, o DIC permite o cálculo do campo de deformações e deslocamentos, além de propriedades mecânicas de materiais metálicos e não metálicos. Zhou et al. (2013) determinaram as propriedades mecânicas de materiais flexíveis em ensaio de tração usando a técnica DIC. Os autores mostraram as vantagens do DIC, como uma técnica sem contato, alta precisão em todo o campo de análise e ampla faixa de medição. Heinz (2010) calculou a tensão de escoamento, o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade de polímeros usando a técnica 3D DIC. O autor concluiu que o DIC é uma técnica prática para entender a distribuição de deformações não uniforme antes do uso prático do elemento.

O método DIC é amplamente aceito como uma ferramenta eficaz para medições de deformações no campo experimental de estruturas e materiais (Pan et al., 2009; Sutton, Orteu e Schreier, 2009). Para medições de deformações no plano, uma única câmera fixada, uma fonte de luz constante e um padrão de preparação de amostra com alto contraste é suficiente para a realização de medidas em 2D. A técnica tem sido usada principalmente para avaliar deformações e fraturas em materiais cimentícios no estado endurecido (Mauroux et al., 2012; Gheitasi, Harris e Hansen, 2018; Boshoff et al. 2016; Maruyama, Sasano e Lin, 2016; Paegle, Minelli e Fischer, 2016).

Mauroux et al. (2012) aplicaram o 2D DIC para examinar o progresso de retração em argamassas de revestimento. O método permitiu identificar e ilustrar o deslocamento de forma não uniforme, além de medir deslocamentos e deformações o que permitiu destacar a evolução dos padrões de microfissuração com o passar do tempo. Os resultados foram comparados com as medidas obtidas por LVDTs, e uma boa correlação foi obtida entre os métodos. De acordo com Pan et al. (2009), o DIC permite avaliar curvas tensão-deformação a partir de regiões de pixels, permitindo a melhor compreensão das deformações de regiões de interesse e a propagação de fissuras em elementos de análise.

Mojsilović e Salmanpour (2016) realizaram ensaios em paredes de alvenaria em escala real no Instituto Federal de Tecnologia de Zurique avaliando deslocamentos e deformações fazendo-se uso de LVDTs e o método DIC. Os resultados obtidos provaram que o DIC pode ser considerada uma técnica eficaz para medir deslocamentos e

deformações com alto nível de precisão, tornando-se uma técnica acessível para os laboratórios de engenharia.

Guerrero et al. (2014) avaliaram deslocamentos e campo de deformações em diversos painéis de alvenaria, preenchidos parcialmente e na sua totalidade e submetidos a carregamentos cíclicos laterais fazendo-se uso do DIC. Os autores observaram que dois diferentes mecanismos de deformação apareceram nos painéis de alvenaria, um durante a fase de carregamento e outro durante a fase de alívio da carga. Os resultados experimentais demonstraram que a inclinação das faixas de deformações depende das dimensões dos blocos e da forma que são dispostos. Os autores verificaram que a técnica DIC é de grande utilidade para a verificação de condições de contorno considerada na análise realizada com micromodelos.

Ghorbani, Matta e Sutton (2014) avaliaram através de um estudo piloto o uso do DIC-3D como forma de medir campos de deformação superficial em paredes de alvenaria em grande escala e para a produção detalhada de mapas de propagação de fissuras. Três paredes de alvenaria confinadas foram ensaiadas sob cargas horizontais cíclicas reversas no plano. Os autores constataram que componentes de deformação específicos podem ser produzidos em mapas 3D a partir do DIC-3D possibilitando visualizar mecanismos de resistência e modos de ruptura de elementos estruturais. Além disso, verificaram que a propagação de fissuras pode ser eficientemente mapeada com base nas medições de deslocamento da técnica DIC-3D. Além disso, os autores realizaram medições de deformações através do DIC e LVDTs, constatando que a diferença da medida de ambos foi menor que 5%.

Gencturk et al. (2014) realizaram ensaios até a carga última de perfis I metálicos pré-tensionados em escala real para calcular os deslocamentos em todos os planos de análise e compararam com os resultados das medições dadas por aparelhos de medição tradicionais. Os autores concluíram que a técnica DIC fornecia informações detalhadas e incapazes de serem mensuradas pelas técnicas tradicionais.

Bertelsen et al. (2019) avaliaram através da técnica DIC a detecção e quantificação de fissuras por retração plástica em coberturas revestidas com argamassa fina em substratos de concreto. Apresentou-se um procedimento detalhado para avaliar parâmetros das fissuras, como localização, largura e comprimento, permitindo que os padrões de fissuras fossem mapeados e reproduzidos digitalmente a partir de dados obtidos pelo DIC. As medidas das propriedades das fissuras obtidas pelo DIC foram verificadas com microscópio óptico. Os autores concluíram que houve uma boa

correlação entre as medidas obtidas através do DIC e as medidas dadas pelo microscópio óptico. Além disso, concluíram que a técnica DIC é um mecanismo apropriado para realizar medições automatizadas de descolamentos em superfícies, além de ser possível realizar o mapeamento de fissuras.

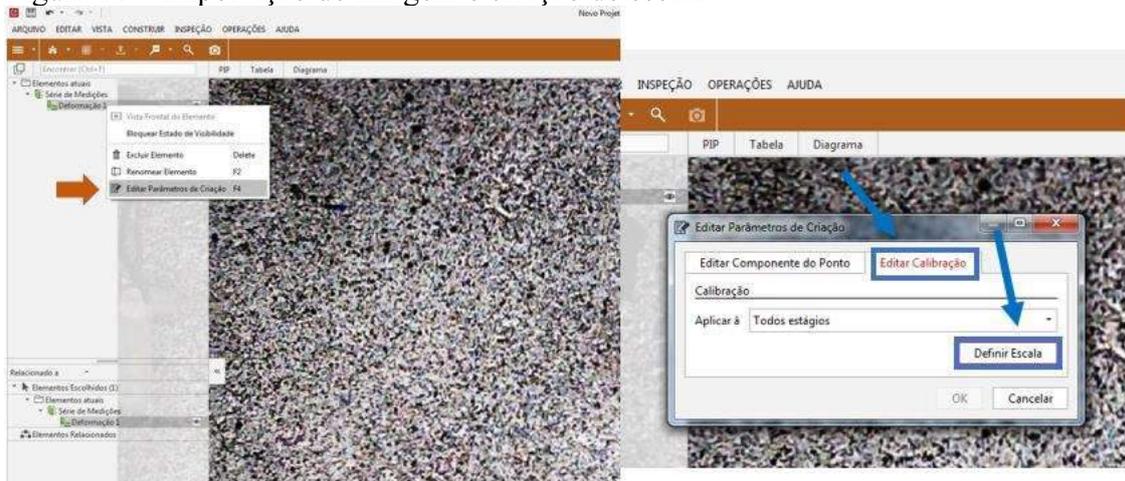
3.1.3 Software GOM Correlate

A GOM é uma empresa alemã que desenvolve, produz e distribui softwares, além de sistemas dedicados à tecnologia de medição de coordenadas em 3 dimensões. O programa Gom Correlate (<https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html>) é um software gratuito utilizado para a Correlação Digital de Imagem e análise de movimento em três dimensões.

3.1.4 Metodologia de análise das imagens

O processo de avaliação das imagens obtidas através da filmagem do ensaio de resistência à compressão axial é melhor descrito em algumas etapas na sequência. Inicialmente o vídeo é importado para dentro do software onde é necessário definir uma escala na imagem previamente conhecida, conforme Figura 18.

Figura 18 – Importação de imagem e criação de escala



Fonte: Elaboração própria.

Após a definição da escala do desenho, delimita-se uma superfície de interesse para que seja possível criar pontos e retas em que se deseja realizar a avaliação de

deslocamentos e deformações. A Figura 19 apresenta o processo de criação de uma superfície de interesse e posterior criação de distâncias onde avaliam-se deslocamentos.

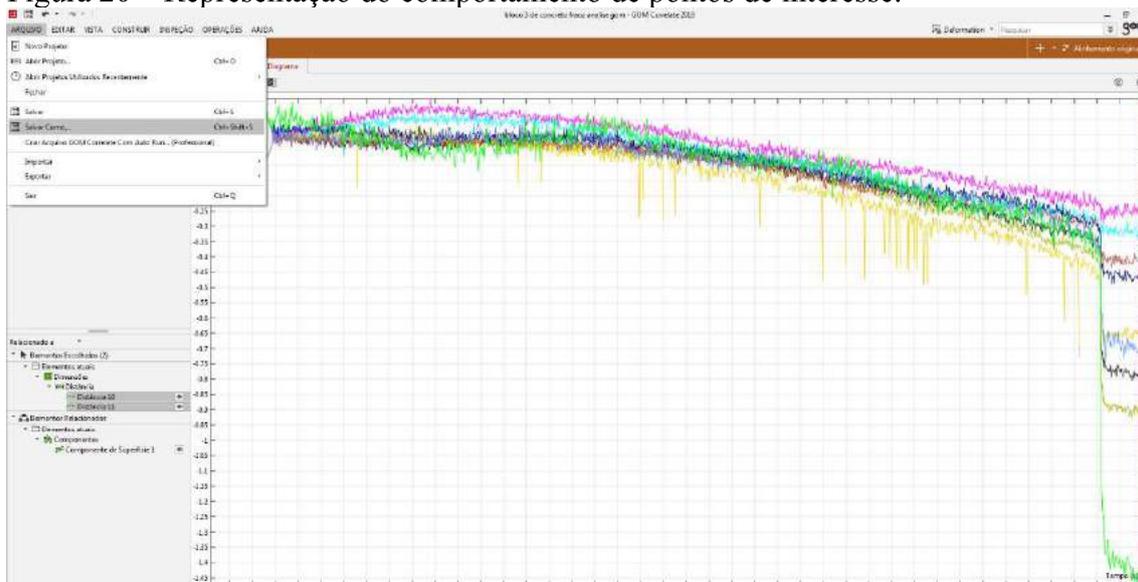
Figura 19 – Delimitação de superfície de interesse e criação de retas de avaliação.



Fonte: Elaboração própria.

Os dados gerados através dos locais de análise escolhidos fornecem um comportamento que pode ser observado no ícone “Diagrama” do software. Além disso, estes dados podem ser exportados em formato .csv para serem tratados em planilhas excel. A Figura 20 apresenta um exemplo do comportamento de pontos avaliados numa superfície de interesse.

Figura 20 – Representação do comportamento de pontos de interesse.



Fonte: Elaboração própria.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são descritos os ensaios de caracterização física e mecânica das argamassas e blocos utilizados na pesquisa, bem como, os procedimentos experimentais de ensaios dos prismas. Todas as amostras foram ensaiadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Na Tabela 8, apresenta-se o resumo dos ensaios realizados nesta pesquisa e as normas técnicas adotadas para a execução.

Tabela 8 – Normas adotadas para os procedimentos experimentais

Ensaio em agregados miúdos	
Determinação da massa específica do cimento e outros materiais em pó	ABNT NBR NM 23:2000
Determinação da massa específica da areia	ABNT NBR NM 52:2009
Requisitos da cal hidratada para argamassas	ABNT NBR 7175:2003
Requisitos para o cimento Portland	ABNT NBR 16697:2018
Ensaio em argamassas	
Preparo e produção das argamassas	ABNT NBR 16541:2016
Índice de consistência	ABNT NBR 13276:2016
Densidade de massa no estado fresco	ABNT NBR 13278:2005
Teor de ar incorporado	ABNT NBR 13278:2005
Resistência à tração na flexão	ABNT NBR 13279:2005
Resistência à compressão axial	ABNT NBR 13279:2005
Densidade de massa no estado endurecido	ABNT NBR 13280:2005
Absorção de água	ABNT NBR 15259:2005
Retenção de água	ABNT NBR 13277:2005
Coefficiente de capilaridade	ABNT NBR 15259:2005
Ensaio em blocos cerâmicos	
Determinação das propriedades físicas, geométricas e mecânicas	ABNT NBR 15270-2:2017
Ensaio em prismas cerâmicos	
Determinação da resistência à compressão axial em prismas	ABNT NBR 15812-3:2017

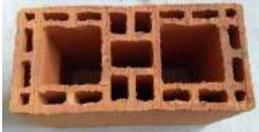
Fonte: Elaboração própria.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Bloco estrutural

Foram selecionadas duas tipologias de bloco estrutural, variando a geometria: bloco cerâmico de parede maciça (BPM) e bloco cerâmico de parede vazada (BPV). Na Tabela 9 relacionam-se os tipos de blocos e suas dimensões nominais. Para a caracterização física e mecânica dos blocos, utilizou-se 13 blocos de cada tipologia.

Tabela 9 – Tipologia e dimensões nominais dos blocos ensaiados

Tipologia	Dimensões nominais comprimento x largura x altura	Vista superior do bloco
Bloco cerâmico parede maciça (BPM)	29cm x 14cm x 19cm	
Bloco cerâmico parede vazada (BPV)	29cm x 14cm x 19cm	

Fonte: Elaboração própria.

4.2.2 Características dimensionais dos blocos

A determinação das características dimensionais dos blocos cerâmicos seguiu as recomendações das partes 1 e 2 da ABNT NBR 15270-2:2017. Foram utilizados paquímetro e esquadro para realizar os procedimentos, conforme Figura 21.

Figura 21 – Ensaio dimensionais. (a) largura; (b) comprimento; (c) altura



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autor

Os valores médios das dimensões encontradas para os dois tipos de blocos utilizados no procedimento experimental estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Dimensões médias dos blocos utilizados

	Dimensões efetivas médias dos blocos (mm)			Espessuras mínimas (mm)				Desvios máximos (mm)	
	L	H	C	Parede externa	Septos	Parede vazada	Vazados	Esquadro	Flecha
Blocos Cerâmicos de Paredes Vazadas (BPV)									
Média	140,44	192,34	288,3	8,95	8,28	32,15	76,99	0,85	0,38
Desvio Padrão	0,83	1,58	0,81	0,18	0,19	0,9	0,44	0,80	0,51
Coefficiente Variação	0,60%	0,80%	0,30%	2,00%	2,30%	2,80%	0,60%	94,60%	131,70%
Blocos Cerâmicos de Paredes Maciças (BPM)									
Média	138,07	189,05	287,37	21,72	14,77	49,36	93,08	0,77	0,83
Desvio Padrão	0,48	1,12	1,36	0,78	0,40	1,51	0,74	0,70	0,40
Coefficiente Variação	0,40%	0,60%	0,50%	3,60%	2,70%	3,10%	0,80%	90,40%	48,70%

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Determinação de absorção d'água e determinação da área líquida

Para o cálculo do índice de absorção d'água (AA) e área líquida de cada bloco, seguiram-se as diretrizes da ABNT NBR 15270-2:2017. Na Tabela 11 apresentam-se os valores encontrados.

Tabela 11 – Características físicas médias dos blocos avaliados

Blocos BPV					
	Massa seca (M_{seca})	Absorção (AA%)	Área bruta (A_{bruta})	Área líquida ($A_{líquida}$)	$A_{líquida}/A_{bruta}$
Média	5894 g	10,21%	404,89 cm ²	159,34 cm ²	0,39
Desvio Padrão	43,93	0,00	2,01	0,53	0,01
Coefficiente de Variação	0,75%	1,73%	0,50%	0,33%	0,96%
Blocos BPM					
Média	7261,5 g	10,49%	396,78 cm ²	196,40 cm ²	0,49
Desvio Padrão	27,60	0,01	2,52	1,99	0,01
Coefficiente de Variação	0,38%	12,22%	0,64%	1,02%	1,35%

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 22 apresenta o ensaio de resistência à compressão axial dos blocos. Os blocos foram ensaiados conforme a norma ABNT NBR 15270:2017, submetidos à compressão em uma prensa servo-controlada com velocidade de deformação controlada de 0,020mm/s, modelo Estrutura 1500HDX, com software de aquisição de dados e operação Bluehill® versão 3.13.1260. Para o capeamento em ambas as bases dos blocos, utilizou-se uma mistura de argamassa e cimento com resistência mecânica superior à dos blocos. Realizou-se o ensaio com as amostras secas para que fosse possível correlacionar esses resultados com os dos blocos obtido pela técnica DIC, os quais também foram ensaiados secos.

Figura 22 – Blocos submetidos à compressão axial

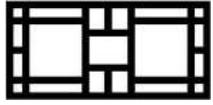


Fonte: Elaboração própria.

4.2.4 Resistência dos blocos cerâmicos

Determinou-se a resistência à compressão dos blocos cerâmicos seguindo-se as recomendações da ABNT NBR 15270:2017. A Tabela 12 apresenta a resistência à compressão para os blocos utilizados.

Tabela 12 – Resistências à compressão dos blocos na área bruta e na área líquida

Tipo de Bloco	BPM	BPV
Geometria		
Resistência média na área bruta ($f_{bm,bru}$)	22,50 MPa	9,85 MPa
Resistência característica na área bruta ($f_{bk,bru}$)	19,77 MPa	8,69 MPa
$A_{líquida}/A_{bruta}$	0,49	0,39
Resistência média na área líquida ($f_{bm,liq}$)	45,92 MPa	25,26 MPa
Resistência característica na área líquida ($f_{bk,liq}$)	40,35 MPa	22,28 MPa

Fonte: Elaboração própria.

4.2.5 Argamassa moldada em laboratório

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas argamassas de assentamento de cimento, cal e areia, com traço em massa, moldadas em laboratório. Para a moldagem dos prismas, utilizaram-se traços de argamassa de resistência média (f_a) com relação à resistência média do bloco na área líquida ($f_{bm,líquida}$) de 0,30 e 0,70 para cada tipologia de bloco.

Para a produção das argamassas, utilizou-se cimento CP-II-Z, com massa específica de 3,06 g/cm³ e massa unitária de 1,1 kg/dm³. A areia utilizada é uma areia média extraída de um rio próximo à Santa Maria - RS, com módulo de finura de 2,02, massa específica de 2,64 kg/dm³ e massa unitária de 1,49 kg/dm³. A areia utilizada para a produção das argamassas passou por um processo de peneiramento, onde retirou-se todo material com granulometria acima da peneira de abertura 1,2 mm. Utilizou-se cal hidratada especial CH-II, com massa unitária de 0,78 kg/dm³ e massa específica de 2,53 kg/dm³.

Para a produção da argamassa, o material seco foi misturado agitando-se num saco plástico durante 30 segundos para completa homogeneização. Na sequência, fez-se a mistura na argamassadeira seguindo-se as recomendações da ABNT NBR 16541:2016. Os traços utilizados, em massa, são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Traços de argamassa utilizados, em massa

Traços	Quantidade de material			
	cimento	cal	areia	Água/aglomerante
T1	1,00	0,05	2,47	0,45
T2	1,00	0,32	4,65	0,64
T3	1,00	0,05	4,07	0,70
T4	1,00	0,54	8,29	0,86

Fonte: Elaboração própria.

A água utilizada é proveniente da rede de abastecimento da cidade e a quantidade foi dosada para alcançar o índice de consistência de 230 ± 10 mm, seguindo os procedimentos normativos da ABNT NBR 13276:2016. Depois de definida, a quantidade de água foi mantida constante para cada traço, de maneira a ser possível manter sempre as mesmas características da argamassa nas repetições das moldagens.

Na Tabela 14, apresentam-se os valores de resistência adotadas para as argamassas moldadas, de acordo com a resistência do bloco na área líquida.

Tabela 14 – Definição das resistências das argamassas adotadas

Tipologia de Bloco	Resistência média na Área Bruta (MPa)	Resistência média na Área Líquida (MPa)	Porcentagem da resistência do bloco na área líquida (%)	Resistência média da argamassa adotada (MPa)
PM	22,50	45,92	70	32,50
			30	14,00
PV	9,85	25,26	70	17,50
			30	7,50

Fonte: Elaboração própria.

Para cada traço de argamassa, foram moldados 10 corpos de prova para medição da resistência à compressão axial, sendo 4 cilíndricos, de diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, para ensaios de compressão instrumentados para avaliação da curva tensão-deformação específica axial, e 6 prismáticos, de 4 x 4 x 16 cm, para avaliação da resistência à tração por flexão, avaliação da densidade de massa e permeabilidade à água. Os corpos de prova foram moldados concomitantemente à moldagem dos prismas, com o propósito de manter as propriedades físicas e mecânicas originais da argamassa de assentamento com cura ao ar.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão axial das amostras, utilizou-se a prensa de carga de modelo HD-20T, da marca Contenco, com taxa de carregamento de 500 N/s.

As propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido foram avaliadas de acordo com os procedimentos descritos pelas normas técnicas brasileiras. Para o estado fresco, foram avaliados índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado. Para o estado endurecido, avaliou-se a resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, densidade de massa e permeabilidade à água.

Os resultados das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resumo das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido

Estado fresco						
Argamassa	Índice de consistência (mm) NBR 13276:2016	Retenção de água (%) NBR 13277:2005	Teor de ar incorporado (%) NBR 13278:2005	Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³) NBR 13278:2005		
T1	230	93,45	4,30	2189,82		
T2	238	92,36	4,88	2125,78		
T3	236	92,25	5,01	2125,16		
T4	232	88,16	6,81	2081,78		
Estado endurecido						
Argamassa	Resistência à tração na flexão (MPa) NBR 13279:2005	Resistência à compressão axial (MPa) NBR 13279:2005	Absorção de água (g/cm ²) NBR 15259:2005	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2}) NBR 15259:2005	Densidade de massa no estado endurecido (kg/m ³) NBR 13278:2005	
T1	6,77	32,80	0,28	1,22	2037,11	
T2	4,95	14,21	0,46	4,43	1926,87	
T3	5,10	16,95	0,44	6,18	1949,31	
T4	2,66	7,44	1,08	10,21	1855,81	

Fonte: Elaboração própria.

4.2.6 Preparação dos prismas avaliados

Os prismas foram constituídos por dois blocos de altura e espessura da junta de argamassa de $1,0 \pm 0,2$ cm. O topo e a base dos prismas foram capeados com argamassa de resistência maior que a dos blocos, com o objetivo de reduzir os efeitos das

irregularidades no topo e na base dos prismas e proporcionar uma distribuição uniforme de carregamento. O capeamento em ambas as bases dos prismas deu-se após 14 dias de moldagem. Moldaram-se 11 prismas para cada tipologia, variando a resistência da argamassa e a tipologia do bloco.

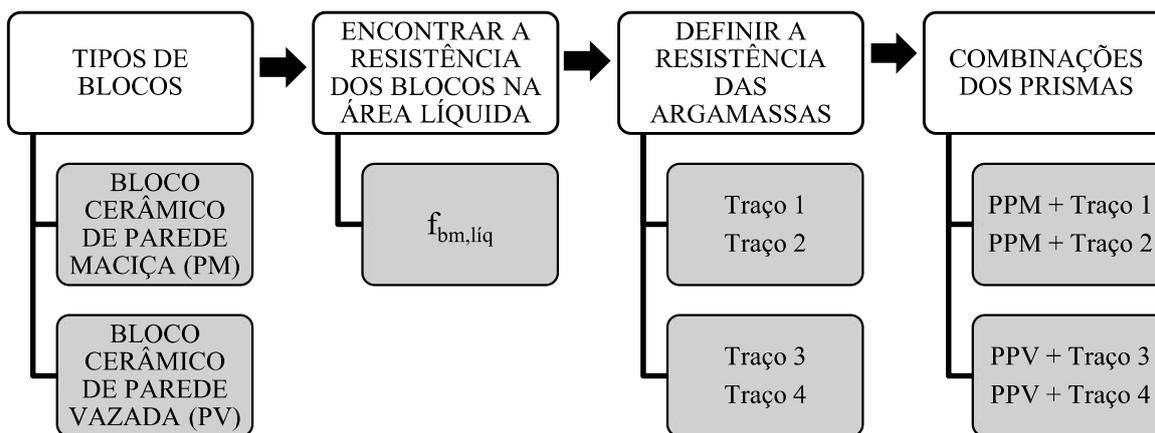
Para facilitar a compreensão das combinações das diferentes tipologias de prismas avaliadas, utilizou-se um sistema de nomenclatura para cada resistência de argamassa e tipo de bloco. Dessa forma, as argamassas com resistência adotada de 32,50 MPa e 14,00 MPa, combinadas com os blocos de parede maciça, foram identificadas pelos nomes T1 e T2, que significam traço 1 e traço 2, respectivamente. Já as argamassas com resistência adotada de 17,50 MPa e 7,50 MPa, combinadas com os blocos de parede vazada, foram identificadas pelos nomes de T3 e T4, significando traços 3 e traço 4, respectivamente.

Dessa forma, um prisma de parede maciça moldado com argamassa de traço T1 e chamado PPM - T1 é a combinação de dois blocos de parede maciça com resistência média na área bruta de 22,50 MPa (resistência média na área líquida de 45,92 MPa) unidos por uma junta de argamassa de resistência média (f_a) estimada de 32,50 MPa, atendendo uma relação com a resistência do bloco na área líquida ($f_{bm, líquida}$) de 0,70. Para os prismas com os mesmos blocos, porém moldados com uma argamassa de resistência média estimada de 14,00 MPa, o prisma é chamado PPM – T2 e tem uma relação com a resistência do bloco na área líquida de 0,30.

Os prismas PPV - T3 são a combinação de blocos de parede vazada com resistência média na área bruta de 9,85 MPa (resistência média na área líquida de 25 MPa) unidos por uma junta de argamassa de resistência média estimada de 17,50 MPa, atendendo uma relação com a resistência do bloco na área líquida de 0,70. Já os prismas PPV – T4 são produzidos com os mesmos blocos, porém moldados com uma argamassa de resistência média estimada de 7,50 MPa, resultando em uma relação com a resistência do bloco na área líquida de 0,30.

Na Figura 23 apresenta-se um fluxograma das tipologias de prismas testadas.

Figura 23 – Fluxograma das combinações dos prismas avaliados



Fonte: Elaboração própria.

Antes da realização do ensaio de resistência à compressão axial, os prismas foram preparados pintando-se as superfícies frontal e traseira por completo com tinta PVA branca fosca, em duas demãos, e, posteriormente, foi utilizado um jateamento em spray preto como mostrado na Figura 24, com o propósito de gerar um contraste aleatório necessário para a análise no software de correlação digital de imagem (Gom Correlate).

As filmagens foram realizadas com duas câmeras digitais modelo Cyber-Shot, marca Sony, full HD, capazes de capturar 30 quadros por segundo, posicionadas de forma a estar a 90° da região do centro do prisma, em ambas as faces. Buscou-se reduzir a interferência da incidência da luz externa e efeitos de vibrações e ruídos externos. Os prismas foram iluminados com refletores de LED de cor branca, um em cada face de filmagem, de maneira a obter uma melhor qualidade de filmagem que proporcionasse uma melhor análise no software. Após a captura dos vídeos, as filmagens também foram convertidas em imagens, quadro a quadro, utilizando o software Free Video to JPG Convert®, versão 5.0.72, desenvolvido e disponibilizado pela empresa Freestudio®.

Figura 24 – Preparação dos prismas para avaliação do método DIC

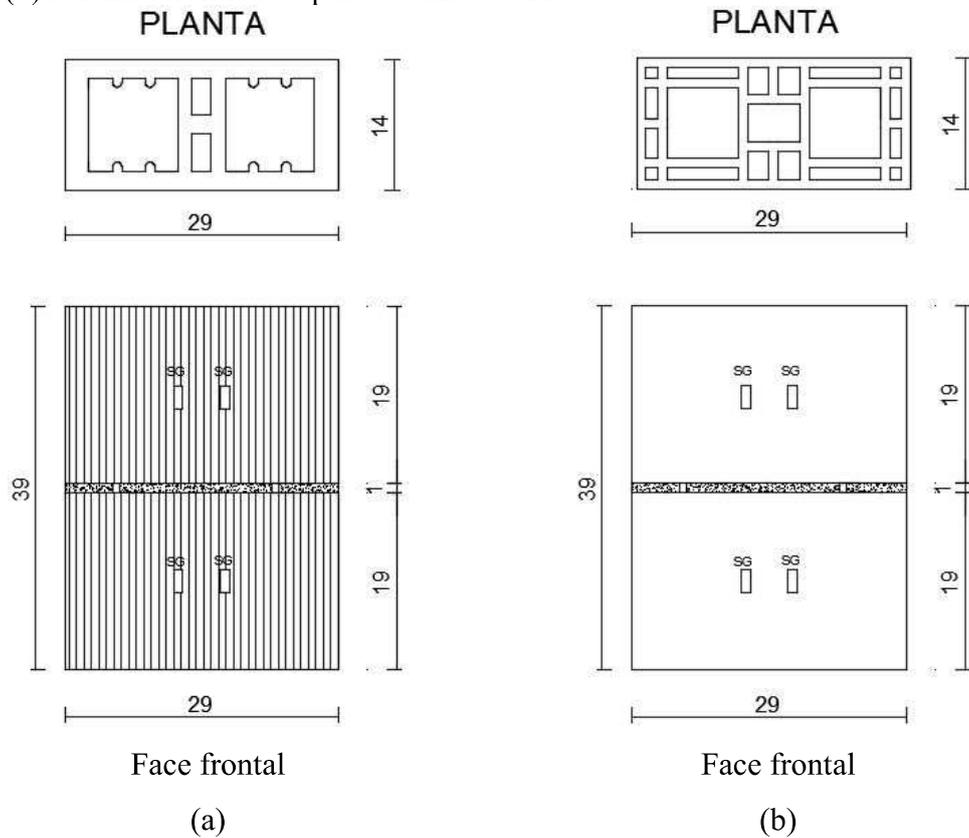


Fonte: Elaboração própria.

4.2.7 Instrumentação dos prismas

Na Figura 25, ilustram-se as geometrias dos prismas avaliados. O bloco de parede maciça foi combinado com argamassas T1 e T2, enquanto que o bloco de parede vazada foi combinado com argamassas T3 e T4.

Figura 25 – Geometria dos prismas moldados. (a) Prisma cerâmico de parede maciça – PPM; (b) Prisma cerâmico de parede vazada – PPV

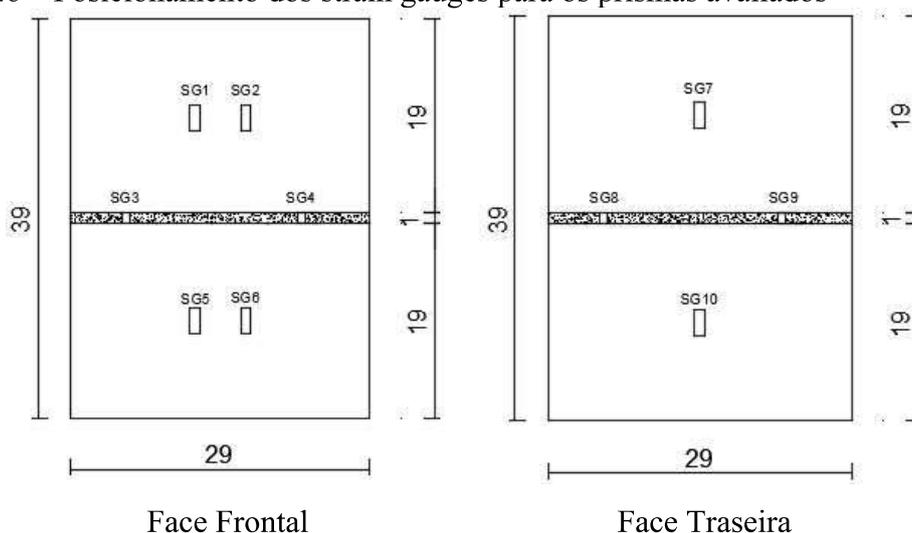


Fonte: Elaboração própria.

Os prismas foram ensaiados com idade de 28 dias conforme a norma ABNT NBR 15812-3:2017, submetidos à compressão em uma prensa servo-controlada com velocidade de deslocamento do pistão de 0,020mm/s, modelo Estrutura 1500HDX, com software de aquisição de dados e operação Bluehill® versão 3.13.1260.

As deformações específicas foram medidas usando strain gauges colados nos blocos, tanto superior quanto inferior, além da junta de argamassa. Com relação ao posicionamento dos strain gauges no prisma, na parte considerada como frontal, foram posicionados dois strain gauges verticais no bloco superior, dois no bloco inferior e dois na junta de argamassa. Na parte considerada como parte traseira, foram colocados um strain gauge vertical no bloco superior, um no bloco inferior e dois strain gauges na junta de argamassa. A Figura 26 representa o posicionamento descrito de colagem dos strain gauges no prisma.

Figura 26 – Posicionamento dos strain gauges para os prismas avaliados



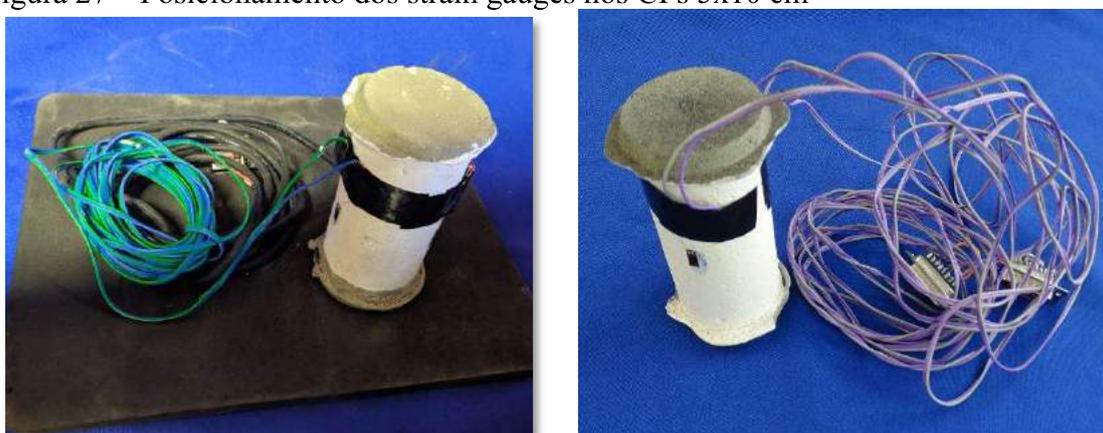
Fonte: Elaboração própria

4.3 ENSAIOS INSTRUMENTADOS

Para a realização das leituras das deformações axiais dos blocos e argamassas, utilizaram-se strain gauges com grade sensitiva de 10mm x 5mm e para os prismas utilizaram-se strain gauges com grade sensitiva de 5mm x 3mm na região da junta de argamassa e 10 mm x 5 mm na região dos blocos. A colagem dos strain gauges foi realizada com cola a base de 90% de cianocrilato de etila, com no mínimo 24 horas de antecedência aos ensaios. Os mesmos foram conectados ao sistema HBM SPIDER/CATMAN para captura dos dados.

Para avaliar o comportamento da curva tensão-deformação específica axial das argamassas, foram instrumentados e ensaiados 4 corpos de prova cilíndricos de diâmetro 5cm x 10cm. Os corpos de prova foram moldados concomitantemente a moldagem dos prismas para o mesmo traço utilizado. Os espécimes foram instrumentados com dois strain gauges colocados em lados opostos da amostra. Para a realização do ensaio de resistência à compressão axial das amostras, utilizou-se a prensa de carga de modelo HD-20T, da marca Contenco, com taxa de carregamento de 500 N/s. O sistema de aquisição de dados dos extensômetros é da marca HBM SPIDER/CATMAN. Para os corpos de prova de argamassa instrumentados, a Figura 27 apresenta o posicionamento dos strain gauges.

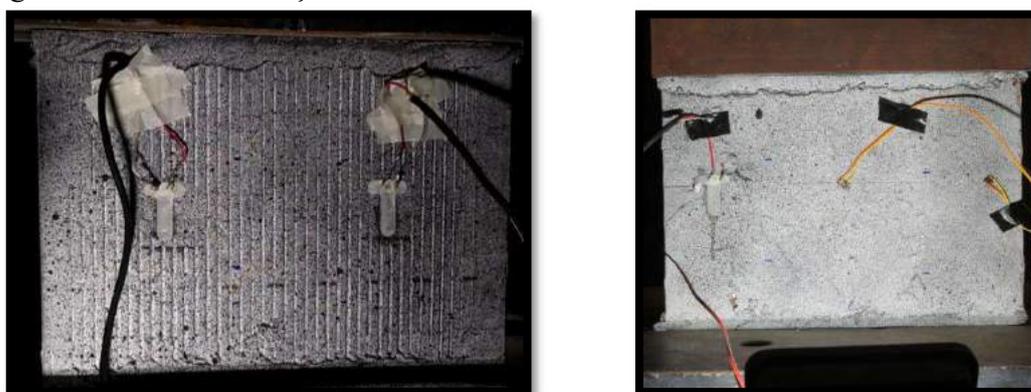
Figura 27 – Posicionamento dos strain gauges nos CPs 5x10 cm



Fonte: Elaboração própria.

Para a avaliação através do método DIC, realizou-se a filmagem do ensaio de resistência à compressão na face frontal e traseira dos blocos de ambas as tipologias. A Figura 28 apresenta a pintura e instrumentação de blocos.

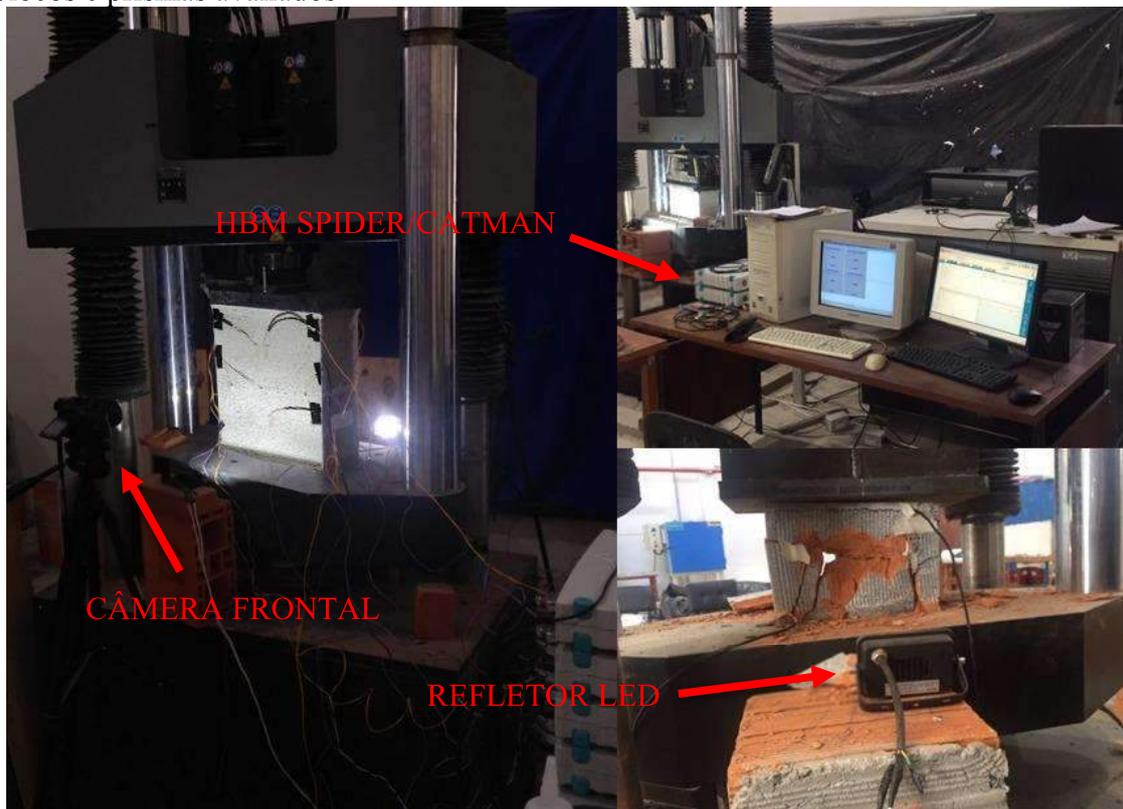
Figura 28 – Instrumentação e teste de blocos instrumentados



Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma que o procedimento de aquisição de dados para os blocos e argamassas, o procedimento indicado na Figura 29 apresenta o processo de captura de dados através da leitura dos strain gauges e o processo de posicionamento e montagem dos equipamentos de filmagem.

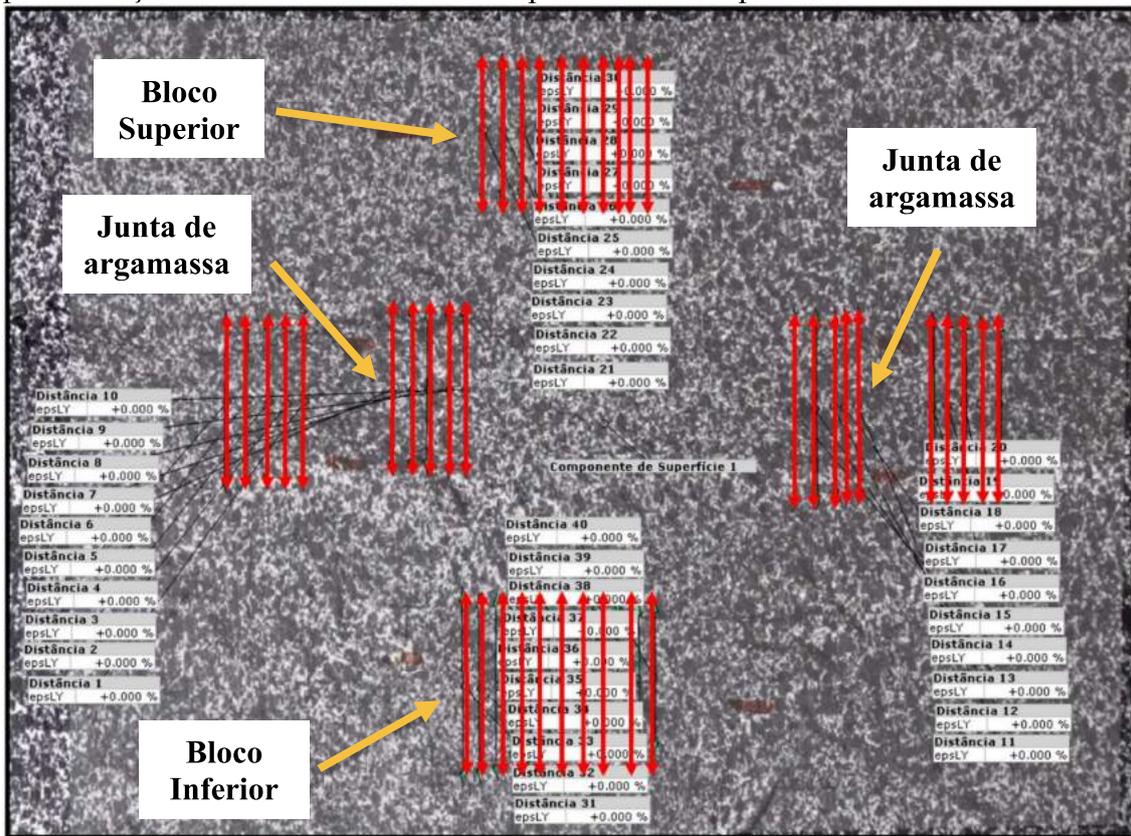
Figura 29 – Posicionamento e montagem dos aparelhos para captura de deformações dos blocos e prismas avaliados



Fonte: Elaboração própria.

Para a comparação das deformações específicas medidas via DIC e strain gauges, estabeleceu-se uma metodologia de avaliação onde foram criadas no software 10 retas de referência localizadas próximas a cada posição dos strain gauges. Na Figura 30 é demonstrado um exemplo de retas criadas num prisma próximo aos posicionamentos dos extensômetros.

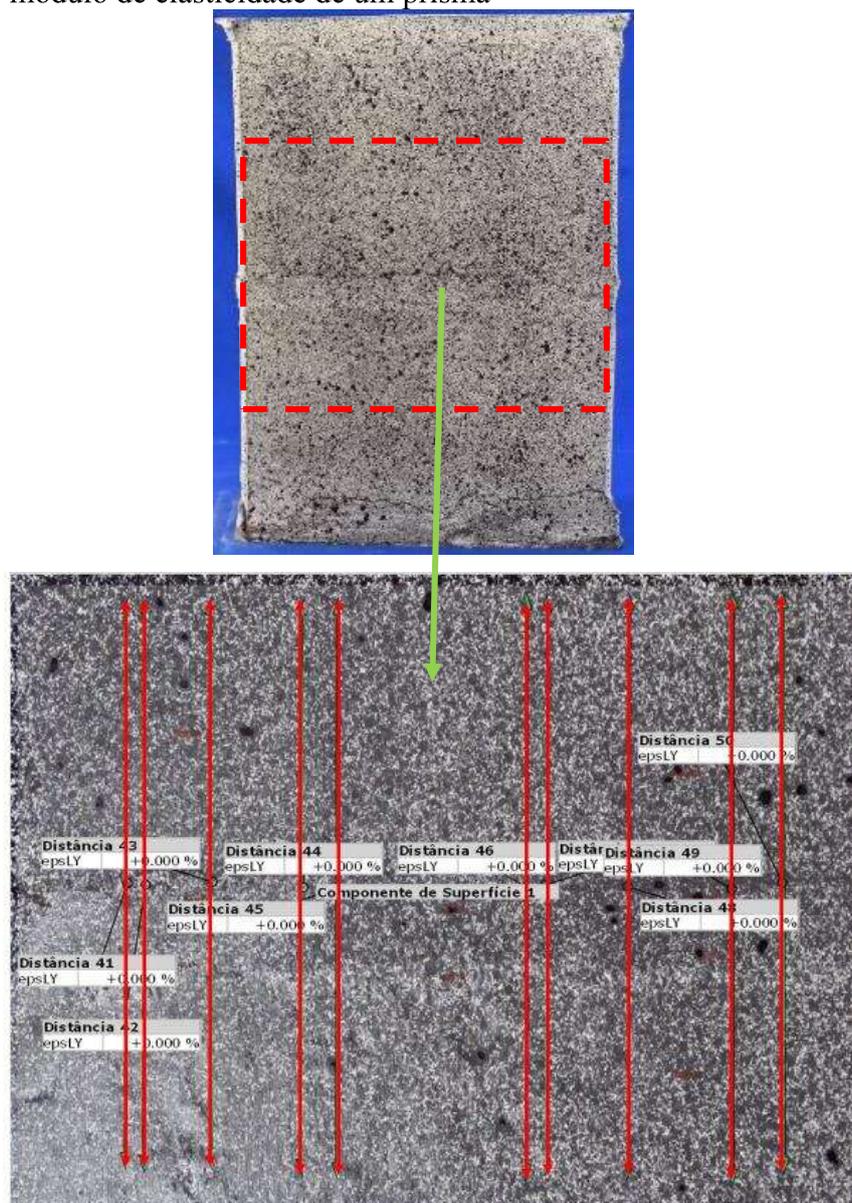
Figura 30 – Exemplo de posicionamento das retas criadas no software Gom Correlate para medição de deslocamentos dos componentes de um prisma



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados médios gerados pelos deslocamentos das dez retas foram comparados com os resultados obtidos através dos strain gauges. Comparadas e validadas as medidas nos componentes com o DIC e strain gauges, foi avaliado o módulo de elasticidade inicial do prisma através do DIC, traçando-se dez retas no prisma conforme Figura 31. A curva tensão-deformação específica do prisma obtida através do DIC foi usada para avaliar o módulo de elasticidade da alvenaria.

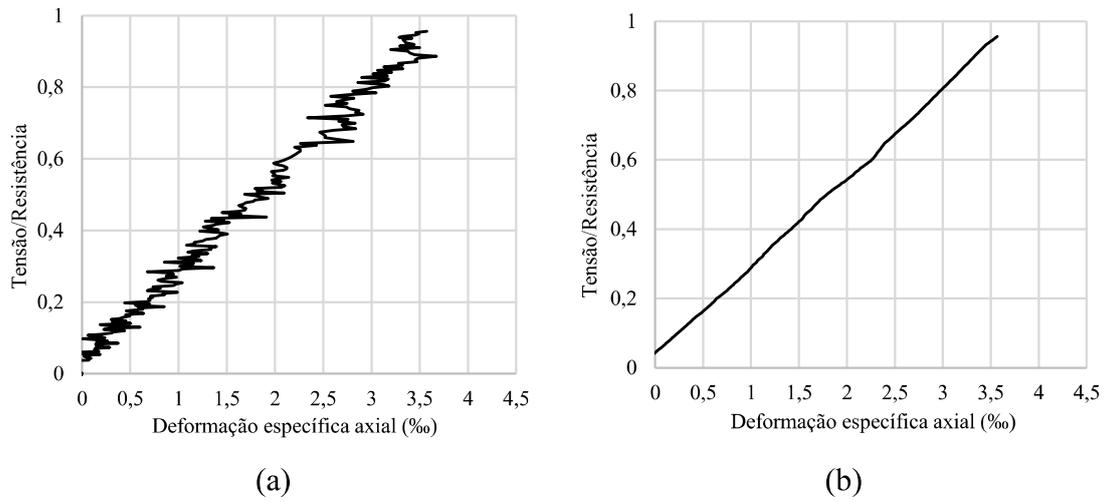
Figura 31 - Exemplo de posicionamento das retas criadas no software Gom Correlate para medição do módulo de elasticidade de um prisma



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados obtidos através do software possuem erros de medição, referente as leituras de imagens, que foram atenuados com o esmero durante a preparação das amostras avaliadas, iluminação e filmagem. Dessa forma, os gráficos na curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos pelo software são linhas serrilhadas, onde quanto maior o erro, maior o tamanho do serrilhado. Para a análise e comparação dos resultados, realizou-se a suavização das curvas com auxílio do software Origin8, utilizando o método de suavização Savitsky-Golay. A Figura 32 (a) apresenta o comportamento da curva média obtido através do DIC e na Figura 32 (b), a curva suavizada.

Figura 32 – Comportamento médio tensão/resistência-deformação específica axial para o bloco BPM4, (a) obtido pelo DIC; (b) Suavizada



Fonte: Elaboração própria.

Para todas as curvas obtidas através dos strain gauges e pelo método DIC para blocos e prismas, utilizou-se a resistência dos blocos e prismas considerando-se a resistência na área líquida.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo está subdividido em 6 partes. Na primeira parte, serão avaliados os resultados da resistência à compressão axial e das deformações medidas nos blocos de parede maciça e blocos de parede vazada instrumentados e submetidos à compressão axial, comparando com os resultados das deformações específicas obtidas pelo DIC.

Na segunda parte, serão apresentados os resultados da resistência à compressão axial e avaliação da curva tensão/resistência-deformação específica axial dos corpos de prova de argamassa.

Na terceira parte, serão abordados os resultados da resistência à compressão axial dos prismas, além do comportamento da curva tensão-deformação específica axial dos materiais componentes de cada tipologia avaliada para os prismas de parede maciça, tanto pela instrumentação experimental quanto pelo DIC.

Na quarta parte, serão abordadas as análises do avanço do processo de ruptura dos prismas de parede maciça através da análise quadro a quadro e através do gradiente de deformação específica.

Na quinta parte desse capítulo, serão abordados os resultados da resistência à compressão axial dos prismas, além do comportamento da curva tensão-deformação específica axial dos materiais componentes de cada tipologia avaliada para os prismas de parede vazada, tanto pela instrumentação experimental quanto pelo DIC.

Na sexta parte desse capítulo, serão abordadas as análises do avanço do processo de ruptura dos prismas de parede vazada através da análise quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pela técnica DIC.

5.1 COMPORTAMENTO DOS BLOCOS AXIALMENTE COMPRIMIDOS

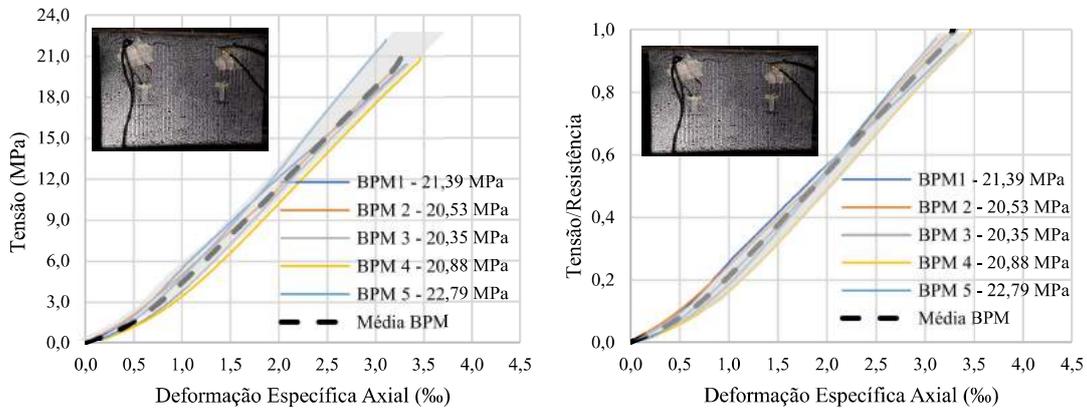
Nesta parte, são avaliados os comportamentos das curvas tensão-deformação específica axial para os blocos cerâmicos de parede maciça e parede vazada.

5.1.1 Bloco estrutural de parede maciça

Para avaliar o comportamento da curva tensão-deformação específica axial dos blocos de parede maciça com resistência média à compressão axial na área bruta de 22,50 MPa (45,92 MPa na área líquida), foram ensaiados e instrumentados cinco blocos

nomeados de BPM 1 a BPM 5. Os resultados das deformações específicas axiais, calculadas para diferentes níveis de tensão aplicada/resistência final, através das médias dos strain gauges colados nos blocos em ambas as faces, são mostrados na Figura 33.

Figura 33 – Curva tensão/resistência-deformação específica axial dos blocos BPM, em tensão e em nível de tensão



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que os blocos de parede maciça tiveram um comportamento semelhante entre si, com deformações específicas máxima na ruptura entre 3,11‰ a 3,46‰. Os valores das deformações específicas, bem como o desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tabela 16. Os valores de deformação específica axial apresentados são os máximos valores registrados pelos strain gauges, porém em alguns casos não correspondem aos valores da máxima tensão medida, uma vez que nem todos strain gauges registraram medidas até a tensão última dos materiais.

Tabela 16 – Deformação específica axial máxima dos blocos BPM obtidos através da instrumentação

Blocos	Deformação Específica Axial na Ruptura (‰)	Deformação Específica Média (‰)	Desvio Padrão (‰)	Coefficiente de Variação (%)
BPM 1	3,31	3,29	0,13	4,02%
BPM 2	3,22			
BPM 3	3,35			
BPM 4	3,46			
BPM 5	3,11			

Fonte: Elaboração própria.

O módulo de elasticidade inicial dos blocos BPM obtidos através da curva tensão-deformação específica axial, bem como, a média dos mesmos, o desvio padrão e o coeficiente de variação são mostrados na Tabela 17. Os valores dos módulos de

elasticidade inicial para cada bloco são resultantes das medidas dos quatro strain gauges colados em cada bloco.

Tabela 17 – Módulo de elasticidade dos blocos de parede maciça obtido através da instrumentação

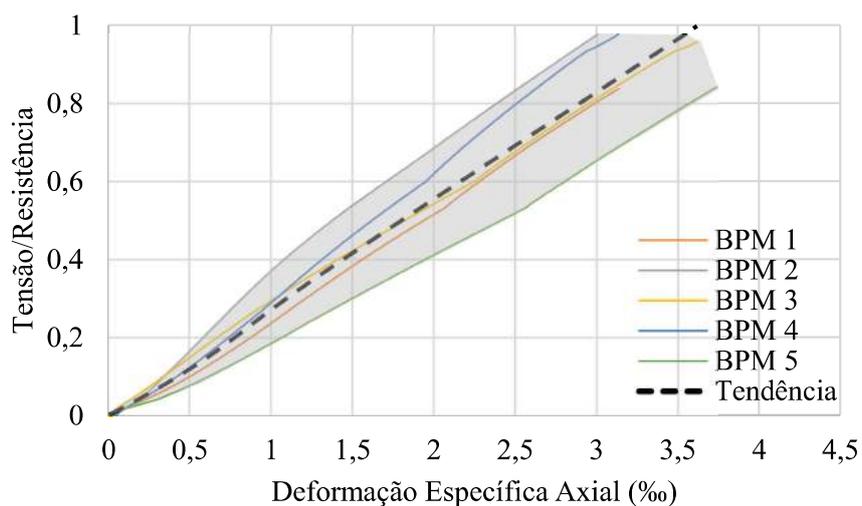
Blocos	Módulo de Elasticidade Inicial (GPa)	Média Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
BPM 1	12,84	11,76	1,12	9,56%
BPM 2	11,29			
BPM 3	11,17			
BPM 4	10,47			
BPM 5	13,05			

Fonte: Elaboração própria.

Buscando correlacionar as medições dos strain gauges com as medidas de deformações axiais obtidas pelo método DIC, realizou-se a filmagem dos blocos de parede maciça, devidamente preparados para a técnica DIC, em ambas as faces.

A Figura 34 apresenta o resultado das curvas médias suavizadas obtidas através do método DIC para os blocos. Além disso, representa-se uma reta de tendência para o comportamento dos blocos avaliados.

Figura 34 – (a) Curva média tensão/resistência-deformação específica axial dos blocos BPM 1, BPM 2 e BPM 3, BPM 4 e BPM 5 obtidas a partir do DIC



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que os blocos de parede maciça tiveram um comportamento semelhante entre si, com deformações específicas máxima na ruptura entre 3,00‰ a 3,74‰.

Os valores das deformações específicas, bem como, o desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Deformação específica axial máxima dos blocos BPM obtido através do DIC

Blocos	Deformação Específica Axial na Ruptura (‰)	Deformação Específica Média (‰)	Desvio Padrão (‰)	Coefficiente de Variação (%)
BPM 1	3,13	3,32	0,33	10,64
BPM 2	3,00			
BPM 3	3,62			
BPM 4	3,13			
BPM 5	3,74			

Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, os valores obtidos através do método DIC foram levemente superiores aos obtidos através dos strain gauges. Tal situação, deve-se possivelmente ao fato de que os strain gauges, para níveis de tensões próximo a ruptura, acabam não registrando deformações por estarem em locais de possíveis propagação de fissuras ou posicionados em locais do corpo de prova que sofrem esfacelamento próximo à ruptura.

O módulo de elasticidade inicial dos blocos BPM obtidos através da curva tensão-deformação específica axial através do método DIC, bem como, a média dos mesmos, o desvio padrão e o coeficiente de variação são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Módulo de elasticidade dos blocos de parede maciça obtido através da técnica DIC

Blocos	Módulo de elasticidade Inicial (GPa)	Média Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
BPM 1	10,77	10,52	0,67	6,39%
BPM 2	10,98			
BPM 3	10,69			
BPM 4	10,82			
BPM 5	9,33			

Fonte: Elaboração própria.

Para essa tipologia de bloco, que apresentavam paredes espessas, a ruptura ocorreu pela instabilidade do conjunto como um todo, uma ruptura predominantemente do tipo tronco-cônica. Observou-se a ocorrência da separação das paredes que formam o

bloco, ocasionando a desagregação completa do mesmo. A Figura 35 mostra o cenário típico observado pós-ruptura.

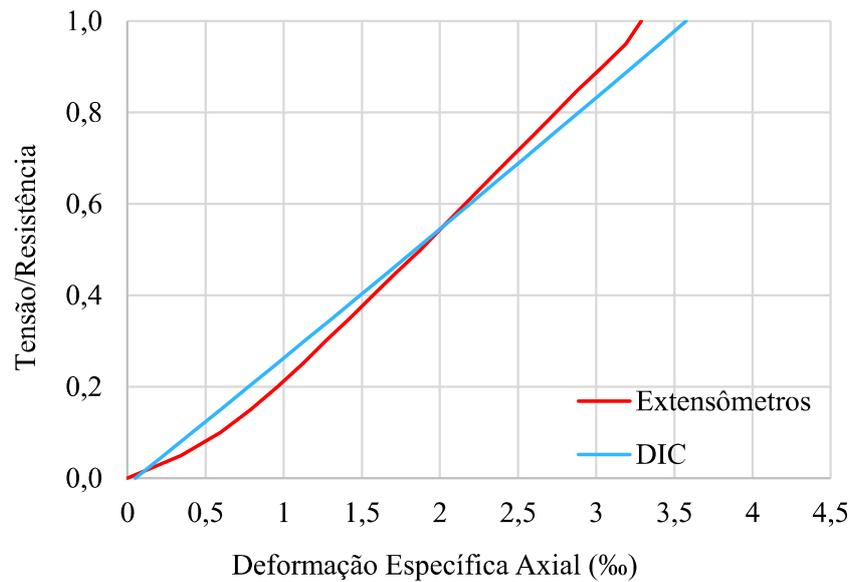
Figura 35 – Cenário pós-ruptura observado para os blocos BPM



Fonte: Elaboração própria.

Para verificar a correlação entre as medidas registradas pelos strain gauges e através da técnica DIC, observa-se através da Figura 36, o comportamento das deformações específicas medidas pelos dois métodos. Verificou-se que através das medidas médias para ambos os métodos, as curvas registradas estão muito próximas entre si, o que sugere que a técnica DIC é uma ferramenta adequada para medição de deformações. Outros autores também obtiveram valores muito próximos entre os dados obtidos pela técnica DIC e pela instrumentação convencional. Kumar, Aravind e Hossiney (2019), usaram instrumentação convencional e DIC em prismas de tijolos cerâmicos, e obtiveram diferença entre as medições realizadas por ambos os métodos de apenas 4,7%. Ghorbani et al. (2014), ao usar LVDTs e DIC para realizar medições de deformações em paredes de alvenaria no plano obtiveram diferença entre os métodos menor que 5%.

Figura 36 – Comportamento médio tensão/resistência-deformação específica axial para extensômetros e DIC para blocos BPM

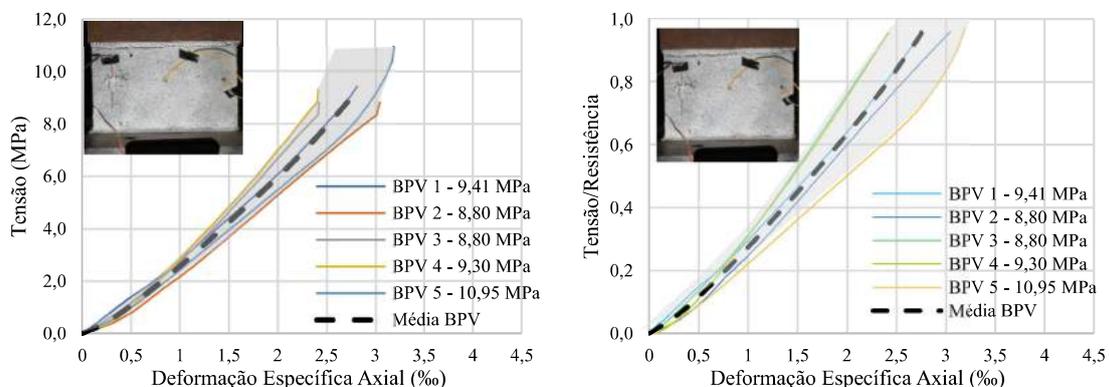


Fonte: Elaboração própria.

5.1.2 Bloco estrutural de parede vazada

Para avaliar o comportamento da curva tensão-deformação específica axial dos blocos de parede vazada com resistência média à compressão axial na área bruta de 9,85 MPa (25 MPa na área líquida), foram ensaiados e instrumentados cinco blocos nomeados de BPV 1 a BPV 5. Os resultados das deformações específicas axiais calculados para diferentes níveis de tensão aplicada/resistência, através das médias dos strain gauges colados nos blocos em ambas as faces, são mostrados na Figura 37.

Figura 37 – Curva média tensão/resistência-deformação específica axial dos blocos BPV instrumentados, em nível de tensão e em tensão absoluta



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram um comportamento próximo entre os blocos avaliados, encontrando-se deformações específicas máximas na ordem de 2,40‰ a 3,17‰. Os valores das deformações específicas, bem como, o desvio padrão e o coeficiente de variação são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 - Deformação específica axial máxima dos blocos BPV obtidos através da instrumentação

Blocos	Deformação Específica Axial na Ruptura (‰)	Deformação Específica Média (‰)	Desvio Padrão (‰)	Coeficiente de Variação (%)
BPV 1	2,79	2,77	0,34	12,32
BPV 2	3,04			
BPV 3	2,40			
BPV 4	2,46			
BPV 5	3,17			

Fonte: Elaboração própria.

O módulo de elasticidade inicial dos blocos BPV obtidos através da instrumentação, bem como a média dos mesmos, o desvio padrão e o coeficiente de variação são mostrados na Tabela 21.

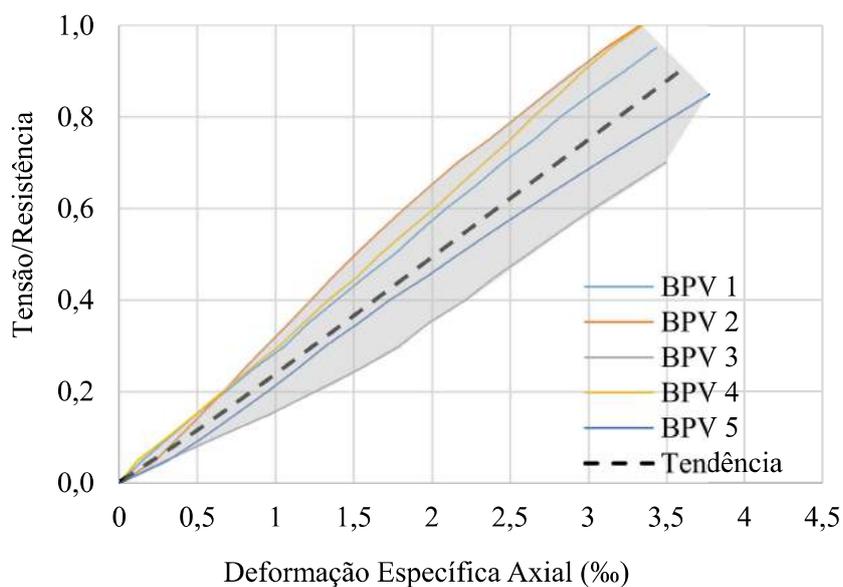
Tabela 21 – Módulo de elasticidade dos blocos BPV obtidos através da instrumentação

Blocos	Módulo de Elasticidade Inicial (GPa)	Média Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coeficiente de Variação (%)
BPV 1	7,27	7,53	0,82	10,90
BPV 2	6,74			
BPV 3	7,50			
BPV 4	8,91			
BPV 5	7,22			

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 38 apresenta as curvas médias suavizadas para os blocos BPV 1 a BPV 5 obtida através do método DIC. Além disso, apresenta-se uma reta de tendência para os blocos.

Figura 38 – Comportamento médio curva tensão/resistência-deformação específica axial dos blocos BPV avaliados pelo DIC



Fonte: Elaboração própria.

Os valores das deformações específicas máximas, bem como o desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tabela 22.

Tabela 22 – Deformação específica axial máxima dos blocos BPV obtido através do DIC

Blocos	Deformação Específica Axial na Ruptura (‰)	Deformação Específica Média (‰)	Desvio Padrão (‰)	Coefficiente de Variação (%)
BPV 1	3,46	3,48	0,18	5,12%
BPV 2	3,49			
BPV 3	3,34			
BPV 4	3,33			
BPV 5	3,77			

Fonte: Elaboração própria.

O módulo de elasticidade inicial dos blocos BPV obtidos através da curva tensão-deformação específica axial através do método DIC, bem como, a média dos mesmos, o desvio padrão e o coeficiente de variação são mostrados na Tabela 23.

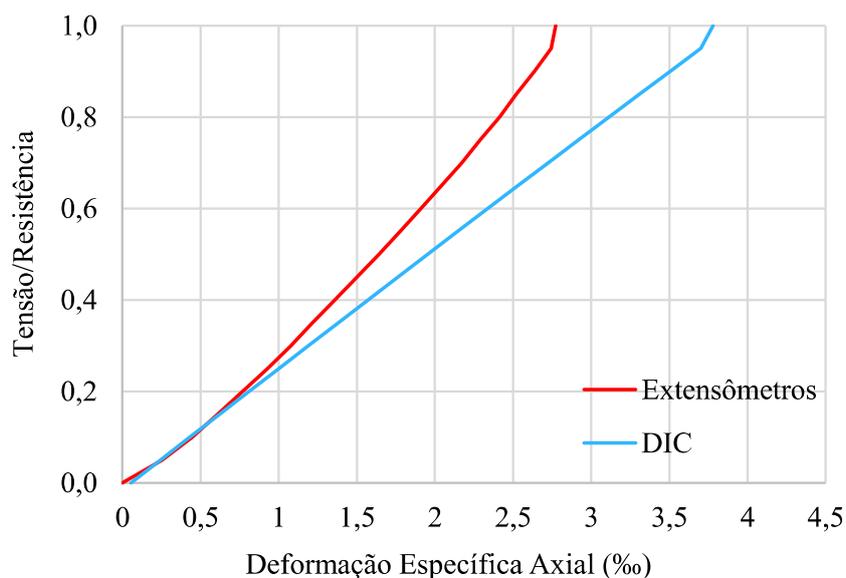
Tabela 23 – Módulo de elasticidade dos blocos de parede vazada obtido através do DIC

Blocos	Módulo de Elasticidade Inicial (GPa)	Média Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
BPV 1	4,87	5,94	0,91	15,40%
BPV 2	5,35			
BPV 3	6,31			
BPV 4	7,25			
BPV 5	5,92			

Fonte: Elaboração própria.

Para verificar a correlação entre as medidas registradas pelos strain gauges e através da técnica DIC, observa-se através da Figura 39, o comportamento das deformações específicas medidas pelos dois métodos.

Figura 39 – Comportamento médio tensão/resistência-deformação específica axial para extensômetros e DIC para blocos BPV



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que para os blocos BPV avaliados, o comportamento das deformações específicas axiais obtidas através dos strain gauges e através do DIC foi próximo para níveis de tensão/resistência de até 40%. Após, os dados registrados através da técnica DIC foram levemente maiores.

Para esse formato de bloco, que apresentavam paredes delgadas, a ruptura ocorreu pela instabilidade das paredes externas. Observou-se a ocorrência da separação das paredes longitudinais externas das internas. A Figura 40 mostra o cenário típico pós-ruptura para esses blocos.

Figura 40 – Cenário pós-ruptura observado para os blocos BPV



Fonte: Elaboração própria.

5.2 AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES EM ARGAMASSAS

Para verificar o comportamento individual da argamassa, avaliou-se o comportamento da curva tensão-deformação específica axial dos corpos de prova dos traços estudados. Na Tabela 24 estão apresentadas as resistências dos corpos de prova ensaiados para cada tipo de argamassa, assim como a resistência à compressão axial média e o desvio padrão calculado. Para os traços T1, T2 e T3 avaliou-se 3 corpos de prova; para o traço T4, avaliou-se 4 corpos de prova.

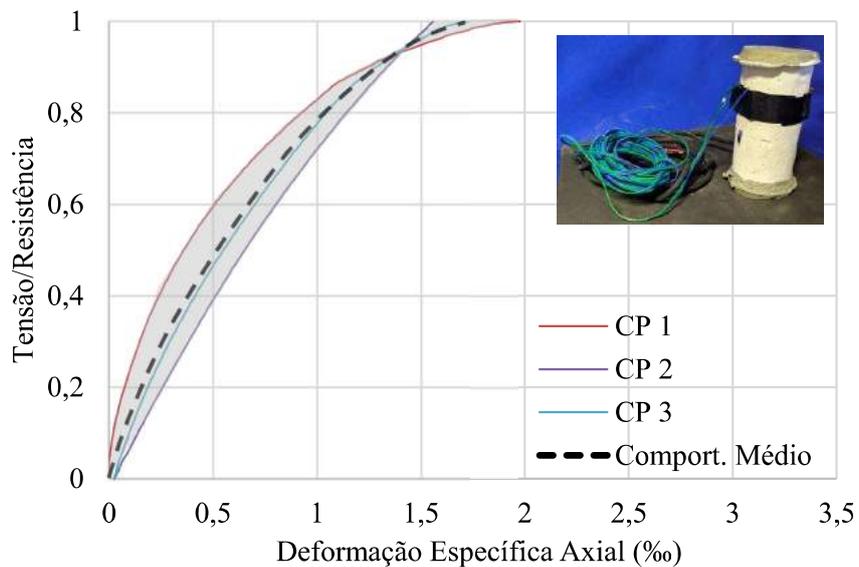
Tabela 24 – Resistências dos corpos de prova de argamassa instrumentados

Traço/Argamassa	Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa)					
	Corpos de prova cilíndricos - 5 cm x 10 cm					
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média	D.P.
T1	31,53	33,55	32,28	-	32,45	1,02
T2	14,54	14,60	14,30	-	14,48	0,16
T3	16,34	17,59	17,25	-	17,06	0,64
T4	8,29	7,69	8,19	8,04	8,05	0,26

Fonte: Elaboração própria.

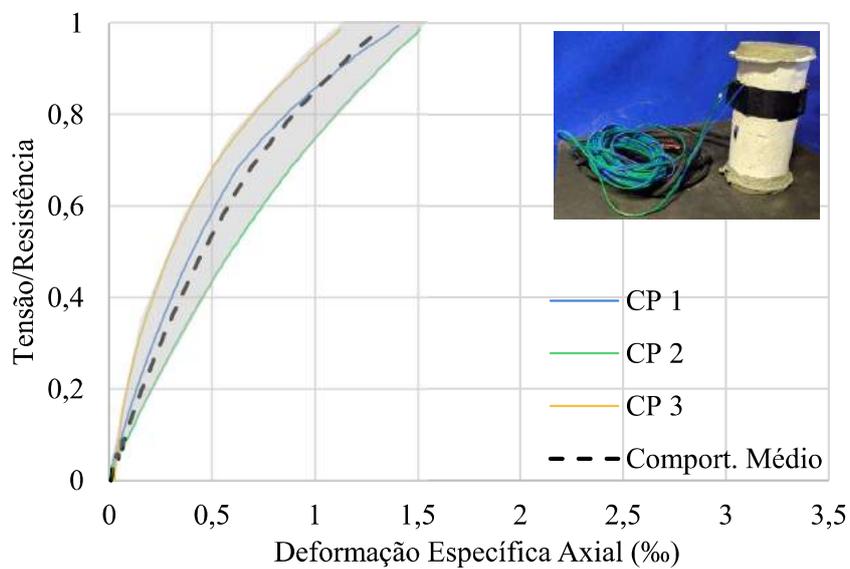
Buscou-se avaliar o comportamento tensão-deformação da argamassa para cada traço utilizando regiões sombreadas, onde o comportamento médio foi demarcado com linha tracejada em cor preta, avaliando a partir de quais níveis de tensão/resistência a argamassa deixa de apresentar um comportamento linear. Nas Figuras 41 a 44 é apresentada essa análise através das curvas tensão/resistência-deformação específica axial para cada traço utilizado.

Figura 41 – Comportamento tensão/resistência-deformação específica axial das argamassas de traço T1



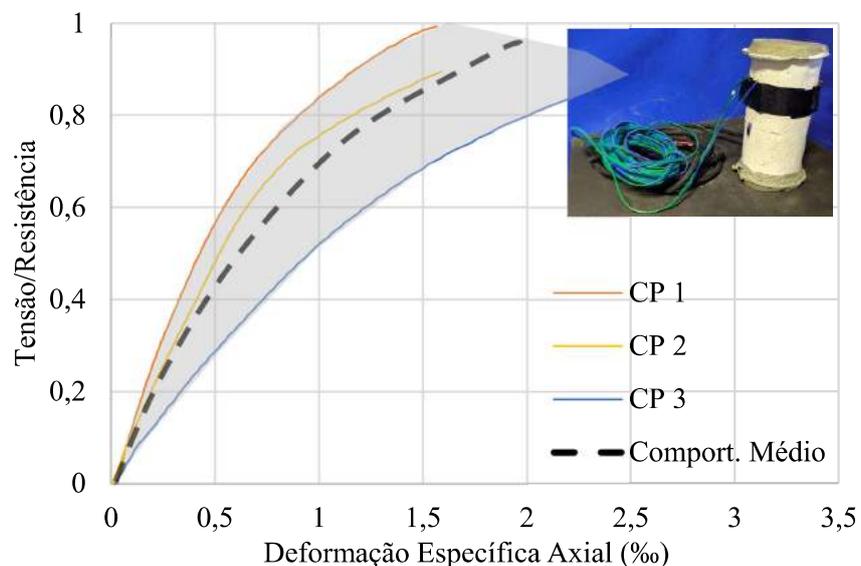
Fonte: Elaboração própria.

Figura 42 – Comportamento tensão/resistência-deformação específica axial das argamassas de traço T2



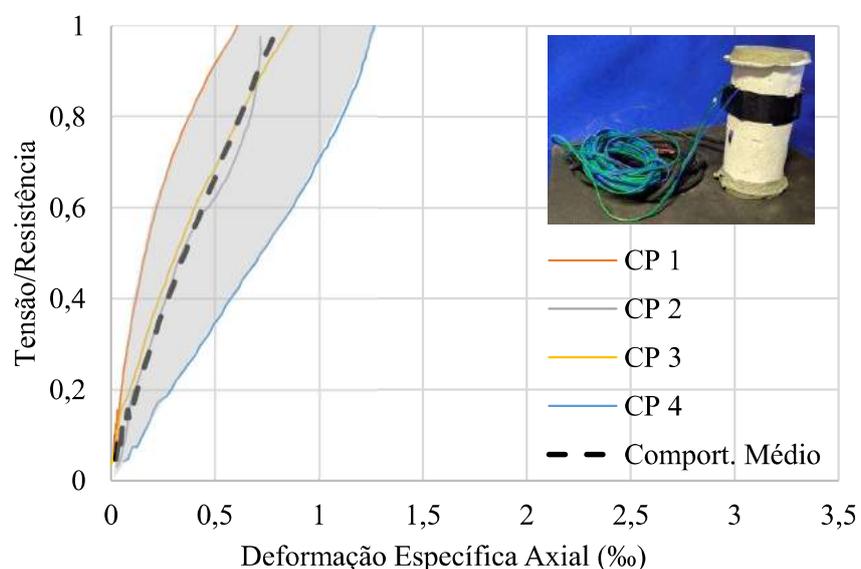
Fonte: Elaboração própria.

Figura 43 – Comportamento tensão/resistência-deformação específica axial das argamassas de traço T3



Fonte: Elaboração própria.

Figura 44 – Comportamento tensão/resistência-deformação específica axial das argamassas de traço T4



Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, os resultados mostram um comportamento bi-linear para as curvas dos traços avaliados. A argamassa de traço T1 apresentou uma mudança no comportamento linear para um nível de tensão da ordem de 0,70. Para a argamassa de traço T2, o comportamento linear se manteve até níveis de 0,60 da tensão última de ruptura. Para a argamassa de traço T3, observou-se o comportamento linear até níveis de

tensão/resistência da ordem de 0,70 e, para a argamassa de traço T4, não se observou uma clara perda de linearidade.

Atkinson et al. (1985), ao avaliarem o comportamento de prismas submetidos à compressão moldados com dois diferentes tipos blocos e quatro tipos de argamassas, já havia percebido que o comportamento não linear da argamassa demonstra ter uma importância significativa na determinação dos níveis de ruptura da alvenaria. Assim, os autores afirmam que a percepção dos mecanismos reais associados ao comportamento da alvenaria reflete a complexa interação que ocorre entre a argamassa e os blocos sob compressão. Na mesma pesquisa, os autores perceberam que para todas as argamassas avaliadas sob diferentes pressões confinantes, as argamassas apresentaram um comportamento não linear para uma carga de aproximadamente 50% da carga última.

O comportamento não linear corresponde a propagação de fissuras internas no corpo de prova desde a zona de transição pasta-agregado até a matriz cimentícia, sendo o local onde a argamassa começa a perder sua capacidade como material estrutural, com a destruição do esqueleto resistente. Machado (2019) e Schossler (2019) também observaram comportamento bi-linear em traços de argamassa instrumentados utilizados para moldagem em prismas de dois blocos.

Mohamad et al. (2018) ao avaliarem corpos de prova de argamassa com diferentes relações diâmetro-altura, constataram, fazendo-se uso dos incrementos de deformações específicas da curva tensão-deformação, o início do dano e degradação da rigidez da argamassa. Conforme os autores, a variação das deformações específicas axiais indicou quando a propagação da trinca começou a aparecer na interface pasta-agregado, enquanto as variações das deformações específicas horizontais indicaram quando as fissuras na zona de transição se espalharam para a pasta.

Pelo fato da argamassa estar confinada entre blocos cerâmicos e devido à perda de água da argamassa fresca para os blocos, a mesma sofre um incremento de resistência que altera o seu comportamento na junta de assentamento quando comparada aos corpos de prova individuais. Diante disso, torna-se difícil correlacionar a não linearidade da curva tensão/resistência-deformação específica axial da argamassa ensaiada em corpos de prova padrão com a argamassa na junta de assentamento.

Ao avaliarem argamassas em prismas submetidos à compressão, autores como Atkinson et al. (1985) e Kohees et al. (2019) perceberam que a carga última e a tensão máxima aumentaram com o aumento da pressão confinante. Os autores constataram que para tais observações, a deformação específica máxima da argamassa também aumentou.

A Tabela 25 indica os valores de deformação específica máxima, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos corpos de prova de argamassa ensaiados. Os valores apresentados representam a média de dois strain gauges colados em cada corpo de prova. Os mesmos são os últimos valores tomados, porém não necessariamente correspondem a tensão máxima, uma vez que alguns strain gauges registraram medidas até somente alguns instantes antes da ruptura.

Tabela 25 – Deformação Específica axial dos corpos de prova de argamassa

Traço	Corpo de Prova	Deformação Específica Axial na Ruptura (‰)	Deformação Específica média (‰)	Desvio Padrão (‰)	Coeficiente de Variação (%)
Traço T1	CP1	1,97	1,75	0,20	11,75%
	CP2	1,56			
	CP3	1,73			
	CP				
Traço T2	CP1	1,40	1,37	0,16	11,47%
	CP2	1,51			
	CP3	1,20			
	CP				
Traço T3	CP1	2,03	2,04	0,45	22,10%
	CP2	1,59			
	CP3	2,49			
	CP				
Traço T4	CP1	0,62	0,74	0,13	17,08%
	CP2	0,72			
	CP3	0,87			
	CP4	1,26			
	CP				

Fonte: Elaboração própria.

O módulo de elasticidade inicial das argamassas de traços T1, T2, T3 e T4, bem como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação das mesmas, são mostrados na Tabela 26.

Tabela 26 – Módulo de elasticidade das argamassas de traços T1, T2, T3 e T4

Argamassa T1	Módulo de Elasticidade Inicial (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
CP1	30,70	32,99	3,24	9,82
CP2	15,98**			
CP3	35,28			
Argamassa T2	Módulo de elasticidade Inicial (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
CP1	17,88	17,13	3,81	22,24
CP2	13,00			
CP3	20,51			
Argamassa T3	Módulo de elasticidade Inicial (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
CP1	19,66	17,58	2,94	16,73
CP2	15,50			
CP3	8,61**			
Argamassa T4	Módulo de elasticidade Inicial (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
CP1	22,60**	9,23	3,03	32,85
CP2	10,88			
CP3	11,08			
CP4	5,73			

Fonte: Elaboração própria. (** Resultado descartado por apresentar um desvio grande em relação aos outros valores).

5.3 AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DOS COMPONENTES DOS PRISMAS

Nesta parte são avaliados os modos de ruptura e as deformações específicas axiais dos componentes dos prismas para cada tipologia estudada. Para o melhor entendimento dos resultados apresentados, ressalta-se que para a tipologia PPM – T1, avaliaram-se as deformações específicas dos prismas PPM1 – T1 ao PPM8 – T1 através da instrumentação e dos prismas PPM5 – T1 ao PPM11 – T1 através da técnica DIC.

Para os prismas da tipologia PPM – T2, avaliaram-se as deformações específicas dos prismas PPM1 – T2 ao PPM7 – T2 através da instrumentação e dos prismas PPM5 – T2 ao PPM11 – T2 através do DIC. Para os prismas da tipologia PPV – T3, avaliaram-se as deformações específicas dos prismas PPV1 – T3 ao PPV7 – T3 através da instrumentação e os prismas PPV3 – T3 ao PPV11 – T3 pelo DIC. Para os prismas da

tipologia PPV – T4, avaliaram-se as deformações específicas dos prismas PPV1 – T4 ao PPV7 – T4 pela instrumentação e os prismas PPV 1 – T4 ao PPV 11 – T4 pelo DIC.

Para alguns casos não foi possível sobrepor os gráficos gerados a partir do DIC com os componentes do prisma avaliados separadamente através dos strain gauges, devido a interferência dos cabos dos extensômetros na qualidade de imagem para a avaliação pela técnica DIC. A fiação ligada aos strain gauges em alguns prismas produziu sombras ou movimentos que diminuíram a qualidade das leituras na região.

5.4 PRISMA DE BLOCO ESTRUTURAL DE PAREDE MACIÇA

A Tabela 27 apresenta os valores de resistência à compressão axial dos prismas de blocos de parede maciça moldados com argamassa T1, com resistência média à compressão axial (f_a) com relação à resistência média do bloco na área líquida ($f_{bm,líquida}$) de 0,70, e dos prismas de blocos de parede maciça moldados com argamassa T2, que representam uma relação $f_a/f_{bm,líquida}$ de 0,30.

Tabela 27 - Resistência à compressão axial dos prismas de blocos de parede maciça

Tipo de prisma	Prisma	Carga (kgf)	$f_{pi,bru}$ (MPa)	$f_{pk,bru}$ (MPa)	$f_{pi,liq}$ (MPa)	$f_{pm,liq}$ (MPa)	$f_{pk,liq}$ (MPa)	D.P. (líq) (MPa)	C.V. (líq) (%)
PPM - T1	1	71009	17,49	13,68	35,69	32,97	27,92	2,78	8,49
	2	57124	14,07		28,71				
	3	65366	16,10		32,86				
	4	70482	17,36		35,43				
	5	71334	17,57		35,86				
	6	64107	15,79		32,22				
	7	64107	15,79		32,22				
	8	66056	16,27		33,20				
	9	71984	17,73		36,18				
	10	55297	13,62		27,80				
	11	64757	15,95		32,55				
PPM - T2	1	53836	13,26	11,19	27,06	26,80	22,85	1,67	6,25
	2	54526	13,43		27,41				
	3	56312	13,87		28,31				
	4	52212	12,86		26,24				
	5	50385	12,41		25,33				
	6	54445	13,41		27,37				
	7	54972	13,54		27,63				
	8	49329	12,15		24,80				
	9	57490	14,16		28,90				
	10	46649	11,49		23,45				
	11	56272	13,86		28,29				

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que o aumento da resistência da argamassa induz um pequeno aumento da resistência à compressão axial dos prismas. Houve um pequeno aumento da resistência do prisma (22,19%), enquanto que houve um aumento significativo na resistência da argamassa entre os traços T1 e T2 (132%). Contudo, a diferença observada foi estatisticamente significativa quando realizada uma análise do tipo ANOVA Fator Único com valor-P calculado menor que 0,05.

Diversos trabalhos também relatam pequenos aumentos na resistência à compressão da alvenaria quando a resistência da argamassa é aumentada (Zahra e Dhanasekar, 2016; Alvarenga et al., 2017; Haach, Vasconcelos e Lourenço, 2014; Yang et al., 2019).

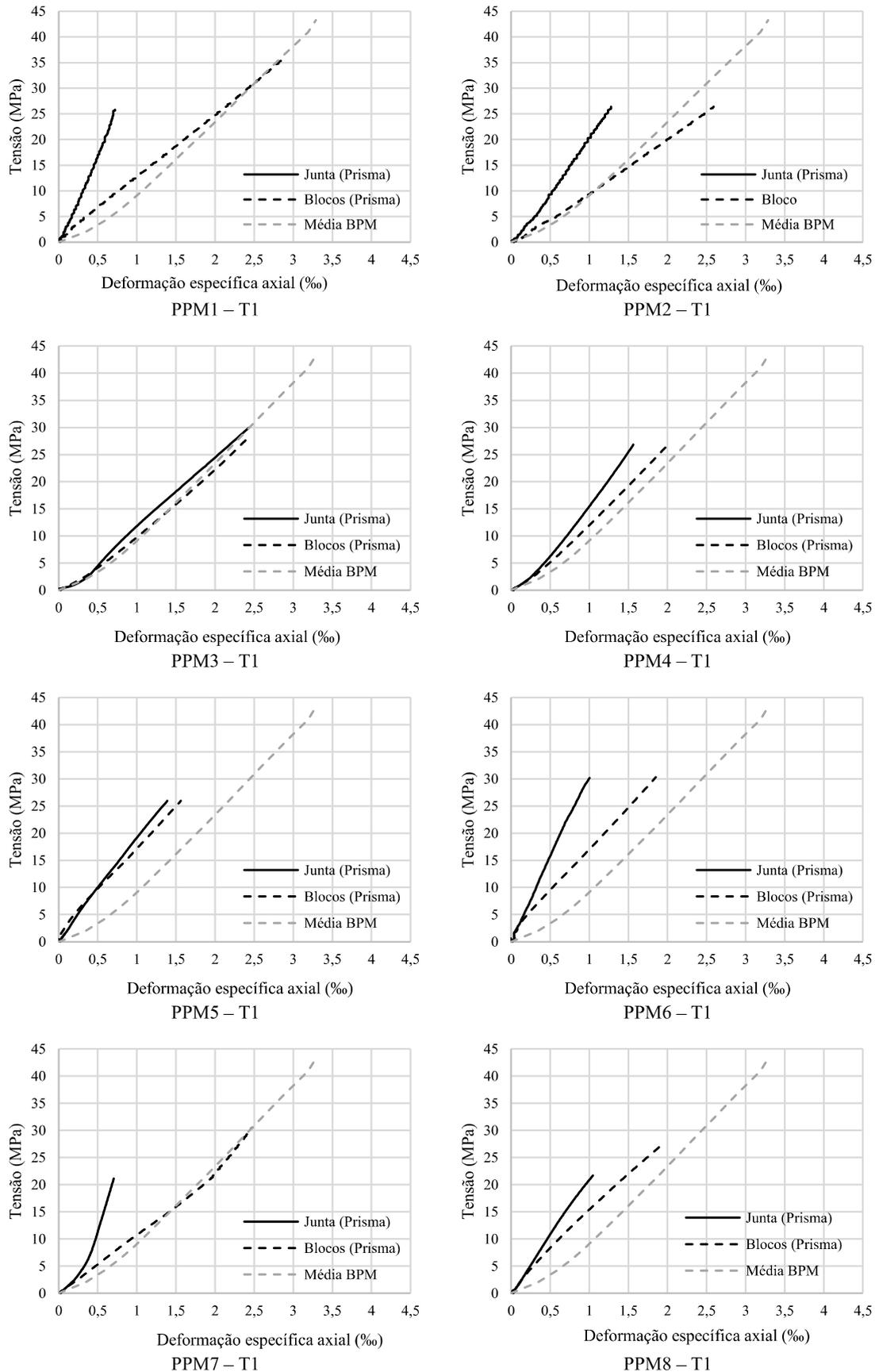
Machado (2019) também constatou que o aumento da resistência da argamassa causou um aumento na resistência de prismas cerâmicos moldados com blocos de parede vazada e de parede maciça. Entretanto, a autora afirma que a relação entre o aumento das resistências não é linear. Ao aumentar 2,3 vezes a resistência à compressão axial da argamassa, a resistência média dos prismas de parede maciça aumentou cerca de 50%, enquanto que o prisma de parede vazada aumentou cerca de 57% a sua resistência.

Alvarenga et al. (2017) ao avaliarem prismas cerâmicos moldados com argamassas de resistência à compressão de 94,70% e 50,40% da resistência à compressão dos blocos na área líquida verificaram que o aumento da resistência e da rigidez da argamassa não afetou significativamente a resistência à compressão dos prismas.

Buscando entender e correlacionar o comportamento dos materiais avaliados separadamente e quando ensaiados em conjunto nos prismas, sobrepôs-se a média dos resultados dos blocos avaliados de forma individual, com os componentes dos prismas instrumentados conforme a Figura 45. Os resultados são apresentados em termos de comportamento médio das curvas tensão-deformação específica axial através da instrumentação e do DIC. O comportamento médio das curvas em valores de tensão/resistência para os mesmos prismas é apresentado nos Apêndices B e C.

As linhas em preto representam o comportamento dos elementos nos prismas; as tracejadas representam o comportamento médio das deformações nos blocos e a linha cheia a média das deformações na junta de argamassa. A linha cinza tracejada representa a média do comportamento dos blocos cerâmicos de parede maciça avaliados separadamente.

Figura 45 – Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPM – T1, além dos blocos BPM isolados



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que para todos os prismas de blocos de parede maciça moldados com argamassa de traço 1, os blocos apresentaram maiores deformações que a argamassa, comportamento, a princípio, não esperado.

Comparando o comportamento dos blocos individualmente e nos prismas, percebe-se muita similaridade. Em alguns prismas, após a acomodação inicial do conjunto, há um paralelismo entre as curvas. Caso essas deformações devido à acomodação fossem desconsideradas, haveria sobreposição entre as medidas dos blocos nos prismas e individualmente.

Para a argamassa, a comparação não faz sentido dada a diferença de forma entre os corpos de prova cilíndricos e a junta de assentamento. As resistências e deformações medidas são fortemente influenciados pelo formato do corpo de prova.

Percebe-se também que, para todos os prismas avaliados, com exceção do PPM 7 – T1, não há uma indicação clara da perda de linearidade da argamassa ou do bloco. Tal condição, deve-se ao fato desses materiais se comportarem quase que de forma uniforme, como um material homogêneo, durante todo o ensaio de resistência à compressão axial. Esse mesmo comportamento é percebido quando se avalia o avanço do processo de ruptura para essa tipologia, uma vez que não há surgimento de fissuras visíveis para a grande maioria dos prismas testados a níveis abaixo de 90% da tensão máxima de ruptura.

Deve-se lembrar que as medidas de deformações das juntas são de difícil aquisição, devido a pequena dimensão da mesma e das características da argamassa, em muitos casos porosa e irregular. Em algumas situações, é possível que algum dos strain gauges tenha sido colado sobre um grão de areia de maior dimensão, o que poderia comprometer uma correta medida de deformação específica naquele local.

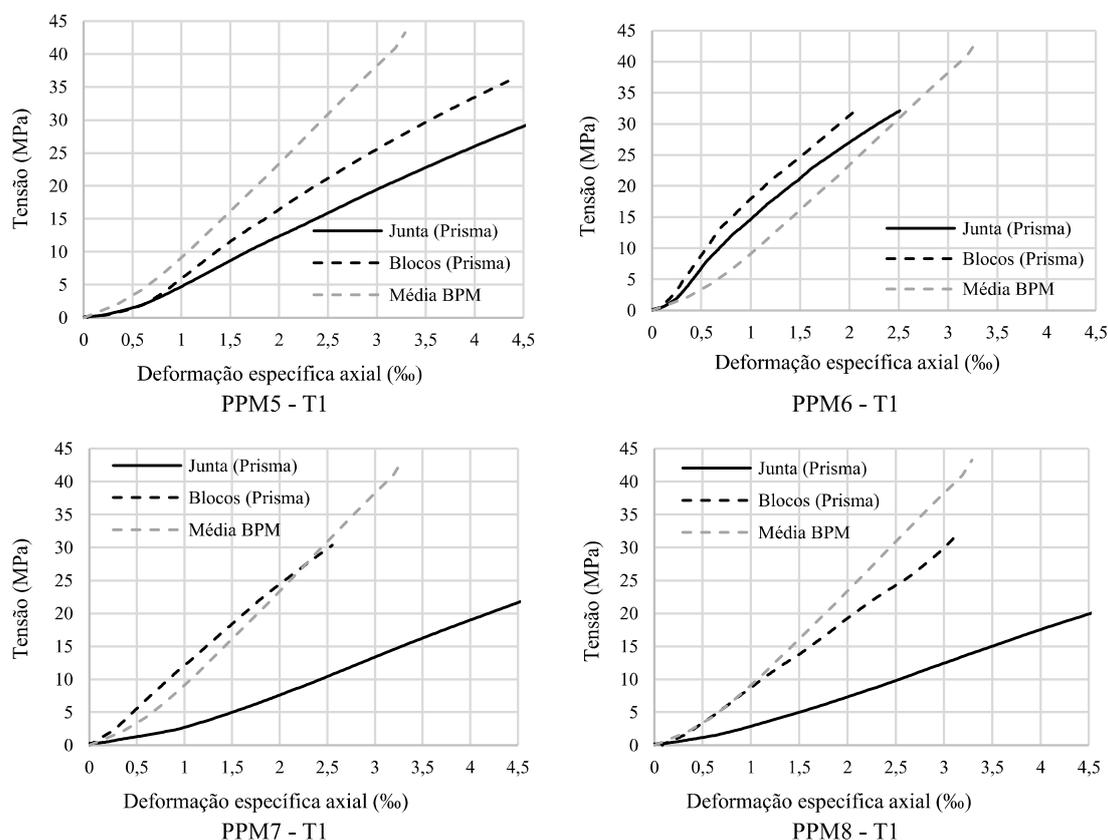
Mohamad et al. (2018), ao realizarem ensaios experimentais em corpos de prova de argamassa, também constataram a dificuldade de avaliar as deformações específicas e variações mecânicas sofridas pela junta de argamassa quando unidas aos blocos e confinadas em juntas de assentamento de alvenarias. Marques et al. (2020) também afirmam que o uso de strain gauges para a realização de medidas de deformação em corpos de prova de argamassa pode resultar em medidas não representativas devido a presença de grãos de agregado de maiores dimensões junto ao local onde são registradas as medidas de deformações.

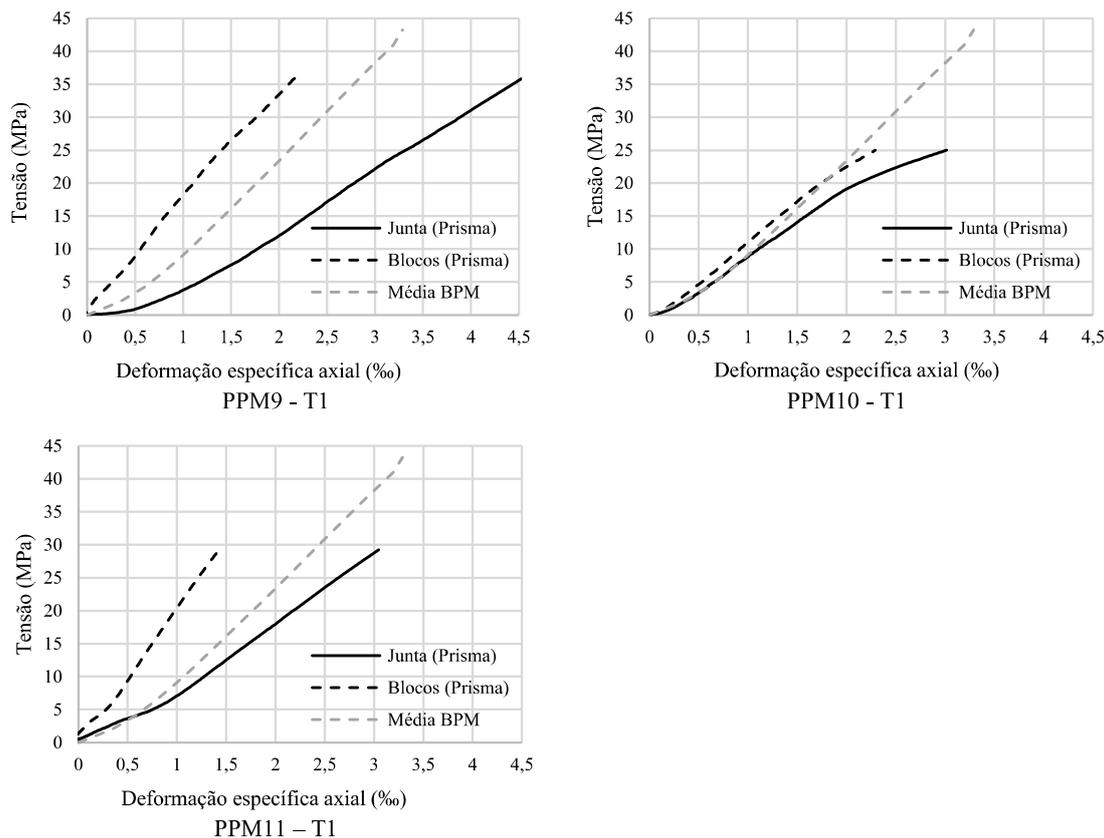
Com relação a manutenção do comportamento linear dos prismas, é possível notar que com uma argamassa de resistência $f_a/f_{b,m,liquida} = 0,70$ da resistência do bloco na área líquida, não se percebe uma perda clara da linearidade da curva das argamassas.

Com relação ao comportamento médio da curva dos blocos, os mesmos indicam um comportamento mais uniforme, linear até um nível de tensão de aproximadamente 90% da tensão última de ruptura. Isso permite entender que possivelmente as fissuras internas para os blocos cerâmicos avaliados começaram a propagar-se a níveis de tensões mais próximos à ruptura, diferentemente do que ocorre para a junta de argamassa. Da mesma forma, essa verificação pode ser constatada através do gradiente de deformação na direção horizontal (ϵ_x), representativas do comportamento dos prismas da tipologia PPM – T1.

Representou-se o comportamento dos blocos avaliados separadamente e quando ensaiados no conjunto de prismas, sobrepondo-se a média dos resultados dos blocos com a média dos componentes dos prismas avaliados de forma separada, para os prismas PPM 5 – T1 a PPM 11 – T1, avaliados pela técnica DIC conforme a Figura 46. As linhas em preto representam o comportamento dos elementos nos prismas; as tracejadas representam o comportamento médio das deformações nos blocos e a linha cheia a média das deformações na junta de argamassa. A linha cinza tracejada representa a média do comportamento dos blocos cerâmicos de parede maciça avaliados de forma isolada.

Figura 46 – Comportamento médio curva tensão-deformação específica axial obtidos através do DIC para os prismas PPM – T1, além dos blocos BPM isolados



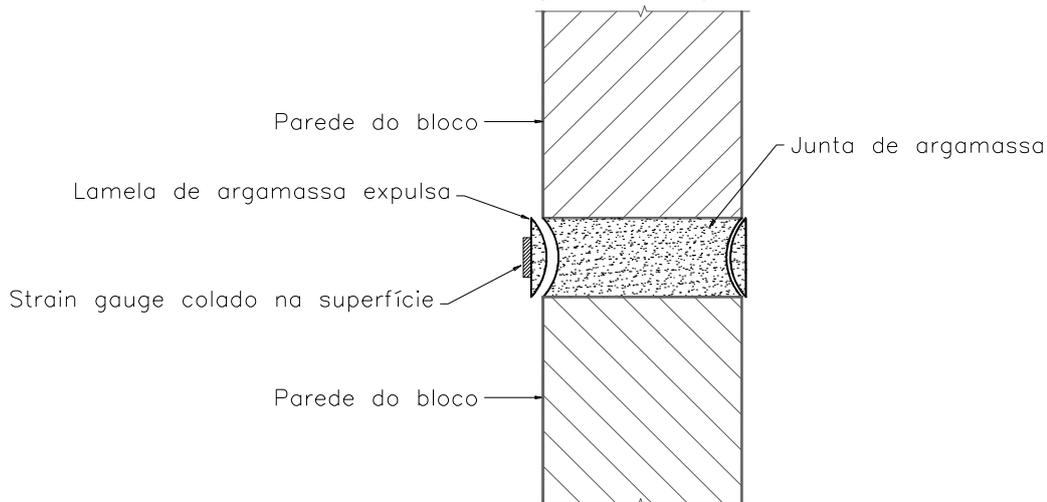


Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que o comportamento das deformações da junta de argamassa dos prismas, quando avaliados pelo DIC, apresentou variações consideráveis com relação ao comportamento registrado pelos strain gauges. Enquanto os strain gauges registraram deformações específicas máximas médias na junta de argamassa para os prismas de 1,27‰, as deformações específicas máximas média para a junta obtida pelo método DIC foi de 4,67‰. Por outro lado, os blocos apresentaram comportamento relativamente próximos para os dois métodos avaliados, apresentando deformação máxima média para os prismas instrumentados de 2,21‰ e 2,56‰ para os prismas avaliados pelo DIC.

Dada a natureza e condições da argamassa nas juntas, os strain gauges estavam colados na superfície lateral, que tende a ser expulsa durante o processo de compressão axial; portanto, as medidas de deformação obtidas com strain gauges não parecem ser corretas para o caso da argamassa nos prismas. A Figura 47 apresenta uma idealização da forma de ruptura da argamassa das juntas.

Figura 47 – Idealização da forma de ruptura da argamassa das juntas de assentamento

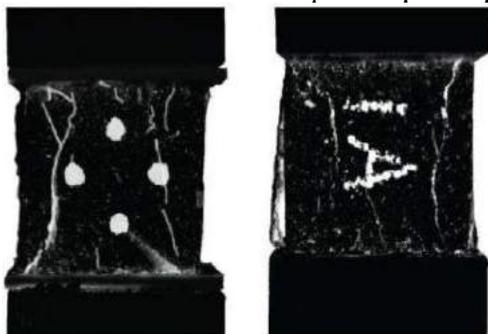


Fonte: Elaboração própria

A diferença das medidas do comportamento das juntas deve-se a forma como as medidas foram realizadas no DIC. No software, as deformações eram realizadas desde a base do bloco de cima até o topo do bloco de baixo, já que a superfície dos blocos tem uma aparência mais uniforme que a da junta. Assim, no DIC obteve-se uma medida de deformação específica das juntas mais próxima à real, sem o efeito do deslocamento observado com os strain gauges.

Esta forma de ruptura para a junta de argamassa também foi observada por Mohamad et al. (2018) que, ao avaliarem a perda da rigidez da argamassa de assentamento da alvenaria para corpos de prova com diferentes relações diâmetro/altura, constataram que, para corpos de prova cúbicos com relação diâmetro/altura de 1,0, houve formação de fissuras cônicas que permitiram alívio de tensão na superfície das amostras e causaram a ruptura da amostra com a expulsão de lamelas da argamassa testada, conforme Figura 48.

Figura 48 – Formação de fissuras cônicas em corpos de prova prismáticos

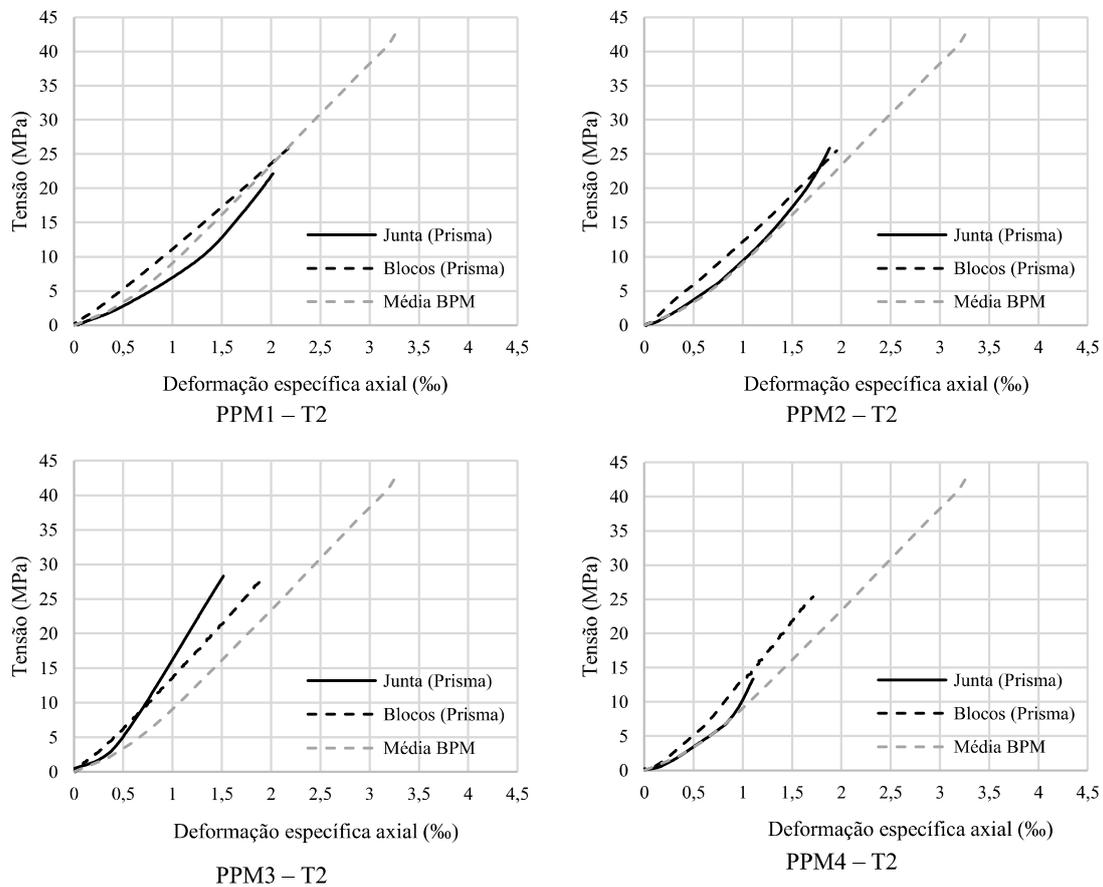


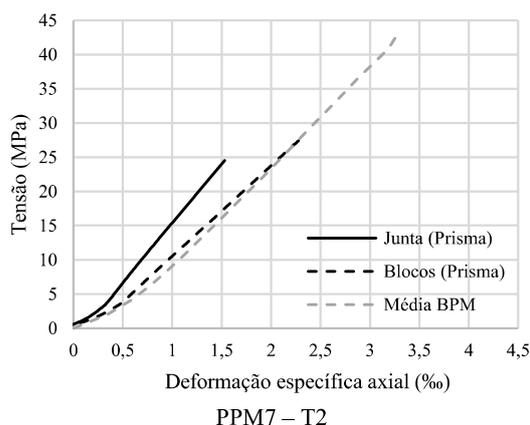
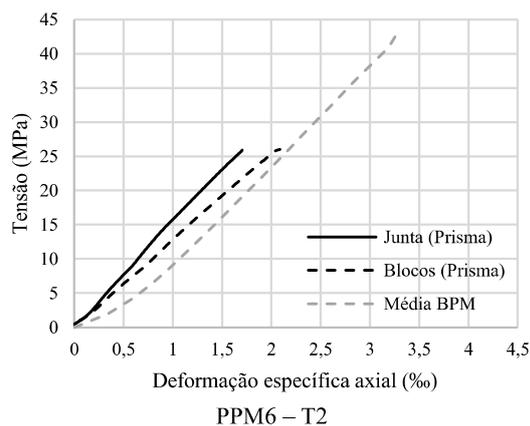
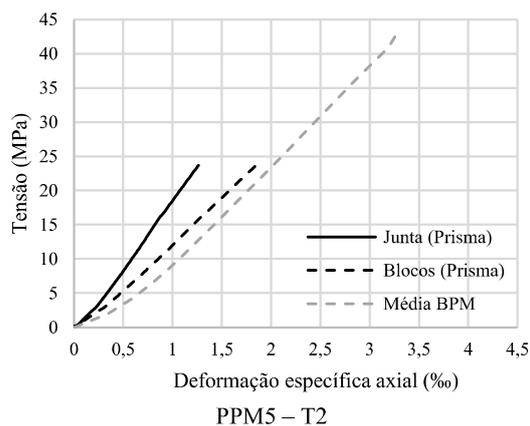
Fonte: Mohamad et al. (2018)

Os resultados obtidos através do método DIC indica que a deformação das juntas foi maior que a dos blocos. A medida das deformações no DIC para a região da junta foi tomada com retas que extrapolavam a espessura da junta, iniciando-se e terminando nos blocos.

Na Figura 49, apresentam-se o comportamento médio das curvas tensão-deformação específica axial dos prismas PPM - T2, obtidos através dos strain gauges que foram colados nos blocos de parede maciça e na junta de argamassa, moldados com argamassa com relação $f_a/f_{bm,liquida}$ de 0,30, de traço T2.

Figura 49 – Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPM – T2, além dos blocos BPM isolados



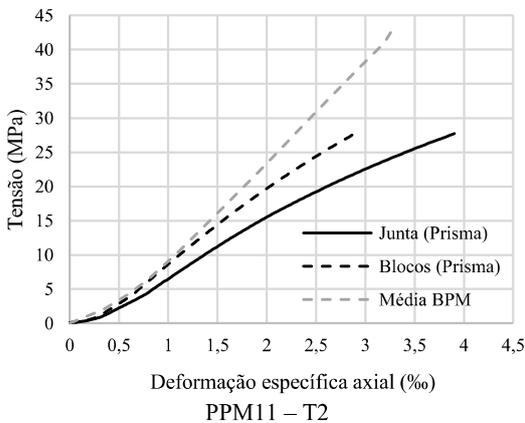
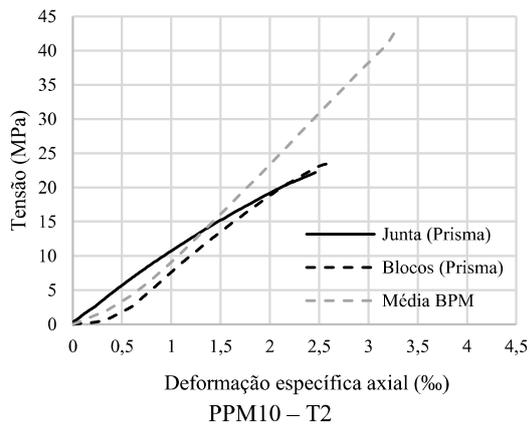
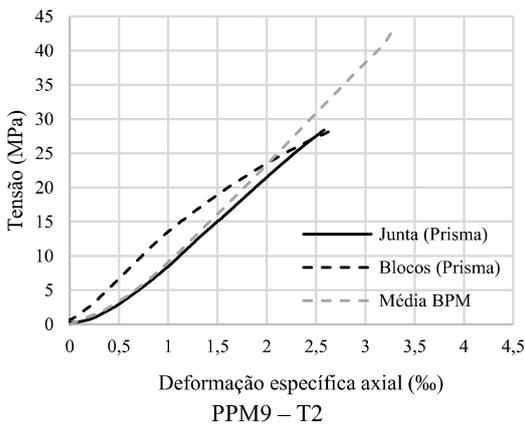
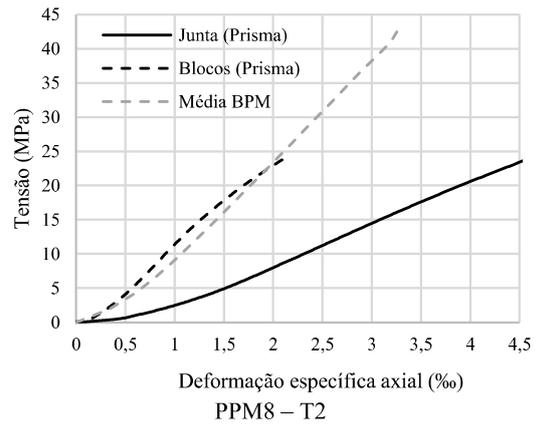
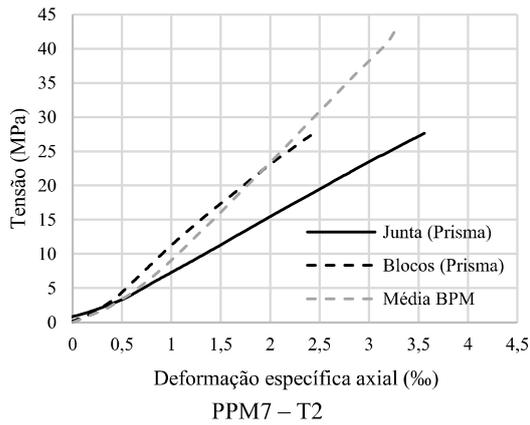


Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que para todos níveis de tensão para os prismas de parede maciça moldados com argamassa de traço 2, os blocos apresentaram maiores deformações no conjunto avaliado.

A junta de argamassa utilizada para esta tipologia com relação $f_a/f_{b,m,liquida}$ de 0,30 tende a ganhar resistência por estar confinada, além do fato de possivelmente perder água para os blocos cerâmicos, os quais possuem alto poder de absorção de água. Dessa forma, estima-se que a relação $f_a/f_{b,m,liquida}$ aumentou para valores muito acima de 0,30.

Para alguns dos prismas avaliados, há uma indicação da perda de linearidade da argamassa em níveis de tensão da ordem de 40% a 50% da carga máxima de ruptura. Tal condição, deve-se possivelmente ao fato de haver propagação de trincas internas no material que promovem a perda de linearidade da curva para a junta de argamassa. Através do gradiente de deformação, constatou-se a propagação de fissuras em diferentes posições dos prismas avaliados a partir de 50% do nível máximo de tensão, além de concentrações de tensões na região de ligação da junta de argamassa com os blocos a partir de 30% do nível máximo de tensão medida. Ou seja, apesar da elevada resistência obtida nos prismas mesmo usando uma argamassa de menor resistência, o início do



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que o comportamento das deformações da junta de argamassa dos prismas avaliados pelo DIC apresentou variações consideráveis com relação ao comportamento registrado pelos strain gauges quando considerado a tensão máxima de ruptura. Enquanto os strain gauges registraram deformações específicas máximas médias na junta de argamassa para os prismas de 1,59‰, as deformações específicas máximas média para a junta obtida pelo método DIC foi 3,59‰. Por outro lado, os blocos apresentaram comportamento relativamente próximos para os dois

métodos avaliados, apresentando deformação máxima média para os prismas instrumentados de 2,02‰ e 2,50‰ para os prismas avaliados pelo DIC.

Diversos autores também avaliaram o comportamento de prismas moldados com argamassas de baixa resistência, constatando que houve esmagamento da junta de argamassa. Casali et al. (2012), ao avaliarem prismas de concreto moldados com argamassa industrializada de baixa resistência, verificaram esmagamento da junta de argamassa em nível de tensão próximo a 50% da tensão máxima medida. Nalon et al. (2020) verificaram o esmagamento da junta de argamassa para tensões da ordem de 80% da tensão máxima medida em prismas de concreto executados com argamassas com resistência da ordem de 40% da resistência do bloco na área líquida.

Além desses autores, outros autores verificaram que prismas moldados com argamassas de baixa resistência induzem o esmagamento da junta da argamassa, sendo que esta é o elemento desencadeante da ruptura dos prismas (Mohamad et al. 2007; Fonseca et al., 2015; Lübeck A., 2016; Mohamad et al. 2017; Machado et al., 2019; Caldeira et al., 2020).

O módulo de elasticidade inicial dos prismas PPM - T1 e PPM - T2 obtidos através da instrumentação e através da técnica DIC, assim como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos mesmos, considerando os blocos e as juntas separadamente, são mostrados na Tabela 28. Os espaços da tabela preenchidos com um * indicam que não foi possível realizar a avaliação.

Tabela 28 – Módulo de elasticidade dos componentes dos prismas PPM - T1 e PPM - T2 obtidos através da instrumentação e DIC

Prisma	Módulo de elasticidade inicial dos blocos - Extensômetria (GPa)	Módulo de elasticidade inicial dos blocos - DIC (GPa)	Módulo de elasticidade inicial da junta de argamassa - Extensômetria (GPa)	Módulo de elasticidade inicial da junta de argamassa - DIC (GPa)
PPM1 - T1	12,67	*	32,14**	*
PPM2 - T1	10,09	*	21,70	*
PPM3 - T1	11,61	*	14,50	*
PPM4 - T1	12,78	*	18,07	*
PPM5 - T1	15,08	10,73	20,25	7,46
PPM6 - T1	15,31	21,55**	14,61	17,28**
PPM7 - T1	10,89	13,05	24,83	5,60
PPM8 - T1	14,79	10,59	23,12	5,03
PPM9 - T1	*	16,64	*	8,89
PPM10 - T1	*	12,79	*	11,04
PPM11 - T1	*	16,33	*	10,15
Média	12,90	13,35	19,58	8,02
D. P. (GPa)	1,99	2,63	4,04	2,43
C.V	15,44%	19,69%	20,62%	30,27%
Prisma	Módulo de elasticidade inicial dos blocos - Extensômetria (GPa)	Módulo de elasticidade inicial dos blocos - DIC (GPa)	Módulo de elasticidade inicial da junta de argamassa - Extensômetria (GPa)	Módulo de elasticidade inicial da junta de argamassa - DIC (GPa)
PPV1 - T2	11,54	*	9,64	*
PPV2 - T2	12,05	*	12,02	*
PPM3 - T2	12,99	*	15,39	*
PPM4 - T2	13,03	*	14,63	*
PPM5 - T2	11,66	11,81	17,25	6,47
PPM6 - T2	12,28	13,75	16,14	6,00
PPM7 - T2	10,87	13,72	14,90	8,07
PPM8 - T2	*	14,35	*	6,04
PPM9 - T2	*	14,15	*	10,31
PPM10 - T2	*	12,58	*	10,56
PPM11 - T2	*	12,21	*	8,71
Média	12,06	13,22	14,28	8,02
D. P. (GPa)	0,78	1,00	2,60	1,94
C.V	6,51%	7,62%	18,23%	24,18%

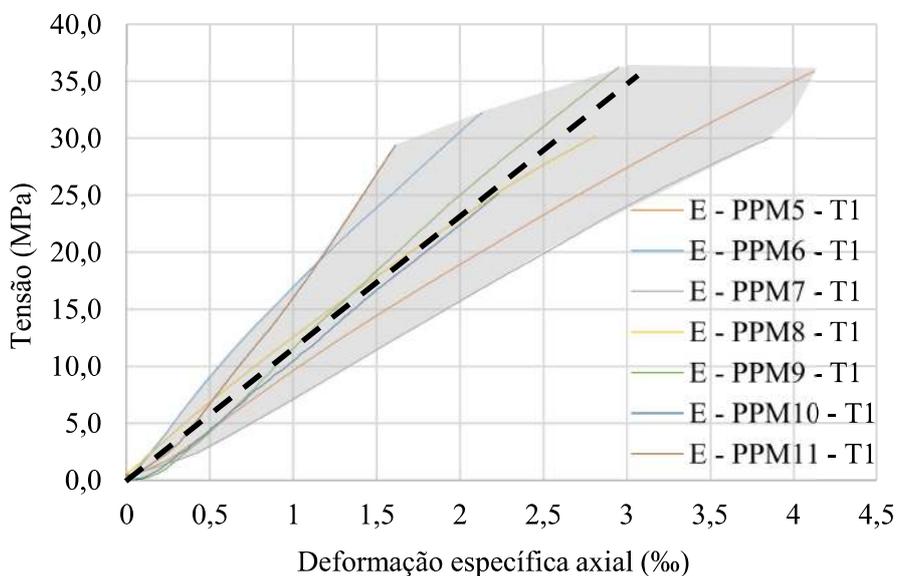
Fonte: Elaboração própria. (** Resultado descartado por apresentar um desvio grande em relação aos outros valores; * Não há análise para o prisma).

Os resultados mostram que os módulos calculados para a argamassa para a tipologia PPM – T2 sofreram uma redução devido a diferença da resistência da argamassa

utilizada com relação a tipologia PPM – T1. Entretanto, a argamassa utilizada teve uma redução de aproximadamente 132% de sua resistência com relação a tipologia PPM – T1, o módulo de elasticidade da argamassa teve uma redução de 41,06%, quando considerada a média dos dados obtidos através dos strain gauges e pelo DIC. Da mesma forma, o módulo de elasticidade medido para o bloco teve uma redução de aproximadamente 8,55%, mantendo-se muito próximo da tipologia PPM – T1, quando considerada a média dos dados obtidos através dos strain gauges e pelo DIC.

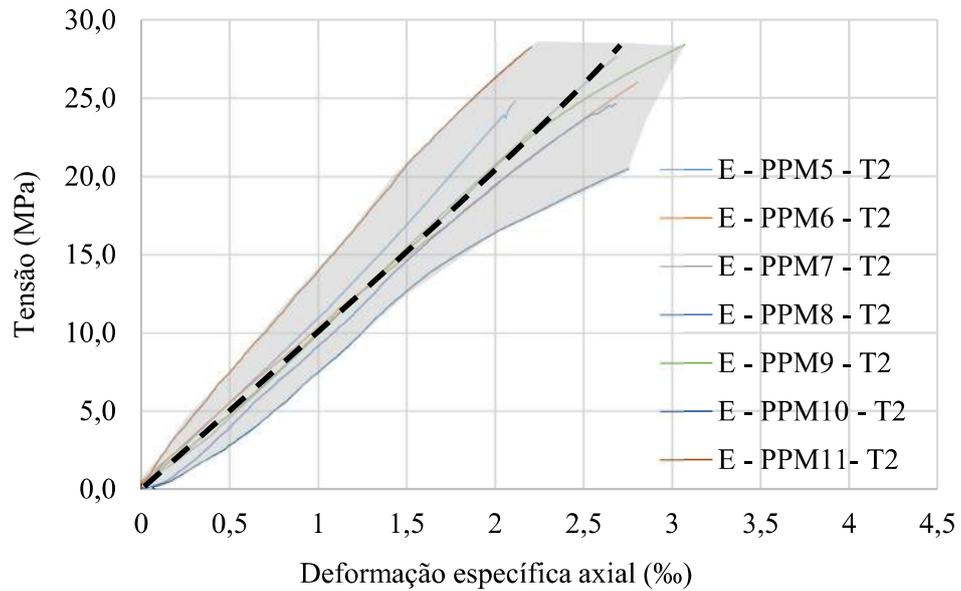
Com o objetivo de correlacionar o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas avaliados através do DIC, avaliaram-se as curvas tensão-deformação específica axial do conjunto para alguns prismas para cada tipologia avaliada, as quais estão apresentadas nas Figuras 51 e 52. Selecionaram-se os prismas que tiveram uma melhor qualidade na preparação, pintura e filmagem para que fosse possível ter uma análise de melhor qualidade e representasse fielmente os resultados para as tipologias avaliadas. Em cada gráfico está representada uma reta de tendência representativa do comportamento dos módulos para os prismas avaliados, em cor preta tracejada.

Figura 51 – Comportamento médio das curvas para o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas para a tipologia PPM – T1 obtido através do DIC



Fonte: Elaboração própria.

Figura 52 – Comportamento médio das curvas para o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas para a tipologia PPM – T2 obtido através do DIC



Fonte: Elaboração própria.

O módulo de elasticidade inicial global do conjunto dos prismas PPM – T1 e PPM – T2, assim como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos mesmos, são mostrados na Tabela 29.

Tabela 29 – Módulo de elasticidade inicial dos prismas PPM – T1 e PPM – T2 obtidos através do DIC

Prisma	Módulo de elasticidade inicial dos prismas (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C. V. (%)
PPM 5 – T1	11,68	14,67	1,69	11,56%
PPM 6 – T1	15,89			
PPM 7 – T1	8,79**			
PPM 8 – T1	16,25			
PPM 9 – T1	14,05			
PPM 10 – T1	15,69			
PPM 11 – T1	14,49			
Prisma	Módulo de elasticidade inicial dos prismas (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C. V. (%)
PPM 5 – T2	10,88	10,34	1,30	12,60%
PPM 6 – T2	9,92			
PPM 7 – T2	9,62			
PPM 8 – T2	10,25			
PPM 9 – T2	10,01			
PPM 10 – T2	8,77			
PPM 11 – T2	12,91			

Fonte: Elaboração própria. (** Resultado descartado por apresentar um desvio grande em relação aos outros valores).

Os resultados mostram que para a tipologia PPM – T1 em que se utilizou uma argamassa de resistência aproximadamente 132% maior do que na tipologia PPM – T2, houve acréscimo de apenas 41,88% no módulo de elasticidade inicial. Para a tipologia PPM – T1, o módulo de elasticidade fica melhor representado por uma relação de $E \approx 525f_{pk}$, enquanto que para a tipologia PPM – T2, o módulo de elasticidade inicial fica melhor representado por uma relação de $E \approx 453f_{pk}$.

Comparativamente aos prismas moldados com blocos cerâmicos de parede vazada, observou-se que quando se utilizou um bloco de maior resistência, alcançou-se maior resistência à compressão e maior módulo de elasticidade. Martins et al. (2018) também verificaram que tanto a resistência à compressão dos prismas quanto o módulo de elasticidade aumentaram com o aumento da resistência à compressão dos blocos.

Zhou et al. (2017), ao avaliarem o modo de ruptura e o comportamento tensão-deformação específica de pequenas paredes de alvenaria de blocos de concreto submetidas à compressão axial, estabeleceram uma relação para o módulo de elasticidade de $872 f_{pk}$. Kaushik, Rai e Jain (2007), ao avaliarem prismas de alvenarias de blocos cerâmicos executados com 3 diferentes argamassas tratadas como resistência fraca, com proporção de 1:0:6 (cimento, cal e areia, medidos em volume), resistência intermediária, com proporção de 1:0,5:4,5 (cimento, cal e areia, medidos em volume) e resistência alta com proporção de 1:0:3 (cimento, cal e areia, medidos em volume), observaram que o módulo de elasticidade dos prismas da alvenaria variaram de proporções médias de 2300 MPa, 3800 MPa e 4200 MPa, respectivamente para prismas produzidos com argamassas fraca, intermediária e forte. Assim, os autores constataram que uma correlação média para o módulo dos prismas avaliados poderia ser $E \approx 550 f_{pk}$.

A técnica DIC permite avaliar o módulo de elasticidade de diferentes materiais, com uma ótima precisão nos resultados. Santos et al. (2016) avaliaram o módulo de elasticidade longitudinal de dois tipos de concreto com diferentes resistências submetidos à compressão axial fazendo-se uso de uma metodologia tradicional com strain gauges e através da correlação digital de imagem com auxílio de um microscópio USB com captura de imagens a uma taxa de 5 quadros por segundo. Os resultados entre as duas metodologias propostas pelos autores tiveram uma diferença na faixa de 4%, sugerindo que a técnica DIC tem uma ampla área de aplicação podendo ser utilizada para avaliação de diferentes materiais.

5.4.1 Avaliação do modo de ruptura

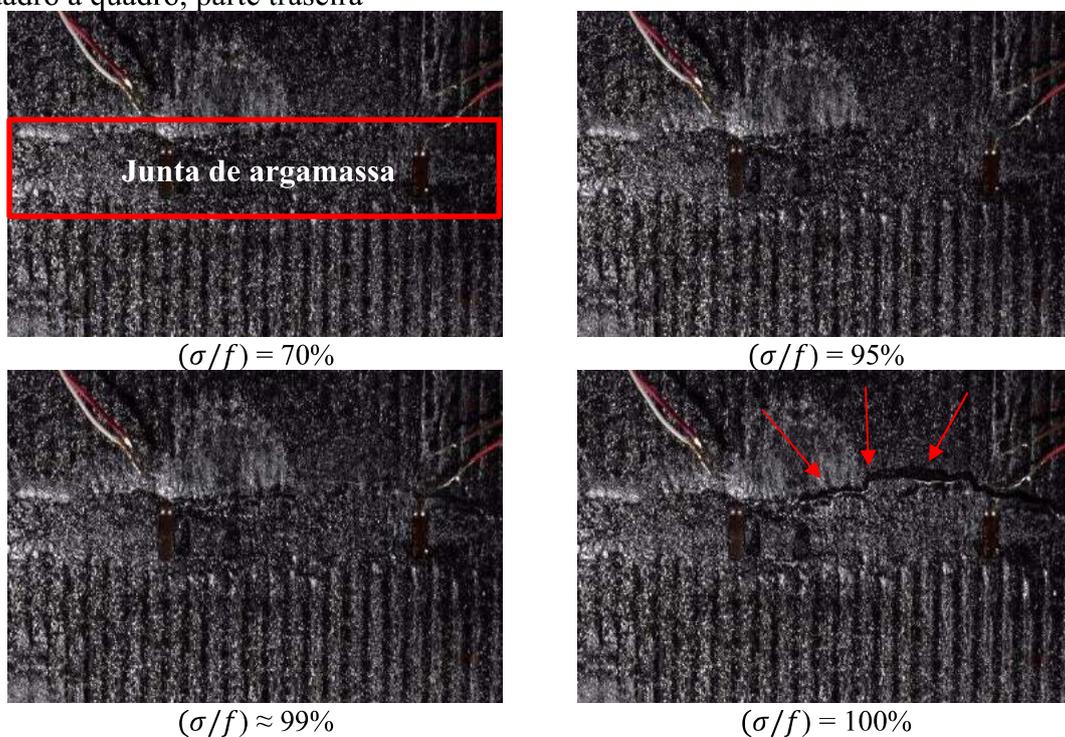
Todos os prismas avaliados foram filmados por duas câmeras posicionadas na face frontal e traseira, buscando identificar o avanço do processo de ruptura dos prismas. A partir das filmagens dos prismas, foi possível avaliar o avanço da ruptura através da extração de imagens quadro a quadro e pelo gradiente de deformação obtido com o auxílio do DIC, nas direções x (ϵ_x) e y (ϵ_y), determinando a partir de qual nível de tensão era possível identificar danos aparentes nos componentes e como se dá o desencadeamento do processo de ruptura. A direção y (ϵ_y) tratada neste trabalho se refere ao sentido de aplicação do carregamento, ao passo que a direção x (ϵ_x) se refere ao sentido transversal ao carregamento.

A diferença de tonalidade das imagens corresponde à concentração de tensões (acúmulo de deformação específica) ou surgimento de fissuras de pequenas dimensões que aumentam conforme ocorre o aumento do nível de tensão atuante no prisma até a ruptura. Para situações em que as fissuras apresentam dimensões visíveis através da avaliação quadro a quadro ou quando há expulsão de lamelas da junta de argamassa ou separação dos blocos e da junta de argamassa, o processo de análise via gradiente de deformações, na maioria dos casos, já havia indicado dano na região.

O cenário de avanço de ruptura dos prismas cerâmicos PPM 7 – T1, PPM 10 – T1 e PPM 11 – T1 com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,70$ apresentou-se conforme mostrado nas Figuras 53 a 58. A região correspondente a junta de argamassa dos prismas está delimitada na primeira imagem por uma caixa com bordas vermelhas. O avanço do modo de ruptura dos demais prismas que foram analisados através de imagem quadro a quadro e do DIC são apresentados no Apêndice D.

Nas Figuras 53 e 54, apresentam-se, respectivamente, o avanço do processo de ruptura do prisma PPM 7 – T1 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pelo DIC para ambas as direções (ϵ_y e ϵ_x).

Figura 53 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 7 – T1 através da imagem quadro a quadro, parte traseira

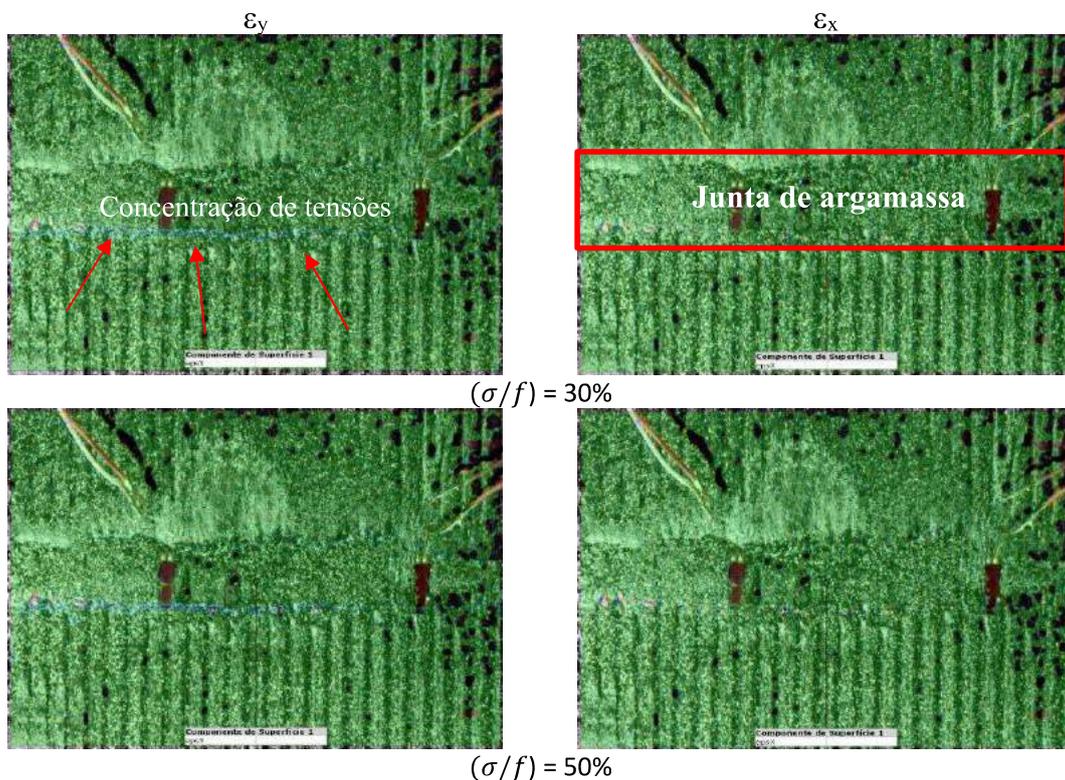


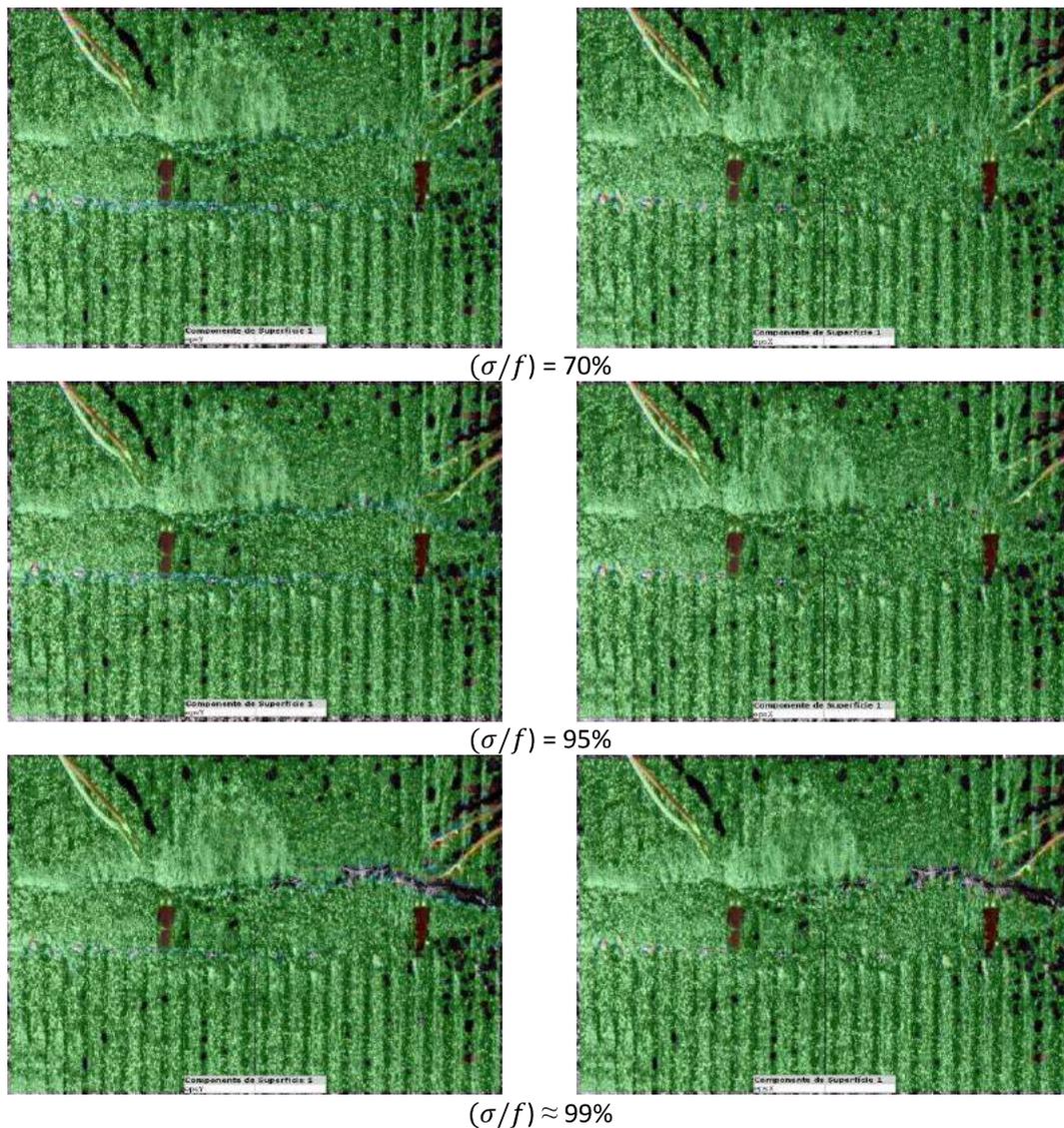
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 53, para um nível de tensão de 100%, que seria no instante da ruptura, houve a ruptura do contato entre porção superior da junta de argamassa e o bloco, com expulsão de parte da argamassa. Na análise quadro a quadro não foi possível identificar nenhum dano prévio em níveis de tensão menores. Para os demais prismas dessa mesma tipologia, a avaliação quadro a quadro não permitiu identificar o surgimento de concentração de tensões na região da junta de argamassa ou aparecimento de fissuras em níveis abaixo de 90% da carga última de ruptura. É válido afirmar que a pintura dos prismas para a avaliação através da técnica DIC pode ter prejudicado a avaliação visual do avanço do processo de ruptura através da metodologia quadro a quadro.

Na Figura 54, na coluna da esquerda, apresenta-se o gradiente de deformações na direção vertical (ϵ_y). Nessa direção busca-se avaliar o avanço das deformações na junta de argamassa. Na coluna da direita apresenta-se o gradiente de deformações na direção horizontal (ϵ_x). Nesta direção, os gradientes de deformação indicam o surgimento de fissuras verticais.

Figura 54 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM7 – T1 – DIC – Parte frontal



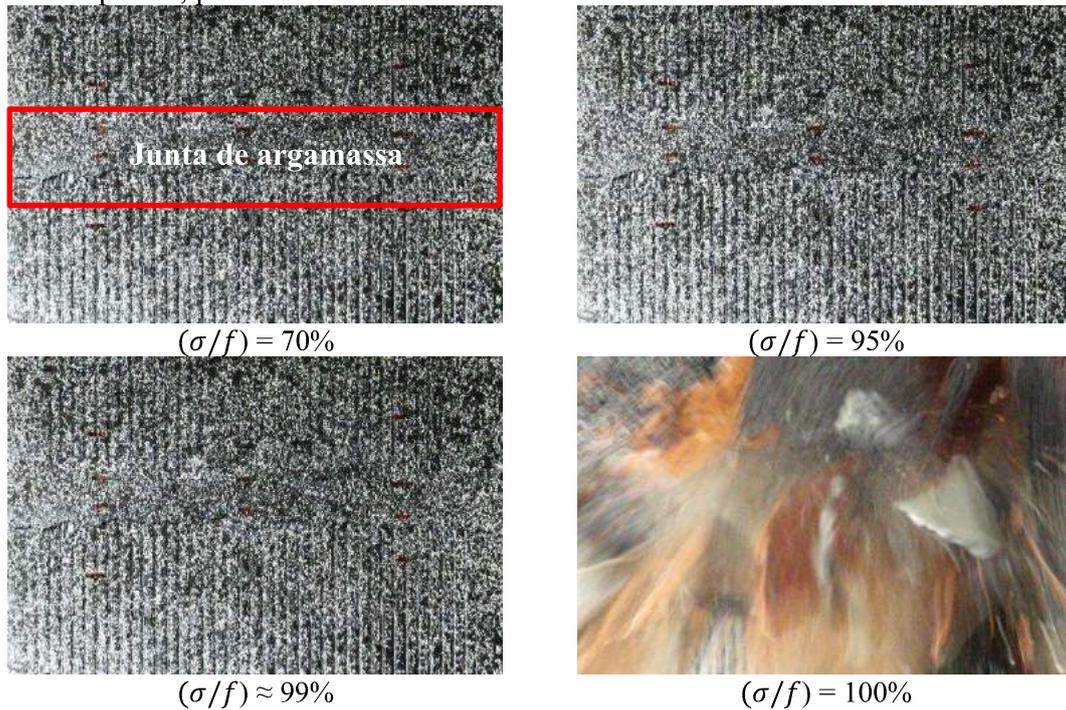


Fonte: Elaboração própria.

Na direção vertical (ϵ_y), percebe-se a concentração de tensões na região de ligação da junta de argamassa com os blocos, o que posteriormente, já em níveis de tensão mais próximos da ruptura, acabou resultando na expulsão de lamelas da argamassa, provocando a ruptura de forma explosiva, sem aviso.

Nas Figuras 55 e 56, apresentam-se respectivamente o avanço do processo de ruptura do prisma PPM 10 – T1 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pelo DIC para ambas as direções (ϵ_y e ϵ_x).

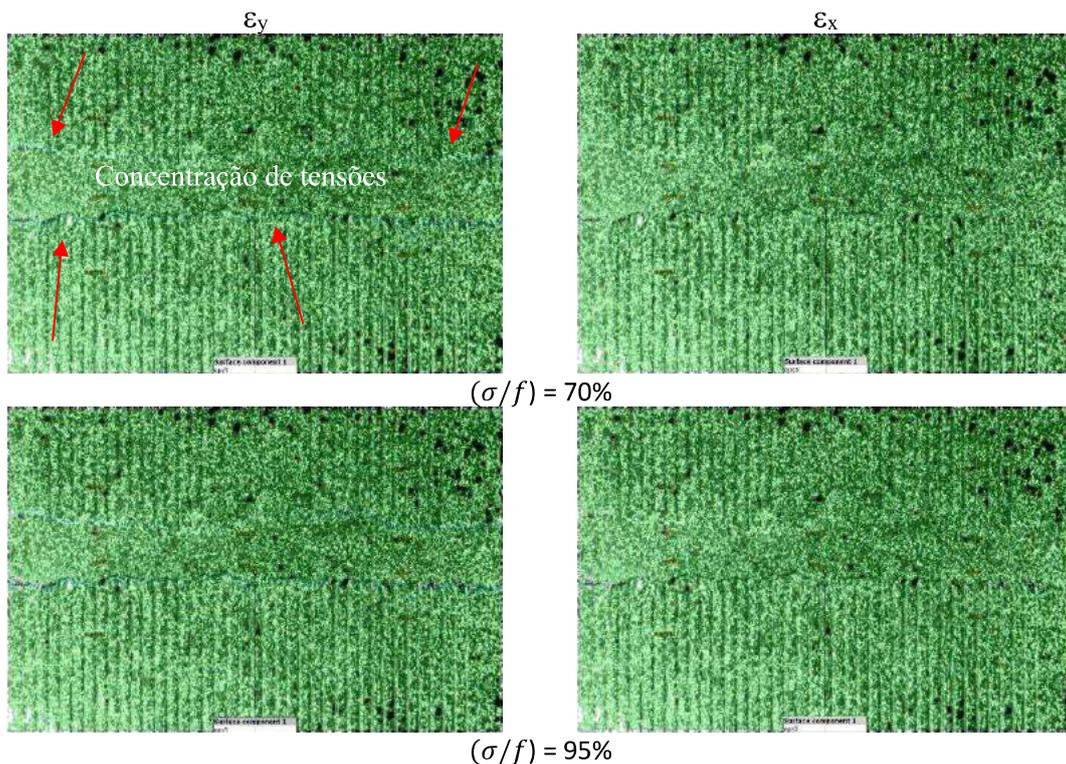
Figura 55 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 10 – T1 através de imagem quadro a quadro, parte traseira

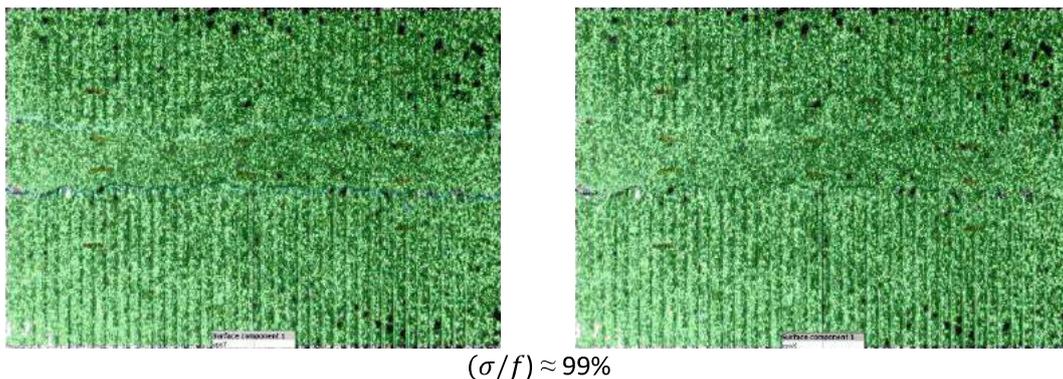


Fonte: Elaboração própria.

Por meio da avaliação visual quadro a quadro apresentado na Figura 55 não foi possível avaliar o surgimento de fissuras ou concentração de tensões que pudessem desencadear o processo de ruptura do prisma.

Figura 56 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM10 – T1 – DIC – Parte traseira





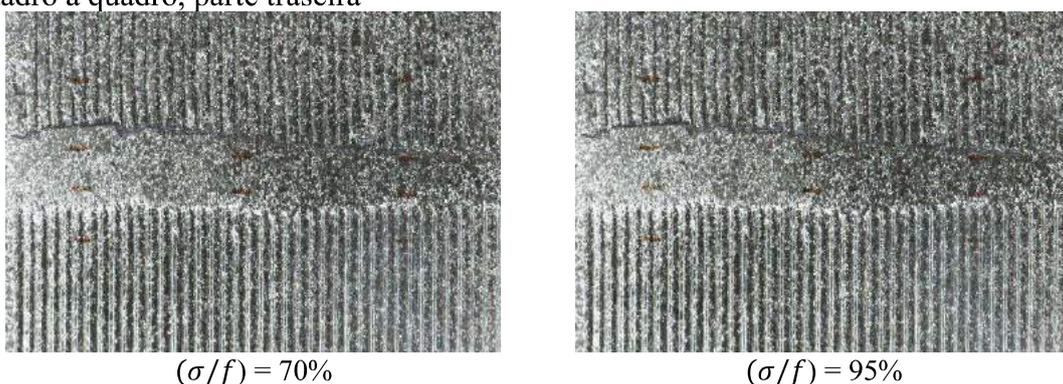
$(\sigma/f) \approx 99\%$

Fonte: Elaboração própria.

Através da Figura 56, avaliando-se a direção vertical (ϵ_y), observa-se um acúmulo de deformações na região da junta de argamassa conforme pode ser visto pela diferença de tonalidade de cor na região da ligação da junta com os blocos ao passo que houve aumento do nível de tensão do prisma. Por outro lado, na direção horizontal (ϵ_x), para níveis de tensões próximos à ruptura, não foi possível detectar surgimento de fissuras nos blocos, de forma que o material comportou-se homogeneamente até a ruptura, apresentando uma ruptura de forma explosiva, com grande liberação de energia e sem aviso.

Nas Figuras 57 e 58, apresentam-se respectivamente o avanço do processo de ruptura do prisma PPM 11 – T1 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pelo DIC para ambas as direções (ϵ_y e ϵ_x).

Figura 57 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 11 – T1 através de imagem quadro a quadro, parte traseira

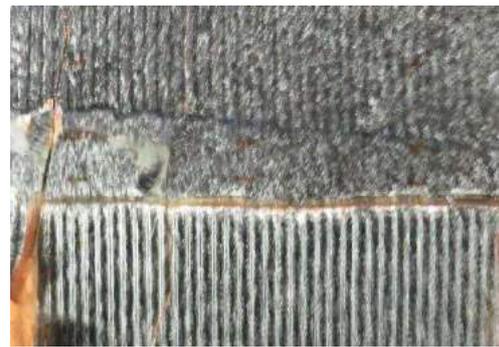


$(\sigma/f) = 70\%$

$(\sigma/f) = 95\%$



$(\sigma/f) \approx 99\%$

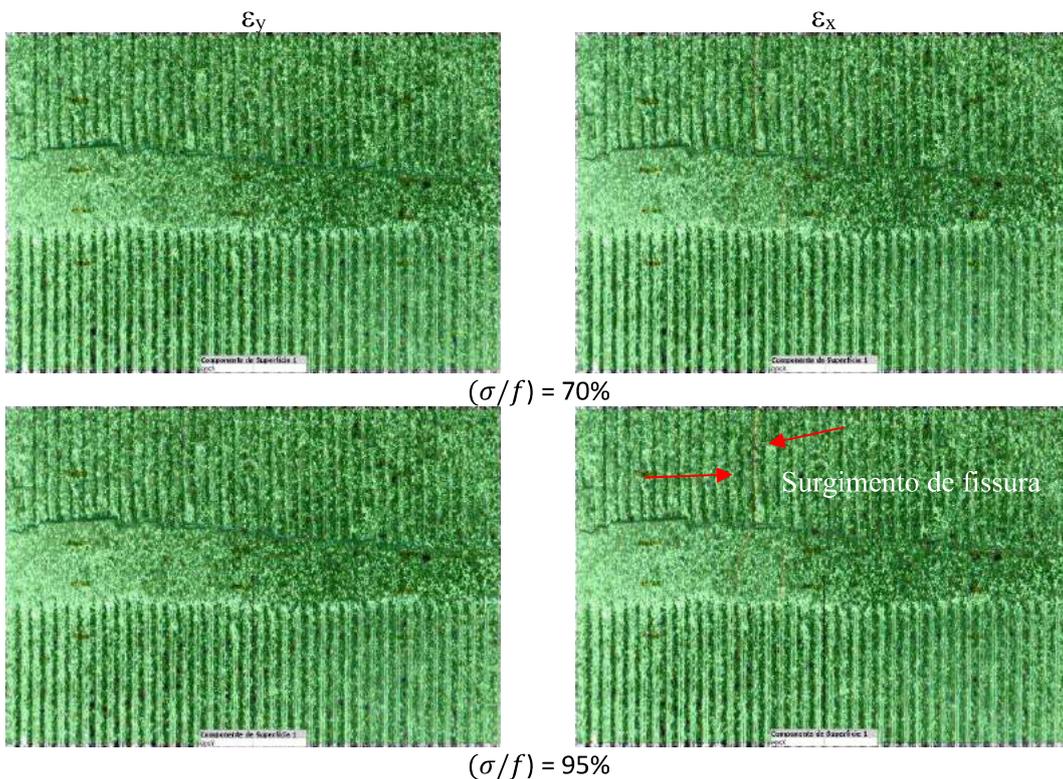


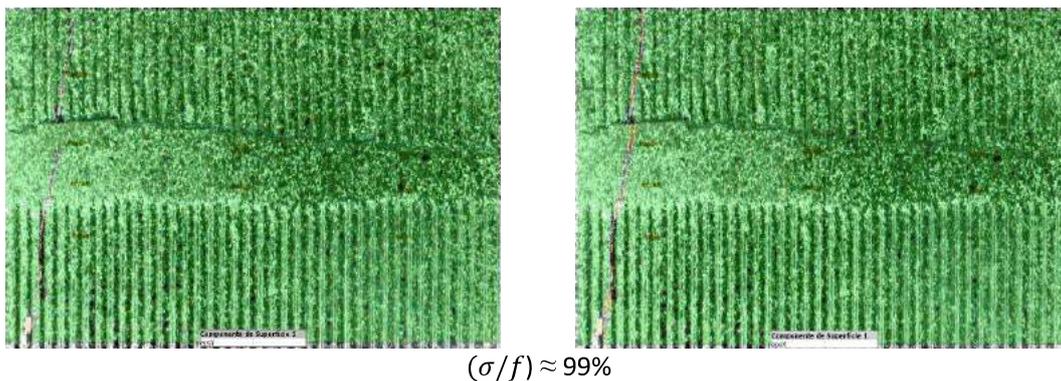
$(\sigma/f) = 100\%$

Fonte: Elaboração própria.

Como para os prismas anteriores dessa mesma tipologia, não foi possível a visualização do início da propagação de fissuras que pudessem identificar ou auxiliar no entendimento da forma como iniciou ou ocorreu o avanço da ruptura do prisma PPM 11 – T1. Assim como os demais prismas dessa tipologia, não foi possível ser identificada fissuras para níveis de tensões abaixo de 90% da carga última de ruptura.

Figura 58 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T1 – DIC – Parte traseira





Fonte: Elaboração própria.

Por outro lado, percebe-se pela Figura 58, que o aparecimento de fissuras identificadas através do gradiente de deformação (ϵ_x) ocorre a partir de 90% da carga última de ruptura. As fissuras identificadas aumentam de dimensão conforme há o aumento do carregamento, até que aconteça o rompimento do prisma, o que pode ser visto através das imagens quadro a quadro com nível de tensão $(\sigma/f) = 100\%$ e através do gradiente de deformação para $(\sigma/f) \approx 99\%$. Autores como Gencturk et al. (2014) afirmam que a técnica DIC é capaz de fornecer informações detalhadas e incapazes de serem mensuradas pelas técnicas tradicionais.

A ruptura de forma explosiva e sem aviso prévio em blocos cerâmicos com argamassas de alta resistência já havia sido constatado por outros autores (De marco, 2016; Lübeck, 2016; Alvarenga et al., 2017; Machado, 2019).

Comportamento similar foi observado por Mohamad et al. (2017), que constataram que prismas não grauteados atuam como um elemento homogêneo quando moldados com argamassa de resistência à compressão similares a dos blocos. Os autores constataram que a ligação bloco-argamassa é responsável pelo modo de ruptura da alvenaria.

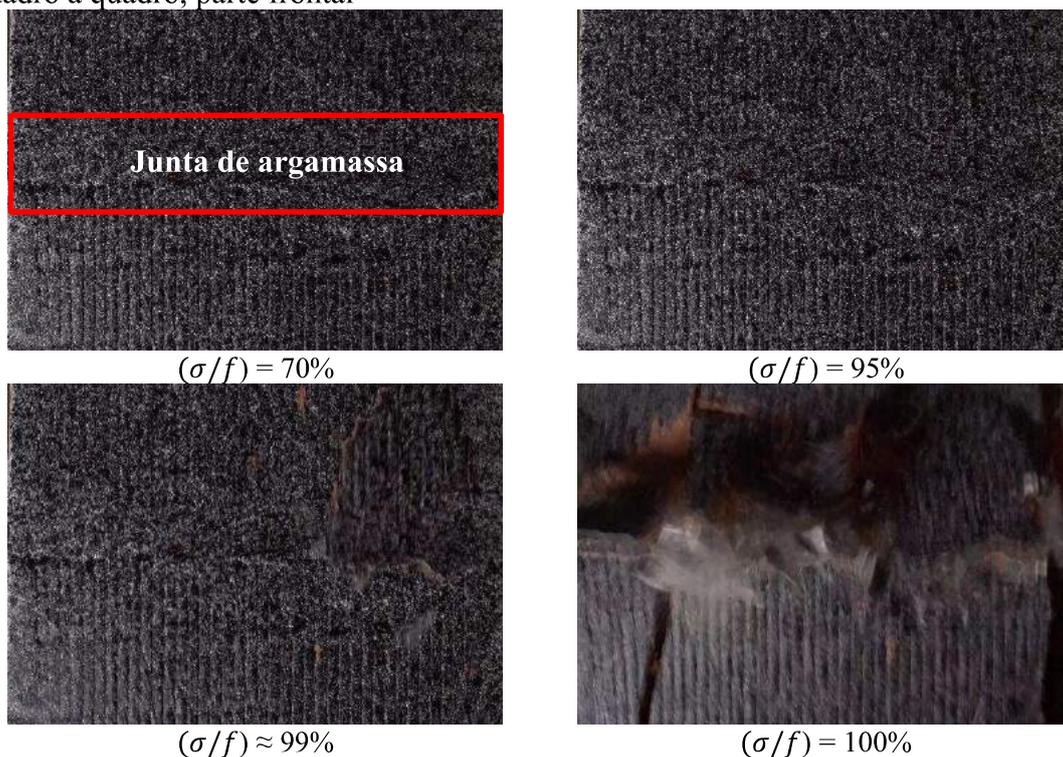
Lübeck (2016), ao ensaiar prismas submetidos à compressão axial, fazendo-se uso dos mesmos tipos de blocos cerâmicos de parede maciça utilizados nesta pesquisa, combinados com argamassa de alta resistência, observou que os prismas apresentaram rupturas com grande acúmulo de energia interna, explosivas, resultando na completa fragmentação e separação do prisma após a ruptura.

O cenário de avanço da ruptura dos prismas cerâmicos PPM 9 – T2, PPM 10 – T2 e PPM 11 – T2 com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,70$ extraído através de imagem quadro a quadro e através do gradiente de deformação são apresentados nas Figuras 56 a 61. O

avanço do modo de ruptura dos demais prismas através de imagem quadro a quadro e através da técnica DIC são apresentados no Apêndice D.

Nas Figuras 59 e 60, apresentam-se, respectivamente, o avanço do processo de ruptura do prisma PPM 9 – T2 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pelo DIC para ambas as direções (ϵ_y e ϵ_x).

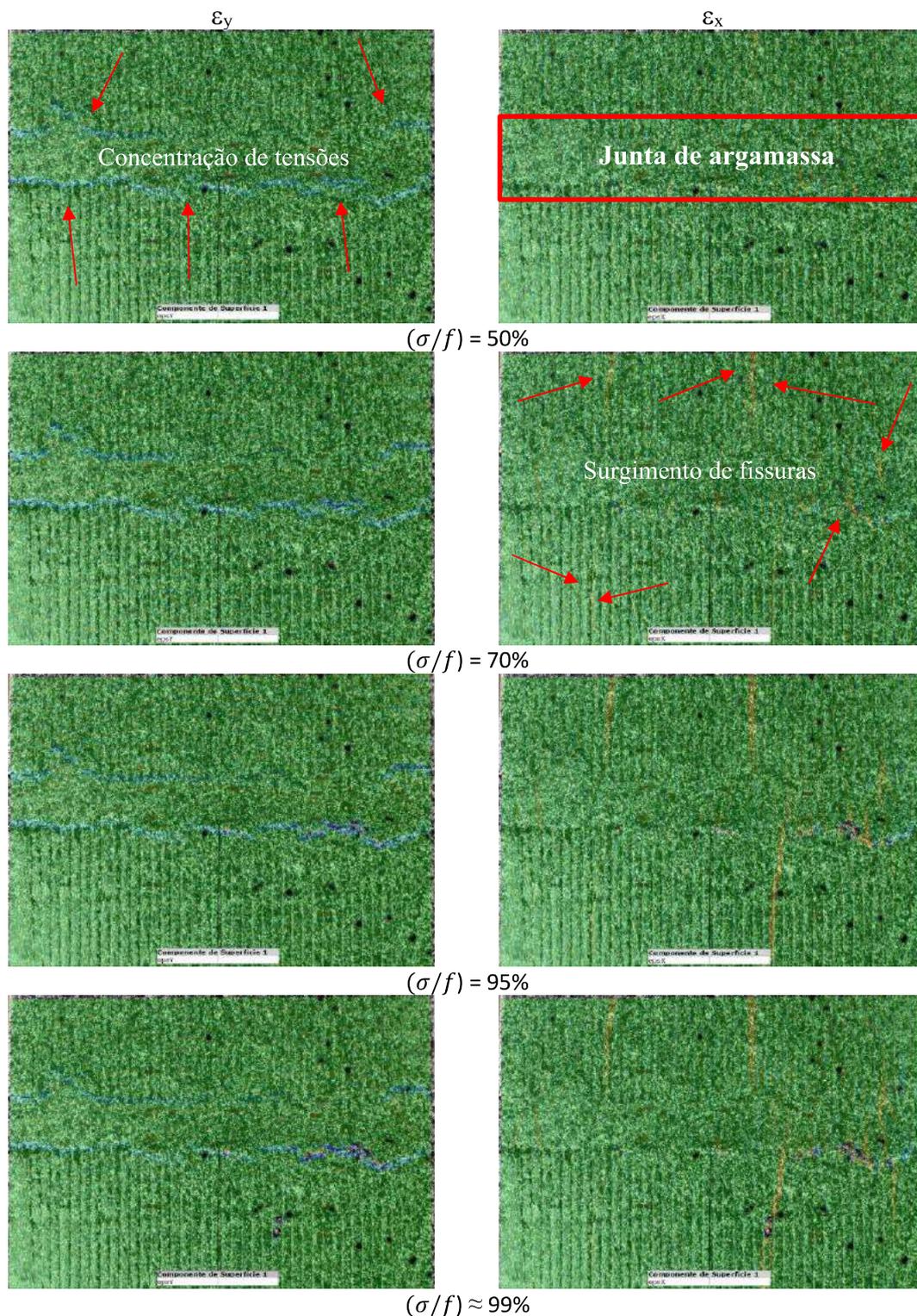
Figura 59 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 9 – T2 através da imagem quadro a quadro, parte frontal



Fonte: Elaboração própria.

Por meio da avaliação quadro a quadro não é possível identificar a propagação de fissuras em níveis abaixo de 90% da tensão última. Da mesma forma, também não foi possível avaliar se ocorre concentração de tensões na região da junta de argamassa. Somente quando próximo da carga de ruptura foi possível identificar surgimento de fissuras que desencadearam a ruptura do prisma PPM 9 – T2.

Figura 60 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM9 – T2 – DIC – Parte Frontal



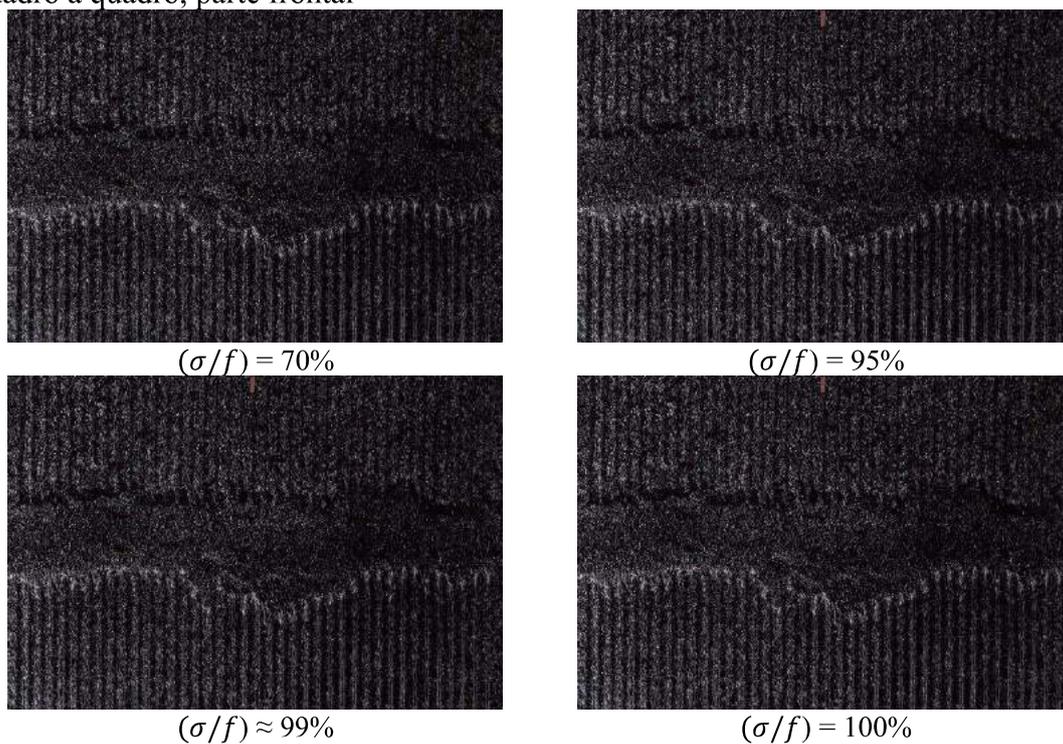
Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se através da Figura 60, um acúmulo de tensões na região da junta de argamassa a partir de 50% da carga máxima de ruptura, ao passo que a partir de 70% da carga de ruptura identifica-se o aparecimento de várias fissuras de pequenas dimensões (invisíveis através da avaliação quadro a quadro). Em níveis já próximos a ruptura (σ/f

$\approx 99\%$) visualiza-se o desprendimento total dos blocos e da junta de argamassa e consequentemente a explosão abrupta e sem aviso prévio do conjunto.

Nas Figuras 61 e 62, apresentam-se, respectivamente, o avanço do processo de ruptura do prisma PPM 10 – T2 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pelo DIC para ambas as direções (ε_y e ε_x).

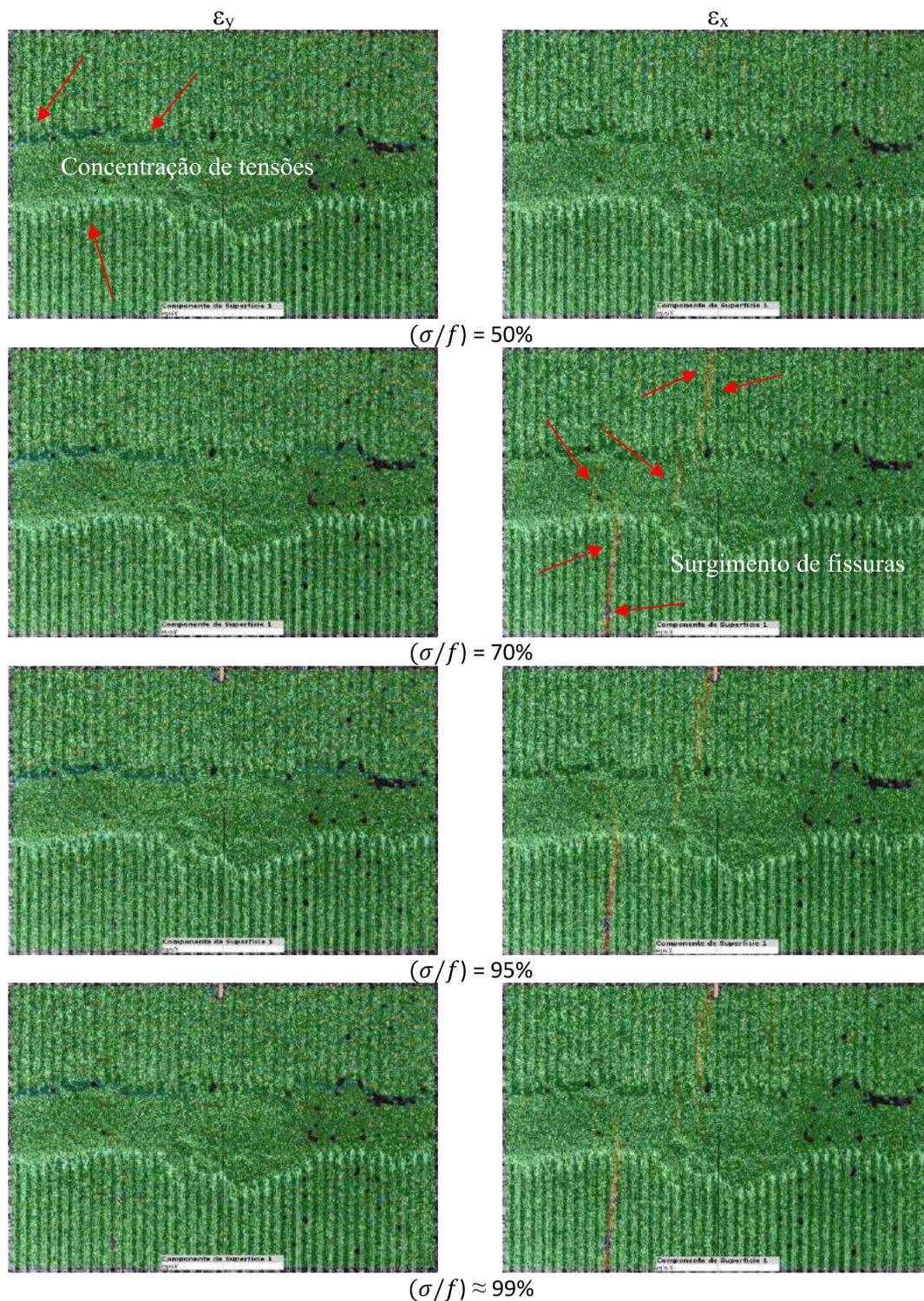
Figura 61 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 10 – T2 através da imagem quadro a quadro, parte frontal



Fonte: Elaboração própria.

Para o prisma PPM 10 – T2 optou-se por evitar que o prisma sofresse ruptura de forma abrupta, o que foi característico dessa tipologia avaliada. Assim sendo, retirou-se o carregamento, uma vez que se percebeu o aparecimento de fissuras visíveis já em níveis de tensões próximo à ruptura e, assim sendo, haveria uma grande liberação de energia, de forma instantânea.

Figura 62 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM10 – T2 – DIC – Parte Frontal



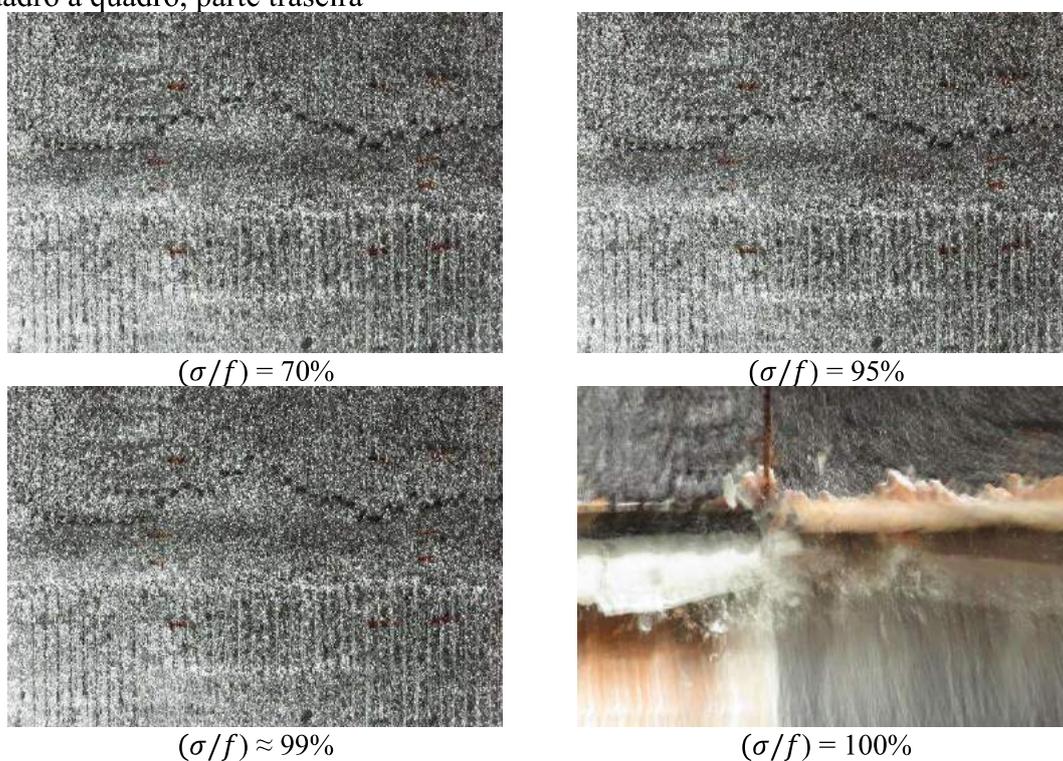
Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode ser visto na Figura 62, identifica-se uma concentração de tensões na região da junta de argamassa em níveis de tensão da ordem de 50% da tensão última, que se intensificam com a continuação do carregamento até a ruptura. Isso foi possível de ser visualizado através do gradiente de deformação na direção vertical (ϵ_y) pela diferença

de tonalidade, principalmente na região que compõe a ligação da junta com os blocos. Para níveis a partir de 70% da carga última, identifica-se o surgimento de fissuras (ε_x) induzidas pelo aumento de tensões na região da junta de argamassa. Tal comportamento, observado para esse prisma, também foi identificado no prisma PPM 9 – T2 e PPM 11 – T2 e é característico para essa tipologia.

Nas Figuras 63 e 64 apresentam-se, respectivamente, o avanço do processo de ruptura do prisma PPM 11 – T2 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pelo DIC para ambas as direções (ε_y e ε_x).

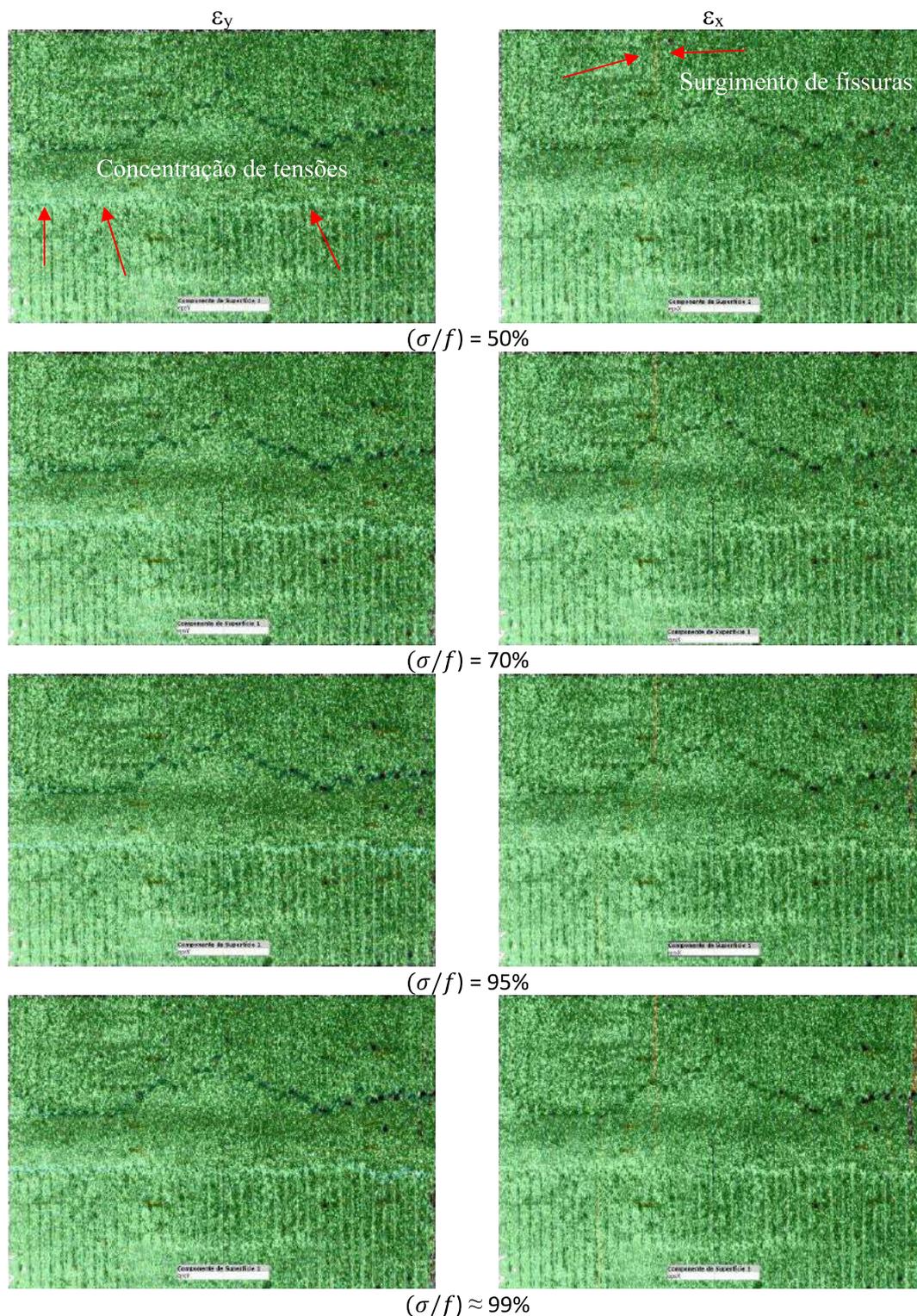
Figura 63 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM 11 – T2 através da imagem quadro a quadro, parte traseira



Fonte: Elaboração própria.

Através da Figura 63, não é possível perceber visualmente o aparecimento de fissuras localizadas ou concentração de tensões na região da junta de argamassa em níveis de tensão inferiores a 95% da tensão máxima.

Figura 64 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T2 – DIC – Parte traseira



Fonte: Elaboração própria.

Através da Figura 64, é possível perceber que o surgimento e a propagação de pequenas fissuras no prisma PPM 11 – T2 ocorreu em níveis próximos a 50% da carga última de ruptura. Tal observação foi típica para essa tipologia. Ao analisar o avanço da ruptura através da imagem quadro a quadro, não foi possível visualizar as fissuras por se

tratarem de fissuras de pequenas dimensões. Na avaliação quadro a quadro, qualquer dano aparente, como o surgimento de pequenas fissuras ou esfacelamento de partes da parede externa dos blocos, ocorreu a frações de segundos antes da ruptura, sendo esta explosiva e sem aviso.

Dessa forma, ressalta-se a importância da avaliação do avanço do processo de ruptura, através da técnica DIC, para seu melhor entendimento, bem como para o melhor mapeamento do início da propagação de fissuras e verificação de concentração de tensões na região da junta de argamassa. Somente na iminência da ruptura é que foi possível identificar danos através da inspeção visual, porém, com o uso do DIC, conseguiu-se fazer uma melhor avaliação do avanço do modo de ruptura dos prismas.

Outros autores verificaram que prismas moldados com argamassas de menores resistências apresentavam o esmagamento da junta de argamassa e surgimento de fissuras em níveis menores do que quando comparados a prismas moldados com argamassas de maiores resistências. Mohamad et al. (2017) verificaram que prismas moldados com argamassas de menores resistências, apresentavam comportamento não linear a níveis de tensão/resistência inferiores devido ao colapso dos poros da argamassa.

O esmagamento localizado das juntas de argamassa e posteriormente a propagação de fissuras nos blocos também já havia sido identificado por outros autores, como Mohamad (2007), que ao avaliar prismas de blocos de concreto com duas argamassas de diferentes resistências, concluiu que para os prismas moldados com argamassa de menor resistência houve esmagamento da junta de argamassa para níveis de tensão de 50% da resistência final e posteriormente a propagação de fissuras nos blocos.

5.5 PRISMA DE BLOCO ESTRUTURAL DE PAREDE VAZADA

A Tabela 30 apresenta os valores de resistência à compressão axial dos prismas de blocos de parede vazada moldados com argamassa T3 com resistência média à compressão axial (f_a) com relação à resistência média do bloco na área líquida ($f_{bm,liquida}$) de 0,70. Da mesma forma, nesta tabela apresentam-se os resultados dos ensaios dos prismas de blocos de parede vazada moldados com argamassa de traço T4, que representam uma relação $f_a/f_{bm,liquida}$ de 0,30.

Tabela 30 - Resistência à compressão dos prismas de blocos de parede vazada

Tipo de prisma	Prisma	Carga (kgf)	$f_{pi,bru}$ (MPa)	$f_{pk,bru}$ (MPa)	$f_{pi,liq}$ (MPa)	$f_{pm,liq}$ (MPa)	$f_{pk,liq}$ (MPa)	D.P. (liq) (MPa)	C.V. (liq) (%)
PPV - T3	1	35403	8,72	6,77	22,36	22,03	17,37	1,83	8,32
	2	38083	9,38		24,05				
	3	37068	9,13		23,41				
	4	35931	8,85		22,69				
	5	37271	9,18		23,54				
	6	37799	9,31		23,87				
	7	36337	8,95		22,95				
	8	30166	7,43		19,05				
	9	33048	8,14		20,87				
	10	31709	7,81		20,03				
	11	30897	7,61		19,51				
PPV - T4	1	23061	5,68	4,86	14,56	14,96	12,47	1,30	8,68
	2	23345	5,75		14,74				
	3	21234	5,23		13,41				
	4	21640	5,33		13,67				
	5	24563	6,05		15,51				
	6	23792	5,86		15,03				
	7	26593	6,55		16,79				
	8	25091	6,18		15,85				
	9	24522	6,04		15,49				
	10	26512	6,53		16,74				
	11	20259	4,99		12,79				

Fonte: Elaboração própria.

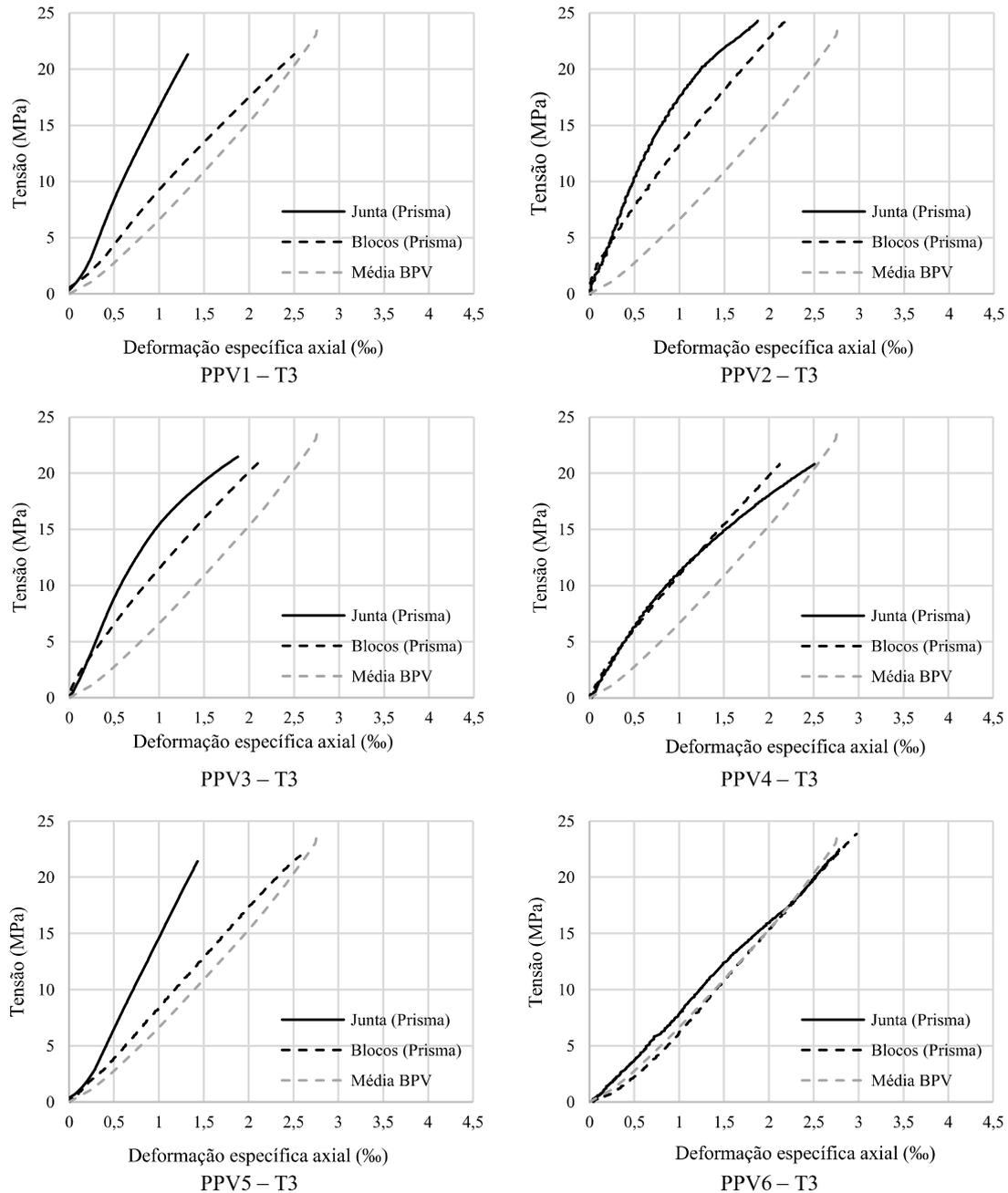
Os resultados mostram que o aumento da resistência da argamassa contribuiu significativamente para o aumento da resistência à compressão axial dos prismas. A diferença observada foi estatisticamente significativa quando realizada uma análise do tipo ANOVA Fator Único com valor-P calculado $< 0,05$.

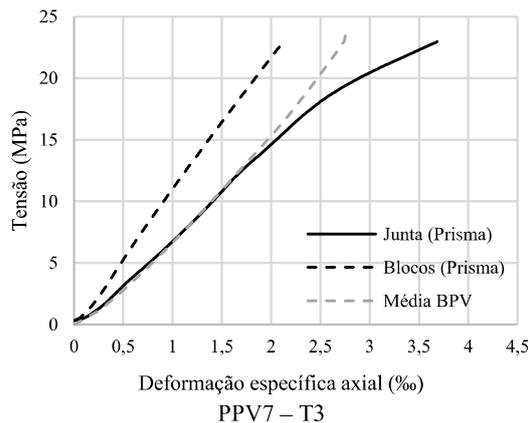
Rao, Reddy e Jagadish (1996), Sarangpani, Reddy e Jagadish (2005), Kaushik et al. (2007), Barbosa et al. (2010), Vimala e Kumarasamy (2014), Singh e Munjal (2017), Sharma, Telang e Rath (2017), Zhou et al. (2017) e Zahra e Dhanasekar (2016) também verificaram que a resistência à compressão de prismas aumenta com o aumento da resistência da argamassa e com o aumento da resistência à compressão axial do bloco. Wu, Li e Li (2012) também observaram que a resistência da alvenaria era influenciada pela proporção entre a resistência da argamassa e a resistência do bloco.

Na Figura 65, apresentam-se as curvas tensão-deformação específica axiais medidas através dos strain gauges dos prismas moldados com a argamassa de traço T3. As linhas em preto representam o comportamento dos elementos nos prismas; as tracejadas representam o comportamento médio das deformações nos blocos e a linha

cheia a média das deformações na junta de argamassa. A linha cinza tracejada representa a média do comportamento dos blocos cerâmicos de parede vazada avaliados de forma isolada.

Figura 65 – Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPV – T3, além dos blocos BPV isolados





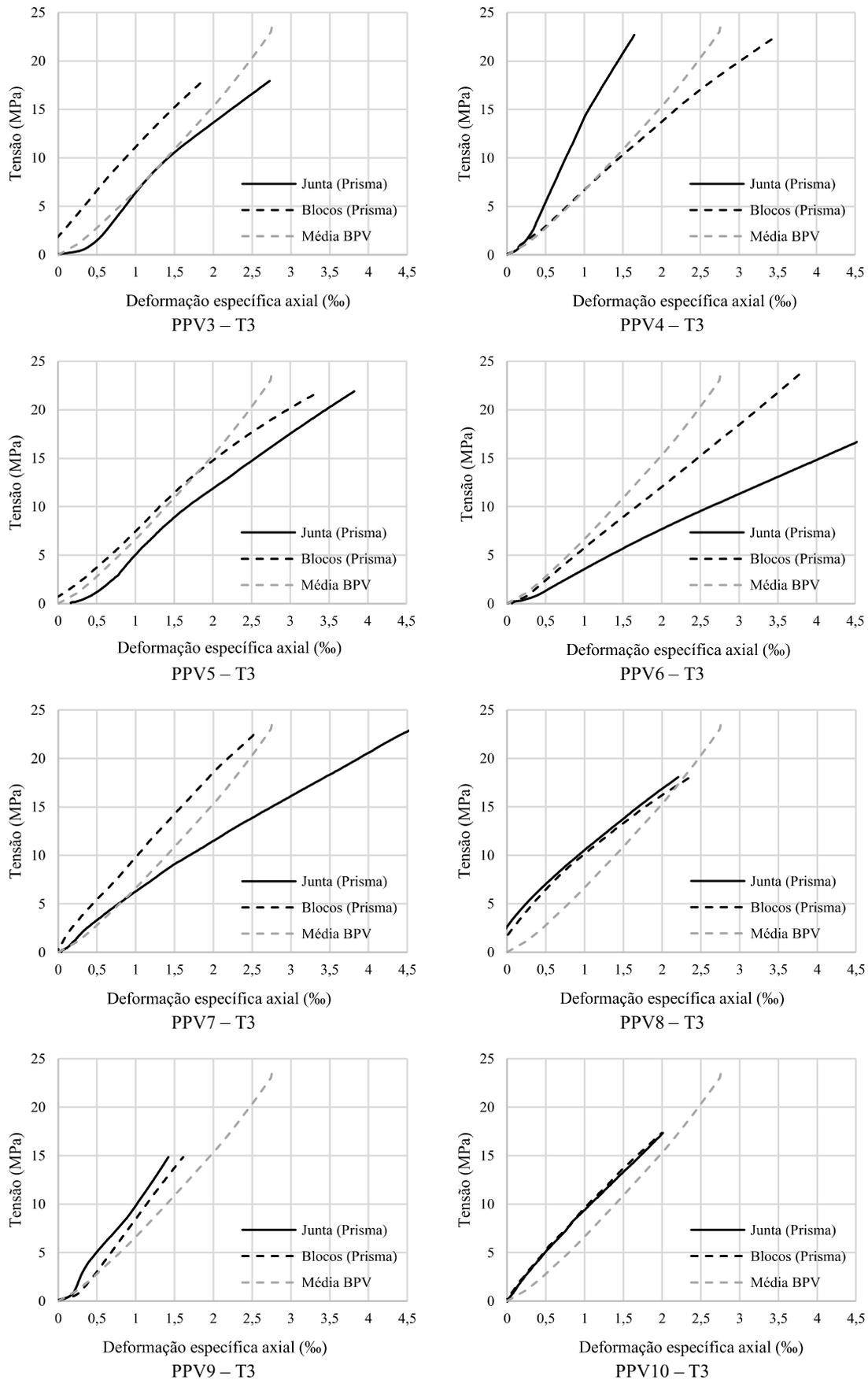
Fonte: Elaboração própria.

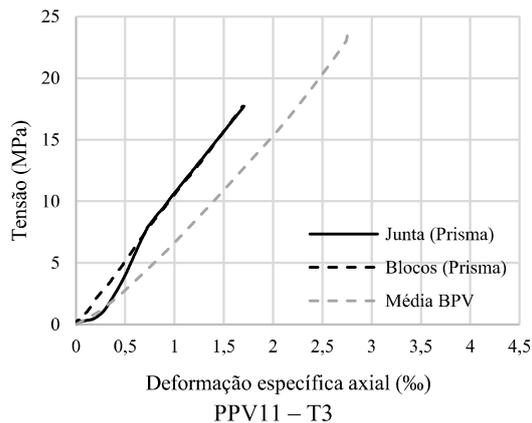
Os resultados mostram que para os prismas avaliados, as deformações máximas registradas para o bloco variaram entre 2,12‰ e 3,01‰ com deformação específica máxima média de 2,44‰. Por outro lado, as deformações máximas registradas para a junta de argamassa variaram entre 1,32‰ e 3,69‰ com deformação específica máxima média de 2,21‰, o que apresenta uma deformação máxima final levemente inferior às registradas para os blocos. Situação também observada para os prismas de blocos de paredes maciças.

Para a maioria dos prismas, há uma indicação da perda de linearidade da argamassa em níveis de tensão próximo da ordem de 0,70 até 0,80 do nível de tensão máxima. Tal condição, deve-se possivelmente ao fato de haver propagação de trincas internas no material.

Da mesma forma, representou-se o comportamento dos materiais avaliados separadamente e quando ensaiados no conjunto de prismas, sobrepondo-se a média dos blocos avaliados de forma separada, para os prismas PPV 3 – T3 a PPV 11 – T3 avaliados pela técnica DIC, conforme a Figura 66. Para os demais prismas, não foi possível avaliar as deformações axiais através do DIC devido a interferência dos cabos utilizados pelos strain gauges.

Figura 66 - Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos através do DIC para os prismas PPV - T3, além dos blocos BPV isolados





Fonte: Elaboração própria.

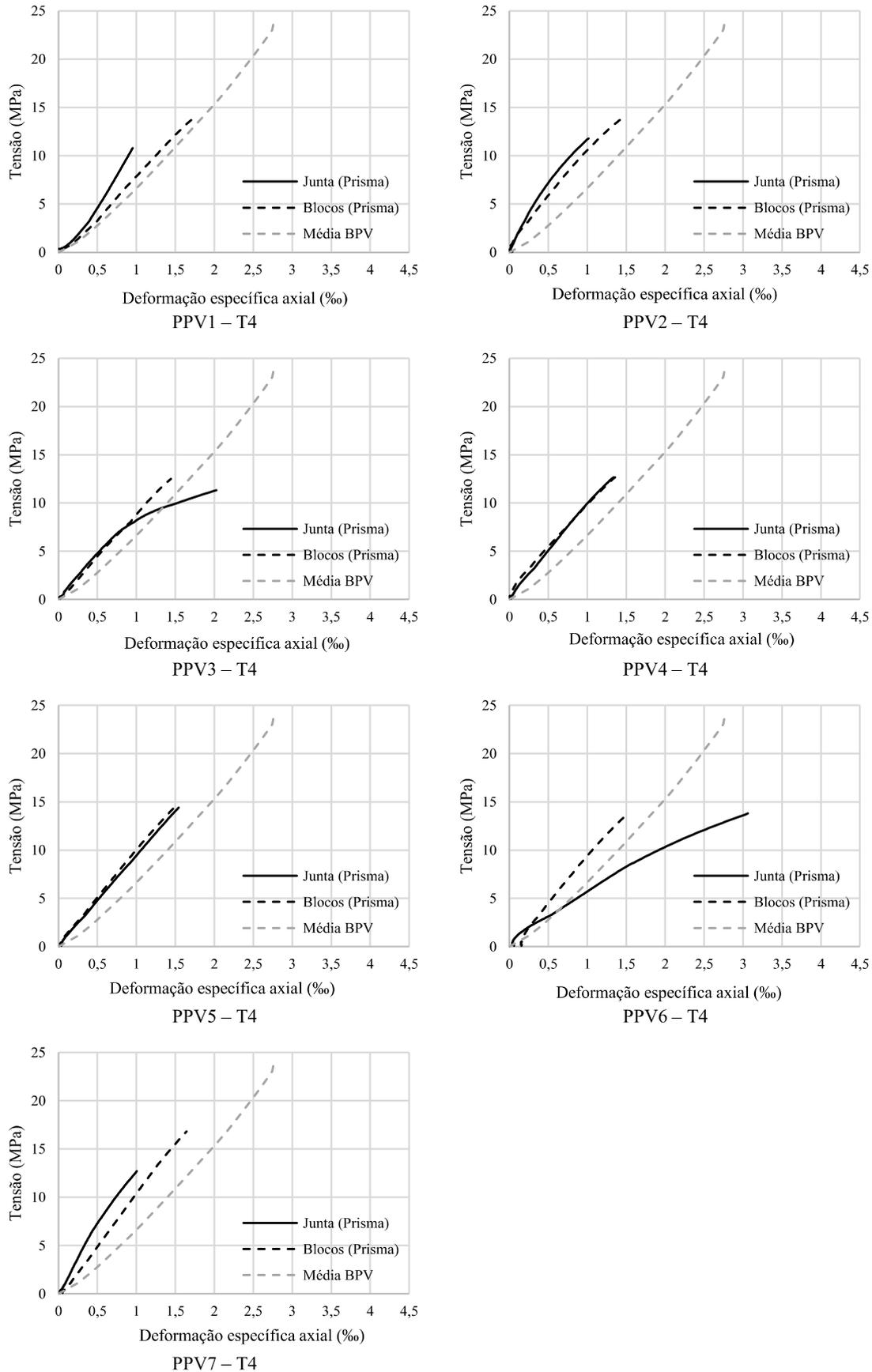
O comportamento das deformações da junta de argamassa dos prismas avaliados pelo DIC apresentou variações consideráveis com relação ao comportamento registrado pelos extensômetros. Observou-se que, enquanto os strain gauges registraram deformações específicas nas juntas menores que as dos blocos, o DIC indicou que estas foram mais deformáveis que os blocos. Quando considerada a tensão máxima medida, as deformações específicas máximas médias na junta de argamassa para os prismas instrumentados foi de 2,22‰ e para a correlação digital de imagem observou-se deformações específicas máximas médias de 3,22‰. Por outro lado, os blocos apresentaram comportamento relativamente próximos para os dois métodos avaliados, apresentando deformação máxima média para os prismas instrumentados de 2,44‰ e 2,66‰ para os prismas avaliados pelo DIC.

Com relação a manutenção do comportamento linear dos prismas, é possível notar que com uma argamassa com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,70$, não é percebido uma perda clara da linearidade da argamassa antes da ruptura.

Com relação ao comportamento dos blocos, os mesmos indicam um comportamento mais uniforme, linear até um nível de tensão de aproximadamente 90% da tensão última de ruptura. Isso permite entender que possivelmente as fissuras internas nos blocos cerâmicos começaram a propagar-se apenas para níveis de tensões próximos a ruptura.

Na Figura 67, apresentam-se as curvas tensão-deformação específica axial medida através dos strain gauges nos prismas moldados com a argamassa de traço T4.

Figura 67 – Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPV – T4, além dos blocos BPV isolados



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que para os prismas avaliados, as deformações máximas registradas para o bloco variaram entre 1,36‰ e 1,73‰ com deformação específica máxima média de 1,53‰. Por outro lado, as deformações máximas registradas para a junta de argamassa variaram entre 0,95‰ e 3,06‰ com deformação específica máxima média de 1,56‰, o que representa uma deformação máxima final levemente superior às registradas para os blocos.

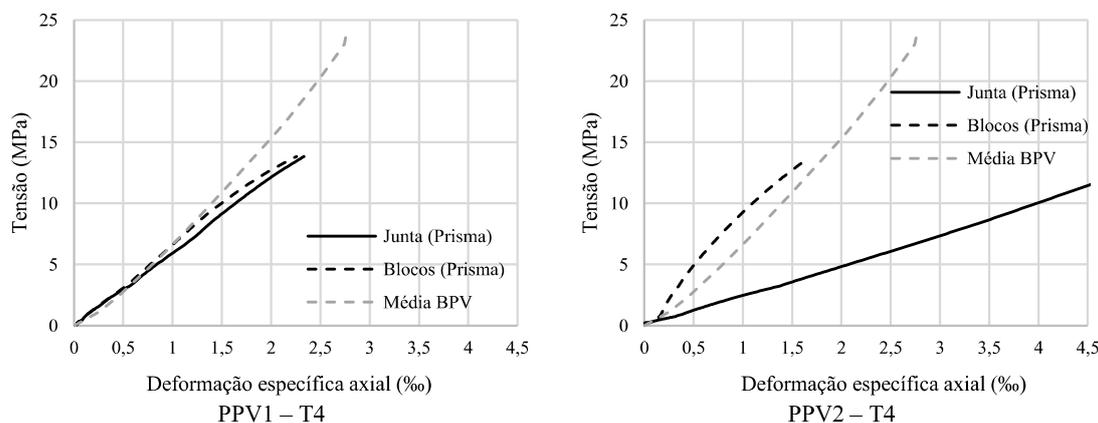
Para alguns dos prismas avaliados, há uma indicação da perda de linearidade da argamassa em níveis de tensão próximo da ordem de 40% a 50% da carga máxima de ruptura.

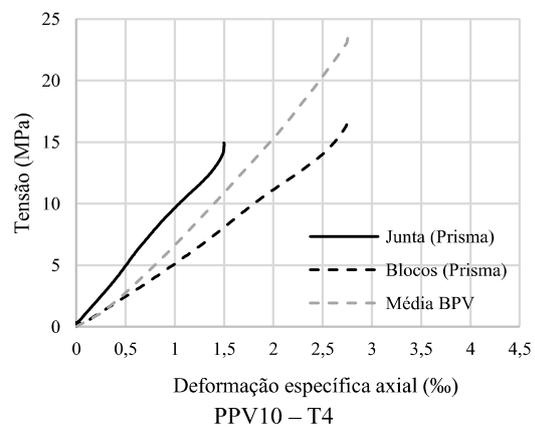
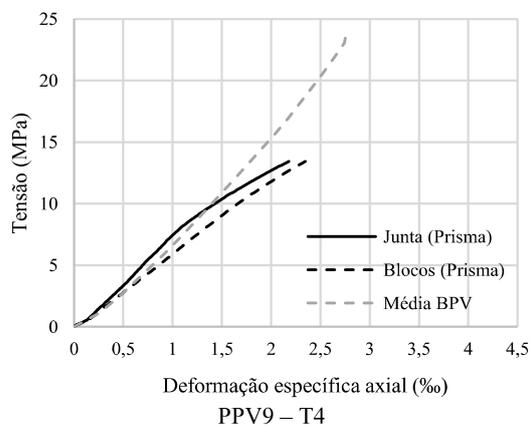
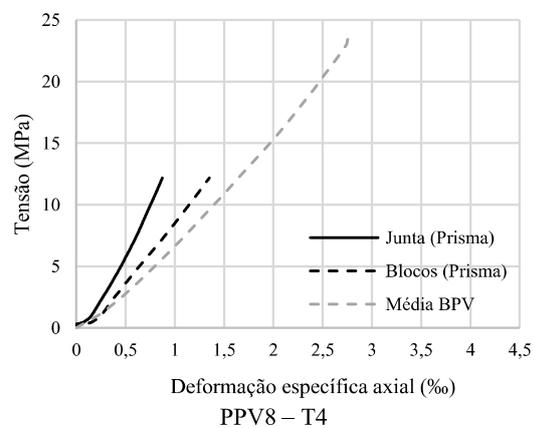
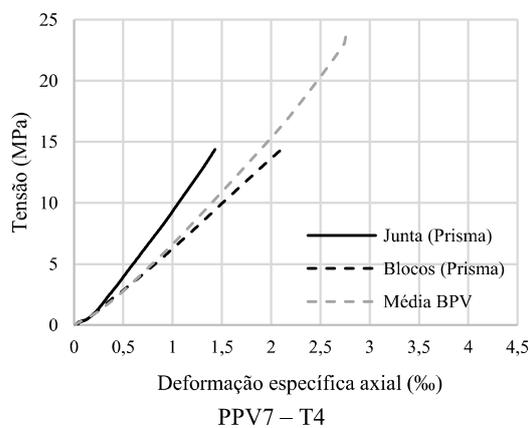
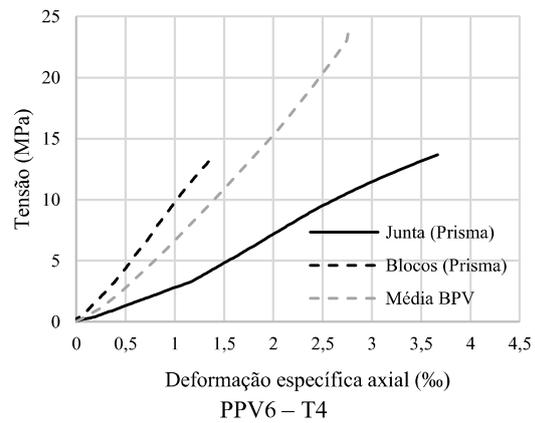
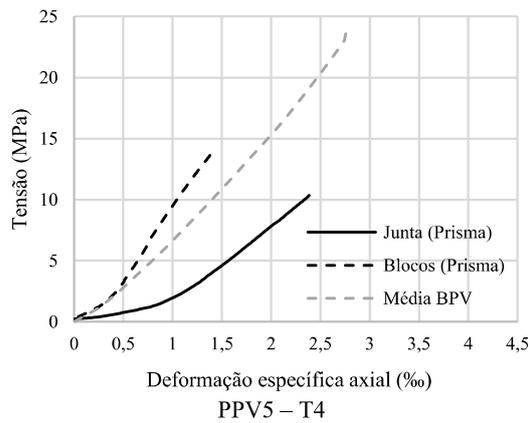
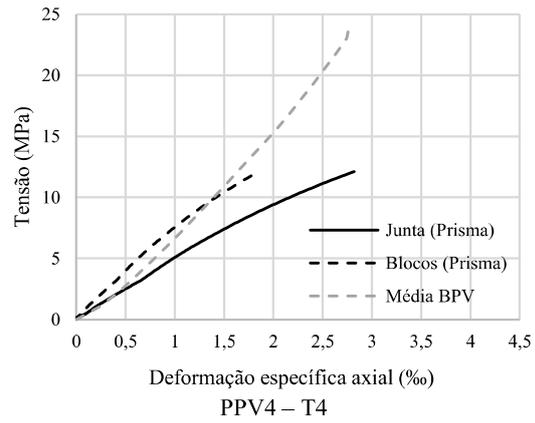
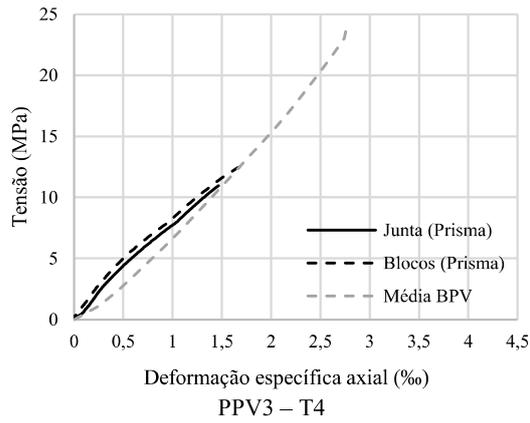
Ao comparar o comportamento da junta de argamassa para as duas tipologias de prisma de parede vazada avaliados, para a tipologia PPV – T4, tem-se uma perda de linearidade a níveis inferiores de tensão comparativamente a tipologia PPV – T3.

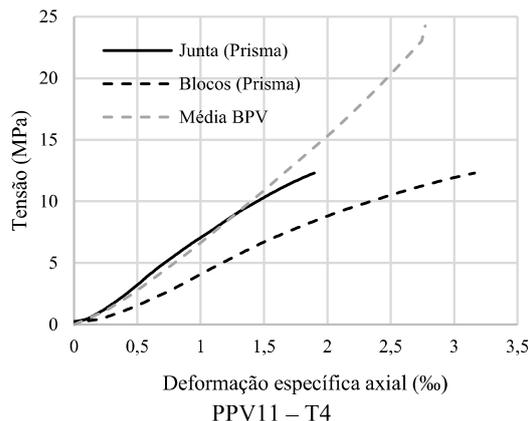
O comportamento dos blocos avaliados através dos strain gauges é praticamente linear até um nível de tensão de aproximadamente 80% da tensão última de ruptura.

Representou-se o comportamento dos blocos avaliados separadamente, sobrepondo-se a média dos resultados dos blocos com os componentes dos prismas avaliados pela técnica DIC conforme a Figura 68.

Figura 68 - Comportamento médio da curva tensão-deformação específica axial obtidos através do DIC para os prismas PPV – T4, além dos blocos BPV isolados







Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que o comportamento das deformações da junta de argamassa dos prismas avaliados pelo DIC apresentou variações com relação ao comportamento registrado pelos strain gauges quando considerado as medidas registradas na tensão máxima de ruptura. Enquanto os strain gauges registraram deformações específicas máximas médias na junta de argamassa para os prismas de 1,56%, as deformações específicas máximas média obtida pelo método DIC foi de 2,28%. Por outro lado, os blocos apresentaram comportamento relativamente próximos para os dois métodos avaliados, apresentando deformação máxima média para os prismas instrumentados de 1,53% e 2,00% para os prismas avaliados pelo DIC.

Tratando-se de prismas moldados com argamassa de relação $f_a/f_{b,m,liquida}$ de 0,30, conforme revisão bibliográfica realizada neste trabalho, espera-se que haja esmagamento da junta de argamassa e as maiores deformações possam ser registradas nesse local, conforme avaliado e registrado na maioria dos prismas avaliados pela técnica DIC e pelos strain gauges.

O módulo de elasticidade inicial dos componentes dos prismas PPV - T3 e PPV - T4, assim como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos mesmos, considerando os blocos e a junta de argamassa obtidos através da instrumentação e do DIC, são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Módulo de elasticidade dos componentes dos prismas PPV - T3 e PPV - T4 obtidos através da instrumentação e do DIC

Prisma	Módulo de elasticidade inicial dos blocos - Extensômetria (GPa)	Módulo de elasticidade inicial dos blocos - DIC (GPa)	Módulo de elasticidade inicial da junta de argamassa - Extensômetria (GPa)	Módulo de elasticidade inicial da junta de argamassa - DIC (GPa)
PPV1 - T3	9,89	*	17,24	*
PPV2 - T3	11,55	*	20,54	*
PPV3 - T3	10,55	9,37	18,58	9,65
PPV4 - T3	10,23	7,43	12,58	7,00
PPV5 - T3	8,94	7,64	16,70	7,83
PPV6 - T3	8,97	6,66	8,61**	5,23
PPV7 - T3	8,86	8,70	7,46**	6,31
PPV8 - T3	*	9,03	*	9,21
PPV9 - T3	*	10,47	*	9,74
PPV10 - T3	*	8,93	*	9,83
PPV11 - T3	*	10,67	*	13,13**
Média	9,85	8,77	17,13	8,10
D. P. (GPa)	1,01	1,34	2,94	1,77
C.V	10,24%	15,34%	17,18%	21,91%
Prisma	Módulo de elasticidade inicial dos blocos - Extensômetria (GPa)	Módulo de elasticidade inicial dos blocos - DIC (GPa)	Módulo de elasticidade inicial da junta de argamassa - Extensômetria (GPa)	Módulo de elasticidade inicial da junta de argamassa - DIC (GPa)
PPV1 - T4	8,87	6,68	9,80	5,80
PPV2 - T4	10,02	10,07	13,92	2,78**
PPV3 - T4	9,57	8,98	9,68	8,25
PPV4 - T4	10,67	7,81	9,91	5,08
PPV5 - T4	9,63	8,13	9,28	5,87
PPV6 - T4	10,07	8,90	5,23	4,00
PPV7 - T4	10,85	6,81	15,14**	8,87
PPV8 - T4	*	9,88	*	9,45
PPV9 - T4	*	7,03	*	8,05
PPV10 - T4	*	6,28	*	9,56
PPV11 - T4	*	6,03	*	8,15
Média	9,95	7,87	9,64	7,31
D. P. (GPa)	0,68	1,43	2,76	1,96
C.V	6,81%	18,14%	28,61%	26,79%

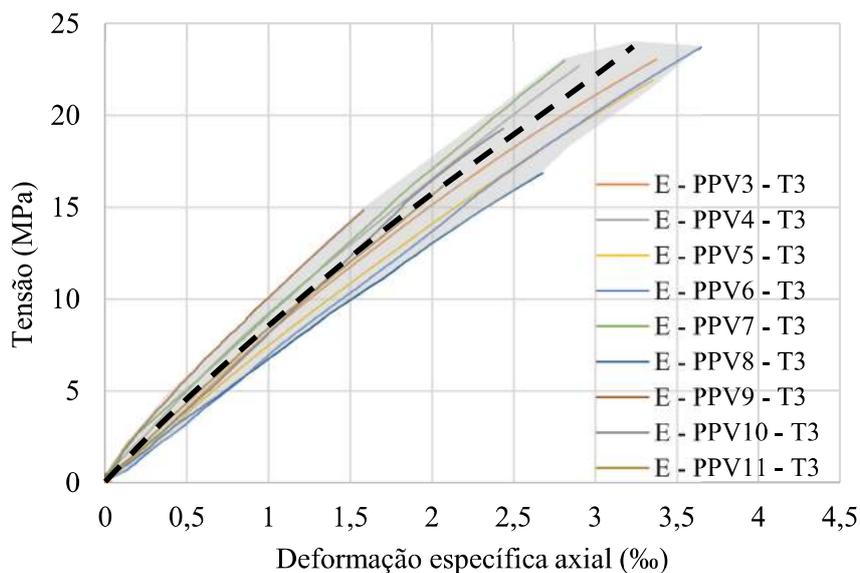
Fonte: Elaboração própria. (** Resultado descartado por apresentar um desvio grande em relação aos outros valores; * Não há análise para o prisma).

Os resultados mostram que o módulo de elasticidade dos blocos para ambas as tipologias de prismas de parede vazada apresentou valores similares, enquanto que o

módulo de elasticidade da argamassa apresentou uma redução de 77,70% na tipologia PPV – T4 com relação a tipologia PPV – T3 quando avaliado através dos strain gauges e 19,01% quando avaliado através do DIC. Tal comportamento, deve-se ao fato da argamassa de traço T4 apresentar resistência à compressão axial 133% menor que a argamassa de traço T3, enquanto não há diferença entre os blocos usados.

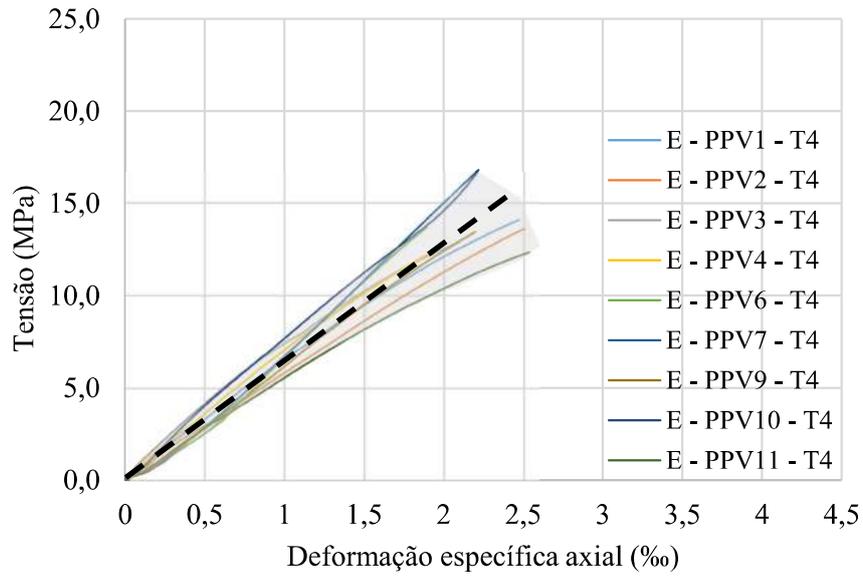
Com o intuito de calcular o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas através do DIC, para ambos os lados dos prismas, avaliaram-se as curvas tensão-deformação específica axial do conjunto para alguns prismas para cada tipologia avaliada, as quais estão apresentadas na Figura 69 e Figura 70. Selecionou-se os prismas que tiveram uma melhor qualidade na preparação, pintura e filmagem para que fosse possível ter uma análise de melhor qualidade e representasse fielmente os resultados para as tipologias avaliadas. Além disso, apresenta-se uma reta de tendência do comportamento dos módulos da tipologia avaliada, em cor preta tracejada.

Figura 69 – Comportamento médio das curvas para o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas para a tipologia PPV – T3 obtido através do DIC



Fonte: Elaboração própria.

Figura 70 – Comportamento médio das curvas para o módulo de elasticidade do conjunto dos prismas para a tipologia PPV – T4 obtido através do DIC



Fonte: Elaboração própria.

O módulo de elasticidade inicial global do conjunto dos prismas PPV - T3 e PPV - T4, assim como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos mesmos, são mostrados na Tabela 32.

Tabela 32 – Módulo de elasticidade dos prismas PPV - T3 e PPV - T4 obtidos através do DIC

Prisma	Módulo de elasticidade inicial dos prismas (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C. V. (%)
PPV3 - T3	7,83	8,63	1,05	12,15%
PPV4 - T3	9,34			
PPV5 - T3	7,52			
PPV6 - T3	7,31			
PPV7 - T3	8,71			
PPV8 - T3	8,96			
PPV9 - T3	10,07			
PPV10 - T3	7,90			
PPV11 - T3	10,03			
Prisma	Módulo de elasticidade inicial dos prismas (GPa)			
PPV1 – T4	7,03	6,77	0,53	7,81%
PPV2 – T4	6,13			
PPV3 – T4	7,36			
PPV4 – T4	6,82			
PPV6 – T4	6,54			
PPV7 – T4	6,94			
PPV9 – T4	6,60			
PPV10 – T4	7,56			
PPV11 – T4	5,95			

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que para a tipologia PPV – T3 em que se utilizou uma argamassa de resistência 133% maior do que a tipologia PPV – T4, houve acréscimo de 27,47% no módulo de elasticidade dos prismas avaliados. Autores como Alvarenga et al. (2017), ao avaliarem o módulo de elasticidade de prismas cerâmicos de parede vazada utilizando duas argamassas com diferentes resistências ($f_a = 6,60$ MPa e $f_a = 12,40$ MPa), constataram um aumento de 9,70% no módulo de elasticidade dos prismas quando utilizado uma argamassa com resistência 87,80% maior. Para a tipologia PPV – T3, o módulo de elasticidade fica melhor representado por uma relação de $E \approx 497f_{pk}$, enquanto

que para a tipologia PPV – T4, o módulo de elasticidade inicial fica melhor representado por uma relação de $E \approx 543f_{pk}$.

Os mesmos autores, após ensaios experimentais, verificaram uma relação para o módulo de elasticidade de $E \approx 402f_{pk}$ para os prismas cerâmicos de parede vazada moldados com a argamassa de resistência à compressão de 12,40 MPa e $E \approx 333f_{pk}$ para prismas executados com argamassa de resistência à compressão de 6,60 MPa.

Os resultados também mostram que a resistência à compressão da argamassa e dos blocos afetaram diretamente o módulo de elasticidade inicial dos prismas avaliados. Haach et al. (2014), ao avaliarem o comportamento de prismas de blocos de concreto contrafiados, também constatou que a resistência à compressão da argamassa influenciou diretamente o módulo de elasticidade secante dos prismas.

A resistência mecânica dos blocos e das argamassas utilizadas para a produção de prismas afetam diretamente os valores dos módulos dos prismas avaliados. Outros autores já haviam verificado a influência das propriedades mecânicas dos materiais empregados nos resultados dos módulos de elasticidade (Özhan e Cagatay, 2014; Kaushik, Rai e Jain, 2007). Esses autores, ao combinarem materiais com diferentes resistências mecânicas atestaram uma ampla faixa para os módulos de elasticidade encontrados, encontrando valores menores quando empregado argamassas ou blocos de baixa resistência.

Para as tipologias avaliadas de prismas cerâmicos de parede maciça e parede vazada tem-se na Tabela 33 o resumo das resistências mecânicas dos materiais utilizados e seus respectivos módulos de elasticidade obtidos a partir dos dados dos strain gauges. Além disso, apresentam-se as correlações entre as propriedades dos materiais avaliadas.

Tabela 33 – Resistências mecânicas e módulos de elasticidades das tipologias avaliadas através dos strain gauges

Material	TIPOLOGIA			
	PPM - T1	PPM - T2	PPV - T3	PPV T4
Resistência à compressão média do bloco na área líquida (MPa)	45,92	45,92	25,26	25,26
Resistência característica à compressão do bloco na área líquida (MPa)	40,35	40,35	22,28	22,28
Resistência média estimada da argamassa (MPa)	32,50	14,00	17,50	7,50
Resistência média à compressão do prisma na área líquida (MPa)	32,97	26,80	22,03	14,96
Resistência característica à compressão dos prismas (MPa)	27,92	22,85	17,37	12,47
Módulo de elasticidade inicial médio do bloco (GPa)	12,90	12,06	9,85	9,95
Módulo de elasticidade inicial médio da junta (GPa)	19,58	14,28	17,13	9,64
Relação $E_{\text{bloco}}/E_{\text{argamassa}}$	0,66	0,84	0,58	1,03
Relação $E_{\text{bloco}}/f_{\text{bk,liq}}$	0,32	0,30	0,44	0,45
Relação $E_{\text{bloco}}/f_{\text{pm,liq}}$	0,39	0,45	0,45	0,67
Relação $E_{\text{bloco}}/f_{\text{pk,liq}}$	0,46	0,53	0,57	0,80
Relação $E_{\text{junta}}/f_{\text{pm,liq}}$	0,59	0,53	0,78	0,64
Relação $E_{\text{junta}}/f_{\text{pk,liq}}$	0,70	0,62	0,99	0,77

Fonte: Elaboração própria.

5.5.1 Avaliação do modo de ruptura

A sequência de imagens descreve o avanço do processo de ruptura dos prismas PPV 9 – T3, PPV 10 – T3 e PPV 11 – T3 com relação $f_a/f_{\text{bm,liquida}} = 0,70$ avaliados através de imagens quadro a quadro e do gradiente de deformação fornecido através do DIC conforme apresentado nas Figuras 68 a 73. O avanço do modo de ruptura dos demais prismas são apresentados no Apêndice D.

Nas Figuras 71 e 72, apresentam-se respectivamente o avanço do processo de ruptura do prisma PPV 9 – T3 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação para ambas as direções (ϵ_y e ϵ_x).

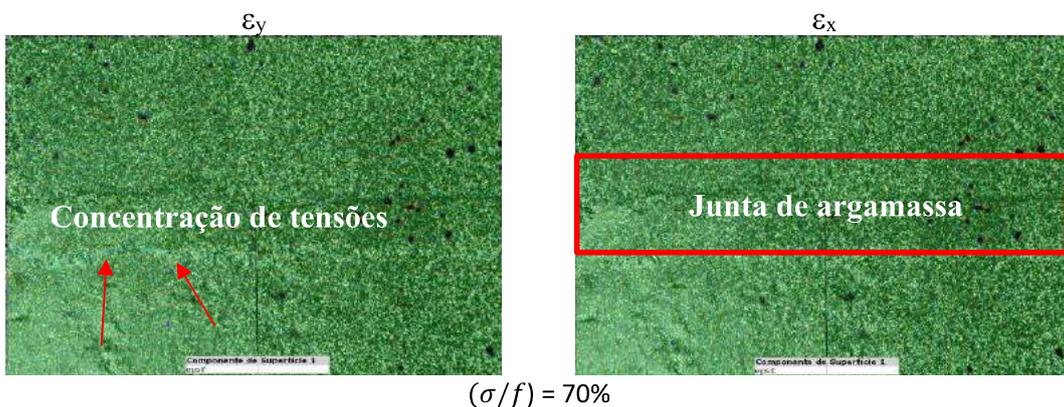
Figura 71 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 9 – T3 através da imagem quadro a quadro, parte frontal

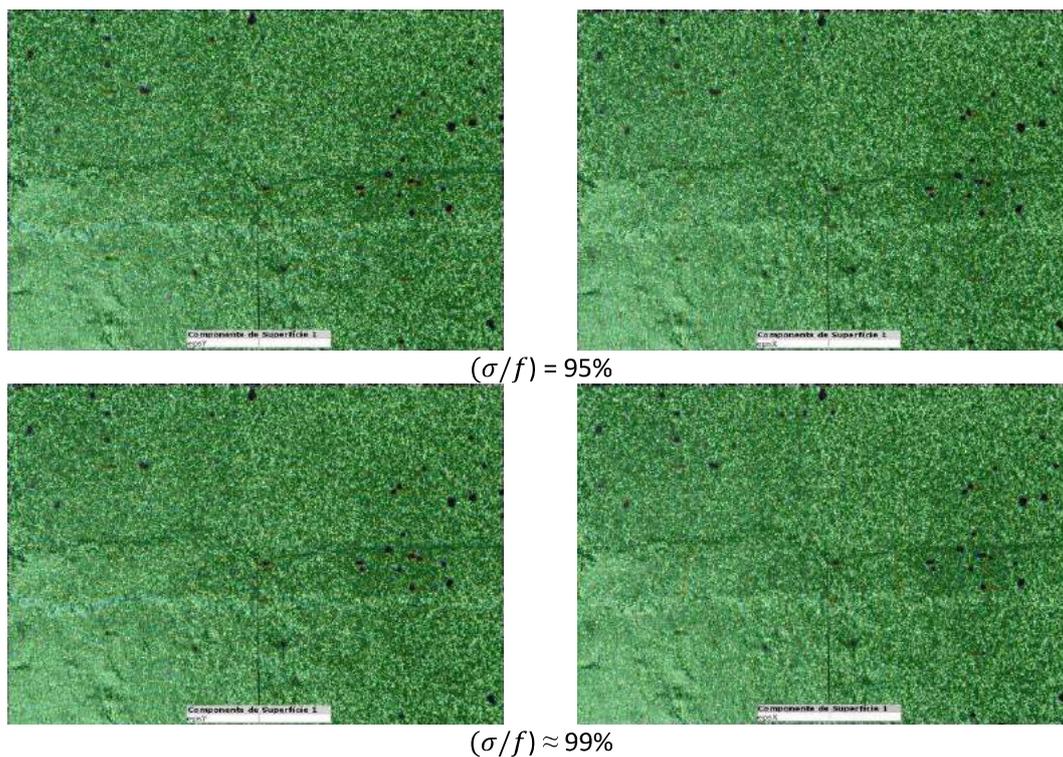


Fonte: Elaboração própria.

Usando somente as fotografias apresentadas na Figura 71, a identificação do surgimento de fissuras ou a verificação da concentração de tensões na região da junta de argamassa não foi possível ser detectada para níveis de tensão abaixo de 90% da tensão máxima quando realizada a avaliação quadro a quadro.

Figura 72 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV9 – T3 – DIC - Parte Frontal



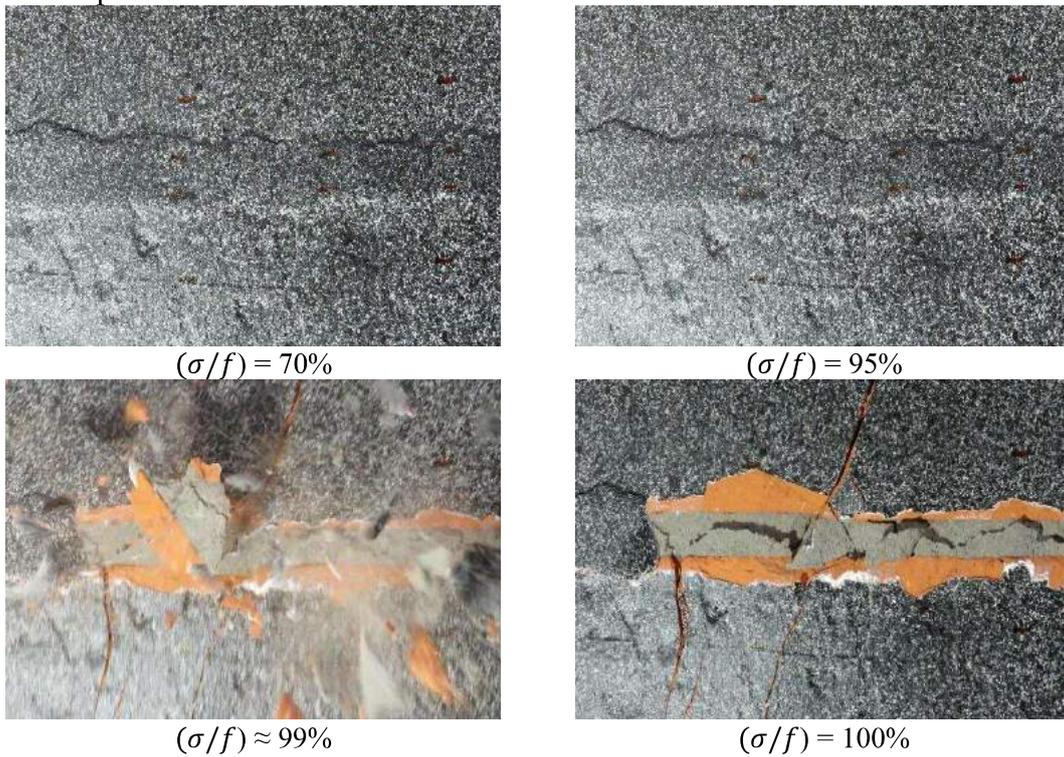


Fonte: Elaboração própria.

Usando os resultados do DIC, a verificação de concentração de tensões na região de ligação da junta com os blocos se dá em níveis de tensões a partir de 50% da carga última. Os materiais bloco-argamassa trabalham praticamente como um sistema monolítico, apresentando fissuras quando já próximo da ruptura que se dá de uma forma frágil e sem aviso. Não são apresentadas imagens para níveis de tensão anteriores na Figura 72, pois não foi possível detectar acúmulo de tensões ou propagação de fissuras nesses níveis. Para as outras análises, adotou-se a mesma lógica, de forma que se apresentou a partir do momento que se tornou possível visualizar concentração de tensões ou surgimento de fissuras.

Nas Figuras 73 e 74, apresentam-se respectivamente o avanço do processo de ruptura do prisma PPV 10 – T3 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pelo DIC para ambas as direções (ϵ_y e ϵ_x).

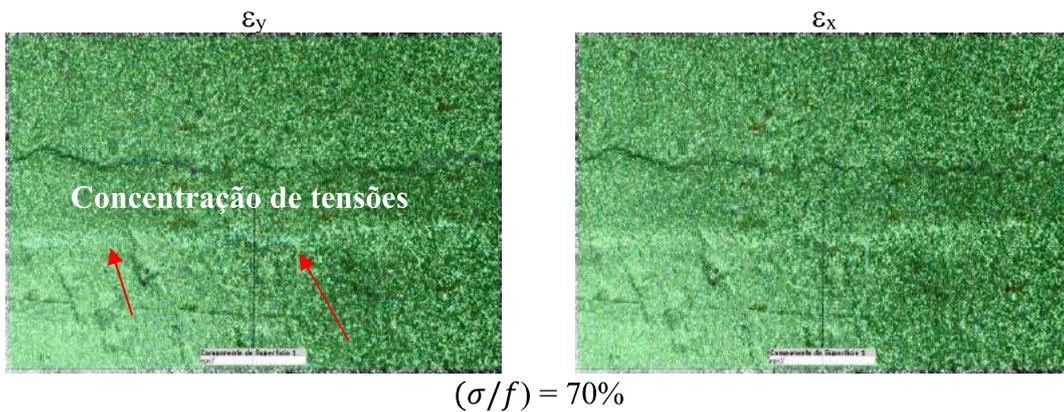
Figura 73 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 10 – T3 através da imagem quadro a quadro



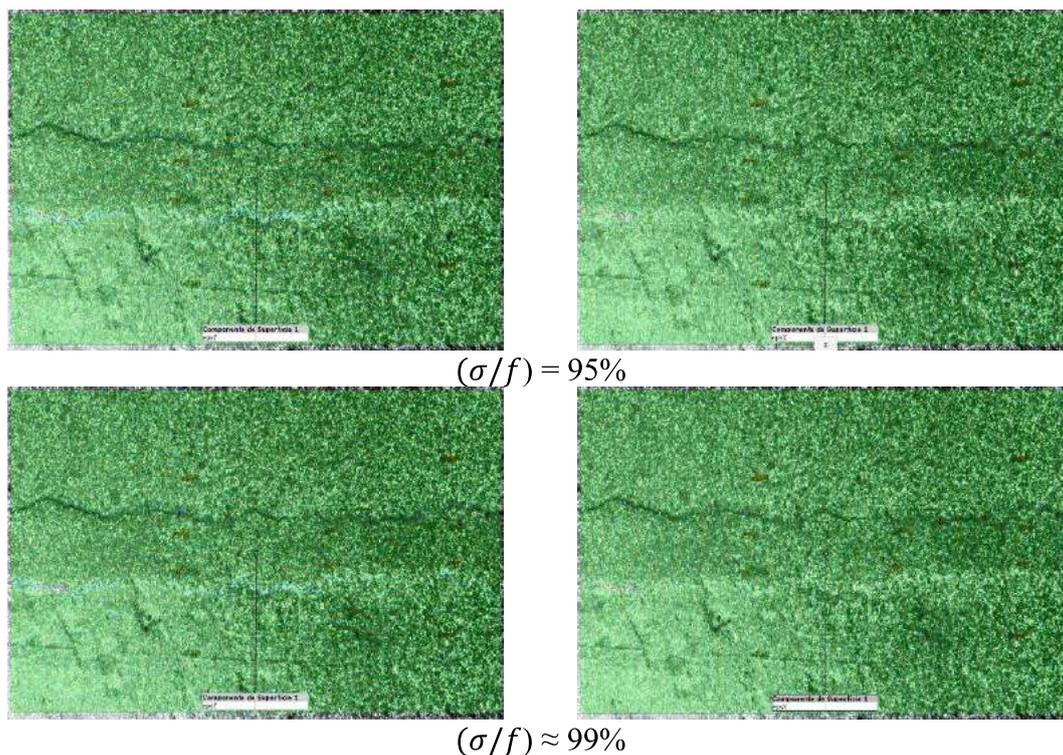
Fonte: Elaboração própria.

A ruptura ocorreu de forma explosiva e houve o desprendimento parcial dos blocos e da junta de argamassa, sem aviso prévio.

Figura 74 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV10 – T3 – DIC – Parte Traseira



$(\sigma/f) = 70\%$



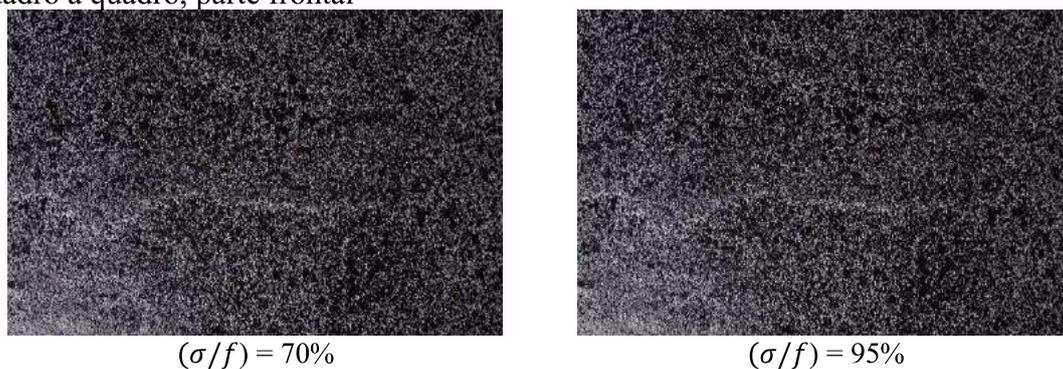
Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se pelos resultados do DIC, assim como constatado para o prisma PPV 9 – T3, a identificação de acúmulo de tensões na região da junta de argamassa, o que pode ser percebido através do gradiente de deformação na direção vertical (ϵ_y) a partir de 70% da tensão máxima de ruptura. Da mesma forma, houve ruptura abrupta do prisma, sem aviso.

Entretanto, quando realizada a análise do avanço do processo do modo de ruptura por imagem quadro a quadro, não foi possível perceber visualmente o avanço das fissuras ocorridas nos prismas para níveis anteriores a 90% da carga máxima de ruptura.

Nas Figuras 75 e 76, apresentam-se respectivamente o avanço do processo de ruptura do prisma PPV 11 – T3.

Figura 75 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 11 – T3 através da imagem quadro a quadro, parte frontal





$(\sigma/f) \approx 99\%$

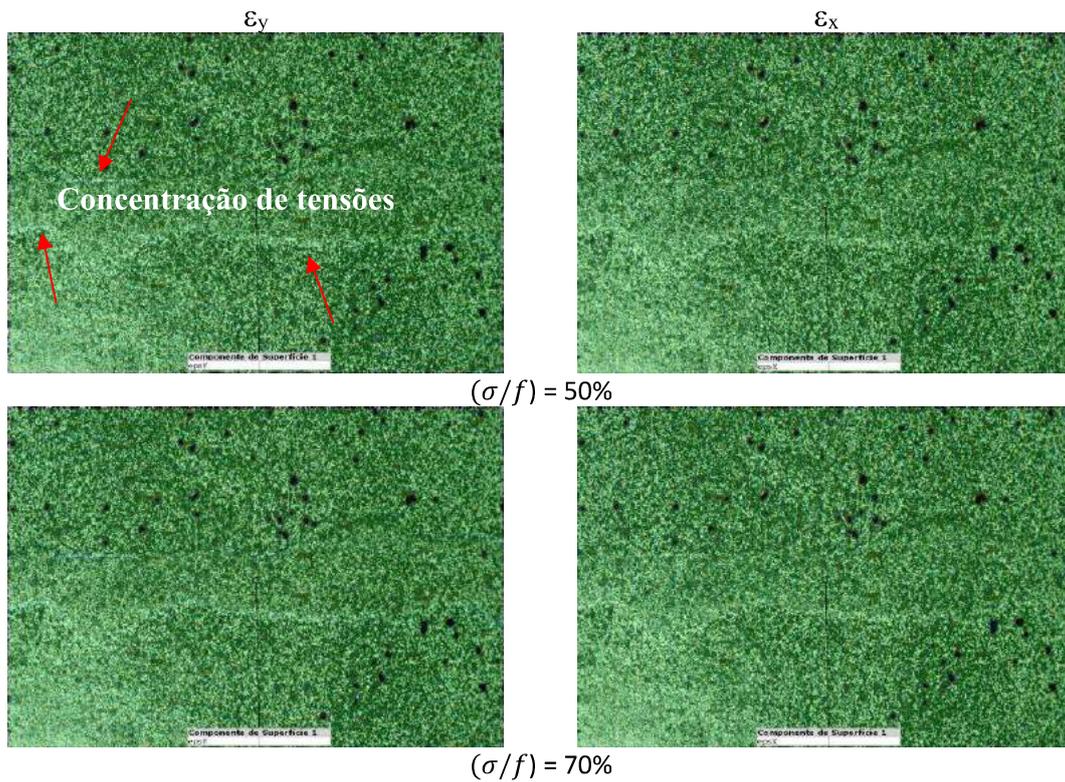
Fonte: Elaboração própria.

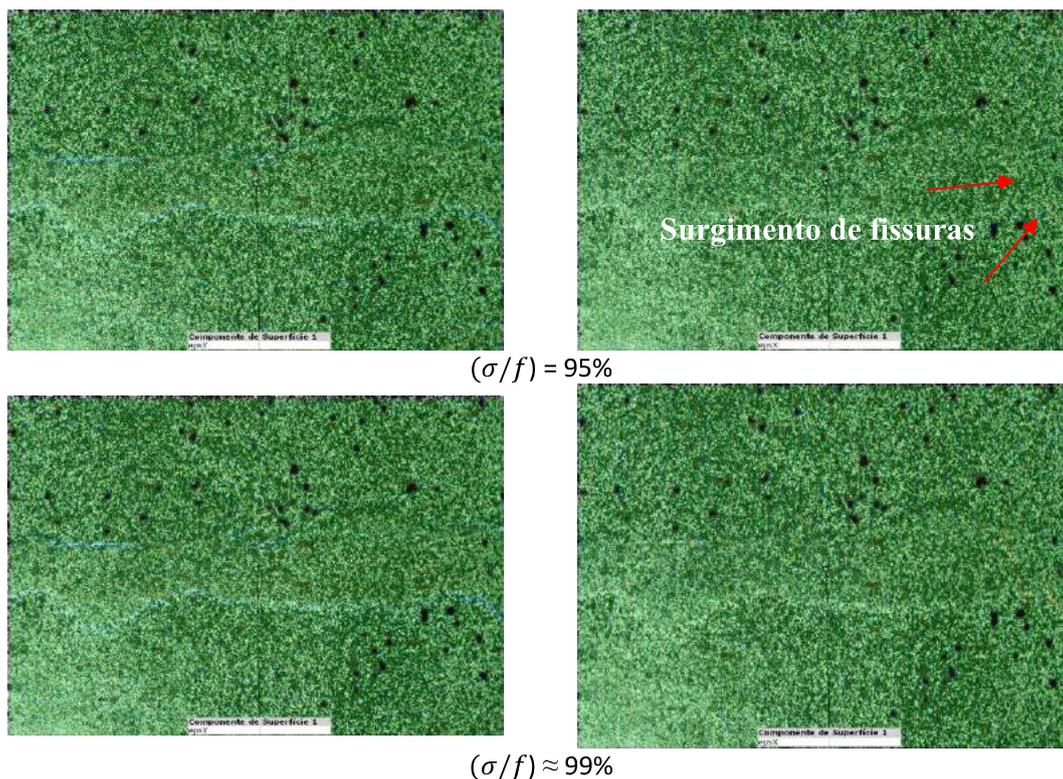


$(\sigma/f) = 100\%$

Essas fotografias mostram o avanço do processo de ruptura do prisma PPV 11 – T3; A ruptura ocorre de forma explosiva, sem aviso. Não foi possível identificar o aparecimento de fissuras ou concentração de tensões na região da junta de argamassa em níveis inferiores a 80% da tensão máxima de ruptura.

Figura 76 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV11 – T3 – DIC – Parte Frontal





Fonte: Elaboração própria.

Usando os resultados do DIC, percebe-se o aparecimento de concentração de tensões na região da argamassa, na ligação com os blocos, a partir de 50% da tensão máxima. Esse comportamento pode ser observado pela mudança de cor fornecido pelo gradiente de deformação no eixo y (ϵ_y) conforme ocorre o aumento da tensão atuante no prisma. O modo de ruptura ocorrido para essa tipologia deu-se de forma explosiva, sem aviso e sem identificação de fissuras em níveis de tensão abaixo de 80% da tensão máxima.

Diversos autores constataram que prismas de alvenaria não grauteados e moldados com argamassas com resistência à compressão com relações próximas ao limite de 70% da resistência do bloco na área líquida, apresentam ruptura por fissuras verticais nas paredes dos blocos quando submetidos à compressão axial (Barbosa, Lourenço e Hanai, 2010; Santos et al., 2017; Martins et al., 2018; Bolhassani et al., 2015).

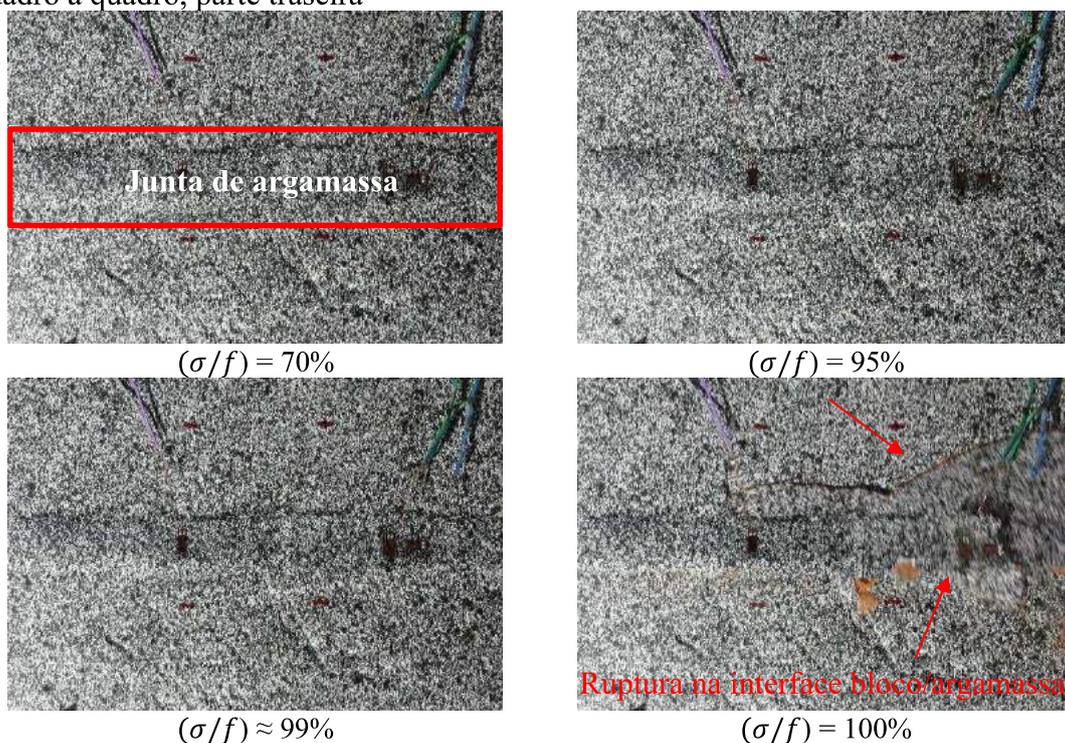
Diante disso, confirma-se que a resistência da argamassa não interfere apenas na resistência final dos prismas, mas também no modo de ruptura dos mesmos e na eficiência prisma-bloco. Observa-se que, para os prismas cerâmicos, tanto de paredes maciças quanto de paredes vazadas, conforme aumentou-se a resistência da argamassa da junta de assentamento, além de aumentar a resistência do prisma, mais abrupta foi a ruptura. Essa

característica já havia sido observadas por outros pesquisadores: De Marco, 2016; Lübeck, 2016; Alvarenga et al., 2017; Machado, 2019; Lübeck (2016) e Machado (2019).

O cenário de avanço de ruptura dos prismas cerâmicos PPV 5 – T4, PPV 7 – T4 e PPV 11 – T4 com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,30$, extraído através de imagem quadro a quadro e através do gradiente de deformação do DIC está apresentado nas Figuras 77 a 82. O avanço do modo de ruptura dos demais prismas que foram analisados através de imagem quadro a quadro e através da técnica DIC para essa tipologia estão apresentados no Apêndice D.

Nas Figuras 77 e 78, apresentam-se, respectivamente, o avanço do processo de ruptura do prisma PPV 5 – T4 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação para ambas as direções (ϵ_y e ϵ_x).

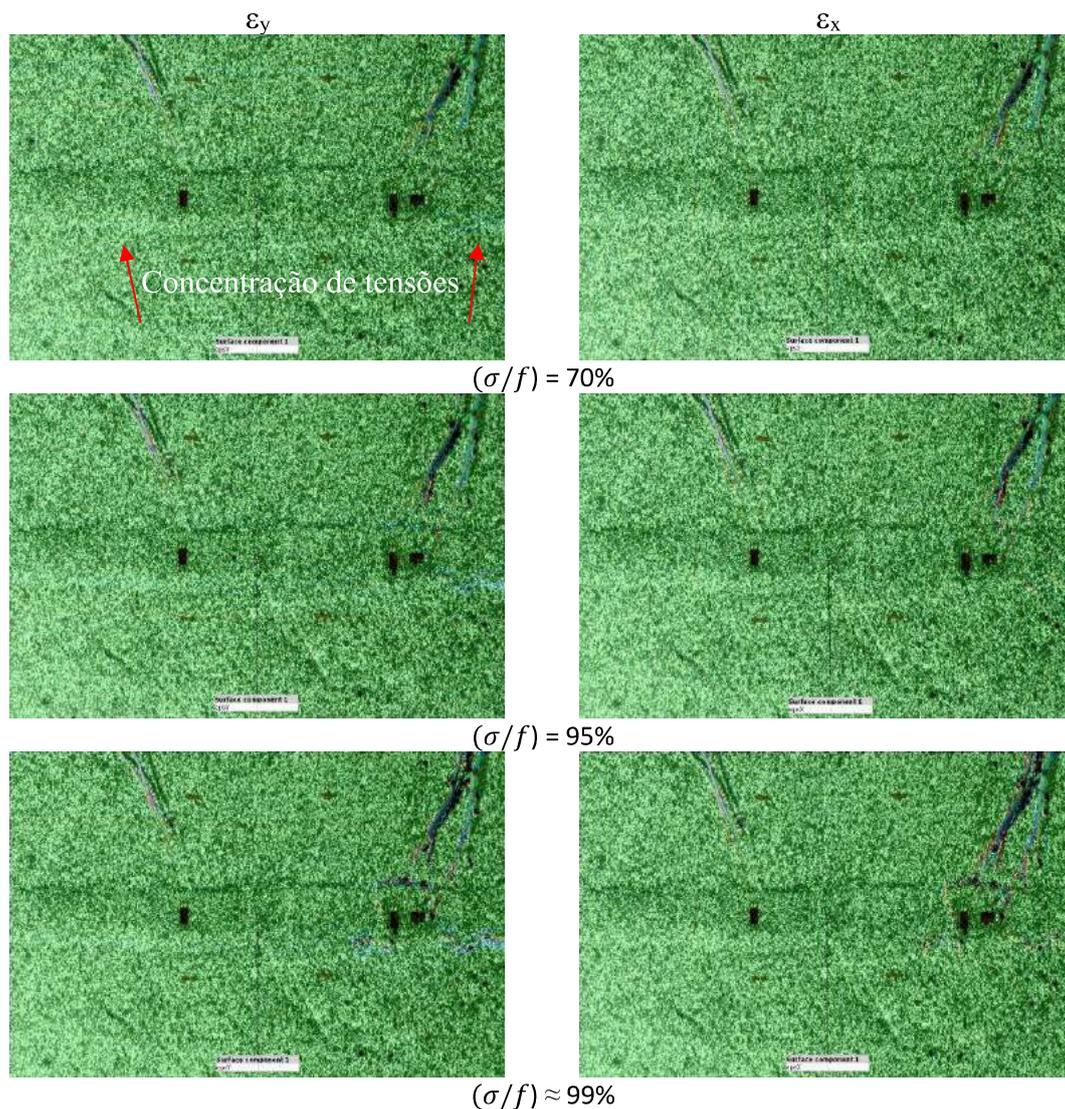
Figura 77 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 5 – T4 através da imagem quadro a quadro, parte traseira



Fonte: Elaboração própria.

Não é possível identificar surgimento de fissuras ou concentração de tensões em níveis abaixo de 90% da carga máxima de ruptura através da avaliação quadro a quadro.

Figura 78 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV5 – T4 – DIC – Parte Traseira

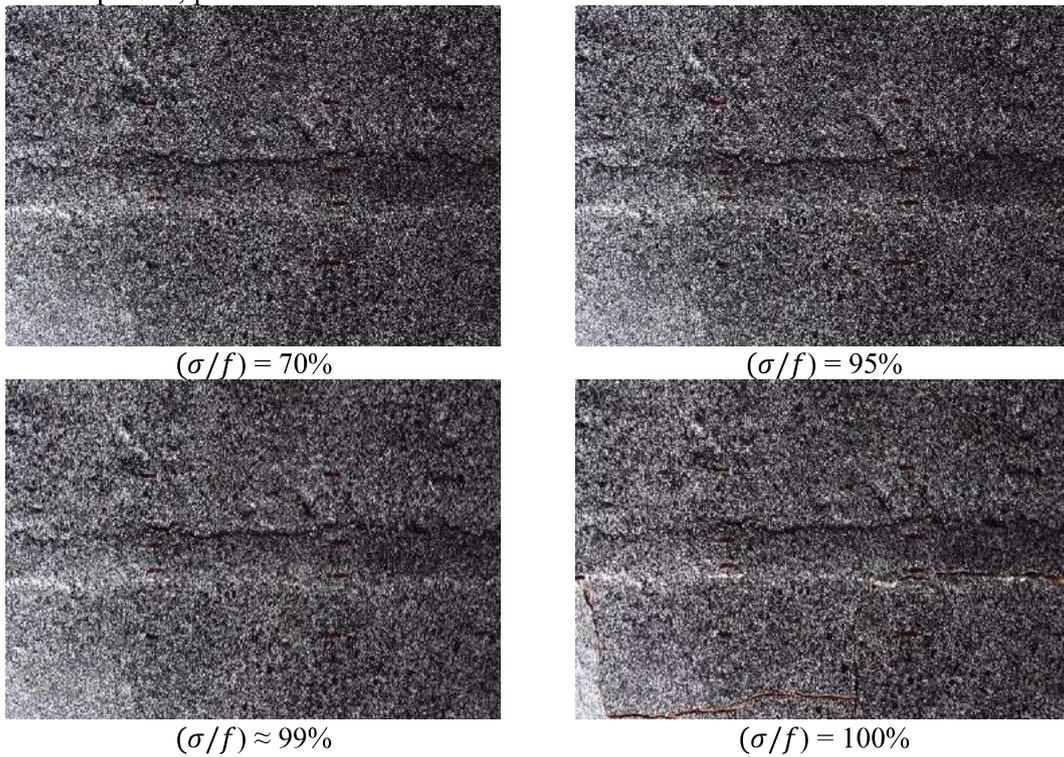


Fonte: Elaboração própria.

Usando os resultados do método DIC, é possível avaliar que na região da junta de argamassa ocorre concentração de tensões identificado a partir de 70% da tensão máxima medida que acabam desencadeando o processo de ruptura do prisma com a expulsão de lamelas da junta de argamassa. O panorama pós ruptura, apresentado na Figura 77, para um nível de tensão de aproximadamente 100%, demonstra que houve a destruição da estrutura porosa da argamassa e desvinculação parcial entre os blocos e a junta de argamassa.

Nas Figuras 79 e 80, apresentam-se, respectivamente, o avanço do processo de ruptura do prisma PPV 10 – T4.

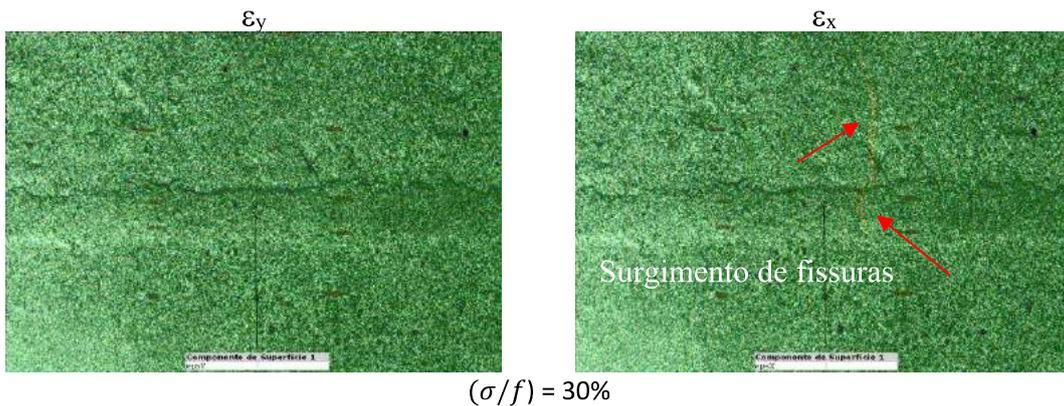
Figura 79 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 10 – T4 através da imagem quadro a quadro, parte frontal



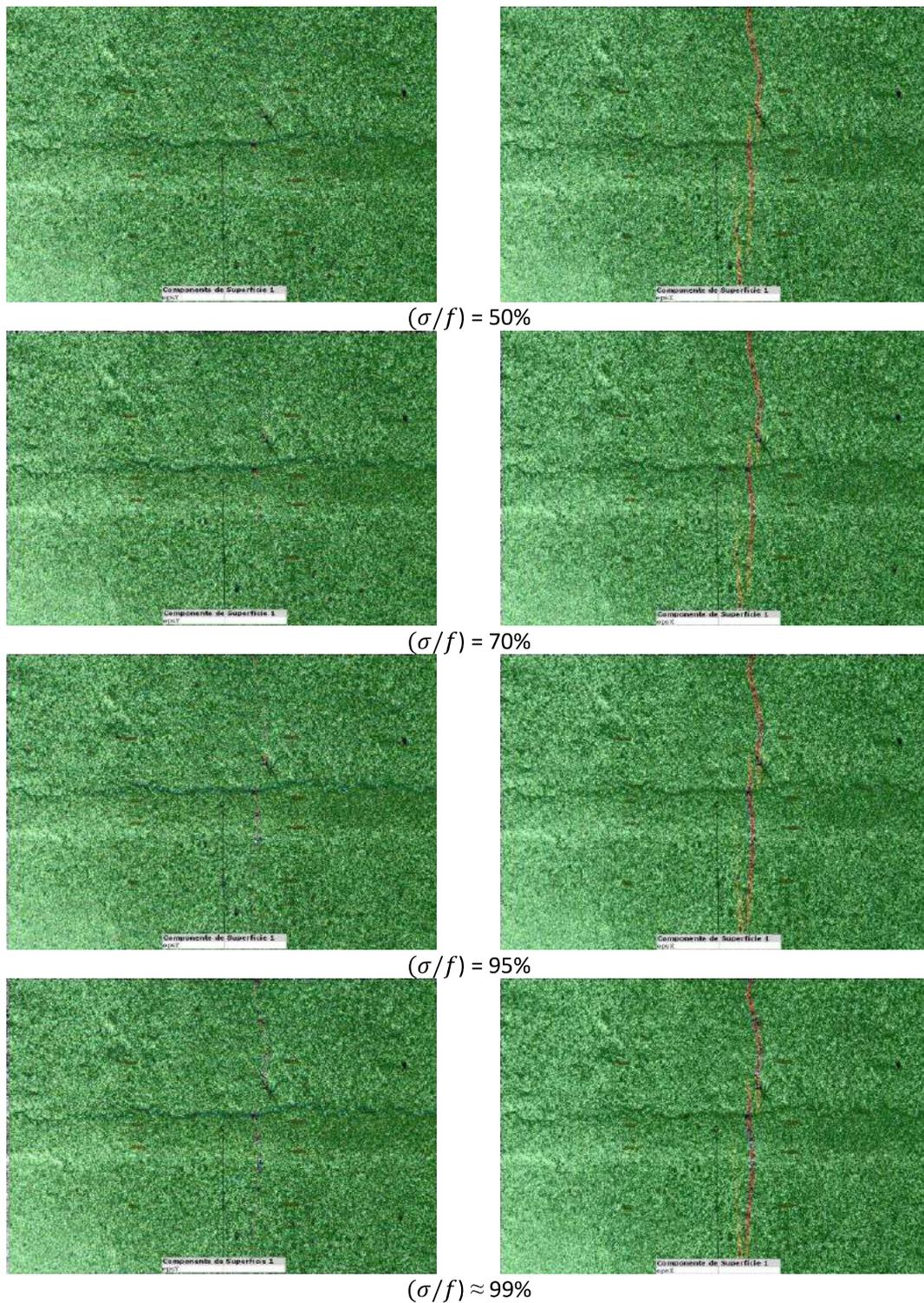
Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma que para os conjuntos anteriores avaliados para essa tipologia, através da avaliação quadro a quadro não foi possível avaliar a origem do processo que desencadeou a ruptura para o prisma antes de níveis de 90% da tensão máxima.

Figura 80 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV10 – T4 – DIC – Parte frontal



$(\sigma/f) = 30\%$



Fonte: Elaboração própria.

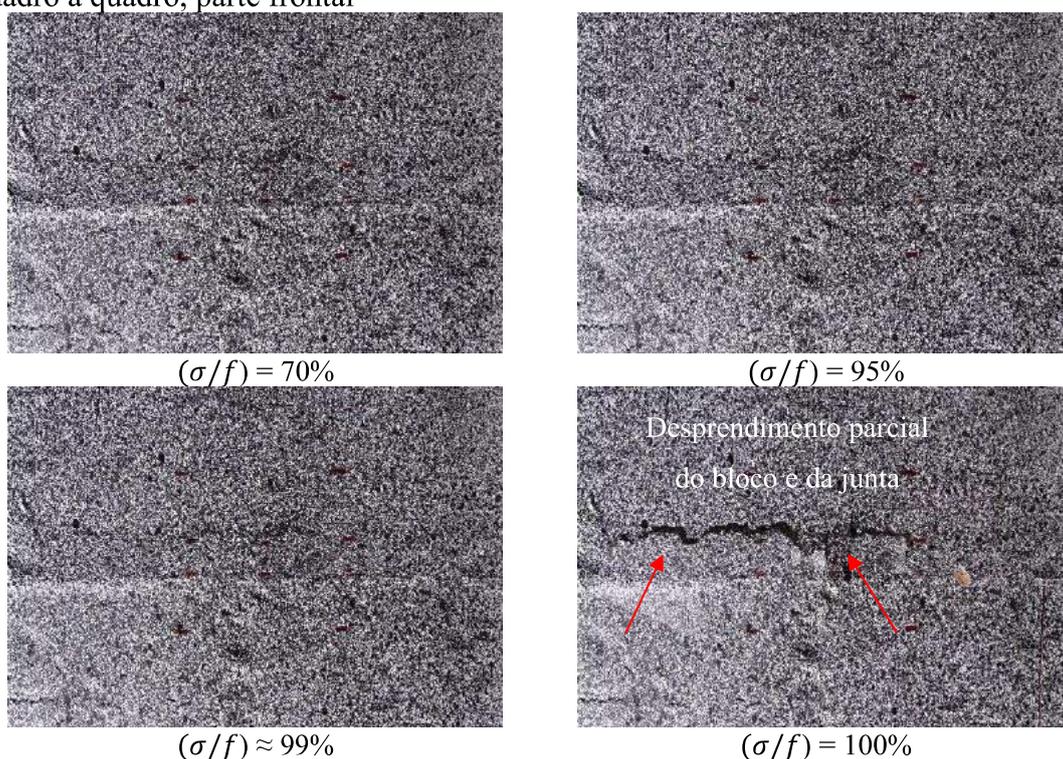
Usando os resultados do DIC, é possível constatar o aparecimento de fissuras no prisma a partir de 30% da tensão última de ruptura do mesmo, de uma forma mais intensa.

A mesma observação, perceptível pelo gradiente de deformação na direção horizontal (ϵ_x) através da técnica DIC, não foi possível ser detectada através da avaliação do avanço da ruptura quadro a quadro por se tratar de fissuras de pequenas dimensões,

praticamente invisíveis ao olho humano. Os resultados apresentados na Figura 79 mostram que houve a desvinculação parcial dos blocos e da junta de argamassa na ruptura, ocasionado pela destruição da estrutura porosa da argamassa.

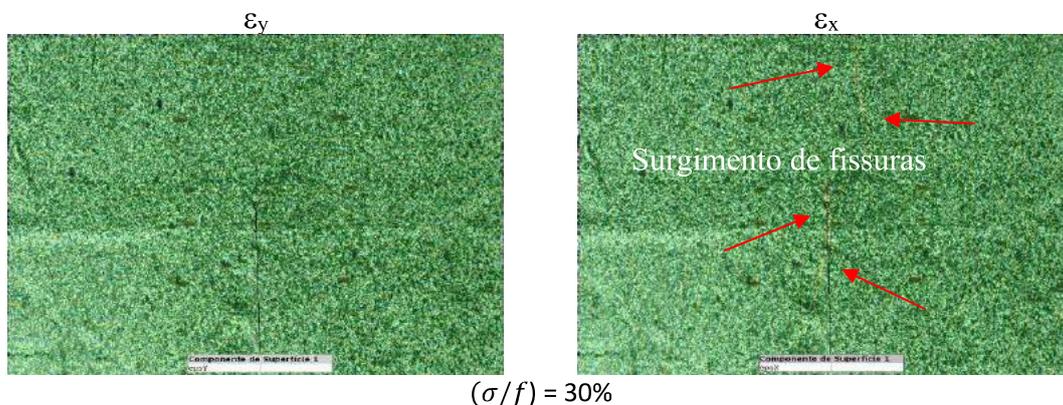
Nas Figuras 81 e 82, apresentam-se respectivamente o avanço do processo de ruptura do prisma PPV 11 – T4 através da avaliação quadro a quadro e através do gradiente de deformação fornecido pelo DIC para ambas as direções (ϵ_y e ϵ_x).

Figura 81 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV 11 – T4 através da imagem quadro a quadro, parte frontal

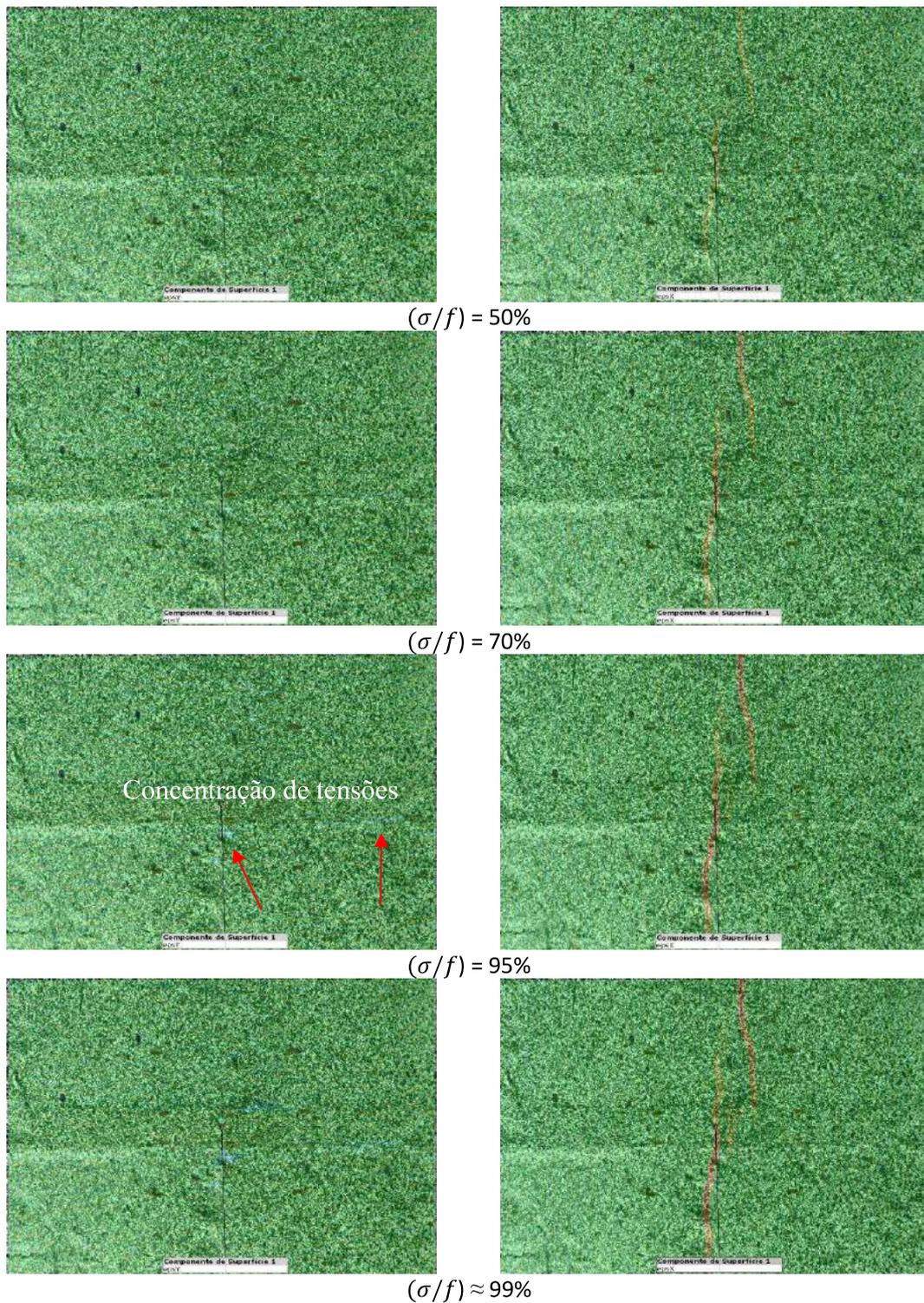


Fonte: Elaboração própria.

Figura 82 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV11 – T4 – DIC – Parte Frontal



$(\sigma/f) = 30\%$



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 82, representativa do avanço do modo de ruptura do prisma PPV 11 – T4 através da técnica DIC, mostra que o aparecimento de fissuras no prisma ocorre a partir de 50% da tensão última, de uma forma mais intensa. Tal observação só é possível através da técnica DIC, que se mostra ser uma ótima ferramenta para avaliação da propagação de fissuras nos materiais antes da ruptura. A mesma observação, perceptível

pelo gradiente de deformação na direção horizontal (ϵ_x) através do DIC, não foi possível ser detectada através da avaliação do avanço da ruptura quadro a quadro, por se tratar de fissuras de pequenas dimensões.

Observou-se que, diferentemente de prismas de blocos de concreto onde a argamassa, ao sofrer esmagamento, tende a quebrar a aderência bloco-argamassa, nos blocos cerâmicos a aderência é maior e o esmagamento da junta de argamassa força a ruptura do bloco (Lübeck, 2016). Assim, para prismas de blocos cerâmicos, o processo de esmagamento diminui o fator de eficiência da alvenaria.

De uma forma geral, para a tipologia PPV – T4, ocorreu um acúmulo de tensões na região da junta de argamassa que, por sua vez, ao sofrer esmagamento e provocar a destruição de sua estrutura, porosa induziu o aparecimento de fissuras nos blocos e na argamassa. O efeito em conjunto tornou-se responsável pelo modo de ruptura dos prismas avaliados para essa tipologia.

Um comportamento similar aos destacados por Mohamad et al. (2017) e Mohamad et al. (2015) foram observados para os prismas avaliados nas tipologias PPM – T2 e PPV – T4; Esmagamento da junta de argamassa devido a destruição de sua estrutura porosa e posteriormente o aparecimento de fissuras espalhadas pelo prisma.

Alvarenga et al. (2017), ao avaliar o comportamento mecânico de prismas cerâmicos, constataram que ao usar argamassa de menor resistência, os prismas avaliados não sofreram uma ruptura repentina, de forma que foi possível verificar o aparecimento de fissuras verticais nas paredes dos blocos antes da ruptura. Por outro lado, ao usar argamassa de maior resistência, os autores verificaram uma ruptura de forma abrupta e explosiva, uma vez que a argamassa rígida não tinha capacidade efetiva de suportar deformações adicionais.

5.6 FATOR DE EFICIÊNCIA MÉDIO

Avaliou-se a eficiência média para as tipologias estudadas, conforme Tabela 34.

Tabela 34 – Resistências médias (MPa) e eficiência prisma/bloco

Tipologia	Propriedades	Prisma Cerâmico de Parede Maciça	Prisma Cerâmico de Parede Vazada
$f_a/f_{bm,liquida} = 0,70$	Resistência característica do bloco na área líquida ($f_{bk, liq.}$)	40,35 MPa	22,28 MPa
	Resistência característica do prisma na área líquida ($f_{pk, liq.}$)	27,92 MPa	17,37 MPa
	Fator de eficiência ($f_{pk}/f_{bk, liq.}$)	0,69	0,78
	Modo de ruptura	Tração no bloco (rupturas explosivas)	Tração no bloco (rupturas explosivas)
$f_a/f_{bm,liquida} = 0,30$	Resistência característica do bloco na área líquida ($f_{bk, liq.}$)	40,35 MPa	22,28 MPa
	Resistência característica do prisma na área líquida (f_{pk})	22,85 MPa	12,47 MPa
	Fator de eficiência ($f_{pk}/f_{bk, liq.}$)	0,57	0,56
	Modo de ruptura	Esmagamento da junta e tração nos blocos (rupturas explosivas)	Esmagamento da junta e tração nos blocos (rupturas explosivas)

Fonte: Elaboração própria.

Para prismas de parede vazada moldados com argamassa com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,70$ e resistência estimada de 17,50 MPa, alcançou-se fatores de eficiência na ordem de 0,78. Lübeck (2016), ao avaliar a mesma tipologia de prisma com argamassa de 20,63 MPa, obteve um fator de eficiência de 0,73. Conforme os resultados, o aumento da resistência à compressão dos blocos causa aumento na resistência à compressão dos prismas, porém o fator de eficiência prisma-bloco diminui, uma vez que o acréscimo de resistência dos prismas não cresce na mesma proporção que o aumento da resistência dos blocos.

Portella (2015), ao avaliar o fator de eficiência prisma-bloco para prismas moldados com blocos estruturais cerâmicos de parede vazada com diferentes resistências, obteve um fator de eficiência médio de 54,7% para prismas com resistência à compressão média na área bruta entre 6,0 – 8,5 MPa. Os valores obtidos para as tipologias de prismas cerâmicos de parede vazada avaliadas neste estudo apresentaram valores de eficiência médio maiores que os encontrados por Portella (2015).

De lima (2010) obteve fatores de eficiência de até 91% para prismas cerâmicos moldados com dois blocos e argamassa de assentamento de 10mm e resistência próxima a 70% da resistência do bloco na área líquida. O autor constatou que o modo de ruptura dos prismas e o fator de eficiência são dependentes da resistência dos componentes do prisma e da espessura da junta de argamassa.

As argamassas de menores resistências, traço T2 e T4, tenderam a esmagar, induzindo a ruptura prematura dos prismas, e o fator de eficiência prisma-bloco foi relativamente menor para os conjuntos avaliados, onde identificou-se o esmagamento da argamassa.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar a curva tensão-deformação e o modo de ruptura de prismas cerâmicos comprimidos, variando o tipo de bloco estrutural, combinando-os com diferentes argamassas de assentamento. Este estudo foi realizado com dois diferentes tipos de blocos: cerâmicos de paredes maciças e cerâmicos de paredes vazadas. Cada tipo de bloco foi combinado com duas resistências de argamassa de assentamento produzidas em laboratório, sendo moldados 11 prismas de dois blocos de altura para cada tipologia avaliada com junta de argamassa aproximada de 10 mm.

A partir dos resultados e análises, foi possível concluir para esses ensaios que:

- Os dados obtidos através do DIC apresentaram proximidade com os dados obtidos através dos strain gauges para os blocos do conjunto dos prismas avaliados. Por outro lado, para as medidas tomadas na junta, houveram variações significativa creditadas a dificuldade de tomada de medidas através dos strain gauges no local da junta de assentamento. De modo geral, acredita-se que as medidas fornecidas através do DIC representam, de uma melhor forma, o comportamento geral da junta de argamassa em todas as tipologias avaliadas.
- Para os prismas da tipologia PPM – T1 executados com argamassa com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,70$ não foi possível verificar através das curvas médias tensão-deformação específica do conjunto bloco-argamassa uma perda da linearidade antes da ruptura, de forma que o material se comportou de forma homogênea, como um material monolítico. Para os prismas executados com argamassa com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,30$ há uma indicação da perda de linearidade da argamassa observada em alguns prismas em níveis da ordem de 40% a 50% da tensão máxima.
- Para os prismas da tipologia PPV - T3 executados com argamassa com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,70$ observou-se que a mudança do comportamento linear para não linear do conjunto ocorre em níveis de 70% a 80% da tensão máxima medida. Para os prismas executados com argamassa com relação $f_a/f_{bm,liquida} = 0,30$ há uma indicação da perda de linearidade da argamassa em níveis da ordem de 40% a 50%.
- As descontinuidades nas curvas tensão-deformação específica das argamassas estão relacionadas com a propagação de fissuras localizadas na região de ligação da junta de argamassa com os blocos, além da destruição da sua estrutura porosa

que ocorrem em níveis de tensão diferentes de acordo com a resistência dos materiais empregados. A ocorrência desses fenômenos está relacionada com o desencadeamento do processo de ruptura dos prismas.

- O formato do bloco, a relação área líquida-área bruta, bem como sua resistência à compressão exercem influência na forma que ocorre o desencadeamento do processo de ruptura dos prismas. Observou-se que para os prismas avaliados com blocos de parede maciça, houve desvinculação total dos blocos e da junta de argamassa, caracterizando uma ruptura explosiva e sem aviso prévio. Para os prismas executados com blocos de paredes vazada, observou-se desvinculação parcial dos blocos e da argamassa, com expulsão de partes lamelares da argamassa, também caracterizando ruptura explosiva e sem aviso prévio.
- Os resultados das análises através do gradiente de deformação obtidos pelo DIC indicam que há uma proporção ou limite entre as resistências da argamassa e resistência do bloco que resulta na mudança do desencadeamento do processo de ruptura da alvenaria comprimida. O limite é dependente do tipo de bloco utilizado, uma vez que o confinamento da argamassa depende da área de contato disponível e consequente confinamento. Dessa forma, alvenarias que são executadas com argamassas que resultem em proporções de resistência menores que esse limite, tendem a sofrer ruptura com esmagamento das juntas que induzem a fissuração nos blocos, enquanto que para argamassas de maiores resistências, a ruptura tende a ocorrer por tração no bloco, mas sem aviso prévio e identificação de fissuras.

O modo de ruptura para cada tipologia avaliada esteve correlacionado com o comportamento observado para a junta de argamassa e para os blocos em cada tipologia, com mais especificidade da seguinte forma:

- Para a tipologia PPM – T1 observou-se de forma geral, que o processo de ruptura se deu através da concentração de tensões na região de ligação entre a junta de argamassa e os blocos identificada em alguns poucos prismas a partir de 30% da carga última e para a maioria dos prismas avaliados a partir de 50% da tensão última, provocando posteriormente uma ruptura do tipo explosiva, com alta liberação de energia e sem aviso prévio. Não se observou o surgimento de fissuras no prisma para níveis de tensões abaixo de 70% da carga de ruptura, de forma que o prisma apresentou comportamento de um material monolítico.

- Para a tipologia PPM – T2 observou-se, de forma geral, que o processo de ruptura se deu através da concentração de tensões na região de ligação entre a junta de argamassa e os blocos a partir de 30% da tensão de ruptura que, por consequência, induziu o surgimento de fissuras a partir de 50% da carga máxima provocando posteriormente uma ruptura do tipo explosiva, com alta liberação de energia e sem aviso prévio.
- Para a tipologia PPV – T3 observou-se, de forma geral, que o processo de ruptura se deu através da concentração de tensões na região de ligação entre a junta de argamassa e os blocos a partir de 50% da carga última, provocando posteriormente uma ruptura do tipo explosiva, com alta liberação de energia e sem aviso prévio. Não se observou o surgimento de fissuras no prisma para níveis de tensões abaixo de 70% da tensão máxima, de forma que o prisma apresentou um comportamento monolítico.
- Para a tipologia PPV – T4 observou-se, de forma geral, que o processo de ruptura se deu através da concentração de tensões na região de ligação entre a junta de argamassa e os blocos a partir de 30% da tensão de ruptura que, por consequência induziu o surgimento de fissuras a partir de 50% da carga máxima provocando posteriormente uma ruptura do tipo explosiva, com alta liberação de energia e sem aviso prévio. O comportamento observado para essa tipologia com $f_a/f_{bm,liquida} = 0,30$ também foi similar ao comportamento observado para a tipologia PPM – T2 com $f_a/f_{bm,liquida} = 0,30$.
- Argamassas de alta resistência causam rupturas explosivas nos prismas, com alta liberação de energia e sem aviso prévio.
- Verificou-se que a técnica DIC é apropriada para realizar medições também para alvenaria, além de ser possível realizar o mapeamento e surgimento de fissuras muito antes da avaliação visual ou quadro a quadro, sendo possível dessa forma descrever de forma mais apurada o modo de ruptura do material.

Observou-se de forma geral que quanto maior a resistência média à compressão da argamassa, maior é a tensão de compressão do início da não linearidade da curva tensão-deformação específica e maior é a tensão de início do esmagamento da junta do prisma.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das observações verificadas neste trabalho, é possível propor algumas sugestões para estudos futuros, complementando as conclusões realizadas.

- (a) Dar continuidade a esta pesquisa utilizando-se outras proporções de resistências de argamassa pela área líquida do bloco, prismas de três blocos de altura e pequenas paredes.
- (b) Ensaiai prismas à compressão, com foco na questão da perda de aderência entre os componentes bloco-argamassa.
- (c) Realizar a análise via método dos elementos finitos dos prismas de alvenaria considerando a não linearidade física dos materiais e compará-los com os resultados experimentais apresentados nesse trabalho.
- (d) Avaliar o comportamento da curva tensão-deformação específica de corpos de prova de argamassa através da técnica DIC.
- (e) Avaliar deslocamentos e deformações em superfícies de peças estruturais de concreto armado submetidas a diferentes esforços.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

_ **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

_ **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017. 26 p.

_ **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

_ **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

_ **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

_ **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 13 p.

_ **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro 2005. 2 p.

_ **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

_ **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos e tijolos para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017. 32 p.

_ **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos. Parte 2: Blocos e tijolos para alvenaria - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017. 35 p.

_ **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008. 8 p.

_ **NBR 15812-1**: Alvenaria Estrutural - Blocos Cerâmicos. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010. 41 p.

_ **NBR 15812-2**: Alvenaria Estrutural - Blocos Cerâmicos. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010. 28 p.

_ **NBR 15812-3**: Alvenaria Estrutural - Blocos Cerâmicos. Parte 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017. 34 p.

_ **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

_ **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

_ **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Norma do Mercosul. 2000. 5 p.

_ **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Norma do Mercosul. 2009. 6 p.

ABHAE, S. **Investigation Of Fiber-Reinforced Concrete Crack Width Measurement By Finite Element Method**. (Mestrado em Engenharia Civil). The University Of Texas At Arlington, dezembro 2016.

ACI. American Concrete Institute. **ACI 530-01**: Specification for Masonry Structures. Farmington Hills, EUA, 2002. 24 p.

_ **ACI 530-05**: Building Code Requirements for Masonry Structures. Farmington Hills, EUA, 2005. 158 p.

AFSHARI, F.; KALDJIAN M. J. Finite element analysis of concrete masonry prisms. American Concrete Institute – **ACI Materials Journal**, v. 86, n. 5, p. 525-530, 1989.

ALVARENGA, R. C. S. S.; NALON, G. H.; FIORESI, L. A. F.; PINTO, M. C.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. Experimental Evaluation of the Influence of Mortar's Mechanical Properties on the Behavior of Clay Masonry. **Characterization of Minerals, Metals, and Materials**, p. 671-679. 2017.

ASTM. American Society for Testin and Materials. **ASTM C 270-07**: Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. West Conshohocken, EUA, 2007. 13 p.

_ **ASTM C 1314**: Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms. West Conshohocken, EUA, 2014. 10 p.

ATKINSON, R. H.; NOLAND, J. L.; ABRAMS, D. P. A deformation failure theory for stack-bond brick masonry prism in compression. In: **International Brick Masonry Conference**, 7, 1985, Melbourne, Proceedings. v. 1, Melbourne: IBMAC, 1985. p. 577-592.

AYDIN, M.; WU, X.; CETINKAYA, K.; YASAR, M.; KADI, I. Application of Digital Image Correlation technique to Erichsen Cupping Test. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 21, n. 4, p. 760-768, aug. 2018.

BARBOSA, C. S.; HANAI, J. B. Comportamento de prismas de blocos vazados de concreto sob compressão axial e análise das propriedades mecânicas de seus materiais constituintes. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 11, n. 50, p. 75-90, 2009.

BARBOSA, C. S.; HANAI, J. B.; LOURENÇO, P. B.; MOHAMAD, G. Influência da perda de água e das tensões confinantes nas propriedades físicas e mecânicas da argamassa de assentamento para alvenaria estrutural. In: **Anais do IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Belo Horizonte, MG. Maio, 2011.

BARBOSA, C. S.; LOURENÇO, P. B.; HANAI, J. B. On the compressive strength prediction for concrete masonry prisms. **Materials and Structures**, v. 43, n. 3, p. 331-344. 2010.

BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. 2017.

BERTELSEN, I.M.G.; KRAGH, C.; CARDINAUD, G.; OTTOSEN, L.M.; FISCHER, G. Quantification of plastic shrinkage cracking in mortars using digital image correlation. **Cement and Concrete Research**, v. 123, 2019.

BOLHASSANI, M.; HAMID, A. A.; LAU, A. C. W.; MOON, F. Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages, **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 159–173, 2015.

BOSHOFF, W. P.; ALTMANN, F.; ADENDORFF, C. J.; MECHTCHERINE, V. A new approach for modelling the ingress of deleterious materials in cracked strain hardening cement-based composites. **Materials and Structures**, v. 49, n. 6, p. 2285-2295, 2016.

BS. BRITISH STANDARD. **BS 5628-1**: Code of practice for use of masonry - Part 1: Structural use of unreinforced masonry. Londres, 2005. 64 p.

_ **BS 5628-3**: Code of practice for use of masonry - Part 3: Materials and components, design and workmanship. Londres, 2005. 116 p.

_ **BS 4551**: Methods of test for mortar and screed. Chemical analysis and physical testing. Londres, 2005. 42 p.

CALDEIRA, F. E. **Avaliação da influência das propriedades da argamassa de assentamento na rigidez e resistência da alvenaria estrutural**. 2018. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Organizador e Editor). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, v. 2. Instituto Brasileiro do Concreto - Ibracon, São Paulo. 2010.

CASALI, J. M.; OLIVEIRA, A. L.; SAKAMOTO, C.; SCHANKOSKI, R.; PRUDÊNCIO JR, L. R. **The effect of mortar bedding type and hollow concrete block geometry on the mechanical behavior of high-strength structural masonry.** 15th International Brick and Block Masonry Conference, Florianopolis, Brazil. 2012.

CASSINELLO, M. J. Effect of mortar joint thickness on deformability in medieval stone walls, **Materiales de Construcción**, v. 56, n. 284, p. 69-80, 2006.

CRAMMOND, G. S. W.; BOYD, J. M.; BARTON, D. Evaluating the localised through-thickness load transfer and damage initiation in a composite joint using digital image correlation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 61, p. 224–234, 2014.

DE LIMA, A. N. **Análise experimental da influência da resistência e espessura da argamassa de assentamento no desempenho mecânico de prismas de blocos cerâmicos.** 2010. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2010.

DE MARCO, C. E. G. **Avaliação Mecânica de Prismas Preenchidos com Argamassa/Graute à compressão.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

EUROCODE 6. **EN 1052-1: Methods of test for masonry - Part 1: Determination of compressive strength.** Bruxelas, 1999. 11 p.

EN 1996-1-1: Design of masonry structures - Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Bruxelas, 2002. 131 p.

FELIPE-SESÉ, L.; SIEGMANN, P.; DÍAZ, F. A.; PATTERSON, E. A. **Integrating fringe projection and digital image correlation for high-quality measurements of shape changes.** *Optical Engineering*, v. 53, no. 4, p. 44106, 2014.

FONSECA, F. S.; MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R.; VERMELTFOORT, A. T. Deformation And Failure Mode Of Masonry. **In.: Proceedings of 12th North American Masonry Conference.** Denver, Colorado. 2015.

FORTES, Ernesto Silva; PARSEKIAN, Guilherme A.; FONSECA, Fernando S. Relationship between the compressive strength of concrete masonry and the compressive strength of concrete masonry units. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 9, p. 04014238. 2014.

FORTES, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; CAMACHO, J. S.; FONSECA, F. S. Resistência à compressão da alvenaria estrutural com blocos de concreto de alta resistência. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 6, p.1273-1319, Dez. 2017.

FRANCIS, A.J.; HORMAN, C.B.; JERREMS, L. E. The effect of joint thickness and other factors on the compressive strength of brickwork. In: **2nd Int. Brick Masonry Conf., British Ceramic Association**, 1972.

GAMS, M.; TOMAŽEVIČ, M. Experimental simulation of seismic response of masonry Walls. In: **15th World Conference on Earthquake**, WCEE. Lisbon, Portugal, 2012.

GENCTURK, B.; HOSSAIN, K.; KAPADIA, A.; LABIB, E.; MO, Y.-L. Use of digital image correlation technique in full-scale testing of prestressed concrete structures. **Measurement**, v. 47, p. 505-514, 2014.

GHEITASI, A.; HARRIS, D. K.; HANSEN, M. An Experimental-Computational Correlated Study for Describing the Failure Characteristics of Concrete across Two Scale Levels: Mixture and Structural Component. **Experimental Mechanics**, v. 58, p. 11-32, 2018.

GHORBANI, R.; MATTA, F.; SUTTON, M.A. Full-Field Deformation Measurement and Crack Mapping on Confined Masonry Walls Using Digital Image Correlation. **Society for Experimental Mechanics**, v. 55, n.1, p. 227-243, Maio, 2014.

GUERRERO, N.; MARTÍNEZ, M.; PICÓN R.; MARANTE M. E.; HILD F.; ROUX S.; FLÓREZ-LÓPEZ J. Experimental analysis of masonry infilled frames using digital image correlation. **Materials and Structures**, v. 47, p. 873-884, 2014.

HAACH, V. G.; VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B. Assessment of Compressive Behavior of Concrete Masonry Prisms Partially Filled by General Mortar. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 10, 2014.

HAYEN, R.; SCHUEREMANS, L.; VAN BALEN, K.; VAN GEMERT, D. Triaxial testing of historic masonry, test set-up and first results. In: **Structural Studies, repairs and maintenance of historical buildings**, VII, Ed. C.A. Brebbia, Wit Press, Southampton. p. 151-160. 2001.

HAYEN, R.; VAN BALEN, K., VAN GEMERT, D. The mechanical behaviour of mortars in triaxial compression. In: **Proceedings of the 6th International Conference on Materials Science and Restoration**, Karlsruhe, p. 295-302. 2003.

HEDAN, S. et al. One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, Oxford, v. 68, p. 22-35, 2014.

HEINZ, S. R.; WIGGINS, J. S. Uniaxial compression analysis of glassy polymer networks using digital image correlation. **Polymer Testing**, v. 29, n. 8, p. 925-932, 2010.

KAUSHIK, H. B.; RAI, D. C.; JAIN, S. K. Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 9, p. 728-739, 2007.

KOHEES, M.; SANJAYAN, J.; RAJEEV, P. Stress-strain relationship of cement mortar under triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 456-463, 2019.

KHOO, C.-L. **A failure criterion for brickwork in axial compression**. Tese de doutorado. University of Edinburgh, Edinburgo, Escócia, 1972.

KUMAR, S. H.; ARAVIND, H. B.; HOSSINEY, N. Digital image correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program. **Results in Engineering**, 2019.

LECOMPTE, D., SMITS, A., BOSSUYT, S., SOL, H., VANTOMME, J., VAN HEMELRIJCK, D., HABRAKEN, A. M. (2006). **Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation**. Optics and Lasers in Engineering, vol 44, no. 11, p. 1132–1145. 2006.

LIMA, F. B.; LIMA, A. N.; ASSIS, W. S. Study of the influence of compressive strength and thickness of capping-mortar on compressive strength of prisms of structural clay blocks. In: **15th International Brick and Block Masonry Conference**, Florianópolis, Brazil, 2012.

LÜBECK, A. **Comportamento mecânico e influência da argamassa no modo de ruptura da alvenaria estrutural**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

MACHADO, J. F. **Análise do modo de ruptura e previsão de resistência à compressão de prismas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MARQUES, A. I.; MORAIS, J.; MORAIS, P.; VEIGA, M. R.; SANTOS, C.; CANDEIAS, P.; FERREIRA, J. G. Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. **Construction and Building Materials**, v. 232, 2020.

MARTINS, R. O. G.; NALON G. H.; ALVARENGA, R. DE C. S. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms. **Construction and Building Materials**, v.182, p. 233-241, 2018.

MARUYAMA I.; SASANO, H. LIN, M. Impact of aggregate properties on the development of shrinkage-induced cracking in concrete under restraint conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 82-101, 2016.

MAUROUX, T.; BENBOUDJEMA, F.; TURCRY, P. AÏT-MOKHTAR, A.; DEVES, O. Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 7, p. 1014-1023, 2012.

McNARY, W. S.; ABRAMS, D. P. Mechanics of Masonry in Compression. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, n. 4, p. 857-870, 1985.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS, D. R. W.; LOURENÇO P. B. Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 489-496, 2017.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R.; BARBOSA, C. S.; RIZZATTI, E. Stress-strain behavior of concrete block masonry prisms under compression. **Proceedings of 15th International Brick and Block Masonry Conference**, Florianópolis, Brazil, 2012.

MOHAMAD, G. **Mechanism failure of concrete block masonry under compression**. Tese de doutorado. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.

MOHAMAD, G. (Coordenador). **Alvenaria estrutural**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo. 2013.

MOHAMAD, G.; RIZZATTI, E.; ROMAN, H. R. Propriedades da alvenaria estrutural e de seus componentes. In: MOHAMAD, G. (Coordenador). **Alvenaria estrutural**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo. 2013.

MOHAMAD, G. (Coordenador). **Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho**. Ed. Blucher, São Paulo. 2015.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. Propriedades mecânicas das argamassas sob compressão triaxial – análise e previsão. **XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural**. Trabalho JOR0001 – p. 2954-2963. Maio, 2006.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; ROMAN, H. R.; VERMELTFOORT, A. T.; RIZZATTI, E. Behavior of Mortar Under Multi-Axial Stress. In.: **Proceedings of 12th North American Masonry Conference**. Denver, Colorado. 2015.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS, D. R. W.; LÜBECK, A. Perda de rigidez da argamassa de assentamento da alvenaria comprimida: resultados preliminares. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, N. 7, p. 279-295, 2018.

MOJSILOVIĆ, N.; SALMANPOUR, A.H. Masonry walls subjected to in-plane cyclic loading: application of digital image correlation for deformation field measurement. **International Journal of Masonry Research and Innovation**, v. 1, n. 2, p. 165–187, 2016.

MOREIRA, P. G. M. O. **Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação Digital de Imagem para Avaliação de Grandes Deformações**. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Julho 2015.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. J. C.; BARBOSA, F. R.; CARVALHO, J. R. de. Influência da espessura da argamassa de assentamento na resistência à compressão axial de prismas de blocos cerâmicos. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto**, Maceió, v. 1, n. 1, p.1-10, out. 2012.

NALON, G. H.; SANTOS, C. F. R.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; VERÍSSIMO, G. DE S.; FERREIRA, F. A. Strength and failure mechanisms of masonry prisms under compression, flexure and shear: Components' mechanical properties as design constraints. **Journal of Building Engineering**, v. 28, 2020.

NASCIMENTO, M. R.; RAUPP-PEREIRA, F.; ROMAN, H. R. Estudo da influência da geometria de blocos cerâmicos na resistência mecânica de alvenaria estrutural. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Canela, RS. 2010.

ÖZHAN, H.; CAGATAY, I. Mechanical behavior of brick masonry panels under uniaxial compression. **Journal of Mechanics of Materials and Structures**, v. 9, n. 4, p. 385–395. 2014.

PAEGLE, I.; MINELLI, F., FISCHER, G. Cracking and load-deformation behavior of fiber reinforced concrete: Influence of testing method. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 147-163, 2016.

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

PARSEKIAN, G. A.; SOARES, M. M. **Alvenaria Estrutural em Blocos Cerâmicos: Projeto, Execução e Controle**. Ed. O Nome da Rosa. São Paulo. 2010.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. Ed. Edufscar, São Carlos. 2012.

PETERS, W. H.; RANSON, W. F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. **Optical Engineering**, v. 21, n. 3, p. 427-431. Maio/Junho 1982.

PETERS, W. H.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A.; CHU, T. C.; ANDERSON, J. Application Of Digital Correlation Methods To Rigid Body Mechanics. **Optical Engineering**, v. 22, n. 6, 232-244, 1983.

PORTELLA, R. P. **Fator de eficiência da resistência prisma/bloco cerâmico de paredes vazadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Ed. Pini, São Paulo. 2003.

RAMOS, T.; BRAGA, D. F. O.; ESLAMI, S.; TAVARES, P. J.; MOREIRA, P. M. G. P. Comparison between Finite Element Method Simulation, Digital Image Correlation and Strain Gauges Measurements in a 3-Point Bending Flexural Test. **Procedia Engineering**, v. 114, p. 232-239, 2015.

RAO, K. V. M.; REDDY, B. V. V.; JAGADISH, K. S. Flexural bond strength of masonry using various blocks and mortars. *Materials and Structures*, v. 29, n. 2, p. 119–124, 1996.

REDDY, B. V. V.; LAL, R.; RAO, K. S. N. Influence of joint thickness and mortar-block elastic properties on the strength and stresses developed in soil-cement block masonry. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 10, p. 535-542, 2009.

RIZZATTI, E. **Influência da geometria do bloco cerâmico no desempenho mecânico da alvenaria estrutural sob compressão**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SANTANA, J. F. de A.; DE ARAÚJO, T. D. P. Avaliação numérica de prismas de blocos maciços de concreto para a alvenaria estrutural. **XXXVIII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. Florianópolis, 2017.

SANTOS, A. H. A.; PITANGUEIRA, R. L. S.; RIBEIRO, G. O.; CARRASCO, E. V. M. Concrete modulus of elasticity assessment using digital image correlation. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 4, p. 587–594, 2016.

SANTOS, C. F. R.; ALVARENGA, R. C. S. S.; RIBEIRO, J. C. L.; CASTRO, L. O.; SILVA, R. M.; SANTOS, A. A. R.; NALON, G. H. Numerical and experimental evaluation of masonry prisms by finite element method. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 2, p.477–508. 2017.

SANTOS, M. J. F. **Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SARANGAPANI, G.; REDDY, B. V. V.; JAGADISH, K. S. Brick-mortar bond and masonry compressive strength. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 17, n. 2, p. 229-237, 2005.

SARHAT, S. R.; SHERWOOD, E. G. The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry. **Construction and Building Materials**, v. 58, p. 111–121, 2014.

SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO Jr., L. R.; PILAR, R. Influência do tipo de argamassa e suas propriedades do estado fresco nas propriedades mecânicas de alvenarias

estruturais de blocos de concreto para edifícios altos. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 1008-1023, 2015.

SCHOSSLER, R. T. **Deformações e modo de ruptura em prismas de blocos de concreto: análise experimental com extensometria e correlação de imagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

SHARMA, N.; TELANG, D.; RATH, B. A Review on Strength of Clay Brick Masonry. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 5, n. 12, dec. 2017.

SINGH, S. B.; MUNJAL, P. Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry. **Journal of Building Engineering**, v. 9, p. 10-16, January 2017.

STEIL, R. O. **Efeito da geometria do bloco de concreto e do tipo de argamassa no desempenho à compressão de prismas de alvenaria não grauteados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

STÖCKL, S.; BIERWIRTH, H.; KUPFER, H. The influence of test method on the results of compression tests on mortar. In: **Proceedings of the 10th International Brick and Block Masonry Conference**, Calgary, Canadá. p. 1397-1406, 1994.

SUTTON, M. A.; ORTEU, J.-J.; SCHREIER, H. W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. **Springer Science & Business Media**, 2009.

TAUIL, C. A. **Alvenaria Estrutural**. [Entrevista disponibilizada em 21 de setembro de 2013, na Internet]. Disponível em <<http://www.imecmg.org.br/30/index.php/imec/2013-09-21-17-21-54/noticias/90-construir/156-alvenaria-estrutural-entrevista>>. Instituto Mineiro de Engenharia Civil. Acesso em 08 de dezembro de 2018.

TEMP, A. L.; MILANI, A. S.; OLIVEIRA, M. J. D.; LUBECK, A.; MOHAMAD, G. Water Loss Influence on Laying Mortar Compressive Strength. In: **10th Australasian Masonry Conference**, 2018, Sydney - Australia.

THAMBOO J.A.; DHANASEKAR M.; YAN C. Flexural and shear bond characteristics of thin layer polymer cement mortared concrete masonry, **Construction and Building Materials**. v. 46, p. 104–113, 2013.

THAICKAVIL, N. N.; THOMAS, J. Behaviour and strength assessment of masonry prisms. **Case Studies in Construction Materials**, 2017.

VIMALA, S.; KUMARASAMY, K. Studies on The Strength of Stabilized Mud Blockmasonry Using Different Mortar Proportions. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, n. 4, apr. 2014.

WU, F.; LI, G.; LI, H.-N. Strength and stress–strain characteristics of traditional adobe block and masonry. **Materials and Structures**, v. 46, p. 1449-1457. Feb 2012.

YANG, K.-H.; LEE, Y.; HWANG, Y.-H. A Stress-Strain Model for Brick Prism under Uniaxial Compression. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019.

ZAHRA, T.; DHANASEKAR, M. Prediction of masonry compressive behaviour using a damage mechanics inspired modelling method. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 128-138, 2016.

ZHOU, J.-W.; LIU, D.-H; SHAO, L.-Y.; WANG, Z.-L. Application of digital image correlation to measurement of packaging material mechanical properties. **Mathematical Problems in Packaging Engineering**, p. 1-8, v. 2013, jul. 2013.

ZHOW, Q.; WANG, F.; ZHU, F.; YANG, X. Stress-strain model for hollow concrete block masonry under uniaxial compression. **Materials and Structures**, Vol. 50:106, 2017.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Tabela 35 – Resistência à compressão axial dos blocos cerâmicos de parede vazada

Exemplar	Carga de ruptura (N)	Resistência à compressão axial (MPa)			
		Individual	Média	D.P	C.V (%)
Bloco 1	382046	9,41	9,85	0,71	7,18%
Bloco 2	357280	8,80			
Bloco 3	357280	8,80			
Bloco 4	377580	9,30			
Bloco 5	444570	10,95			
Bloco 6	416556	10,26			
Bloco 7	377580	9,30			
Bloco 8	429954	10,59			
Bloco 9	430766	10,61			
Bloco 10	397880	9,80			
Bloco 11	399910	9,85			
Bloco 12	401128	9,88			
Bloco 13	428330	10,55			

Fonte: Elaboração própria

Tabela 36 – Resistência à compressão axial dos blocos cerâmicos de parede maciça

Exemplar	Carga de ruptura (N)	Resistência à compressão axial (MPa)			
		Individual	Média	D.P	C.V (%)
Bloco 1	868434	21,39	22,5	1,41	6,25%
Bloco 2	833518	20,53			
Bloco 3	826210	20,35			
Bloco 4	847728	20,88			
Bloco 5	925274	22,79			
Bloco 6	998760	24,60			
Bloco 7	964250	23,75			
Bloco 8	966280	23,80			
Bloco 9	917560	22,60			
Bloco 10	978460	24,10			
Bloco 11	941920	23,20			
Bloco 12	885080	21,80			
Bloco 13	921620	22,70			

Fonte: Elaboração própria

Tabela 37 – Composição granulométrica da areia

Composição granulométrica da areia								
Peneiras		1º determinação		2º determinação		% Retida Média	% Retida Acumulada	Passante (%)
nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida			
3/8"	9,5		0		0	0		100
1/4"	6,3		0		0	0		100
4	4,8		0		0	0	0	100
8	2,4	1,28	0,09	3,28	0,22	0,15	0,15	99,85
16	1,2	137,55	9,17	167,16	11,16	10,16	10,31	89,69
30	0,6	243,66	16,24	259,83	17,34	16,79	27,11	72,89
50	0,3	606,49	40,43	677,73	45,23	42,83	69,93	30,07
100	0,15	438,13	29,21	299,11	19,96	24,58	94,52	5,48
Fundo	<0,15	73,02	4,87	91,33	6,1	5,48		
Total		1500,13	100	1498,44	100	100	202,03	
Diâmetro máximo:			2,4			Módulo de finura:		2,02

Fonte: Elaboração própria

Tabela 38 – Ensaio dimensionais dos blocos cerâmicos BPM

Exemplar	Dimensões efetivas médias dos blocos (mm)			Espessuras mínimas (mm)				Desvios máximos (mm)	
	L	H	C	Parede externa	Septos	Parede vazada	Vazados	Esquadro	Flecha
Blocos Cerâmicos de Paredes Maciças (BPM)									
BPM 01	138,83	190,40	287,40	22,10	14,90	48,10	93,00	0,50	1,00
BPM 02	138,47	189,57	287,53	22,70	14,70	49,40	92,70	1,00	1,00
BPM 03	138,53	190,70	287,60	21,90	14,60	48,20	93,20	0,50	1,00
BPM 04	137,83	187,83	285,13	21,90	14,50	47,60	92,10	1,00	1,30
BPM 05	137,80	188,43	285,00	23,10	14,90	47,70	92,10	0,00	0,00
BPM 06	138,57	188,53	287,10	22,10	14,60	47,70	92,00	0,00	0,50
BPM 07	138,31	189,51	287,61	21,21	15,44	51,00	93,00	2,00	1,00
BPM 08	137,41	187,21	288,45	20,43	14,57	50,00	94,00	0,00	0,00
BPM 09	138,20	187,44	287,60	20,74	14,88	49,00	94,00	1,00	1,00
BPM 10	137,44	189,87	286,33	21,86	15,45	51,00	93,00	2,00	1,00
BPM 11	137,40	188,89	288,24	21,88	14,45	51,00	93,00	1,00	1,00
BPM 12	137,83	190,10	287,54	20,61	15,00	52,00	94,00	0,00	1,00
BPM 13	138,34	189,21	290,22	21,84	14,00	49,00	94,00	1,00	1,00

Média	138,07	189,05	287,37	21,72	14,77	49,36	93,08	0,77	0,83
Desv. Pad.	0,48	1,12	1,36	0,78	0,40	1,51	0,74	0,70	0,40
Coefficiente de Variação	0,4%	0,6%	0,5%	3,6%	2,7%	3,1%	0,8%	90,4%	48,7%

Fonte: Elaboração própria

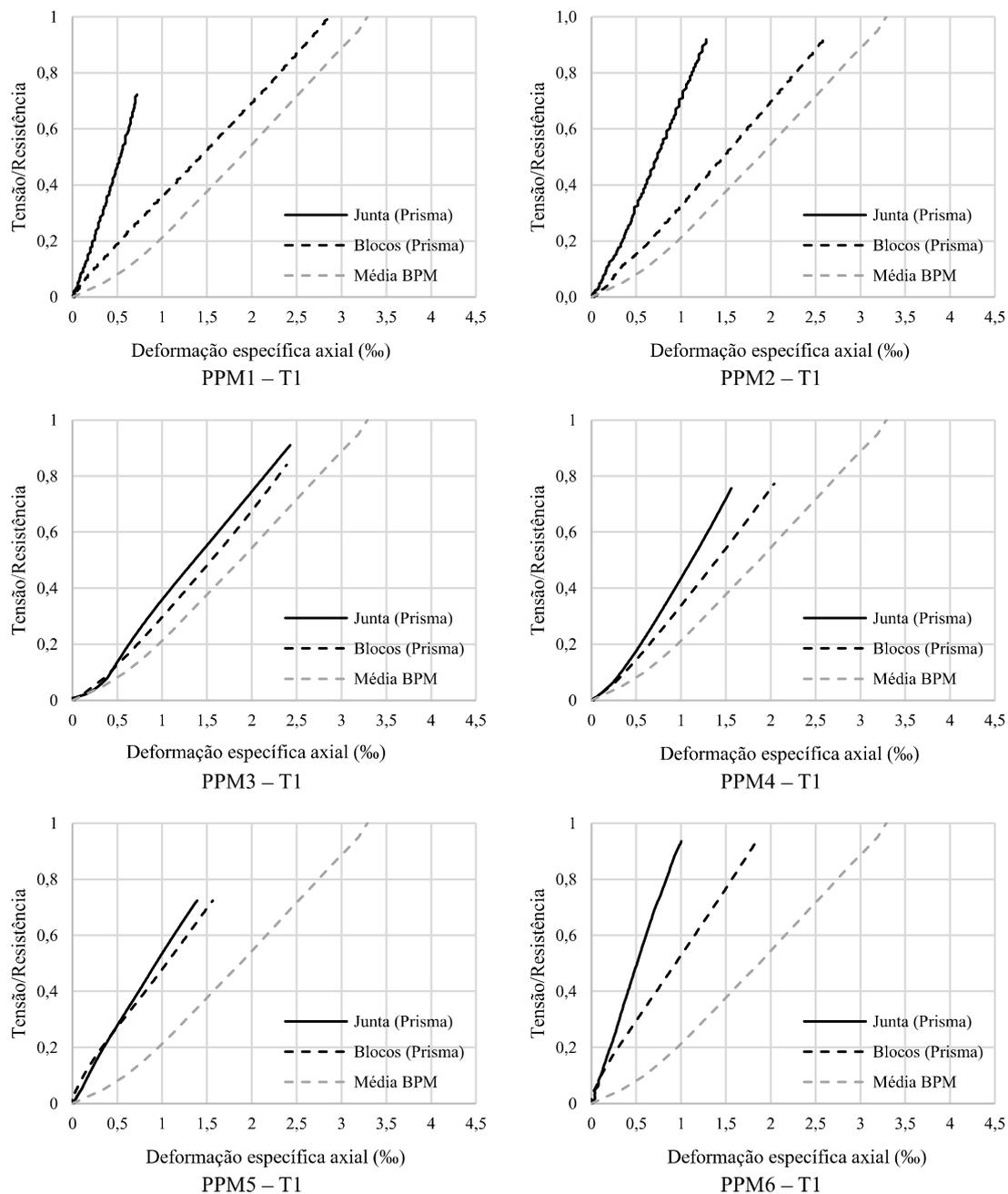
Tabela 39 – Ensaio dimensionais dos blocos cerâmicos BPV

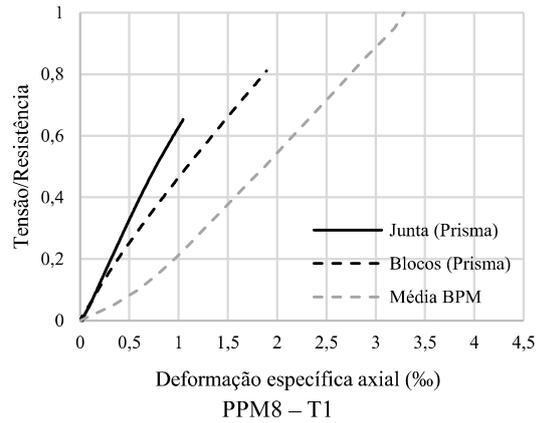
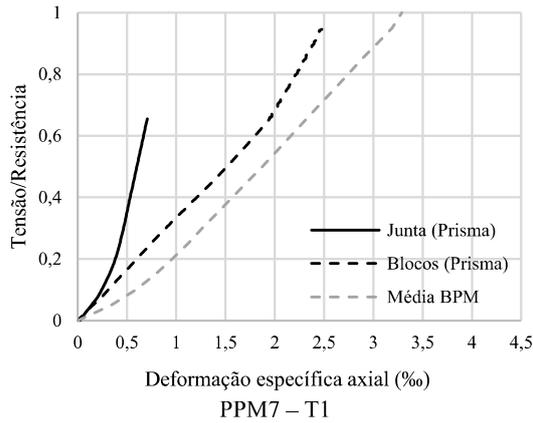
Exemplar	Dimensões efetivas médias dos blocos (mm)			Espessuras mínimas (mm)				Desvios máximos (mm)	
	L	H	C	Parede externa	Septos	Parede vazada	Vazados	Esquadro	Flecha
Blocos Cerâmicos de Paredes Vazadas (BPV)									
BPV 01	140,63	194,43	289,33	8,86	8,19	32,20	76,95	1,00	0,00
BPV 02	139,90	194,37	288,83	9,11	8,22	33,44	77,48	0,00	0,00
BPV 03	139,83	192,13	288,33	8,67	8,88	32,97	76,67	1,00	0,00
BPV 04	140,07	192,37	288,80	9,21	8,13	32,65	77,73	0,00	0,00
BPV 05	139,33	191,93	288,87	8,78	8,27	30,68	76,89	2,00	1,00
BPV 06	140,23	196,03	289,53	9,10	8,29	32,83	76,89	0,00	0,00
BPV 07	138,90	191,20	288,66	8,98	8,19	32,10	76,72	1,00	0,00
BPV 08	141,58	191,31	287,41	8,87	8,31	33,15	76,41	0,00	0,00
BPV 09	140,89	191,10	287,21	8,75	8,16	31,30	76,44	0,00	0,00
BPV 10	141,20	191,20	287,33	9,15	8,26	31,15	77,30	2,00	1,00
BPV 11	141,45	191,45	287,44	8,98	8,24	31,20	77,32	1,00	1,00
BPV 12	140,40	191,25	287,55	8,78	8,33	31,21	76,52	2,00	1,00
BPV 13	141,31	191,60	288,66	9,10	8,12	32,24	77,52	1,00	1,00
Média	140,44	192,34	288,30	8,95	8,28	32,15	76,99	0,85	0,38
Desv. Pad.	0,83	1,58	0,81	0,18	0,19	0,90	0,44	0,80	0,51
Coef. Variação	0,6%	0,8%	0,3%	2,0%	2,3%	2,8%	0,6%	94,6%	131,7%

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DOS COMPONENTES DO PRISMA EM NÍVEL DE TENSÃO ATRAVÉS DA EXTENSOMETRIA

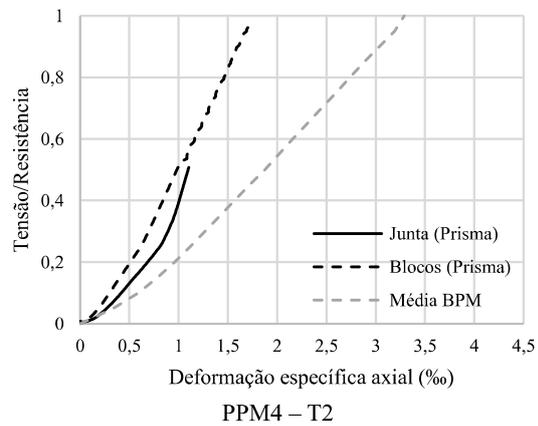
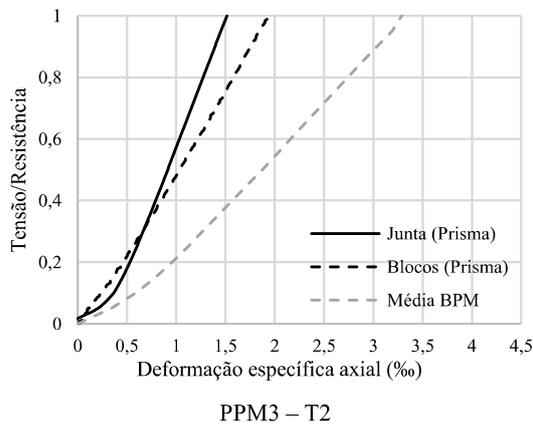
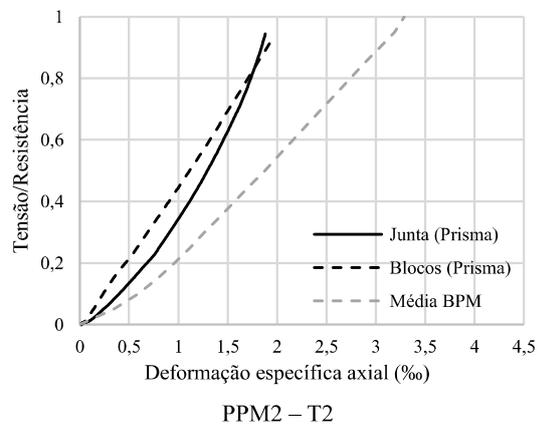
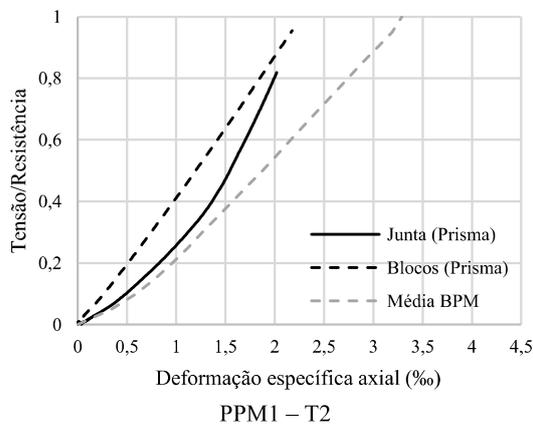
Figura 83 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPM – T1, além dos blocos BPM

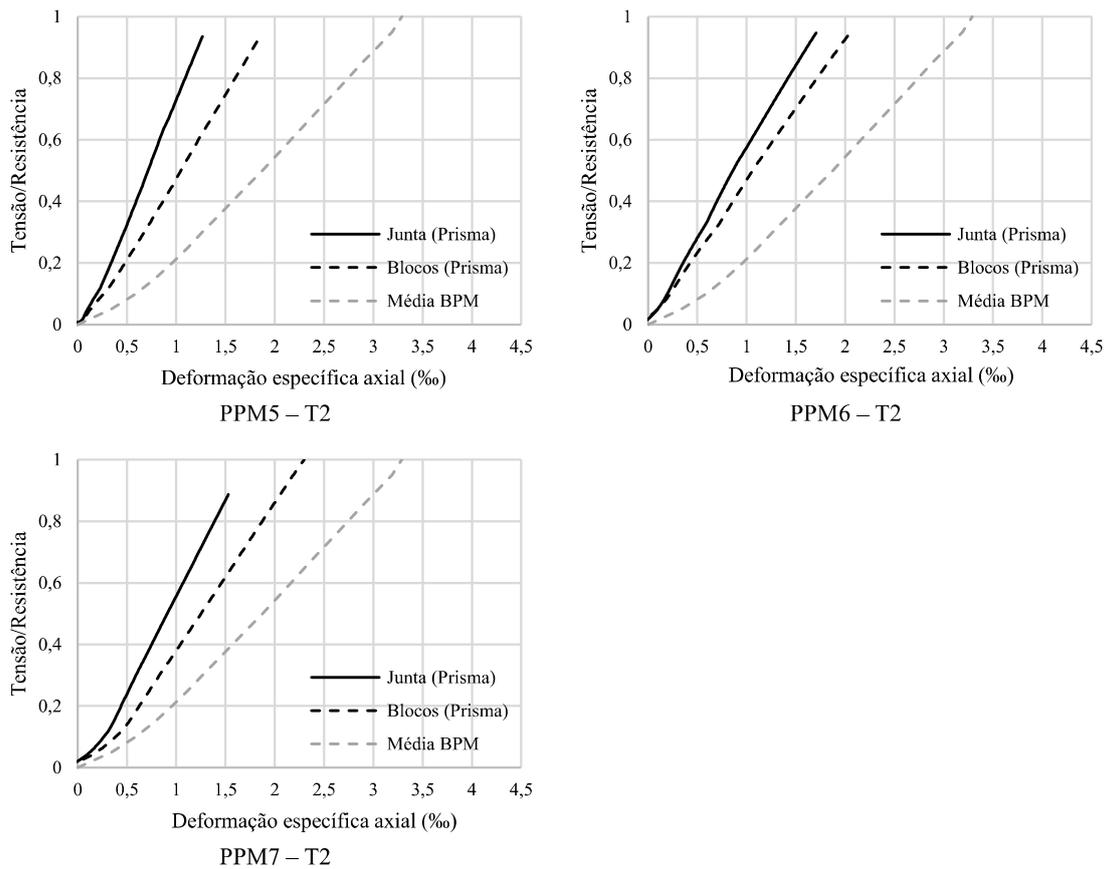




Fonte: Elaboração própria

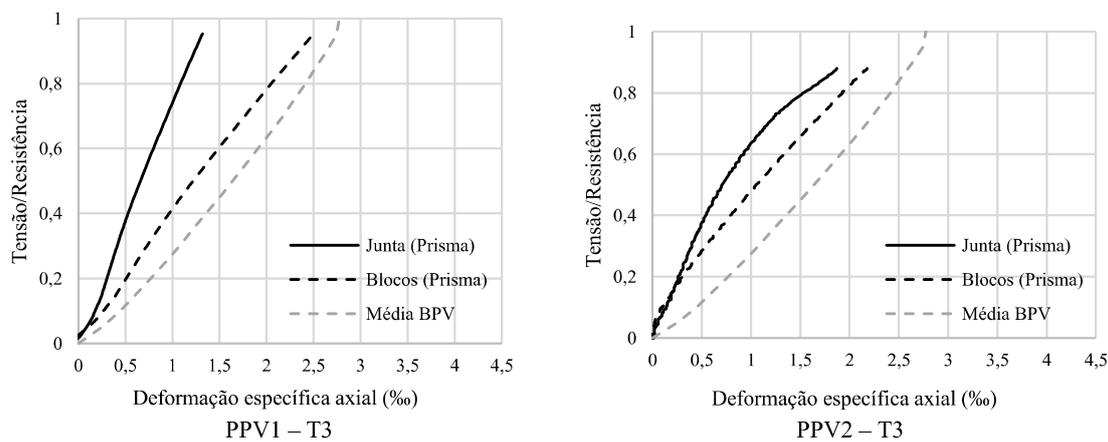
Figura 84 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPM – T2, além dos blocos BPM

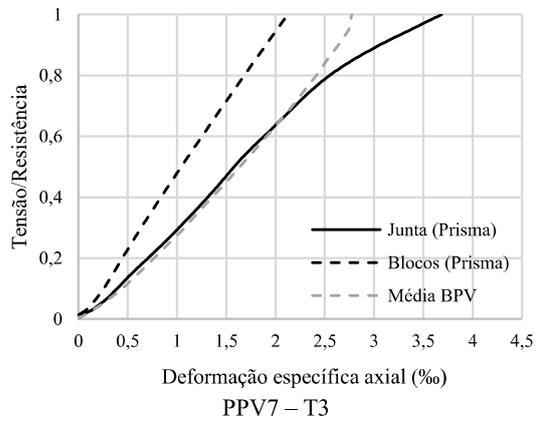
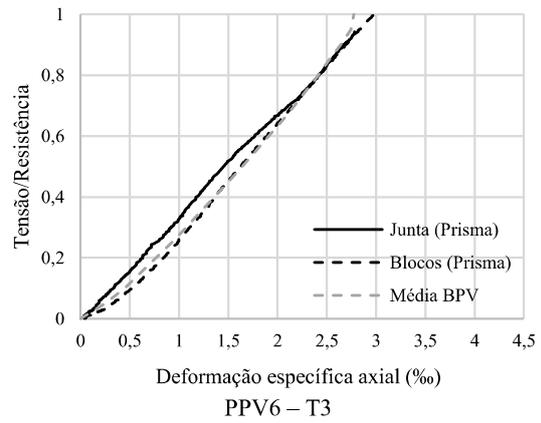
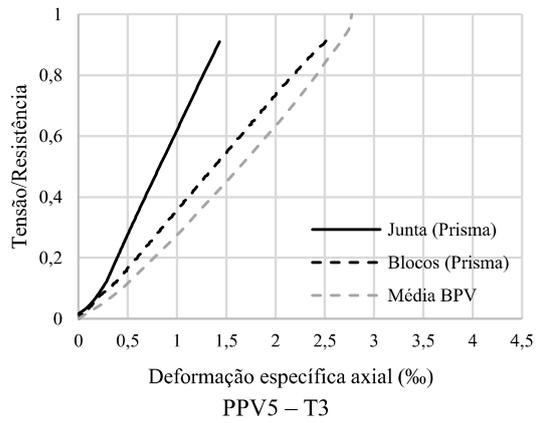
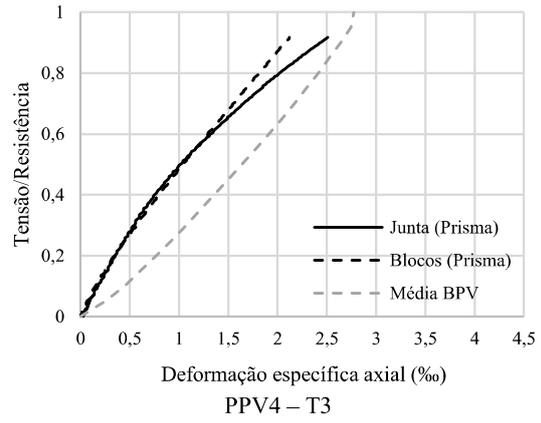
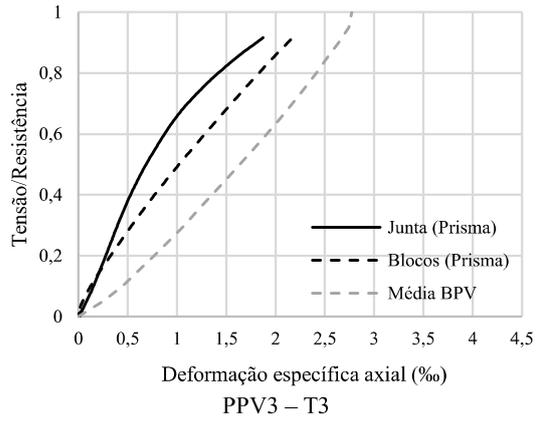




Fonte: Elaboração própria

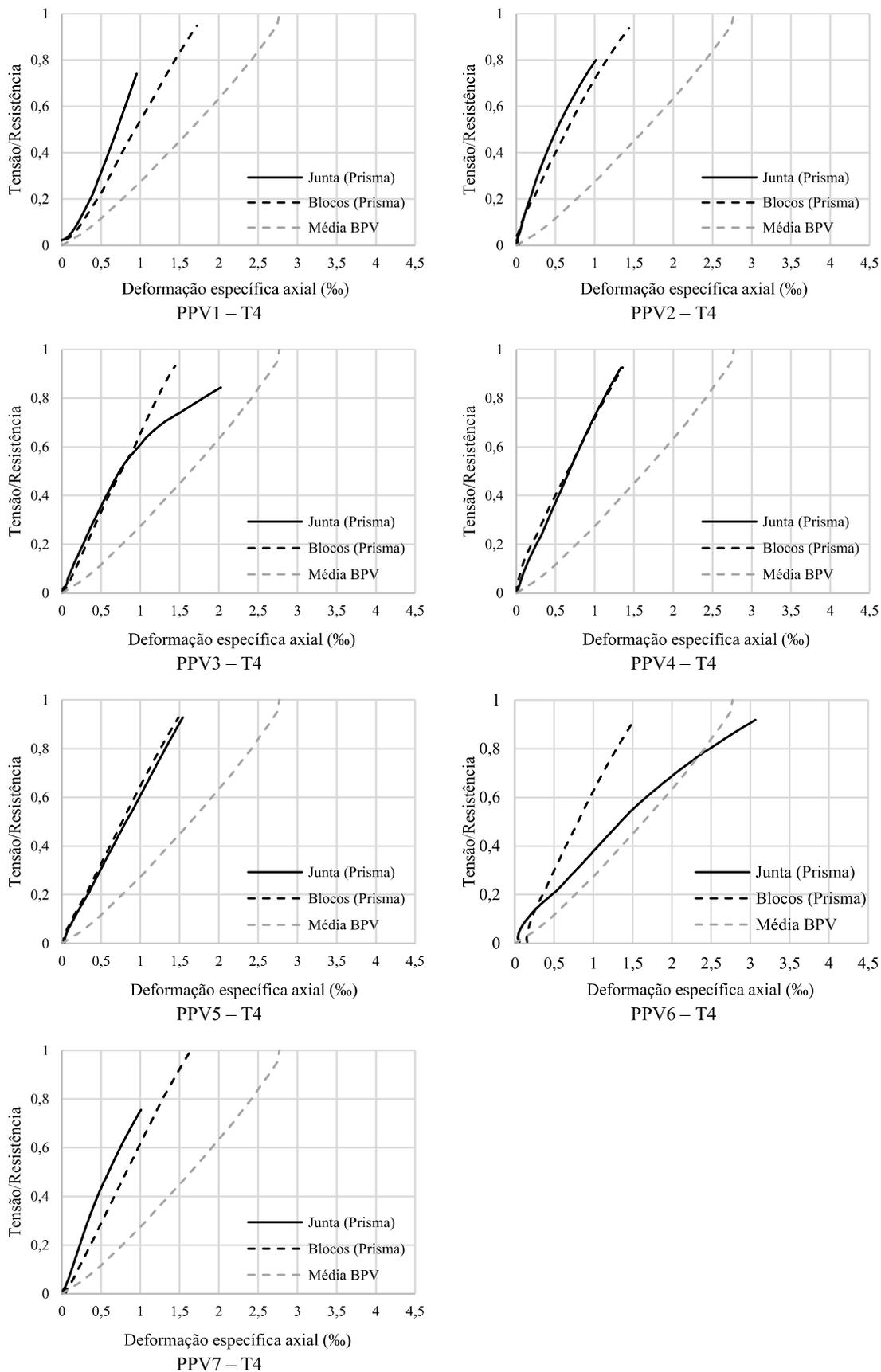
Figura 85 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPV – T3, além dos blocos BPV





Fonte: Elaboração própria

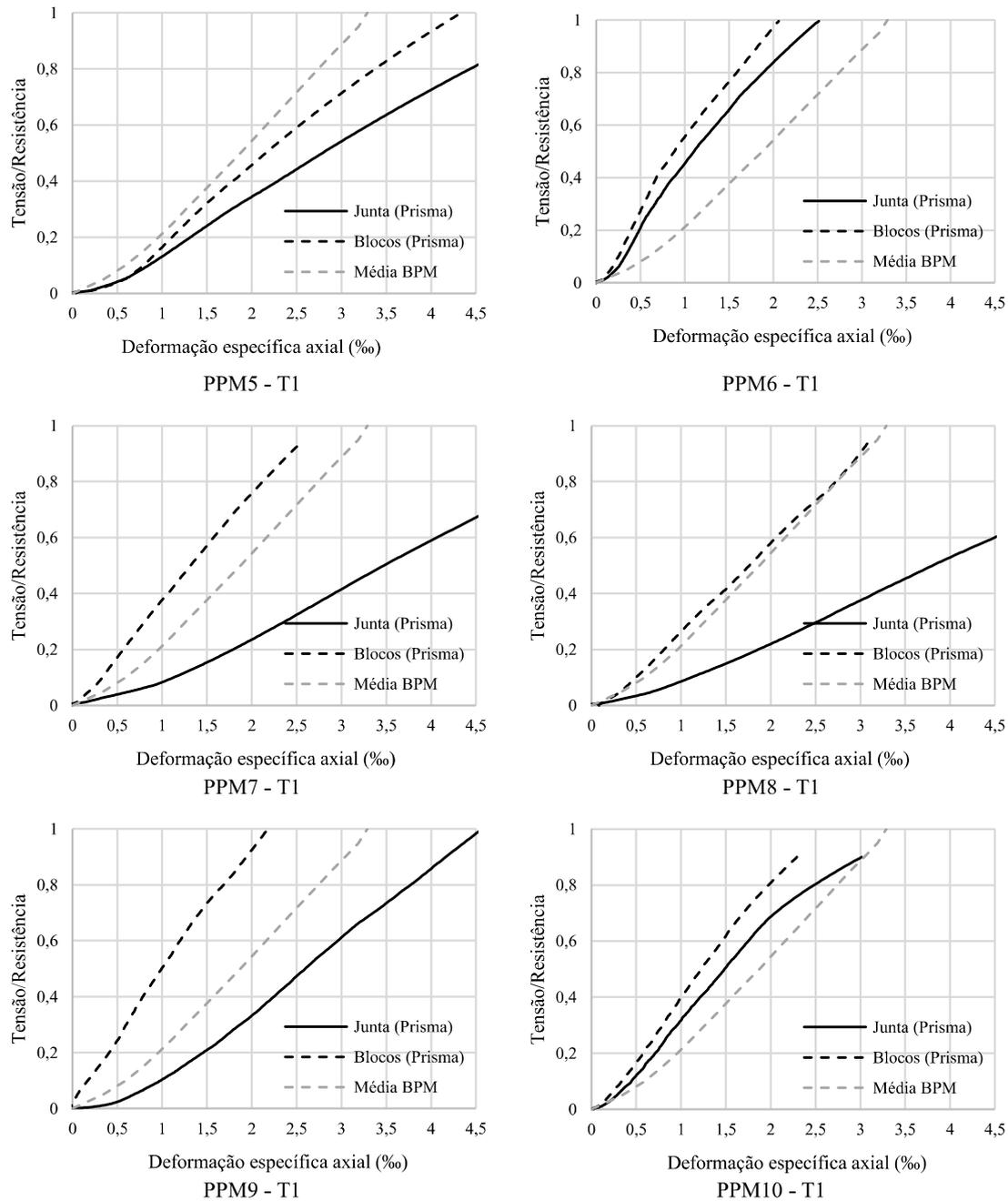
Figura 86 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtidos com extensômetros para os prismas PPV – T4, além dos blocos BPV

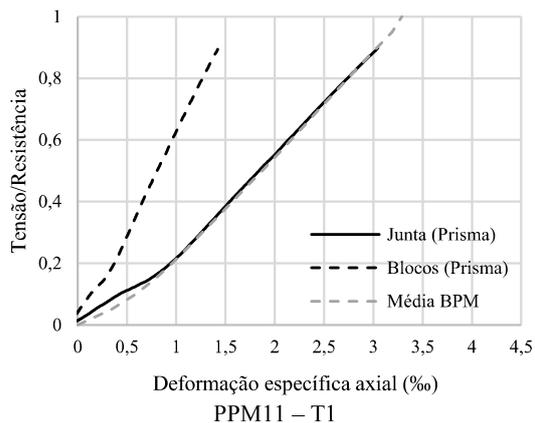


Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DOS COMPONENTES DOS PRISMAS EM NÍVEL DE TENSÃO ATRAVÉS DO DIC

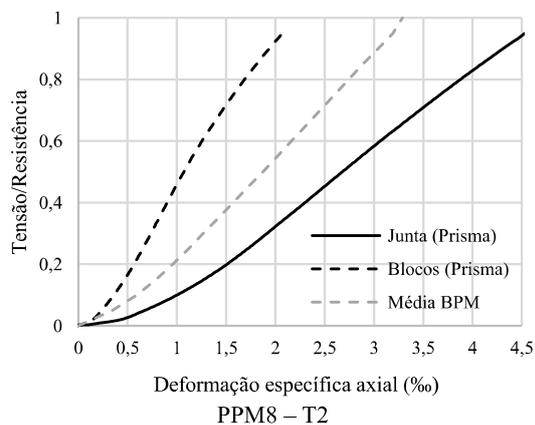
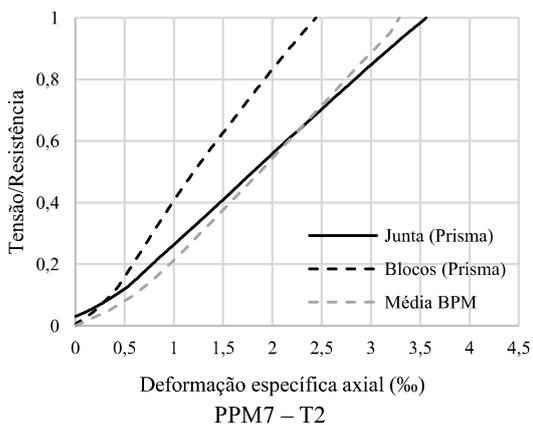
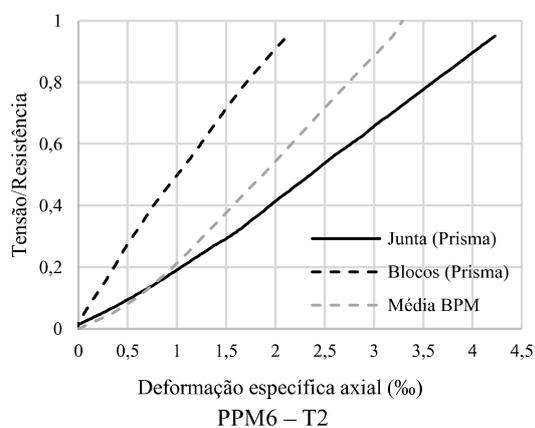
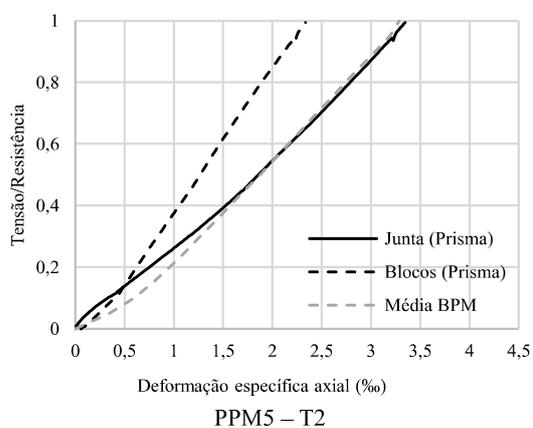
Figura 87 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtido através do DIC para os prismas PPM – T1, além dos blocos BPM

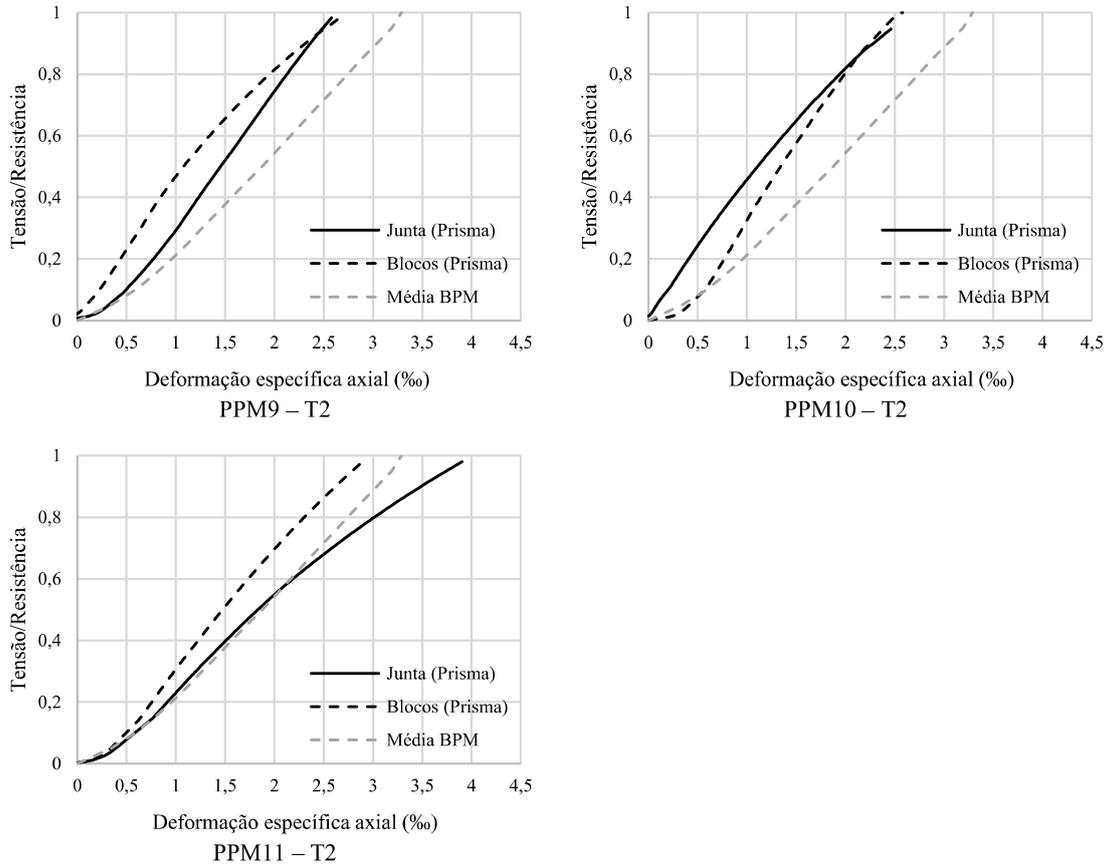




Fonte: Elaboração própria

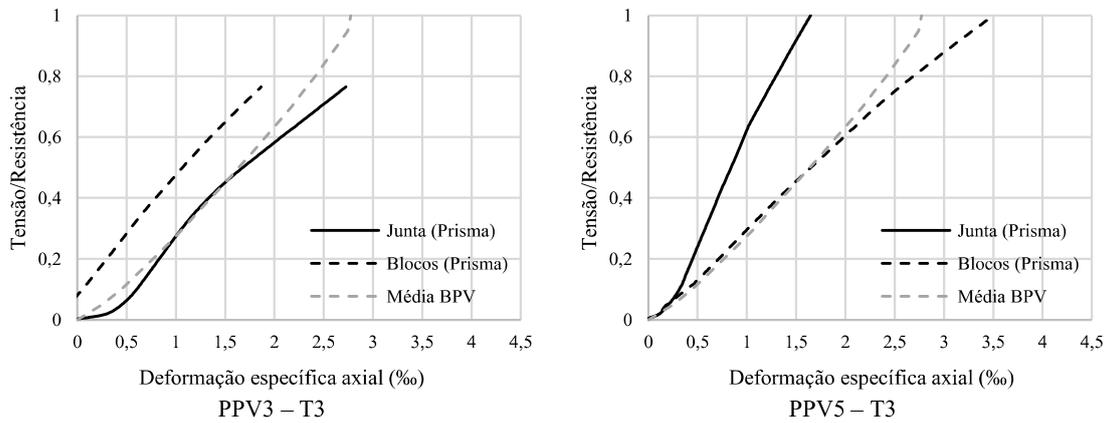
Figura 88 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtido através do DIC para os prismas PPM – T2, além dos blocos BPM

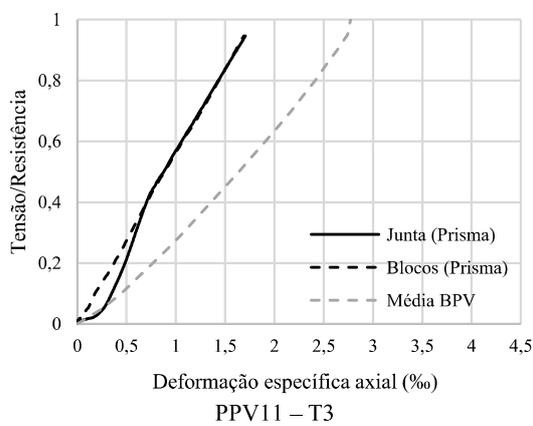
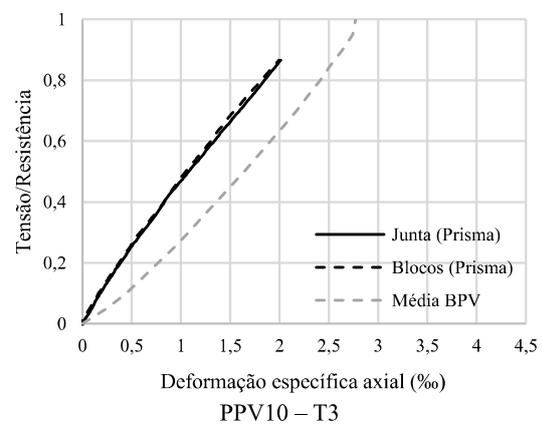
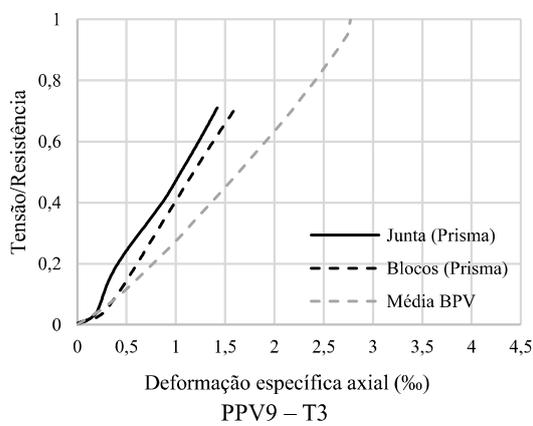
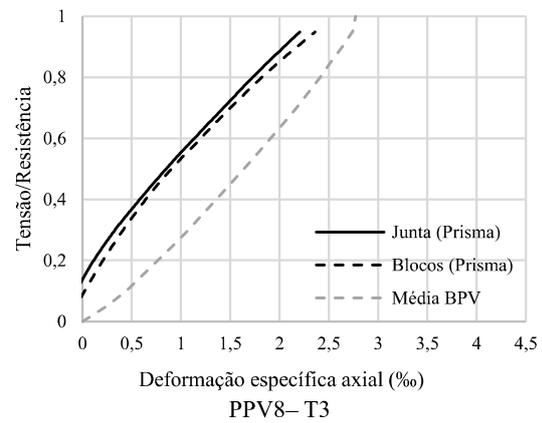
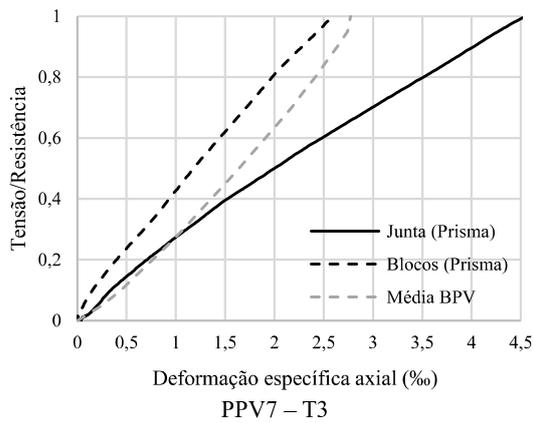
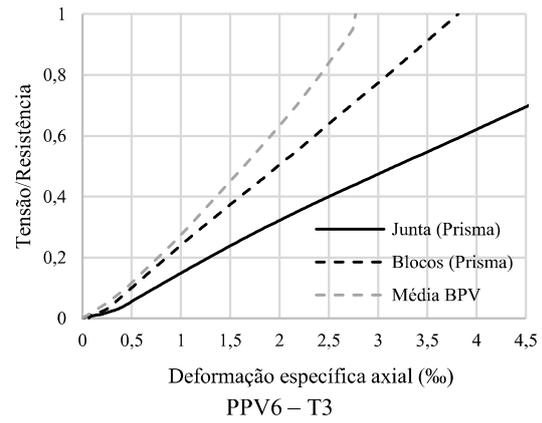
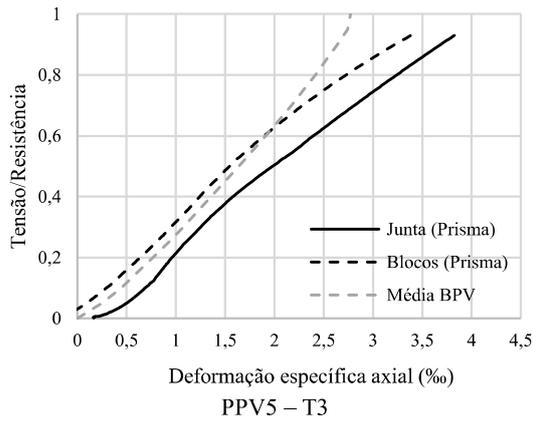




Fonte: Elaboração própria

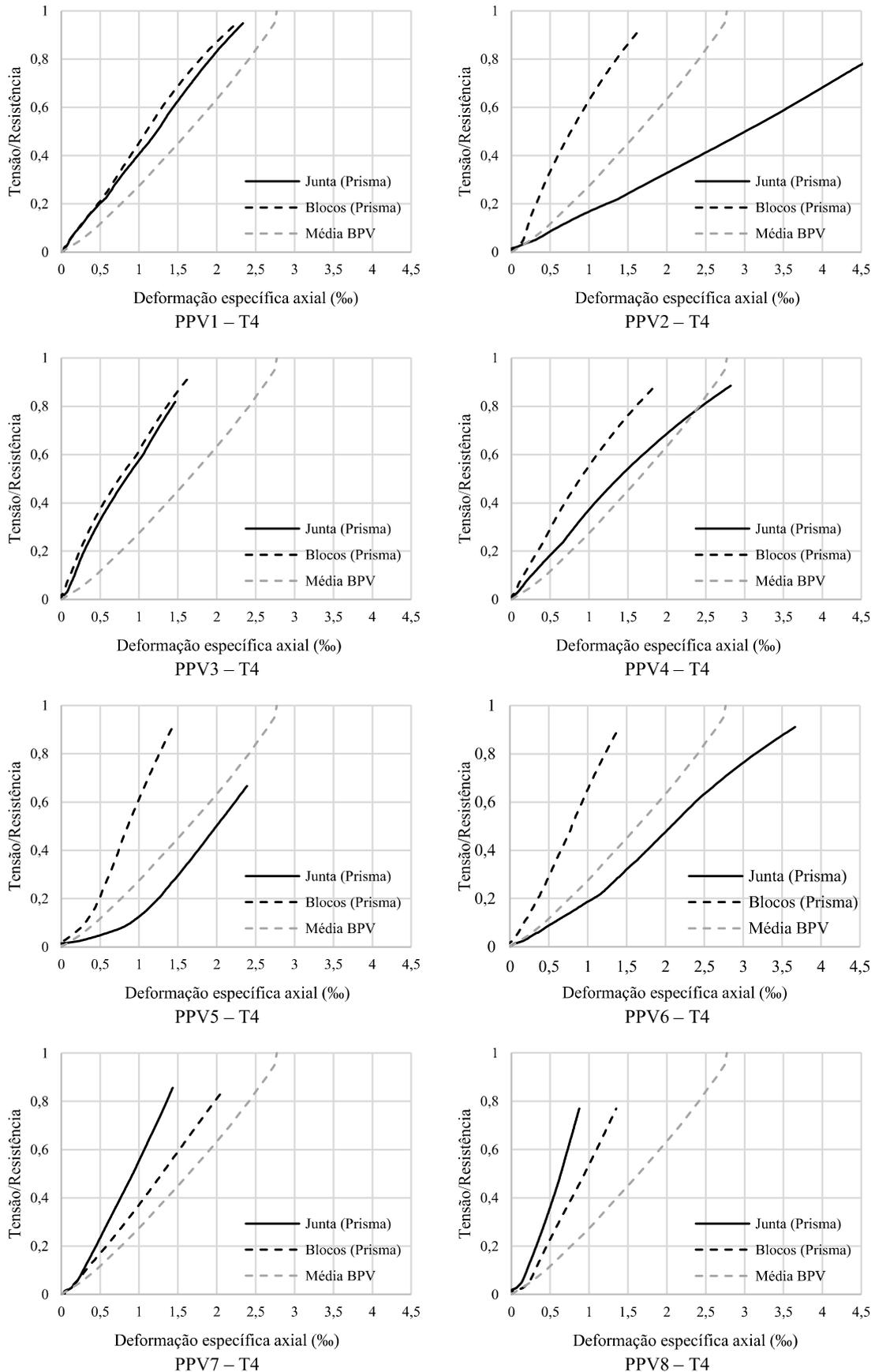
Figura 89 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtido através do DIC para os prismas PPV – T3, além dos blocos BPV

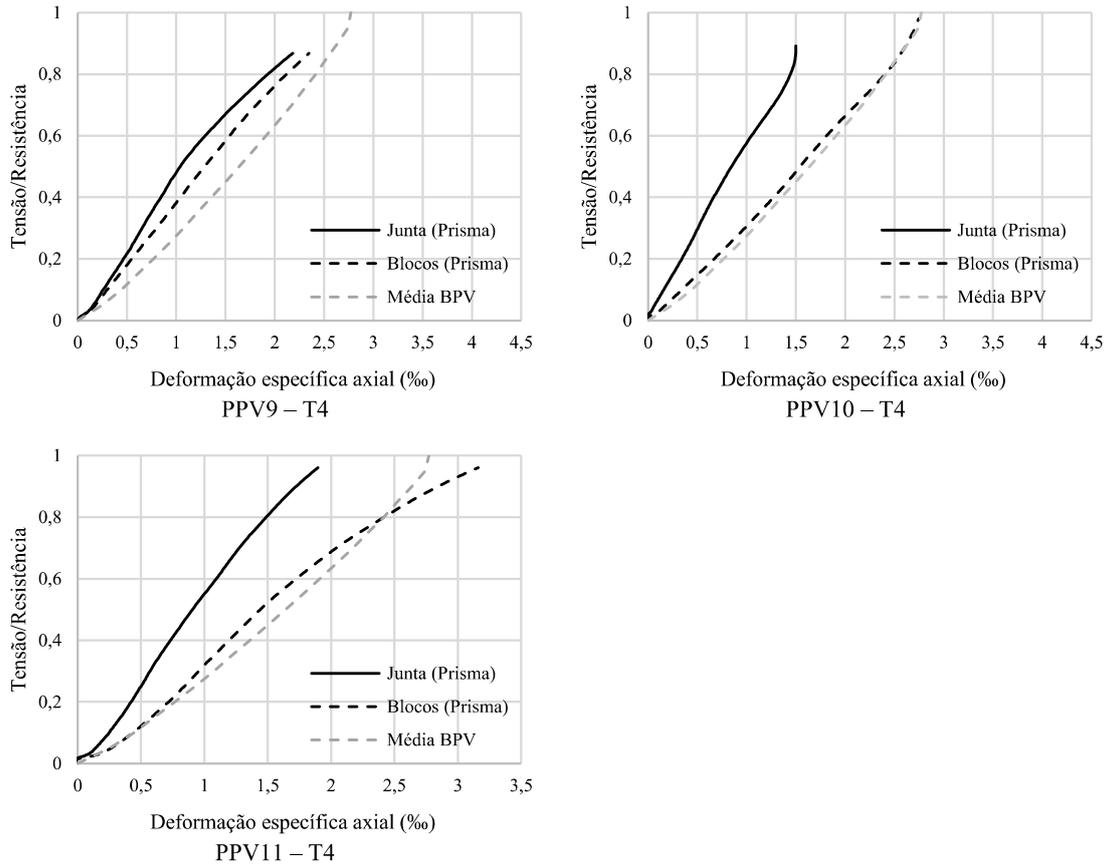




Fonte: Elaboração própria

Figura 90 – Comportamento médio da curva tensão/resistência-deformação específica axial obtido através do DIC para os prismas PPV – T4, além dos blocos BPV



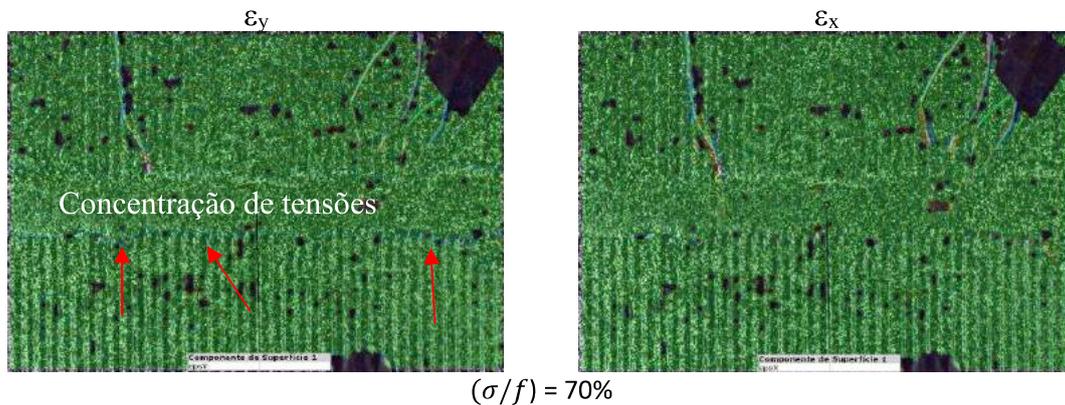


Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE D – AVANÇO DO PROCESSO DE RUPTURA DOS PRISMAS AVALIADOS ATRAVÉS DO DIC

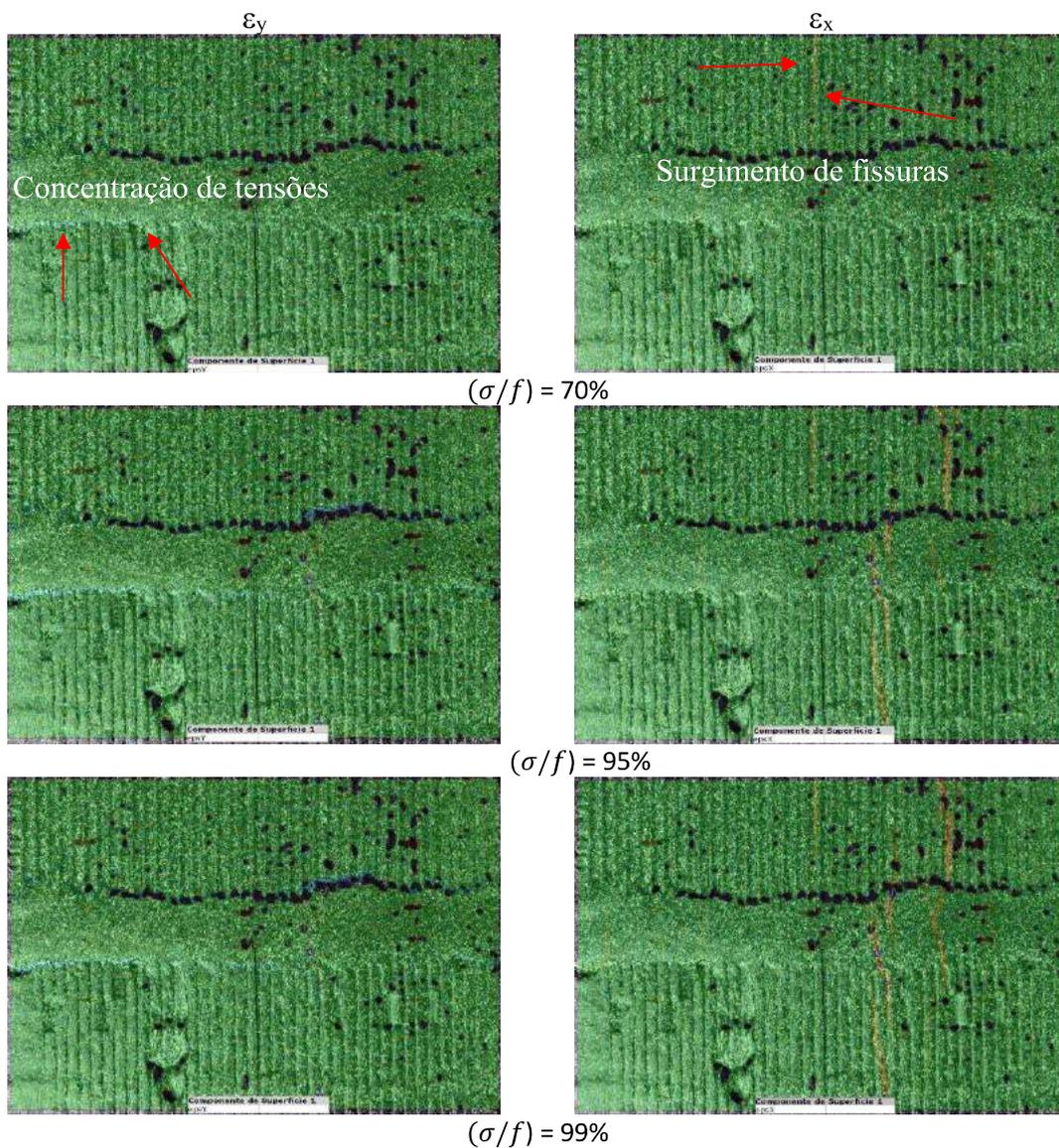
AVANÇO DO MODO DE RUPTURA DE PRISMAS DA TIPOLOGIA PPM – T1

Figura 91 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T1 – DIC – Parte Frontal



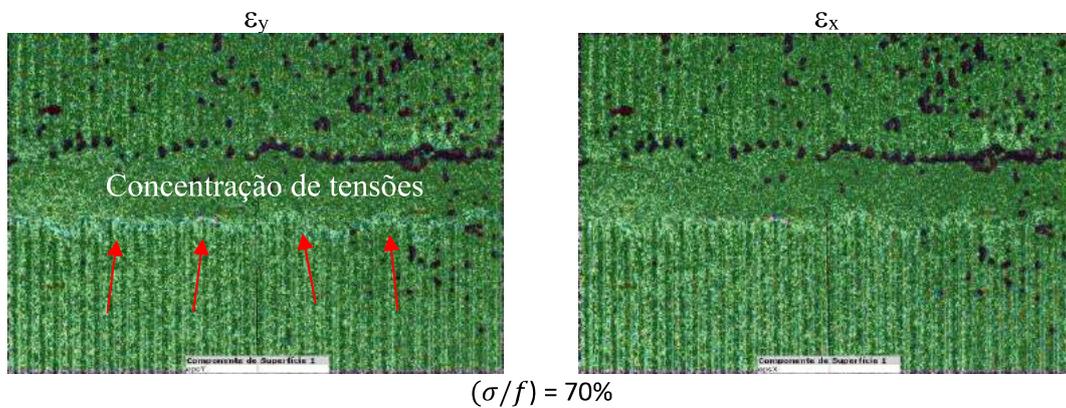
$(\sigma/f) = 70\%$

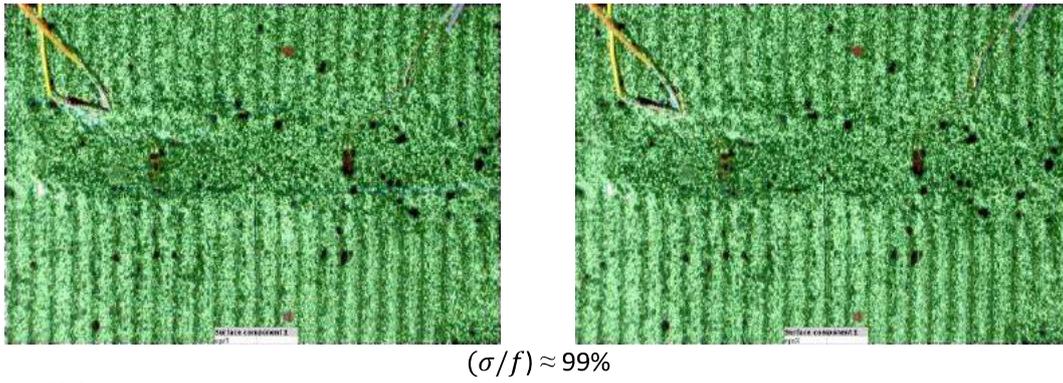
Figura 93 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM11 – T1 – DIC – Parte frontal



Fonte: Elaboração própria

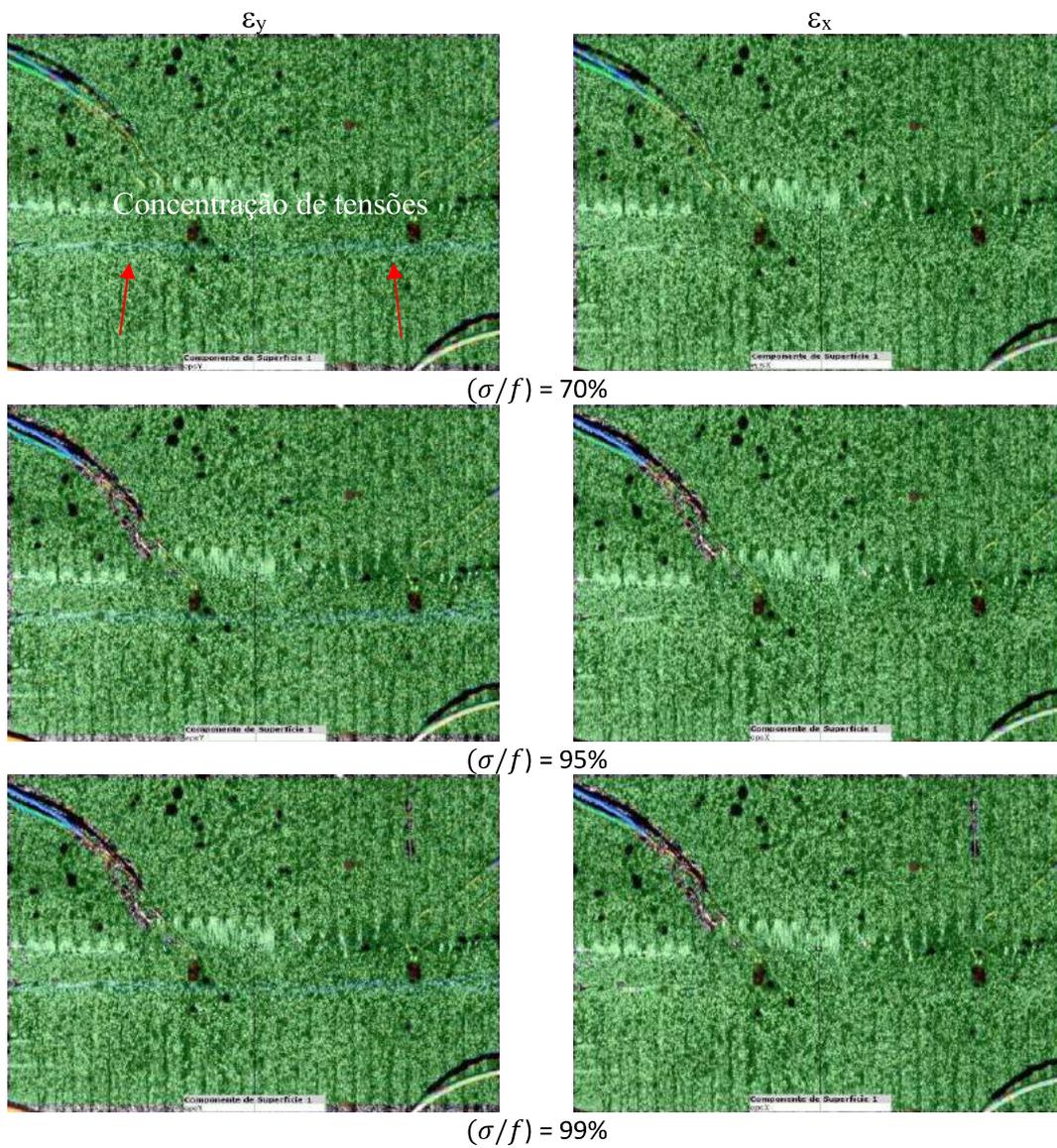
Figura 94 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM10 – T1 – DIC – Parte frontal





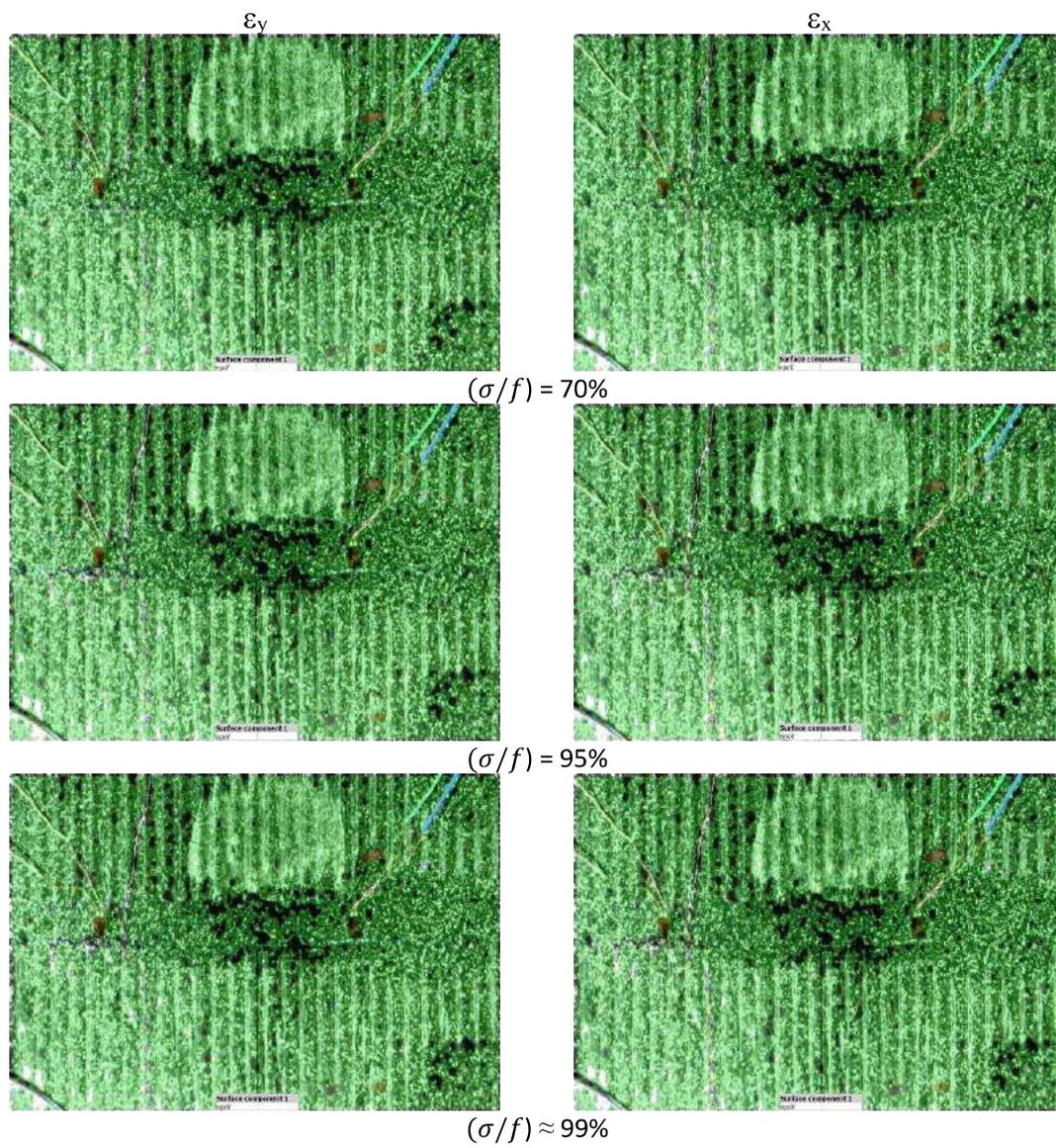
Fonte: Elaboração própria

Figura 96 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM8 – T1 – DIC – Parte frontal



Fonte: Elaboração própria

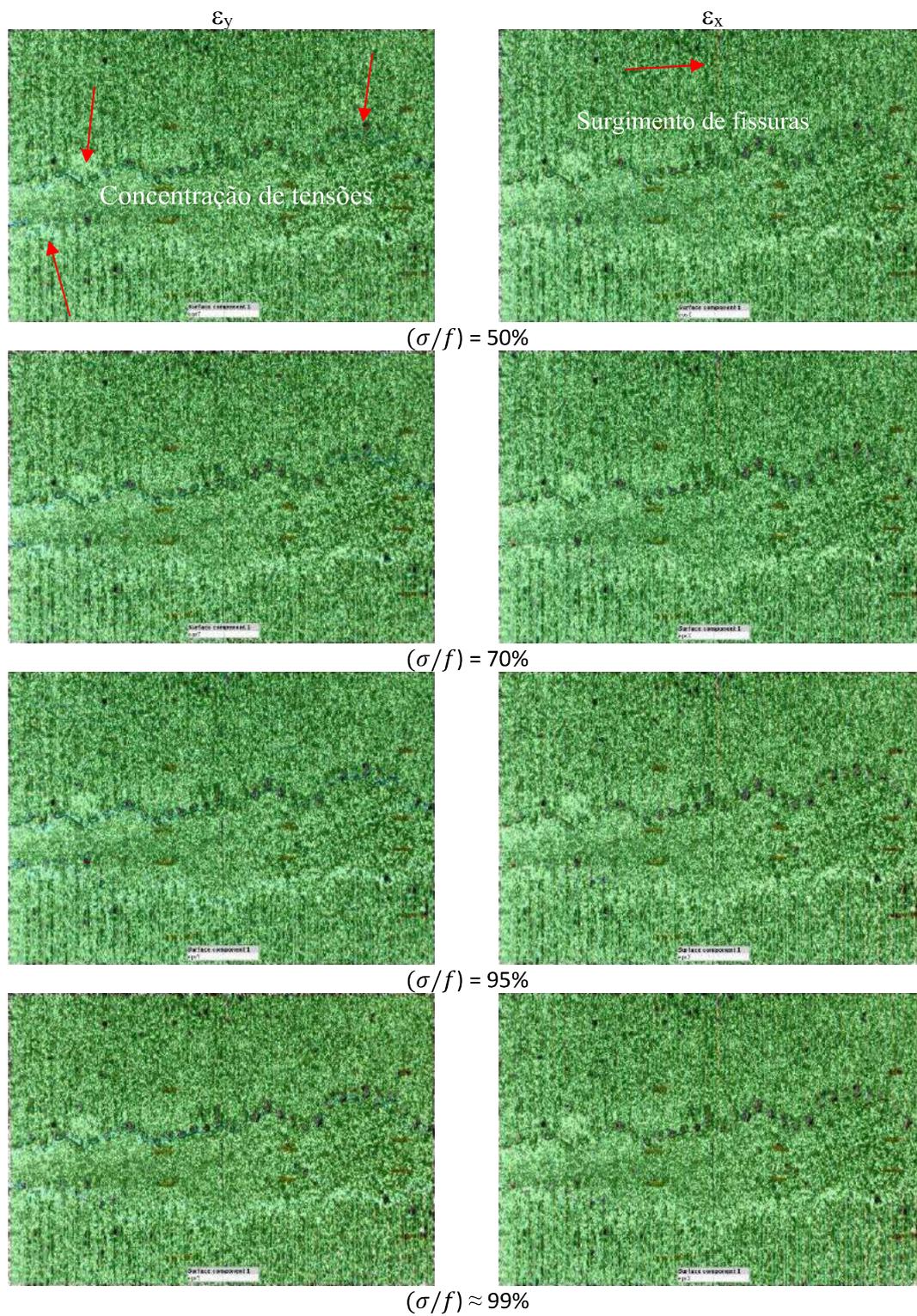
Figura 97 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM7 – T1 – DIC – Parte traseira



Fonte: Elaboração própria

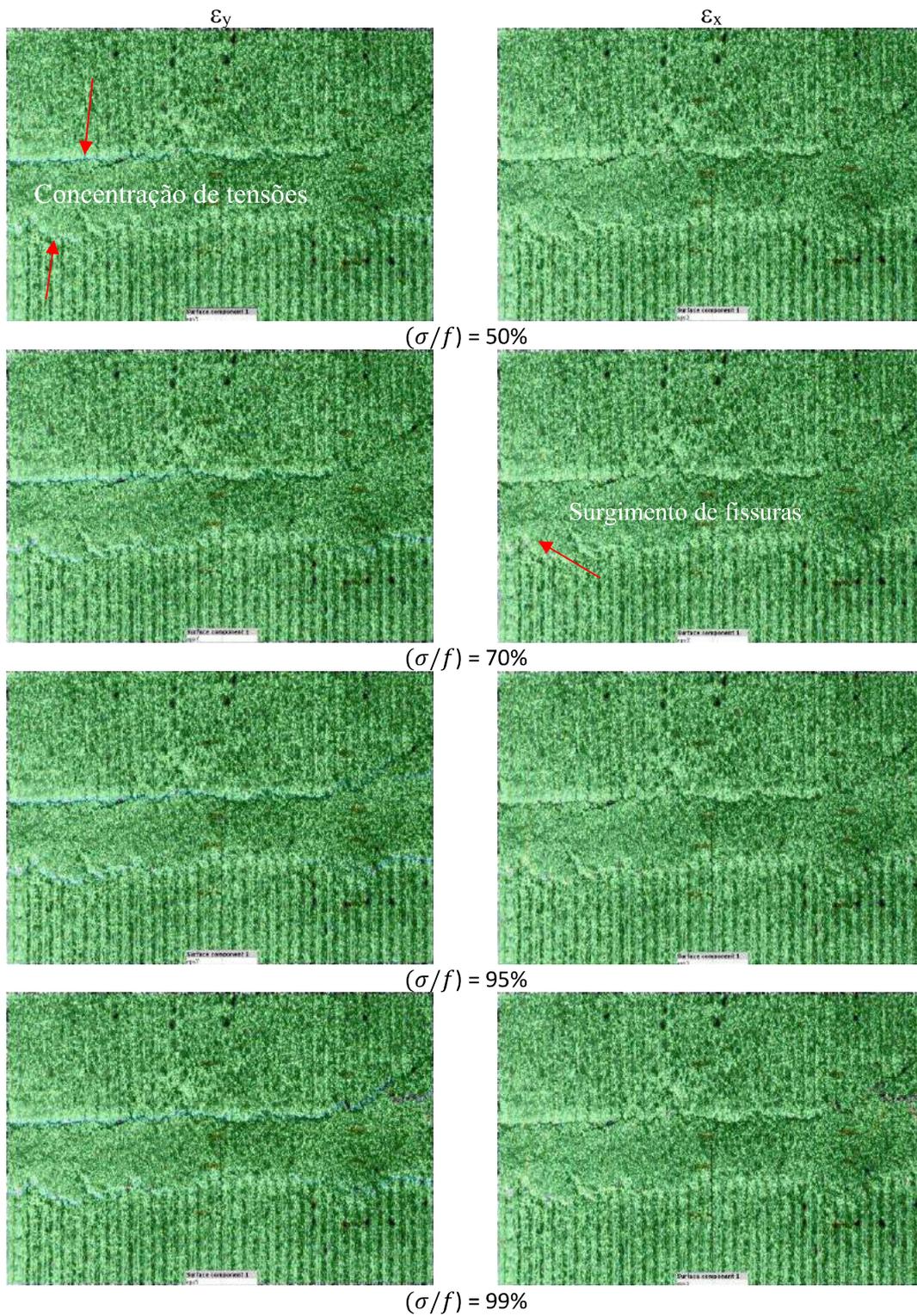
AVANÇO DO MODO DE RUPTURA DE PRISMAS DA TIPOLOGIA PPM – T2

Figura 98 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM10 – T2 – DIC – Parte traseira



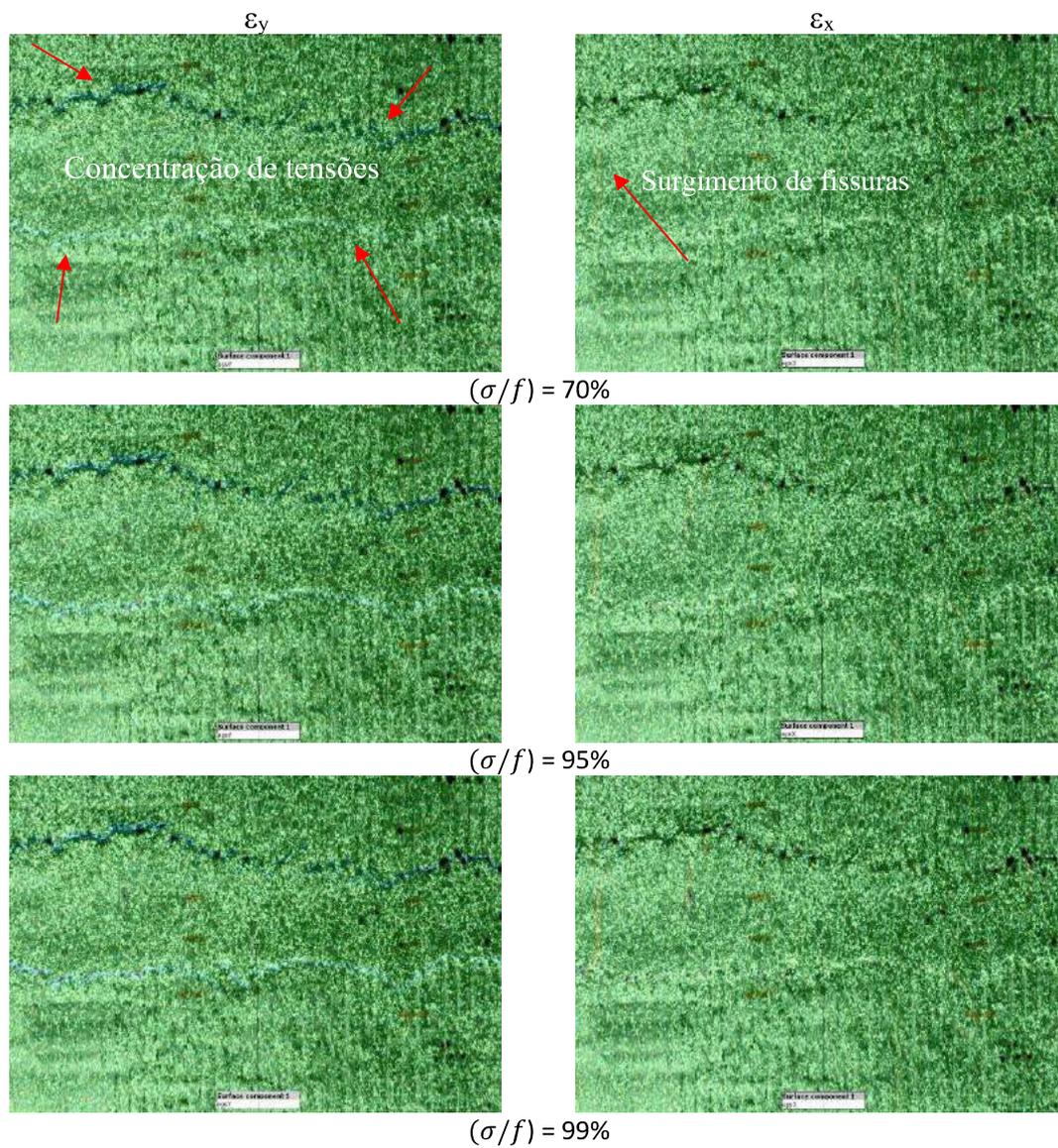
Fonte: Elaboração própria.

Figura 99 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM9 – T2 – DCI – Parte traseira



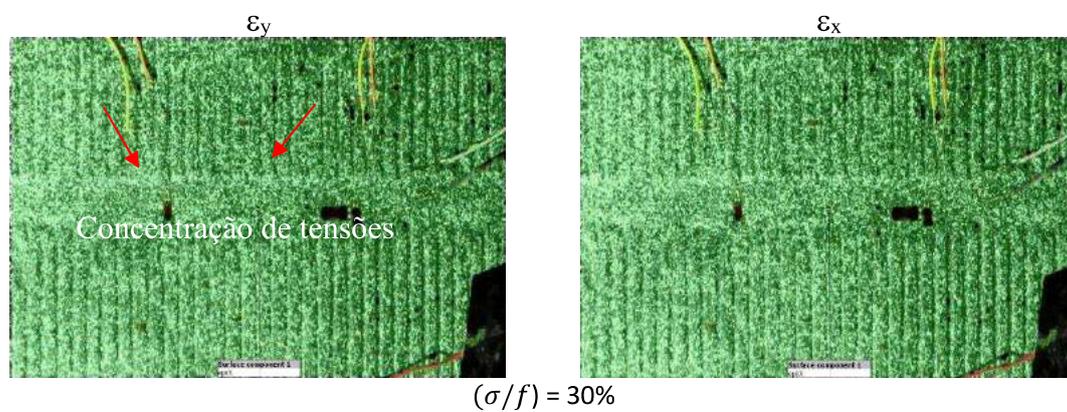
Fonte: Elaboração própria.

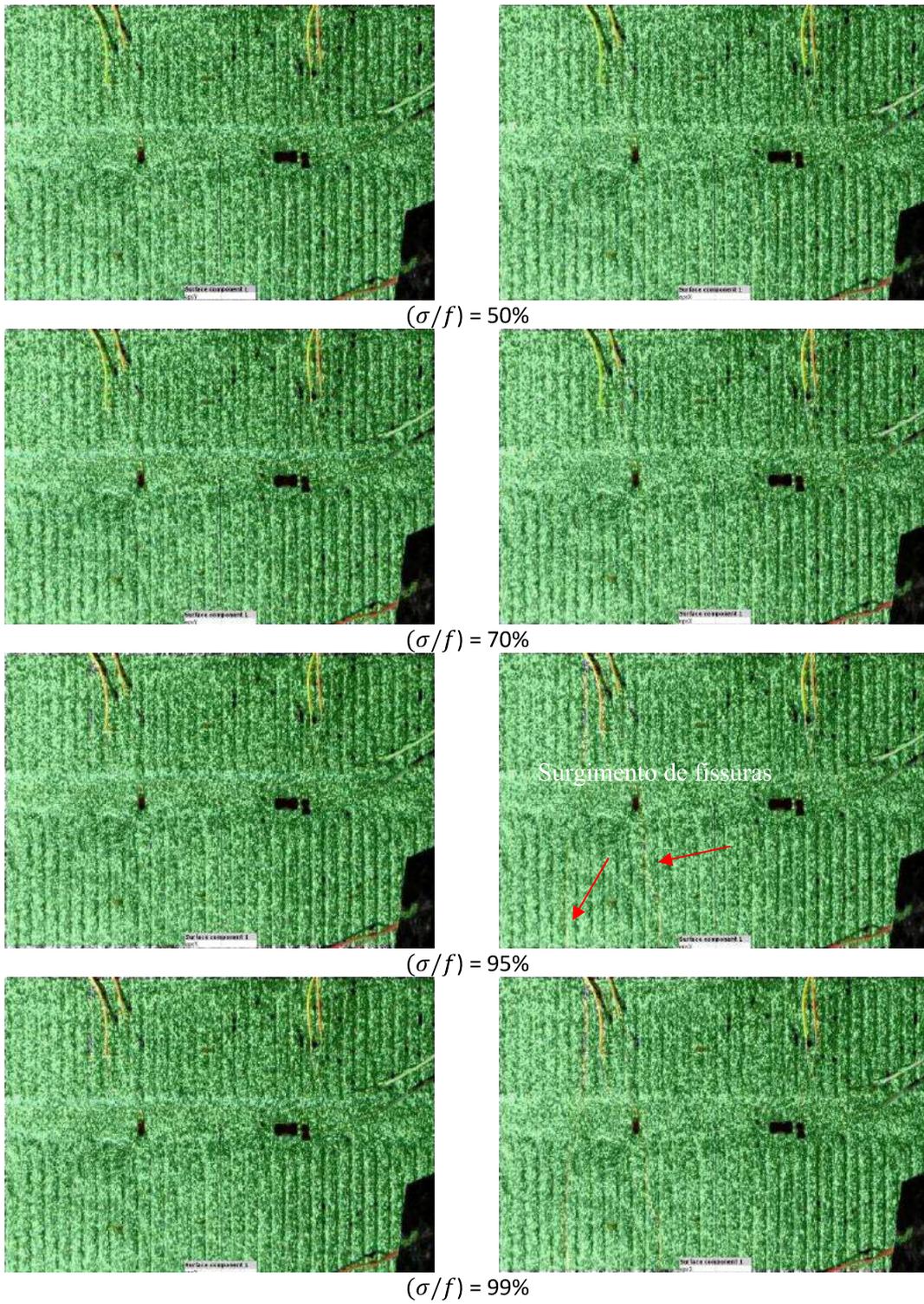
Figura 100 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM8 – T2 – DIC – Parte traseira



Fonte: Elaboração própria.

Figura 101 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPM7 – T2 – DIC – Parte traseira

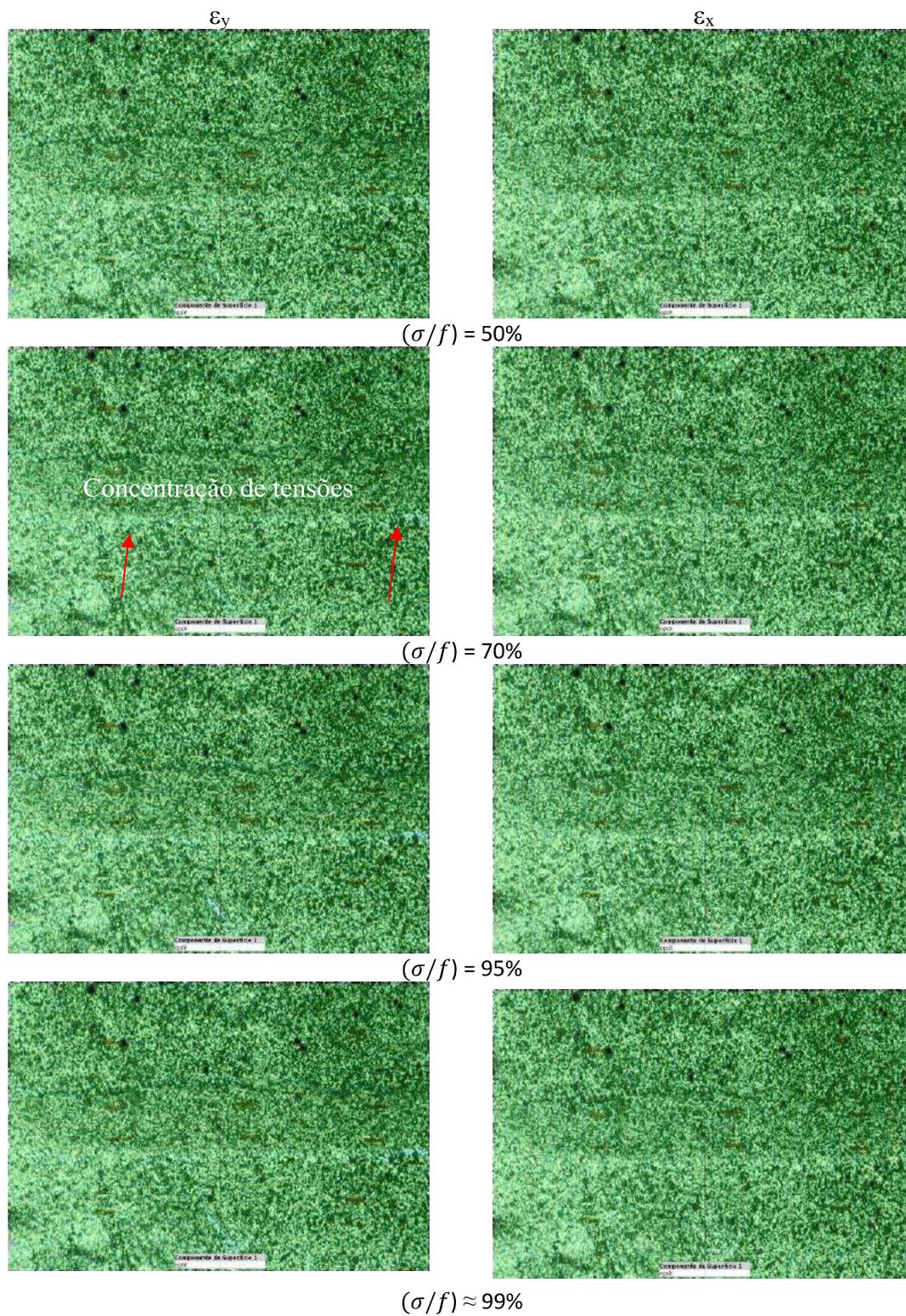




Fonte: Elaboração própria.

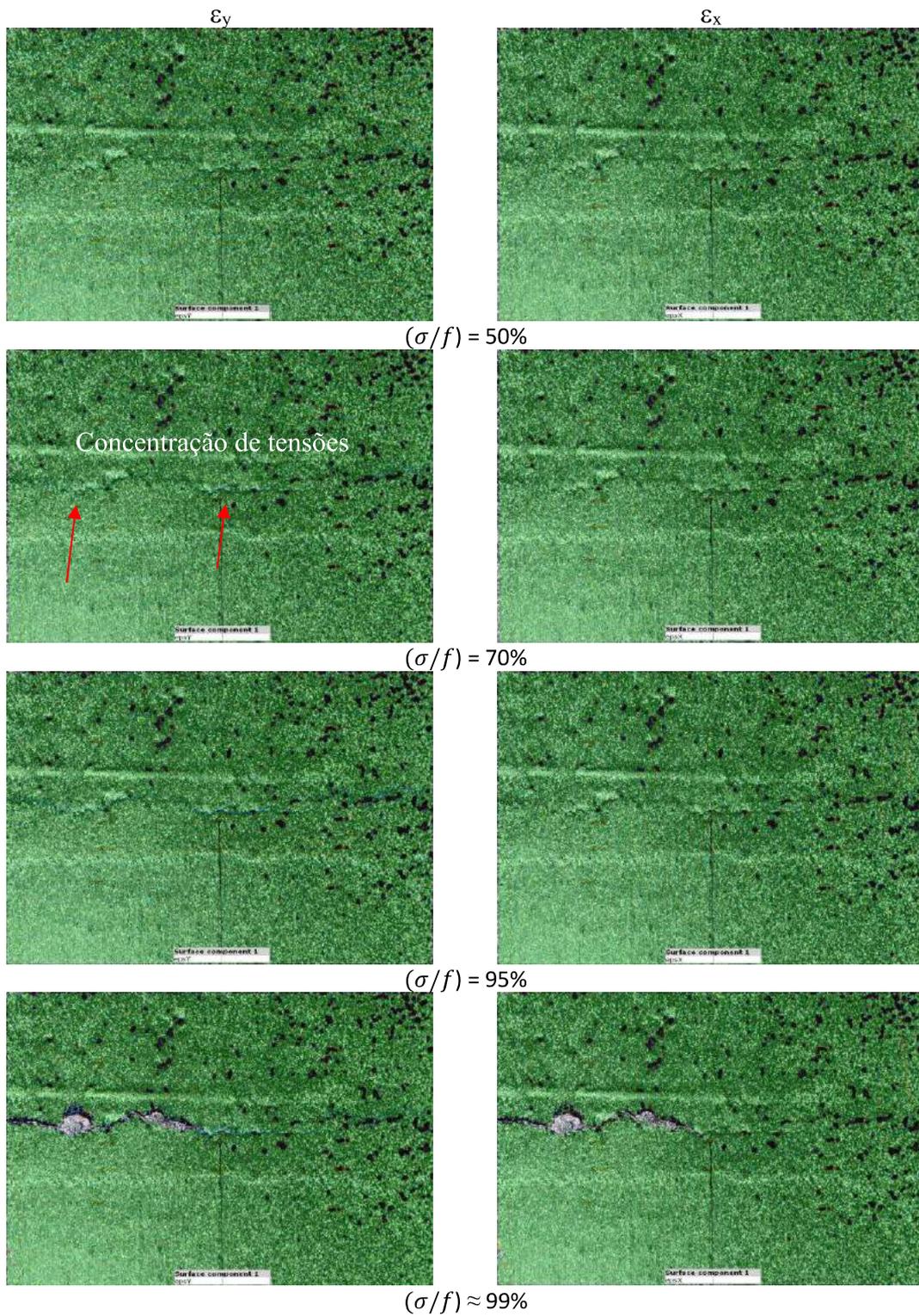
AVANÇO DO MODO DE RUPTURA DE PRISMAS DA TIPOLOGIA PPV – T3

Figura 102 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV11 – T3 – DIC – Parte traseira



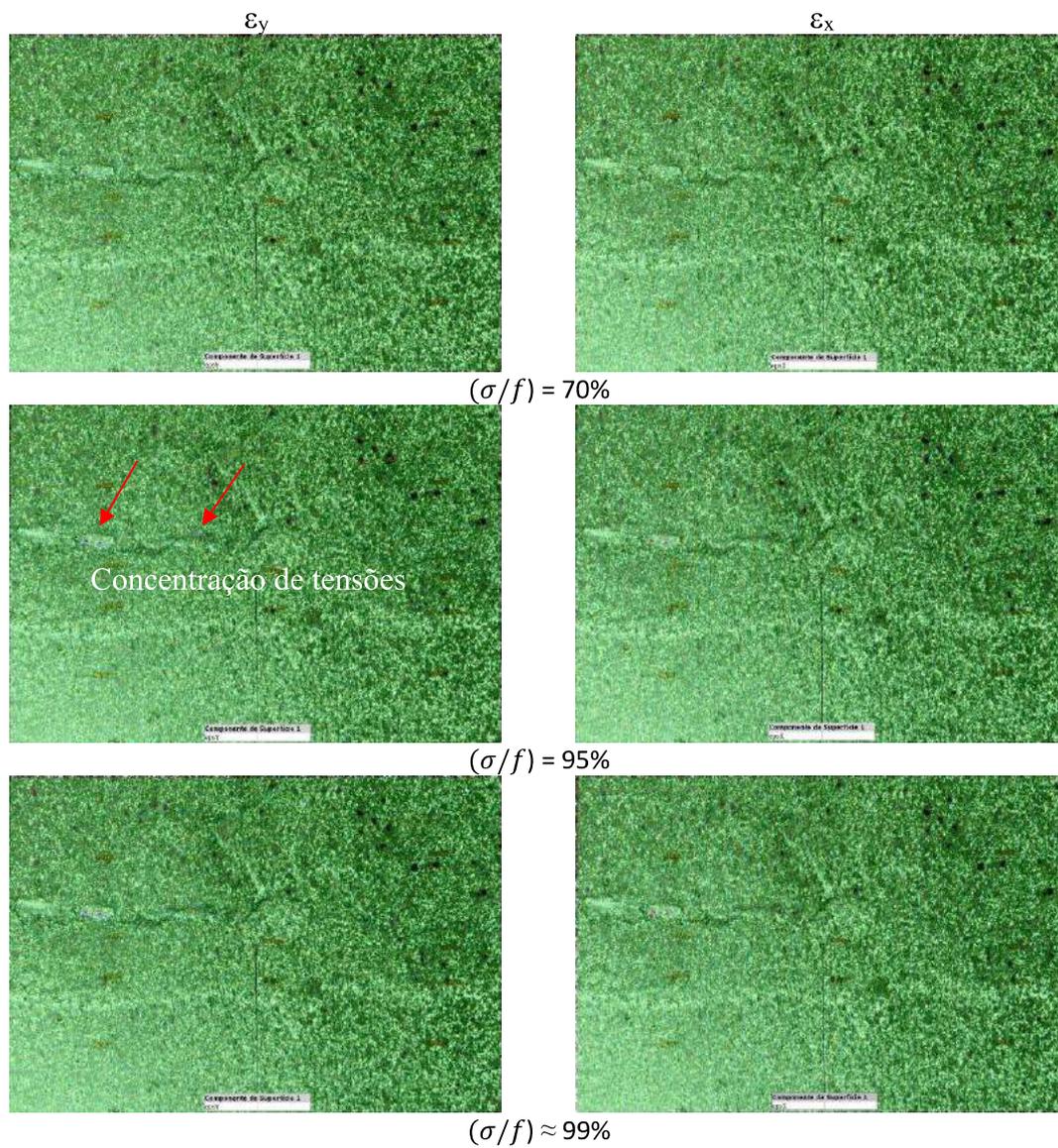
Fonte: Elaboração própria.

Figura 103 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV10 – T3 – DIC – Parte Frontal



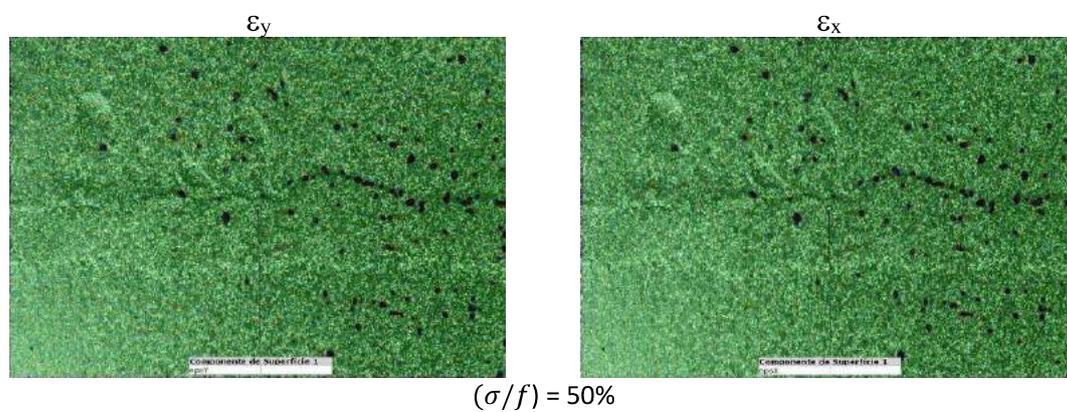
Fonte: Elaboração própria.

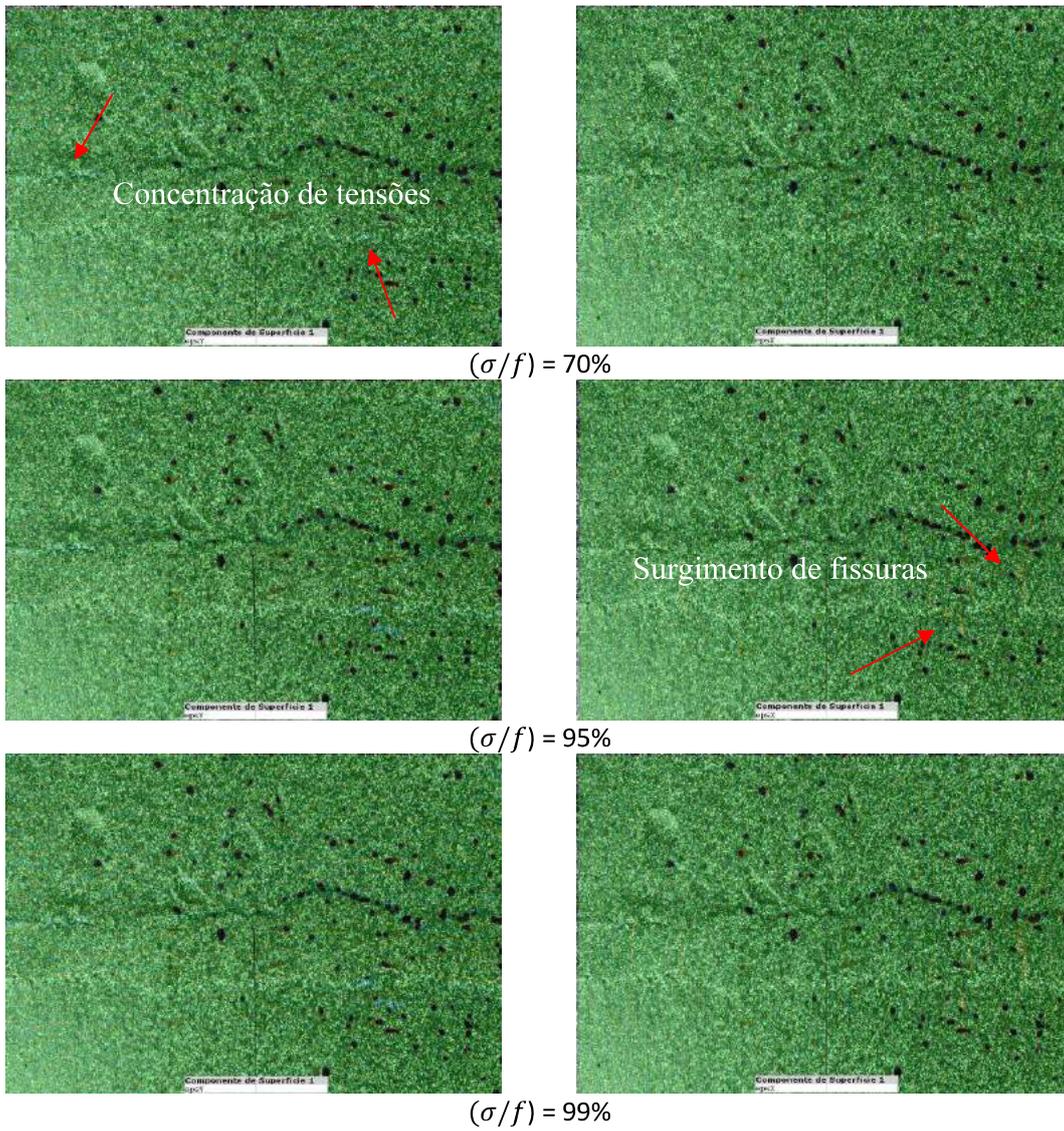
Figura 104 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV9 – T3 – DIC – Parte traseira



Fonte: Elaboração própria.

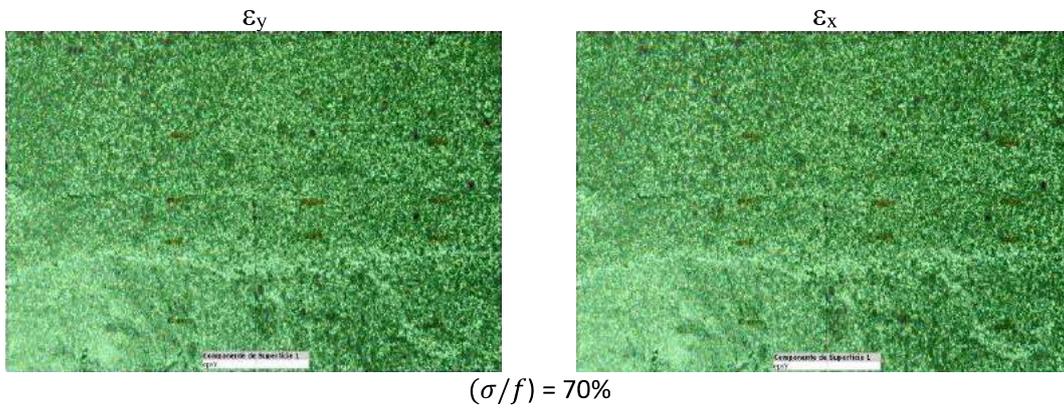
Figura 105 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV8 – T3 – DIC – Parte frontal

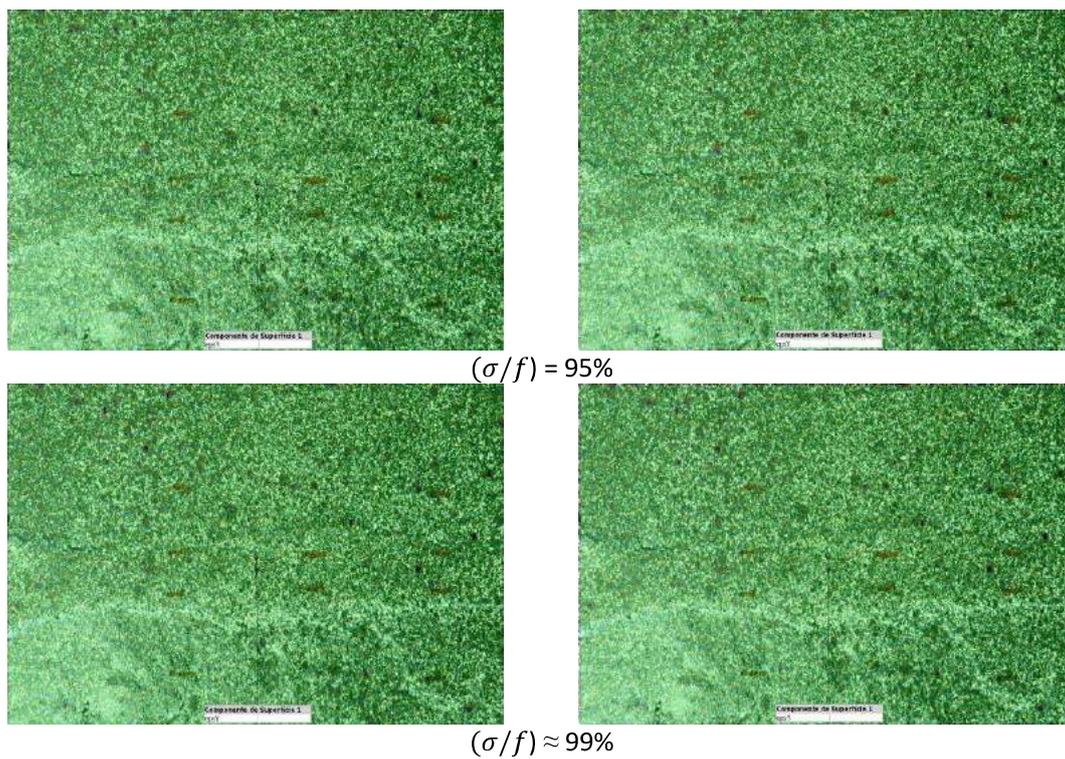




Fonte: Elaboração própria.

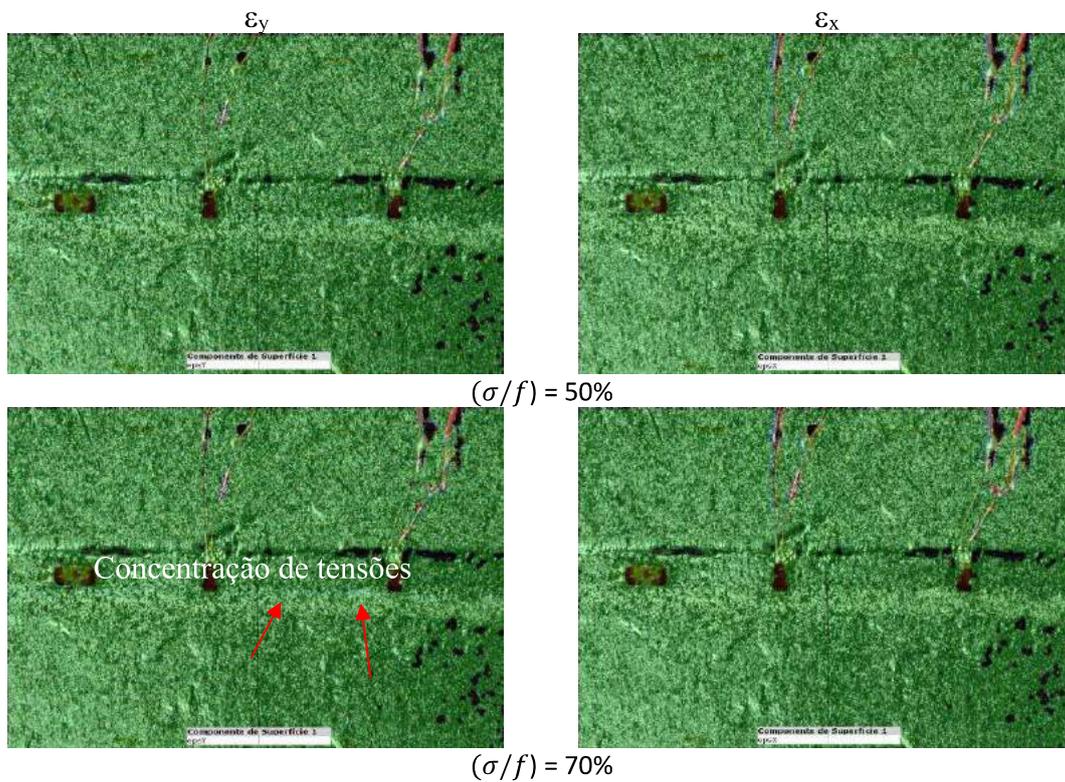
Figura 106 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV8 – T3 – DIC – Parte traseira

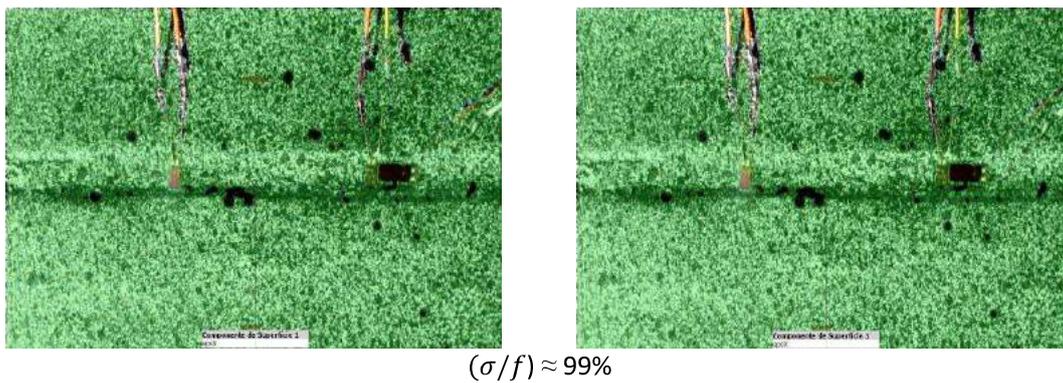




Fonte: Elaboração própria.

Figura 107 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV7 – T3 – DIC – Parte frontal

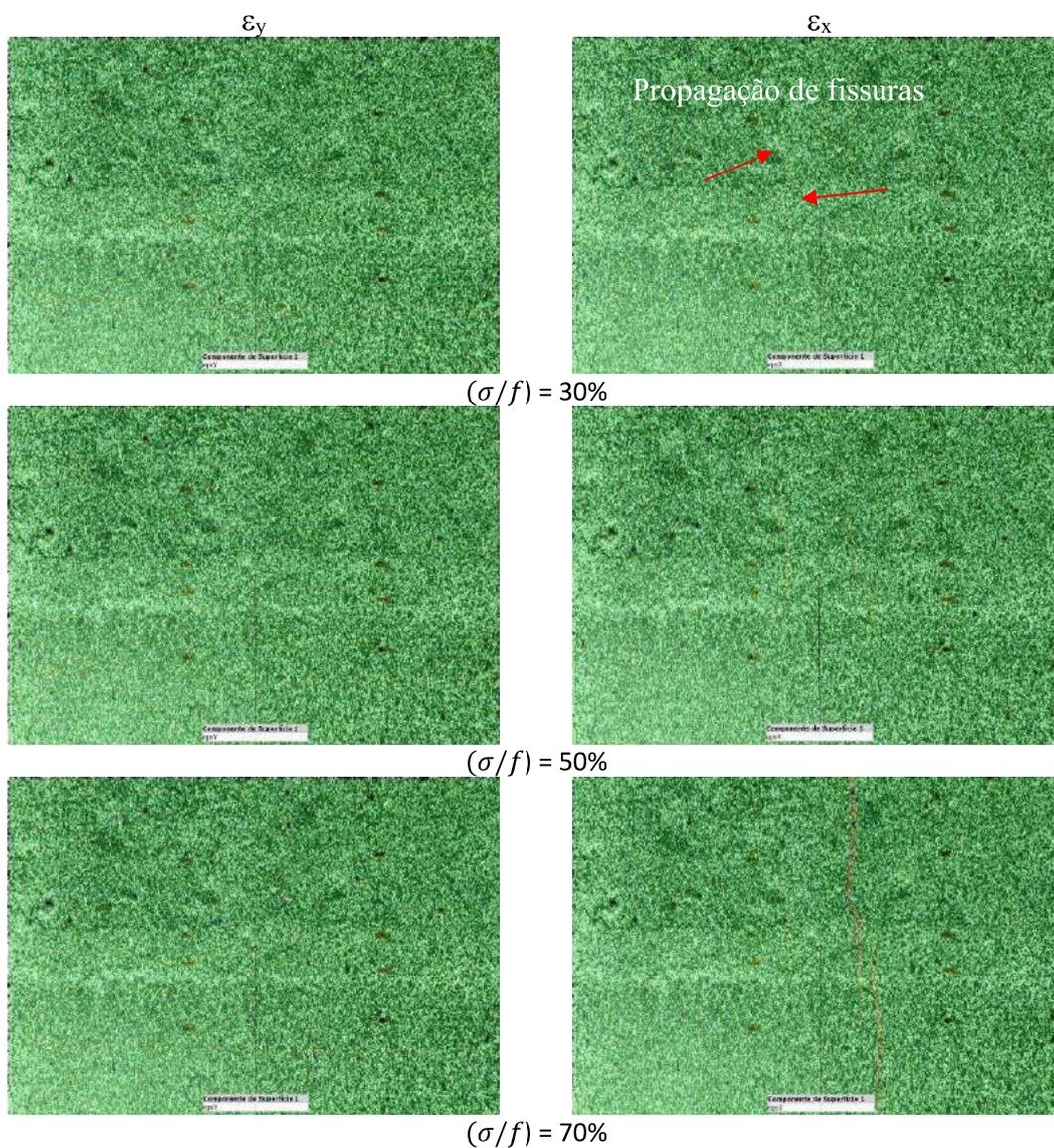


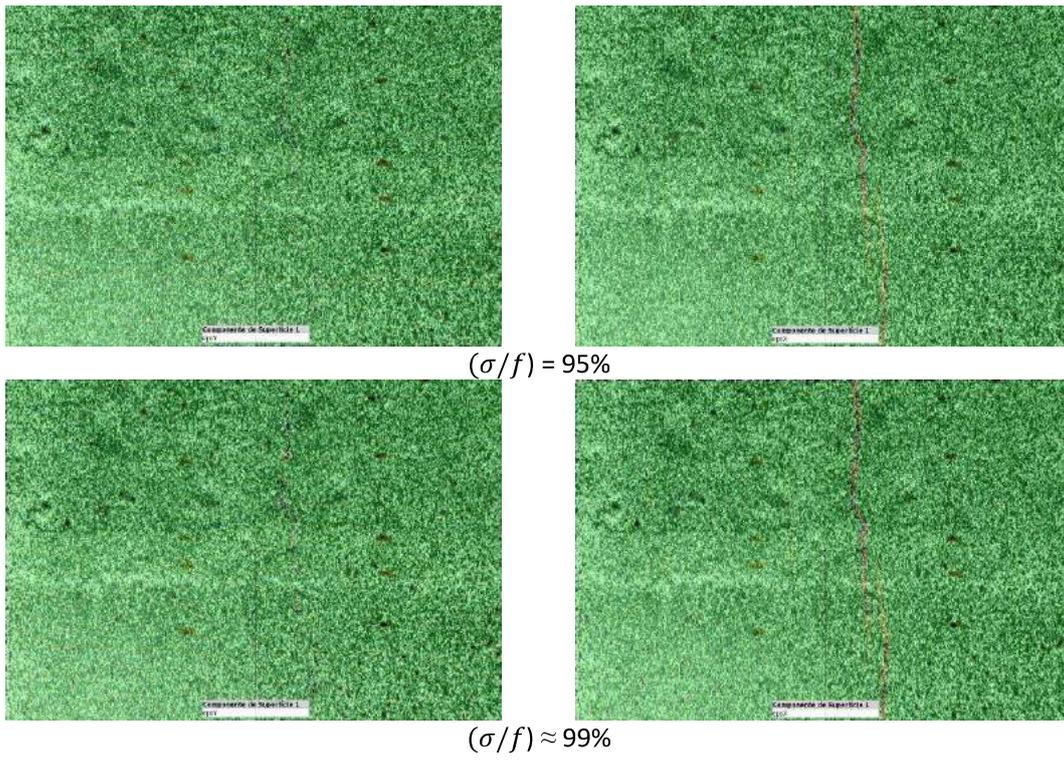


Fonte: Elaboração própria.

AVANÇO DO MODO DE RUPTURA DE PRISMAS DA TIPOLOGIA PPV – T4

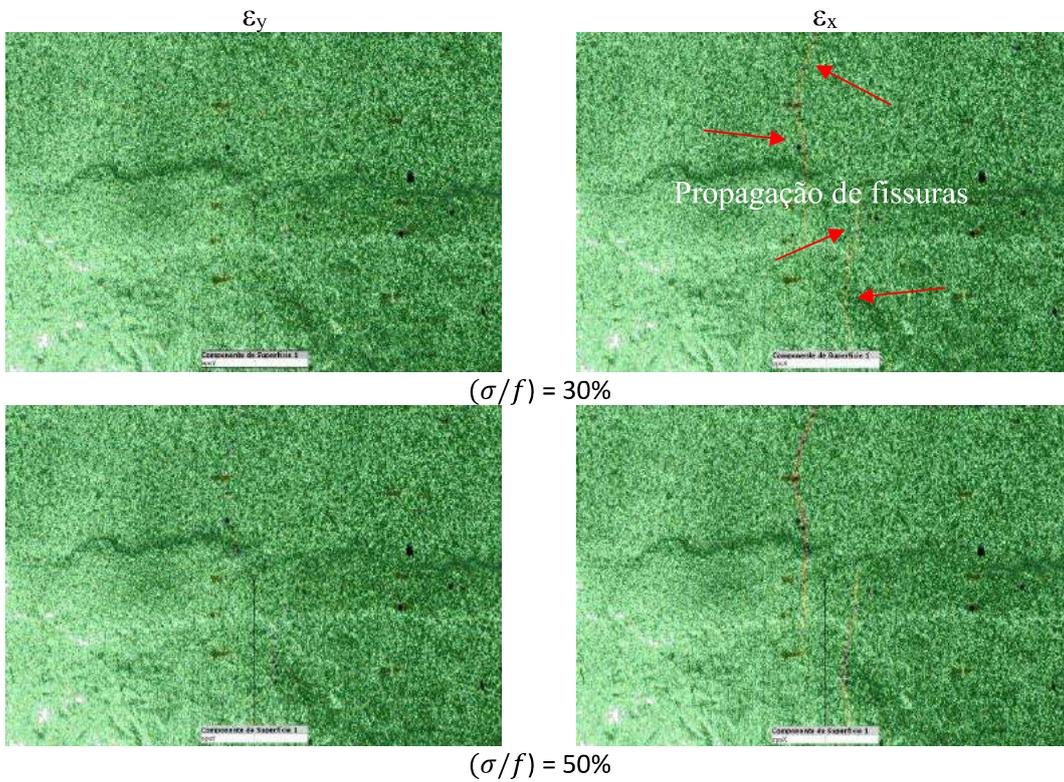
Figura 109 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV11 – T4 – DIC – Parte traseira

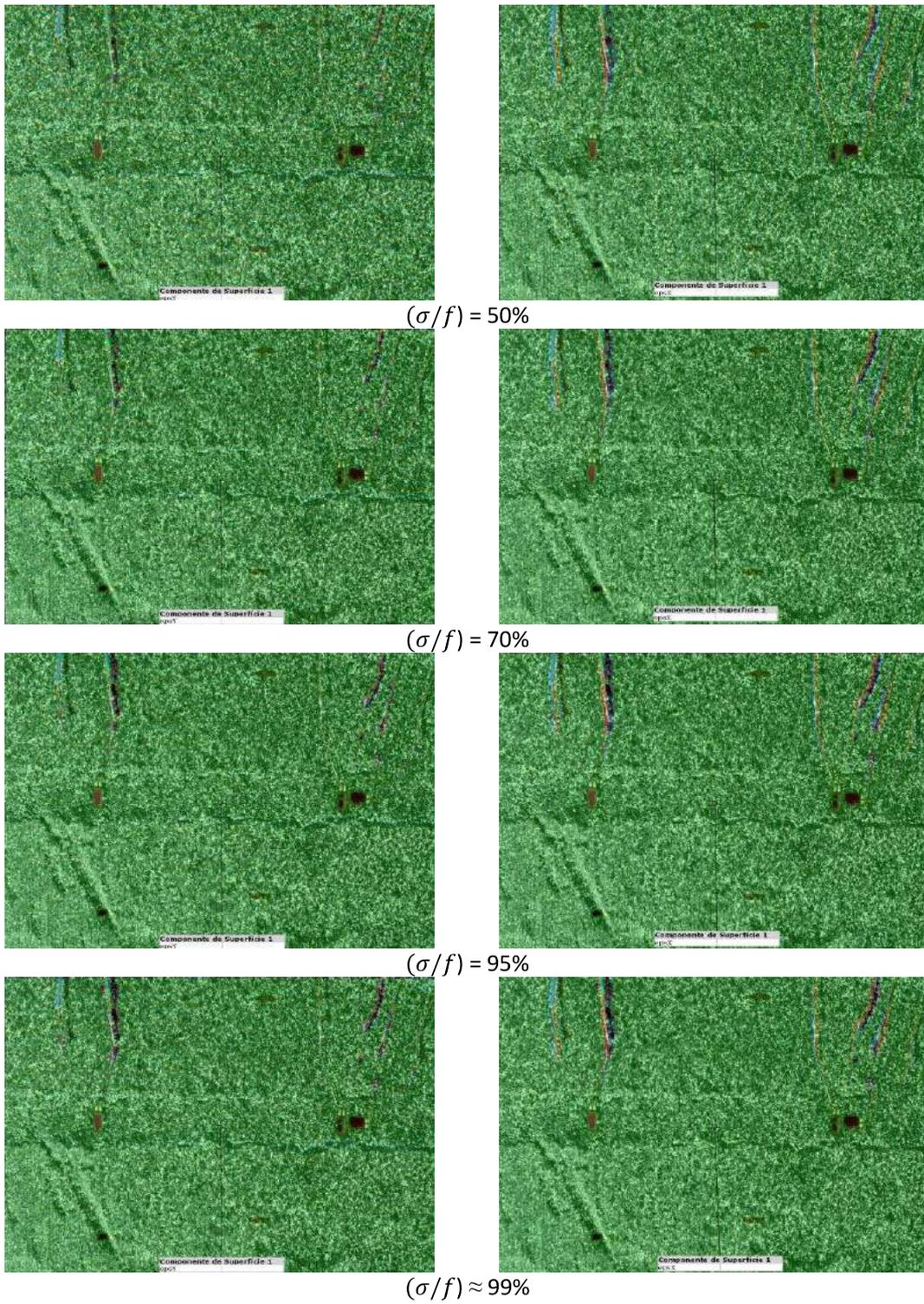




Fonte: Elaboração própria

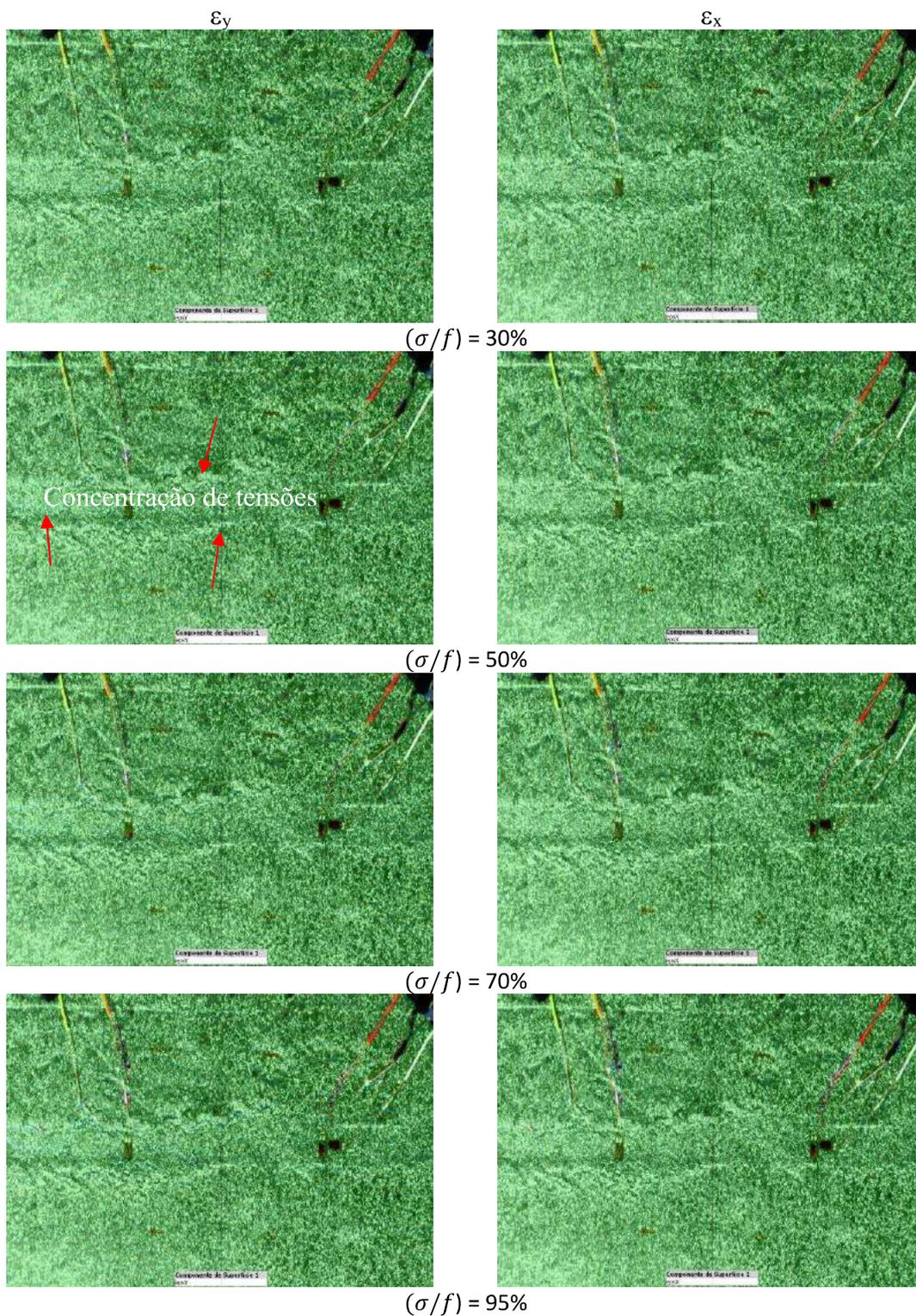
Figura 110 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV10 – T4 – DIC – Parte traseira

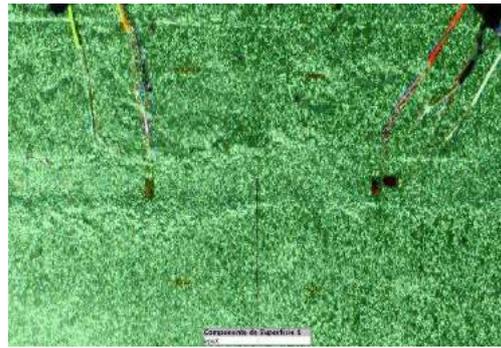
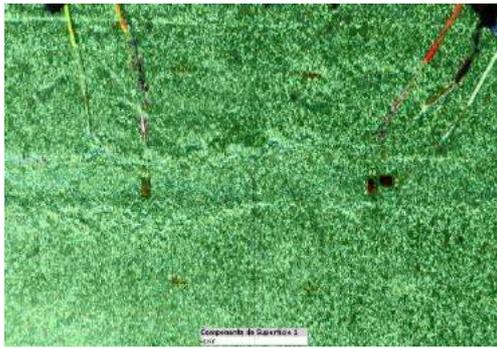




Fonte: Elaboração própria.

Figura 112 – Avanço do processo de ruptura do prisma PPV6 – T4 – DIC – Parte traseira





$(\sigma/f) \approx 99\%$

Fonte: Elaboração própria.