

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ALINE MOREIRA BRANDOLFF

**ANÁLISE DE RUPTURA DE PRISMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL ATRAVÉS
DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL**

**Alegrete
2019**

ALINE MOREIRA BRANDOLFF

**ANÁLISE DE RUPTURA DE PRISMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL ATRAVÉS
DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Jaelson Budny

**Alegrete
2019**

ALINE MOREIRA BRANDOLFF

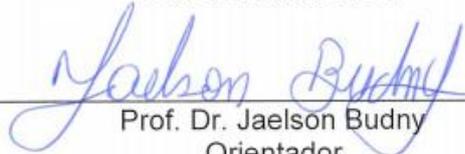
**ANÁLISE DE RUPTURA DE PRISMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL ATRAVÉS
DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

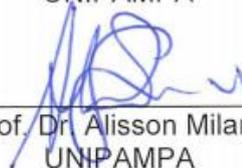
Orientador: Dr. Jaelson Budny

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26, novembro de 2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Jaelson Budny
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Alisson Milani
UNIPAMPA



Prof. Dr. André Lubeck
UFSM

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer a minha família, que sempre me apoiou imensamente em toda minha trajetória acadêmica, principalmente a minha irmã Bianca, que leu e releu esse trabalho muitas vezes para me ajudar a torna-lo o melhor possível.

Aos Professores Alisson Milani e Jaelson Budny, por todos os conselhos e ajudas durante os meus estudos e ensaios para a elaboração do meu TCC.

A Universidade Federal do Pampa e aos responsáveis pelo Laboratório da Engenharia Civil, pela disponibilidade do laboratório para realização da minha pesquisa.

Por fim, a todos os demais, que de alguma forma me apoiaram muito, mas não estão aqui citados.

“Os cientistas estudam o mundo como ele
é. Os engenheiros criam o mundo como
ele nunca havia sido”.
Theodore Vou Kármán

RESUMO

Apesar dos avanços de tecnologia, ainda há uma carência de conhecimento relacionado a previsão do modo de ruptura da alvenaria estrutural. Para isso, é interessante utilizar uma instrumentação na análise de prismas comprimidos. A correlação de imagem digital (DIC) é uma evolução que pode ser aplicada nesses ensaios. Este estudo buscou avaliar a aplicação da correlação de imagem digital, com uso do software GOM Correlate na alvenaria estrutural através da análise do comportamento de prismas de blocos cerâmicos de parede vazada não-grauteados construídos com argamassas de diferentes resistências. Para isso, foram realizados ensaios de compressão axial em prismas de duas fiadas, com três resistências de argamassas industrializadas diferentes, 2, 6 e 12 MPa. Esses ensaios foram instrumentados com LVDTs e filmados, então, foi realizada uma análise dos resultados com LVDTs, uma análise visual do modo de ruptura e uma análise de deformação no software GOM Correlate. Os resultados finais dessa pesquisa comprovaram que a correlação de imagem digital é eficiente quando comparada com LVDTs e que a baixa resistência da argamassa induz o rompimento do bloco por esmagamento da junta.

Palavras-Chave: alvenaria estrutural, correlação de imagem digital, ruptura de prismas.

ABSTRACT

Despite advances in technology, there is still a lack of knowledge related to the occurrence of structural masonry rupture. For this, it is interesting to use an instrumentation in the analysis of compressed prisms. Digital image correlation (DIC) is an evolution that can be applied in these assays, as it is the same as full field transformation. This study aimed to evaluate the application of digital image correlation using GOM Correlations in structural masonry software by analyzing the behavior of prisms of unglutted hollow ceramic blocks constructed with clays of different strengths. For this, axial compression tests were performed on two-row prisms, with three different industrialized clay strengths, 2, 6 and 12 MPa. These trials were filmed and did not analyze any GOM Correlate software. The final results of this research proved that the digital image correlation is efficient compared to LVDTs and that the low mortar resistance is induced by block breakage by joint crushing.

Keywords: structural masonry, digital image correlation, prism break.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modo de ruptura dos prismas um, para os três traços de argamassa.	17
Figura 2. Blocos utilizados na pesquisa. (a) cerâmico de paredes vazadas, (b) cerâmico de paredes maciças, (c) blocos de concreto.	20
Figura 3. Geometria dos prismas avaliados. (a) blocos de paredes vazadas, (b) blocos de paredes maciças, (c) blocos de concreto.	20
Figura 4. Avanço do processo de ruptura por esmagamento da junta no prisma D5, com blocos de paredes vazadas. (a) Surge a primeira fissura na junta de argamassa, (b) a partir da fissura na junta, propagam-se trincas nos blocos e (c) há o fendilhamento do bloco junto à argamassa e a ruptura do conjunto.	21
Figura 5. Avanço do processo de ruptura por tração do bloco, prisma B3. (a) Surge a primeira trinca vertical na parede do bloco e (b) as trincas generalizam-se, passando pela junta e indo até o bloco inferior.	21
Figura 6. Sistema de captação de imagens digitais.	23
Figura 7. Duas imagens digitais sucessivas de uma área de interesse e respectivos subconjuntos de pixel indicando padrões a serem observados.	23
Figura 8. Análise de deformação de uma superfície através da DIC. Superfície de deformação de uma peça.	24
Figura 9. Padrões aleatórios considerados ótimos.	24
Figura 10. Contração por secagem da argamassa, medições obtidas por DIC e LVDT.	26
Figura 11. Comparação entre diferentes métodos de medição de deslocamentos através das curvas tensão deformação real.	27
Figura 12. Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados.	31
Figura 13. Prisma confinado pelos pratos da prensa.	42
Figura 14. Detalhe lateral do posicionamento da câmera e refletor no ensaio de compressão de prisma.	43
Figura 15. Detalhe em perspectiva do posicionamento da câmera e refletor no ensaio de compressão de prisma.	43
Figura 16. Deformações utilizadas.	45
Figura 17. Curva tensão <i>versus</i> deformação específica dos prismas com argamassa de 2 MPa.	47

Figura 18. Modo de ruptura dos prismas com argamassa de 2 MPa.....	48
Figura 19. Vistas do prisma após a ruptura.....	49
Figura 20. Curva tensão <i>versus</i> deformação específica dos prismas com argamassa de 6 MPa.	51
Figura 21. Modo de ruptura dos prismas com argamassa de 6 MPa.....	52
Figura 22. Vistas do prisma após a ruptura.....	52
Figura 23. Curva tensão <i>versus</i> deformação específica dos prismas com argamassa de 12 MPa.	54
Figura 24. Modo de ruptura dos prismas com argamassa de 12 MPa.....	54
Figura 25. Vistas do prisma após a ruptura.....	55
Figura 26. Curva tensão <i>versus</i> deformação específica para prismas com diferentes resistências de argamassa.....	56
Figura 27. Distâncias utilizadas para a DIC.....	58
Figura 28. Curva tensão <i>versus</i> deformação do prisma com argamassa de 2MPa para diferentes métodos de medição: (a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4.	59
Figura 29. Deformação específica dos prismas para diferentes métodos de medição na posição 1.....	60
Figura 30. Deformação específica dos prismas para diferentes métodos de medição na posição 2.....	61
Figura 31. Curva tensão <i>versus</i> deformação do prisma com argamassa de 6 MPa para diferentes métodos de medição: (a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4	62
Figura 32. Deformação Específica dos Prismas para diferentes métodos de medição na posição 1.....	63
Figura 33. Deformação Específica dos Prismas para diferentes métodos de medição na posição 2.....	64
Figura 34. Curva tensão <i>versus</i> deformação dos Prismas com argamassa de 12 MPa para diferentes métodos de medição: (a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4.....	65
Figura 35. Deformação Específica dos Prismas para diferentes métodos de medição na posição 1.....	66

Figura 36. Deformação Específica dos Prismas para diferentes métodos de medição na posição 2.....	67
Figura 37. Pontos de análise de deformação:	68
Figura 38. Curva tensão <i>versus</i> deformação do prisma comparando LVDT médio e DIC na junta de argamassa:.....	70
Figura 39. Pontos de análise de deformação:	72
Figura 40. Curva tensão <i>versus</i> deformação dos prismas comparando os LVDTs com a DIC na junta:	74
Figura 41. Pontos de análise de deformação.	76
Figura 42. Curva tensão <i>versus</i> deformação dos prismas comparando os LVDTs com a DIC na junta.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Proporção em volume de cimento, cal e areia dos traços de argamassas.	16
Tabela 2. Normas adotadas.	30
Tabela 3. Determinação das características dimensionas do bloco.	34
Tabela 4. Área líquida dos blocos.	35
Tabela 5. Caracterização física dos blocos.	37
Tabela 6. Resultado de compressão dos blocos.	38
Tabela 7. Caracterização física das argamassas.	40
Tabela 8. Ensaio de tração na flexão das argamassas.	41
Tabela 9. Ensaio de compressão das argamassas.	41
Tabela 10. Análise de Tensão de Ruptura e Módulo de Elasticidade dos prismas com argamassa de 2 MPa.	46
Tabela 11. Análise de Tensão de Ruptura e Módulo de Elasticidade dos prismas com argamassa de 6 MPa.	50
Tabela 12. Análise de Tensão de Ruptura e Módulo de Elasticidade dos prismas com argamassa de 12 MPa.	53
Tabela 19. Comparação dos prismas com diferentes resistências de argamassa....	56
Tabela 20. Relação entre as resistências da argamassa e o bloco.	57
Tabela 13. Comparação entre LVDTs e DICs do Prisma com argamassa de 2 MPa.	60
Tabela 14. Comparação entre LVDTs e DICs do Prisma com argamassa de 6 MPa.	63
Tabela 15. Comparação entre LVDTs e DICs do Prisma com argamassa de 12 MPa.	66
Tabela 16. Relação da deformação nas juntas dos prismas de 2 MPa com a deformação total.	69
Tabela 17. Relação da deformação nas juntas dos prismas de 6 MPa com a deformação total.	73
Tabela 18. Relação da deformação nas juntas dos prismas de 12 MPa com a deformação total.	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo principal.....	13
1.2 Objetivos específicos	14
1.3 Estrutura do trabalho.....	14
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Modo de ruptura da alvenaria estrutural	15
2.2 Correlação de imagem digital	22
3 METODOLOGIA	29
3.1 Considerações iniciais	29
3.2 Caracterização dos blocos.....	32
3.2.1 Determinação das características dimensionas do bloco	32
3.2.2 Determinação das características físicas.....	35
3.2.3 Determinação das características mecânicas	37
3.3 Caracterização das argamassas	39
3.3.1 Caracterização física.....	39
3.3.2 Caracterização mecânica	40
3.4 Compressão em prismas.....	41
3.5 Análise visual dos prismas comprimidos	42
3.5.1 GOM Correlate.....	44
4.1 Compressão dos prismas	46
4.1.1 Prismas com argamassa de 2 MPa	46
4.1.2 Prismas com argamassa de 6 MPa	49
4.1.3 Prismas com argamassa de 12 MPa	53
4.2 Relação entre os prismas de diferentes argamassas.....	55
4.3 Comparação LVDT <i>versus</i> DIC.....	58
4.3.1 Prismas com argamassa de 2 MPa	58
4.3.2 Prismas com argamassa de 6 MPa	61
4.3.3 Prismas com argamassa de 12 MPa	64
4.4 O esmagamento das juntas de argamassa nos prismas ensaiados à compressão.....	67
4.4.1 Prismas com argamassa de 2 MPa	68
4.4.2 Prismas com argamassa de 6 MPa	71
4.4.3 Prismas com argamassa de 12 MPa	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	80
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Até o início do Século XX todas as estruturas de alvenaria construídas foram dimensionadas empiricamente. Intuitivamente, projetistas e construtores compreendiam como as cargas eram transferidas pelas paredes resistentes para o solo (SABBATINI, 1984).

Nos dias atuais, apesar do avanço das tecnologias, as pesquisas relacionadas à alvenaria estrutural revelam que há uma falta de conhecimento em relação ao comportamento do material, principalmente relacionado ao modo de ruptura (LUBECK, 2016).

Essa falta de conhecimento está diretamente relacionada com o impacto no dimensionamento da alvenaria. Por isso, os modos de ruptura da alvenaria precisam ser mais estudados, a fim de que se alcancem patamares de desenvolvimento tecnológico similares aos que podem ser vistos sobre outras estruturas convencionais mais utilizadas (SANTANA & ARAÚJO, 2017).

Diante disso, os estudos devem ser intensificados, essencialmente em relação à verificação das deformações limites de ruptura. De acordo com Machado (2017), as deformações limites de ruptura são responsáveis por emitirem os primeiros sinais de que a estrutura pode estar entrando em colapso.

Nesse contexto, mostra-se interessante ampliar o estudo do modo de ruptura dos prismas comprimidos através da instrumentação dos prismas, medindo as deformações específicas axiais na região das juntas de assentamento, de maneira a determinar como essas se comportam (LUBECK, 2016).

Desse modo, é interessante implementar a tecnologia de correlação de imagem digital ou DIC (*digital image correlation*) para analisar a ruptura de prismas. Pois com o DIC é possível medir deslocamentos em qualquer ponto da superfície, uma grande vantagem comparada a métodos convencionais, que são capazes de medir apenas deformações pontuais (QUEIROZ, 2013).

1.1 Objetivo principal

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a aplicação da correlação de imagem digital, com uso do software GOM Correlate na alvenaria estrutural,

através da análise do modo de ruptura de prismas de blocos cerâmicos de parede vazada não-grauteados construídos com argamassas de diferentes resistências.

1.2 Objetivos específicos

- Validar o DIC com o uso de instrumentação através de LVDTs (Transdutores de Deslocamento Variável Linear);
- Avaliar os modos de ruptura dos prismas moldados com diferentes resistências de argamassas;
- Verificar para diferentes resistências de argamassa, o tipo de ruptura ocorrido e o nível de resistência última dos prismas;

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. No primeiro, serão apresentados os temas e os objetivos do trabalho. No segundo, é apresentada uma revisão bibliográfica com uma análise de como se desenvolve o processo de ruptura da alvenaria comprimida, os principais estudos que buscaram prever a carga e forma de ruptura da alvenaria estrutural e a caracterização do esmagamento das juntas. Além disso, também descreve como é realizado o procedimento de correlação de imagem digital e quais estudos experimentais já utilizaram essa técnica.

No terceiro capítulo são descritos os procedimentos metodológicos adotados para alcançar os objetivos propostos. Também são apresentados os métodos para caracterização dos materiais, aquisição das imagens, execução dos ensaios de ruptura dos prismas e como será realizado o procedimento de análise visual das rupturas e medições de deformações, através de uma correlação de imagem digital.

Por sua vez, o quarto capítulo é dedicado à apresentação dos resultados desse procedimento experimental. Por fim, o quinto capítulo refere-se à conclusão. Após, são apresentadas as referências bibliográficas.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Modo de ruptura da alvenaria estrutural

Apesar de um amplo número de pesquisas na área, a alvenaria estrutural não possui um comportamento plenamente entendido. Por isso, há uma generalização do seu comportamento que, muitas vezes, não correspondem à realidade. Como consequência disso, não há uma plena otimização desse sistema (MOHAMAD, 1998).

Diante disso, é fundamental entender a análise do comportamento mecânico da alvenaria. Assim, é necessário compreender os modos de ruptura que podem ocorrer e, com isso, avaliar as propriedades dos materiais num estado de tensão multiaxial (AFSHARI & KALDJAN, 1989 *apud* MOHAMAD, 1998).

Assim sendo, várias pesquisas foram importantes ao longo dos anos para entender o comportamento da alvenaria estrutural. Cabe salientar que os procedimentos experimentais dos anos 80, a exemplo de McNary (1984) *apud* Mohamad (2007), Shrive e El-Rahman (1985) *apud* Mohamad (2007), e Cheema e Klingner (1986) *apud* Mohamad (2007), que possuem conclusões que nos levam aos questionamentos atuais sobre esse método construtivo.

McNary (1984) *apud* Mohamad (2007), em seus estudos, citou que a ruptura do prisma de blocos estruturais acontece, em primeiro lugar, pela fissuração das superfícies entre o bloco e a argamassa. Por outro lado, Shrive e El-Rahman (1985) *apud* Mohamad (1998) verificaram que a origem da trinca em prismas comprimidos é o esmagamento da junta de argamassa, gerando concentrações de tensões no bloco, rompendo muitas vezes sem aviso. Além disso, os doutrinadores verificaram que o processo de fendilhamento é gerado pelo esmagamento da junta dos prismas. Por sua vez, Cheema e Klingner (1986) *apud* Mohamad (2007) notaram que a ruptura dos prismas comprimidos poderia ocorrer por diferentes modos. Ou seja, quando a tração principal no bloco atingia a resistência do bloco a tração, ocorria a ruptura a tração. Por sua vez, quando a tensão principal de compressão no bloco atingia a resistência à compressão, a ruptura era por esmagamento do bloco.

Ainda, de acordo com Mohamad (1998), as formas de ruptura da alvenaria estrutural dependem das características mecânicas dos elementos que constituem a alvenaria, tanto do bloco como da argamassa. Assim, nas argamassas com traços

menos resistentes a compressão do que os blocos, a forma de ruptura é dúctil, ocasionando um esfacelamento das partes externas dos blocos, próximos às juntas. Em contrapartida, nas argamassas que possuem o mesmo nível de resistência à compressão do bloco, a ruptura é essencialmente frágil no sentido da secção transversal do prisma. Constatase então que a ruptura pode ocorrer por esmagamento da argamassa, tração na argamassa e tração no bloco.

Além disso, as características do bloco estrutural podem influenciar nos caracteres de ruptura. Neste particular, Carvalho (2003) apurou que blocos de maior altura apresentam menor resistência em relação aos de menor altura. No entanto, o aumento da resistência nos prismas não é proporcional para cada tipo de bloco. Contudo, ao mesmo tempo, há uma tendência de diminuir a resistência na medida em que se aumenta a espessura de junta e a forma de aplicação da argamassa influencia diretamente na resistência de prismas. Assim, prismas com argamassas em toda superfície possuem resistências maiores comparados com argamassa apenas na região externa do bloco e, ainda, quanto maior a área da argamassa, mais resistente se torna o prisma.

Por conseguinte, complementando os trabalhos supracitado, Mohamad (2007) realizou um estudo sobre as influências no modo de ruptura da alvenaria estrutural através de blocos de concreto não grauteados. Em princípio, o autor caracterizou a interação entre o bloco e a argamassa em seu procedimento experimental, principalmente em relação às propriedades mecânicas, quando os componentes da alvenaria são submetidos aos esforços de compressão. Para isso, Mohamad (2007) construiu prismas com três blocos de concreto inteiros e duas juntas de argamassa com três traços diferentes, conforme observa-se na Tabela 1, a seguir.

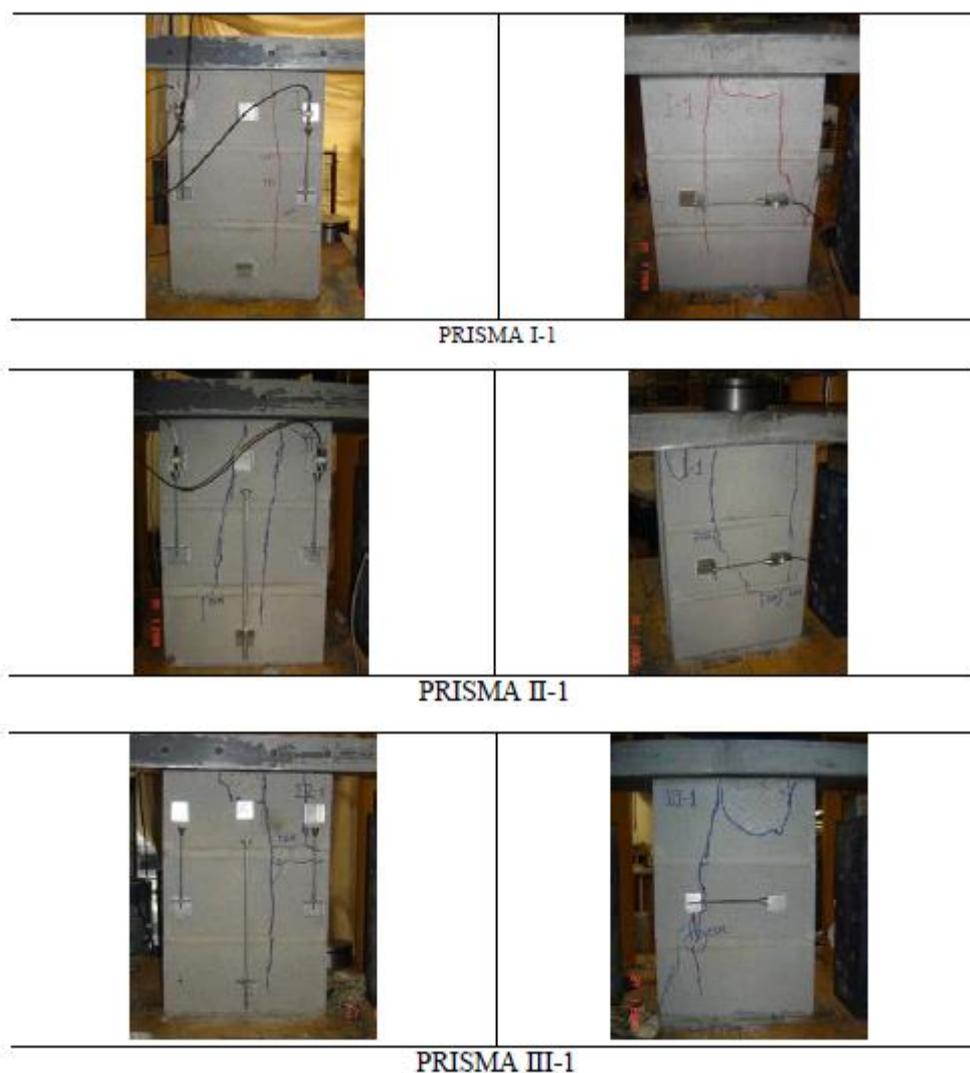
Tabela 1. Proporção em volume de cimento, cal e areia dos traços de argamassas.

Série	Traço - Proporção entre materiais em volume		
	Cimento	Cal	Areia
I	1	0,25	3
II	1	0,5	4,5
III	1	1	6

Fonte: Mohamad (2007).

A Figura 1, mostra a deformação dos primeiros prismas rompidos com os três diferentes traços de argamassa. Visualmente, pode-se observar o modo de ruptura de cada prisma analisado por Mohamad (2007).

Figura 1. Modo de ruptura dos prismas um, para os três traços de argamassa.



Fonte: Adaptado de Mohamad (2007).

Em suma, quando os prismas são submetidos a uma carga de compressão axial, Mohamad (2007) verificou que o prisma tende a igualar a rigidez dos materiais, ou seja, a junta de argamassa horizontal e o bloco passam a comportarem-se como únicos, sendo que as deformações do prisma são governadas pela deformação da junta de argamassa, até níveis de tensão igual a 30% da resistência à compressão do prisma. Além disso, pode-se observar que os prismas de argamassa I tiveram o comportamento de ruptura devido ao desenvolvimento de tensões de tração,

enquanto os prismas de argamassas II e III romperam-se por esmagamento da junta da argamassa.

Nesse contexto, realizando uma observação mais detalhada do modo de ruptura para os prismas de argamassa I, Mohamad (2007) analisou que na medida em que aumenta o carregamento, inicia-se um aumento desproporcional das deformações laterais quando a tensão atinge 70% da resistência à compressão última do prisma. Assim, as deformações laterais possuem um comportamento linear até a primeira trinca. Posteriormente, ocorre um aumento repentino nas deformações laterais, provocando uma relaxação nas deformações axiais, ainda sem pontos de esmagamento das juntas de assentamento. Dessa maneira, o conjunto começa a se comportar como um material monolítico e as trincas são simétricas, verticais e dispersas e há o surgimento das não-linearidades da alvenaria corresponde ao aumento das deformações laterais. Isso tudo devido à extensiva fissuração do material e a um aumento progressivo do coeficiente de Poisson.

Nos prismas de argamassa II, observa Mohamad (2007) que possuem um aumento de deformação lateral progressivo e não repentino. E, em alguns pontos, pode-se verificar a existência de trincas verticais e esmagamentos localizados na junta de assentamento. Já nos prismas de argamassa III, os esmagamentos localizados foram frequentes e induziram o surgimento de concentração de tensões em alguns pontos da alvenaria, bem como o conseqüente surgimento de trincas verticais.

Resumidamente, as análises finais de Mohamad (2007) concluíram que, para diferentes tipos de composição entre o bloco e a argamassa, ocorre uma diminuição na proporção de rigidez entre a argamassa e o bloco. Isso se dá devido ao esmagamento da junta de assentamento, gerando concentrações de tensões no bloco, ou ao desenvolvimento de tensões de tração localizadas.

Por sua vez, a fim de complementar os estudos de Mohamad (2007), De Lima (2010) também comprovou a influência da resistência da argamassa no modo de ruptura. No entanto, de Lima (2010) analisou a influência do modo de ruptura em blocos cerâmicos não grauteados.

Em seu procedimento experimental, De Lima (2010) pôde observar que as argamassas com menor resistência a compressão comparadas com a resistência à tração dos blocos levam a uma ruptura mais frágil do prisma, ocorrendo o

esmagamento da argamassa. Já as argamassas mais fortes levam a uma ruptura com fendilhamento à tração, provocando um som característico.

Após a análise dos trabalhos de Mohamad (1998), Carvalho (2003), Mohamad (2007) e De Lima (2010) pode-se constatar que o esmagamento das juntas é um elemento desencadeante da ruptura da alvenaria estrutural.

Em contrapartida, para aprofundar os conhecimentos sobre os modos de ruptura da alvenaria, De Marco (2016) avaliou a ruptura de blocos cerâmicos não grauteados através da análise de vídeos de ensaios de prisma, variando diferentes blocos e resistência de argamassa.

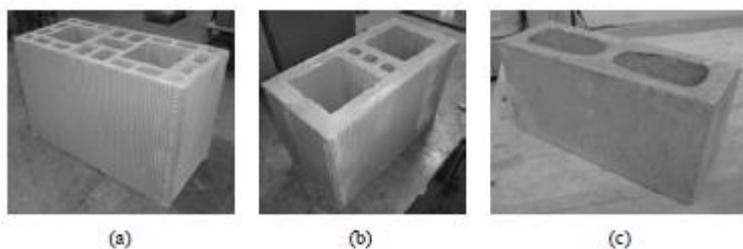
A partir de seu estudo, De Marco (2016) observou que os fatores de eficiência prisma/bloco foram distintos entre os prismas com blocos de paredes vazadas e de blocos de paredes maciças. Para o autor, o modo de ruptura entre esses blocos possui uma ruptura diferente, demonstrando que a interação entre a argamassa e o bloco é determinante sobre o modo de ruptura.

Além disso, após a análise de De Marco (2016), fica evidente que o esmagamento da junta de argamassa em prismas com blocos cerâmicos é um dos fenômenos envolvidos no processo de ruptura da alvenaria. Conclui-se, então, que a forma e o avanço do processo de ruptura são dependentes da geometria do prisma e do tipo de bloco utilizado.

De maneira a complementar o estudo de De Marco (2016), foi realizado um novo conjunto de ensaios de rupturas filmadas por Lubeck (2016), que analisou o comportamento mecânico e influência da argamassa de assentamento no modo de ruptura da alvenaria estrutural, através de uma análise visual e da sequência de imagens da ruptura de prismas comprimidos axialmente. Os resultados de resistência dos prismas e o fator de eficiência prismas/blocos de De Marco (2016) podem ter sido influenciados pelo modo de ruptura e, por isso, são considerados por Lubeck (2016).

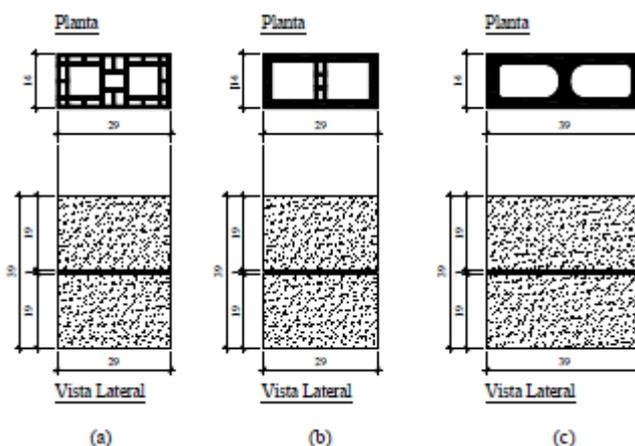
Através do procedimento de Lubeck (2016), buscou-se testar combinações de blocos de paredes vazadas com argamassa de alta e baixa resistência. Da mesma forma, foram combinados blocos de paredes maciças com esses dois tipos de argamassas, a fim de que a influência do confinamento e da resistência da argamassa sobre o mecanismo de ruptura da alvenaria fossem determinados. Nas Figura 2 e Figura 3 apresentam-se os blocos e uma das geometrias propostas para os prismas, respectivamente.

Figura 2. Blocos utilizados na pesquisa. (a) cerâmico de paredes vazadas, (b) cerâmico de paredes maciças, (c) blocos de concreto.



Fonte: Lubeck (2016).

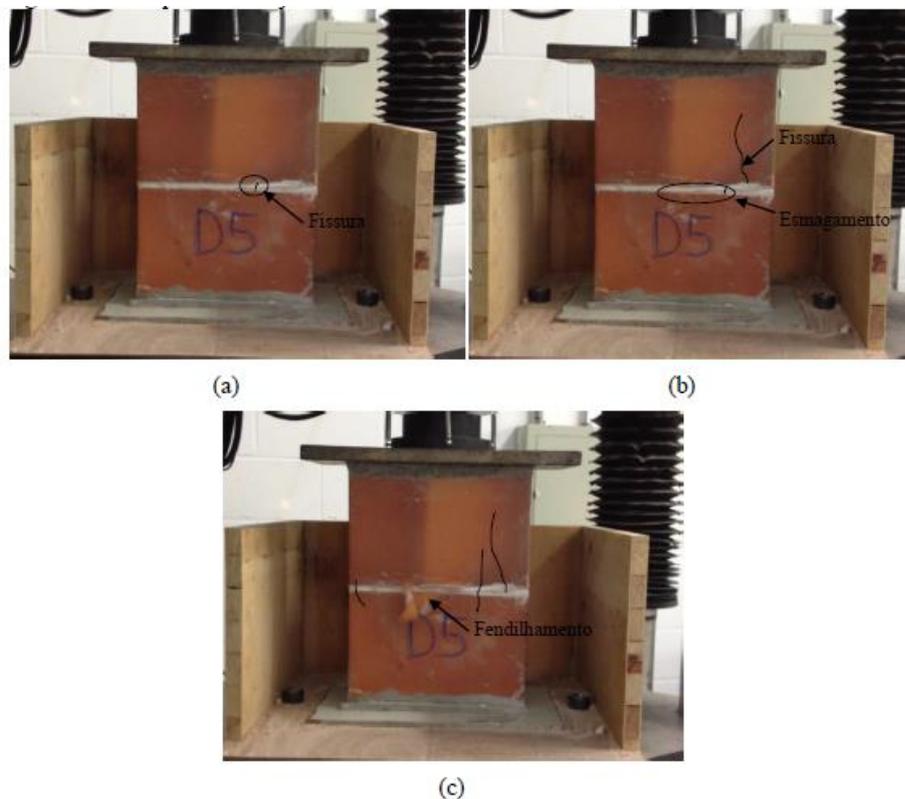
Figura 3. Geometria dos prismas avaliados. (a) blocos de paredes vazadas, (b) blocos de paredes maciças, (c) blocos de concreto.



Fonte: Lubeck (2016).

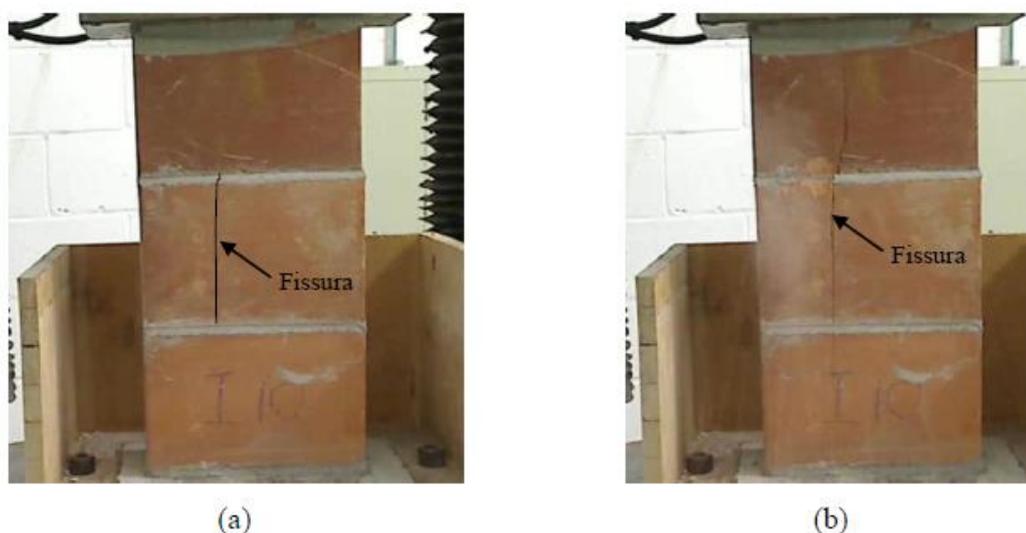
A Figura 4 apresenta o avanço típico da ruptura em um prisma de bloco cerâmico de parede vazada. Por sua vez, na Figura 5, há a ruptura típica do bloco cerâmico de parede maciça que rompeu por tração no bloco.

Figura 4. Avanço do processo de ruptura por esmagamento da junta no prisma D5, com blocos de paredes vazadas. (a) Surge a primeira fissura na junta de argamassa, (b) a partir da fissura na junta, propagam-se trincas nos blocos e (c) há o fendilhamento do bloco junto à argamassa e a ruptura do conjunto.



Fonte: Lubeck (2016).

Figura 5. Avanço do processo de ruptura por tração do bloco, prisma B3. (a) Surge a primeira trinca vertical na parede do bloco e (b) as trincas generalizam-se, passando pela junta e indo até o bloco inferior.



Fonte: Lubeck (2016).

Por conseguinte, através do procedimento experimental de Lubeck (2016) pode-se avaliar que tanto a resistência da argamassa de assentamento como a interação dela com os blocos é determinante sobre a forma de ruptura dos prismas. Além de que há um limite de proporção entre a resistência da argamassa e a resistência do bloco, que influencia na mudança do modo de ruptura do prisma. Nas resistências de argamassa com proporções de resistência menores que essa proporção limite, a ruptura tende a ocorrer devido o esmagamento das juntas, já resistências de argamassas maiores, a ruptura tende de ocorrer por tração no bloco.

No entanto, os estudos de Lubeck (2016) mostram que ainda é fundamental ampliar o conhecimento sobre os modos de ruptura da alvenaria estrutural através de prismas comprimidos, principalmente relacionados à instrumentação dos prismas. Assim, com uma maneira de medição mais acessível e precisa, poderá ser medida as deformações específicas axiais na região das juntas de assentamento, de maneira a determinar como essas se comportam com eficácia.

Para sanar essa questão de instrumentação de ensaios, vem sendo utilizada recentemente a correlação de imagem digital, já utilizada em diversos tipos de materiais e tem se mostrado eficiente.

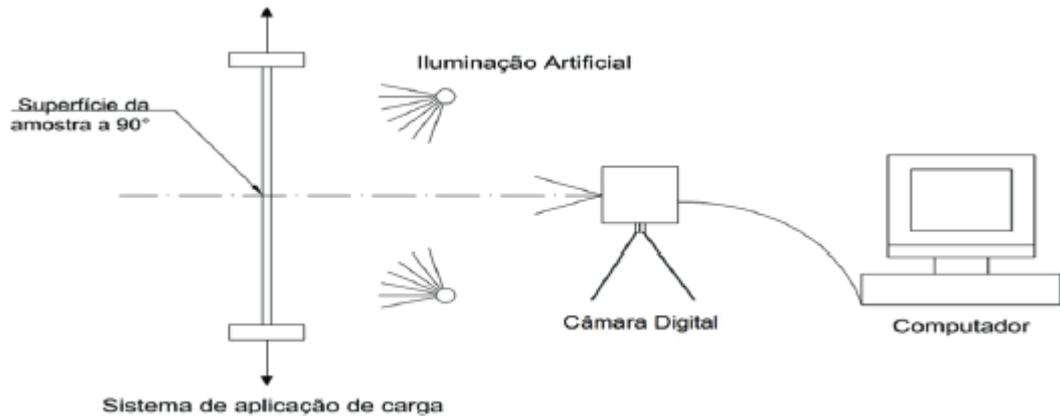
2.2 Correlação de imagem digital

Há um avanço científico e tecnológico mundial no que diz respeito às técnicas de medições de deformações (QUEIROZ, 2013). Pesquisadores da Universidade Federal da Califórnia do Sul desenvolveram uma técnica não destrutiva, capaz de extrair informações do campo de deslocamentos e deformações, através de imagens digitalizadas das áreas a serem analisadas, denominada de correlação de imagem digital ou DIC (*digital image correlate*) (Sutton et al, 1983; Bruck et al, 1989)

Em geral, o DIC baseia-se no princípio da comparação de imagens consecutivas. Ou seja, uma imagem de referência e outras imagens deformadas gravadas por uma câmera digital, imóvel, com eixo orientado perpendicular ao plano de superfície analisado, conforme Figura 6 (PAN et al, 2009) essas imagens são digitalizadas e armazenadas em um disco rígido do computador para análises. Em

seguida, os componentes de deformação podem ser calculados a partir da diferenciação numérica do campo de deslocamento estimado (SUTTON, 2009).

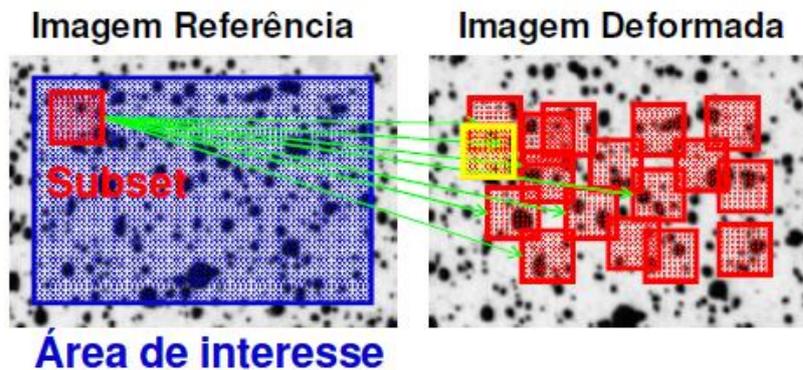
Figura 6. Sistema de captação de imagens digitais.



Fonte: Pan *et al* (2009).

Após obter a imagem digital, a área de interesse a ser observada deve ser selecionada para determinação dos subconjuntos. Então, uma função calcula os deslocamentos, correlacionando todos os subconjuntos da primeira imagem com os da segunda imagem, como ilustra a Figura 7 (SKARŻYŃSKI *et al*, 2011)

Figura 7. Duas imagens digitais sucessivas de uma área de interesse e respectivos subconjuntos de pixel indicando padrões a serem observados.

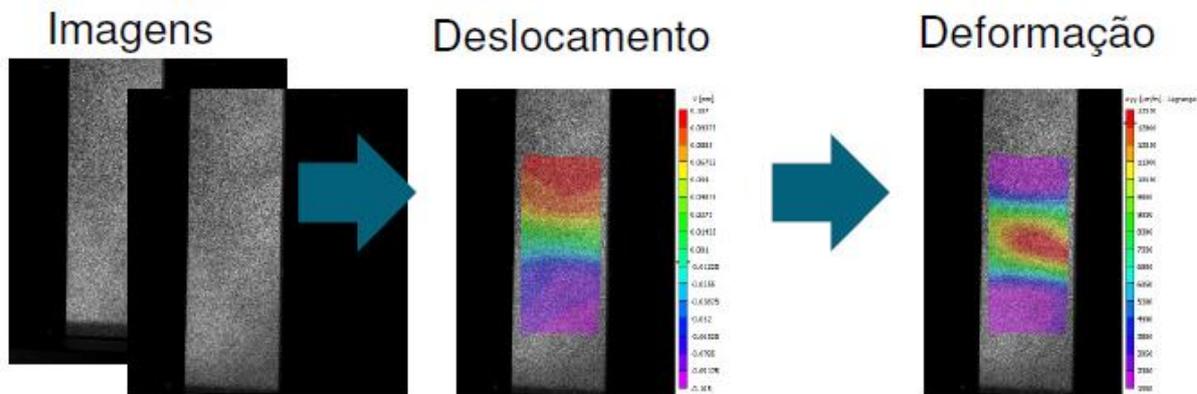


Fonte: GOM (2019).

Assim, as deformações podem ser calculadas diretamente do campo de deslocamentos medido. Nesse sentido, a Figura 8 mostra uma imagem de referência

e outra deslocada, bem como realiza o mapeamento das tensões após a deformação da superfície. Nota-se que há como medir deslocamentos em qualquer ponto da superfície, uma grande vantagem comparada a métodos convencionais, que são capazes de medir deformações apenas pontuais (QUEIROZ, 2013).

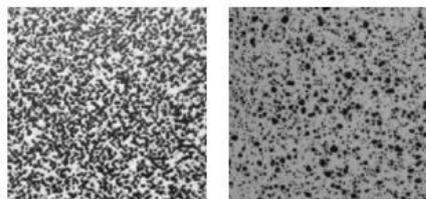
Figura 8. Análise de deformação de uma superfície através da DIC. Superfície de deformação de uma peça.



Fonte: GOM (2019).

Para obter-se dados mais precisos de deslocamentos, primeiramente necessita-se da preparação da superfície a ser analisada através da aplicação de tintas sobre a superfície, um padrão estabelecido como na Figura 9. Aplica-se, primeiramente, uma camada branca. Em seguida, deve-se realizar a marcação dos corpos de provas, com outra cor de tinta, criando um padrão estocástico na superfície. Essas pinturas não devem alterar as propriedades mecânicas do material a ser analisado (MOURA, 2013). A textura deverá ter uma orientação com pontos aleatórios (SUTTON, 2009). Desta forma, toda a superfície analisada possui informações satisfatórias para realizar o processo de correlação.

Figura 9. Padrões aleatórios considerados ótimos.



FONTE: GOM (2019).

A fim de melhorar a técnica e, conseqüentemente, obter informações mais precisas em ensaios, vários estudos fundamentais foram realizados ao longo dos anos (MOURA, 2013).

As correlações na fotogrametria têm suas raízes por volta dos anos de 1950. Contudo, sua evolução para meios digitais iniciou-se por volta de 1980, devido aos avanços eletrônicos e computacionais que permitiram a busca de pontos homólogos entre imagens (SCHENK, 1999).

Logo, foram aperfeiçoadas as mudanças no coeficiente de correlação (PETERS *et al.*, 1983; SUTTON *et al.*, 1986; VENDROUX e KNAUSS, 1998; HWANG *et al.*, 2008), tipo de interpolação empregado (BRUCK *et al.*, 1989) e mudanças no processamento dos resultados (SUN *et al.*, 1997; CHENG *et al.*, 2002; PAN *et al.*, 2007).

Peters e Ranson (1982) foram pioneiros na utilização de DIC para medições de pequenos deslocamentos em superfícies de materiais e cálculo de tensões. Eles utilizaram o método experimental de integral de contorno para analisar imagens digitais através de um scanner de imagem conectado a um computador que armazena na memória os padrões de manchas de laser de um objeto, em uma configuração de referência e uma configuração deformada. Então, conseguiram calcular as tensões de toda superfície do material.

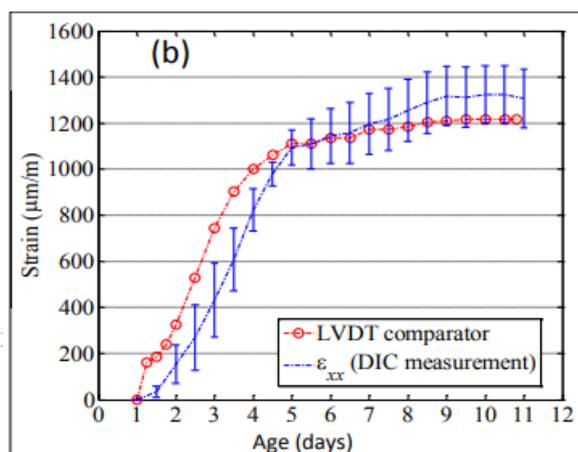
Após, pode-se utilizar o DIC em outras áreas, como na identificação e análise de fissuras. Os primeiros trabalhos nessa linha foram de Bodun (2000), que analisou fissuração de solos utilizando a técnica DIC. Bodun (2000) analisou uma porção de solo, dentro de uma caixa de acrílico e pode observar a secagem do solo de forma não homogênea, capturando uma imagem por dia, posteriormente, correlacionando-as. Passo seguinte pode analisar a existência de fissuras e calcular o comprimento das trincas de cada ensaio realizado com precisão, através dessa técnica.

Posteriormente, trabalhos de Benboudjema *et al.* (2013) puderam ser analisados com maior precisão, através da correlação de imagem digital. Os autores analisaram o mapeamento de deformações de retração e determinaram a evolução dos padrões de trincamento de uma argamassa de revestimento, devido à restrição de retração de secagem por blocos de concreto. Além disso, mediram a deformação

média de amostras de argamassa, comparando dois métodos de medição, a correlação de imagem digital e transdutores de deslocamentos variáveis.

Para medir a correlação de imagem digital, Benboudjema *et al* (2013) utilizaram o software Correli-Q4-LMT, com uma câmera CANON EOS 450D, para monitorar a evolução do deslocamento da superfície desde o início da secagem. As imagens da superfície foram registradas a cada dez minutos durante dez dias, com qualidade de 1157 × 1737 pixels. A superfície foi iluminada por várias luzes LED para limitar o ruído óptico. A diferença de medição entre os LVDTs e o DIC estão dispostos na Figura 10.

Figura 10. Contração por secagem da argamassa, medições obtidas por DIC e LVDT.



FONTE: Benboudjema *et al* (2013).

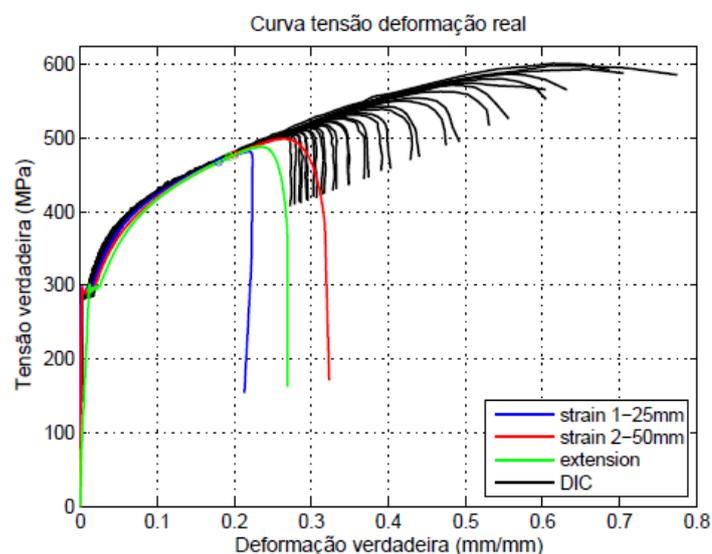
Mais a diante, Benboudjema *et al* (2013) verificou que a concordância entre ambos os métodos era boa, indicando que o método de correlação de imagem digital se torna eficiente para obter campos de deslocamentos e deformações durante a secagem da argamassa por vários dias. Por tanto, foi possível usar o DIC para comparar deslocamentos experimentais em pontos aleatórios. Ou seja, foi possível medir as distâncias em toda a superfície e uma quantificação de aberturas de fissuras. Trata-se de um avanço importantíssimo para análise dos resultados estudados, devido ao fato que as rachaduras começam em áreas aleatórias. Usando o DIC foi possível também extrair as condições de contorno em termos de deslocamentos e impor-lhes para cálculos de elementos finitos. Desse modo, quase todos os parâmetros relevantes do material puderam ser medidos.

Por sua vez, Moura (2013) realizou uma comparação entre o método de correlação de imagem digital e clip-gages. Para isso, analisou corpos de provas de

tração de aço através de duas análises com o DIC. Uma utilizando todas fotos na região elástica e outra analisando uma a cada cinco fotos, cobrindo todo ensaio. Posteriormente, realizou mais ensaios de tração em aço, através de 2 clip-gages, para medir as deformações.

Os resultados finais analisados por Moura (2013) estão na Figura 11. Pode-se observar que, conforme a tensão é pequena, os resultados de deformações entre o clip-gages e o DIC se assemelham. Contudo, quando a tensão aumenta, os resultados se diferenciam, pois, a partir da força máxima a distribuição de deslocamentos deixa de ser linear na região próxima da seção de menor área de estrição, assim concentra-se grande parte de cada acréscimo de deslocamento imposto pela máquina nessa região e reduz a deformação do restante do corpo de prova, nesse momento, ocorre a invalidação do uso de clip-gages, pois ele mede o deslocamento total. Como o método DIC consegue medir deslocamentos nos pontos de menor área de estrição apenas, a utilização do método se torna útil.

Figura 11. Comparação entre diferentes métodos de medição de deslocamentos através das curvas tensão deformação real.



Fonte: Moura (2013).

Entretanto, mesmo com os dados da resistência mecânica do material disponível em diversas áreas do corpo de prova, Moura (2013) percebeu uma dificuldade na obtenção de um conjunto de parâmetros capazes de reproduzir o comportamento mecânico dos corpos de prova de aço com o DIC. O autor acredita

que um limitante para isso foi a utilização das câmeras na fase de carregamento dos ensaios, pois, não se pode afirmar que o intervalo entre fotos é constante e há uma dificuldade de sincronizar o início do carregamento com o início das fotografias.

Outros autores também verificaram que pode ocorrer interferência devido a parâmetros que influenciam diretamente no processo de filmagem, Dai (2014) cita que há fontes de ruído inevitáveis que podem alterar os dados do DIC, tais como ambientes, hardware ou algoritmos. Já Queiroz (2013) cita que quanto mais se aumenta a velocidade de captura de imagens, mais pode haver dificuldades de análises e que dependendo do tipo de foco utilizado, pode haver outro tipo de interferência e queda de resolução das fotos.

Assim, é importante verificar todas as fontes de contaminação das imagens para correlação de imagem digital. Para isso, é preciso que haja um padrão estabelecido de como devem ser realizadas as filmagens, quais câmeras utilizar, qual tipo de iluminação e formas de pintura.

Desta forma, é essencial aplicar a correlação de imagem digital em novos ensaios, a fim de aprimorar essa tecnologia. É preciso obter um padrão de filmagem e analisar todas formas de ruídos que podem interferir no processo de medição. Para isso, foi utilizado o software GOM Correlate, desenvolvido pela empresa GOM. De acordo com a empresa GOM (2019), o software é baseado em um conjunto de correlações que permitem que todas as etapas de deformações sejam medidas.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações iniciais

O programa experimental desse trabalho foi elaborado visando obter dados referentes à resistências à compressão, características físicas e características mecânicas dos materiais envolvidos nos estudos. Além disso, busca-se estabelecer a aplicabilidade de uma nova técnica de medição que é a correlação de imagem digital.

A influência da argamassa de assentamento sobre o modo de ruptura da alvenaria estrutural foi investigada conforme o procedimento detalhado nesse capítulo. Foram considerados blocos estruturais cerâmicos de parede vazada, com resistência nominal de 7 MPa e argamassa de assentamento industrializadas com três resistências nominais diferentes, 2, 6 e 12 MPa.

Os dados foram obtidos através de ensaios experimentais. Os materiais foram caracterizados fisicamente e mecanicamente, de acordo com as normas vigentes, no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, RS (UNIPAMPA). Do mesmo modo, todos corpos de prova e prismas foram moldados nesse mesmo laboratório.

Além disso, foram realizados ensaios de compressão axial instrumentados com LVDTs e análise visual com correlação de imagem digital. Todos os ensaios foram realizados aos 28 dias após as moldagens.

Na Tabela 2, apresenta-se o resumo dos ensaios realizados e as normas técnicas adotadas para a execução.

Tabela 2. Normas adotadas.

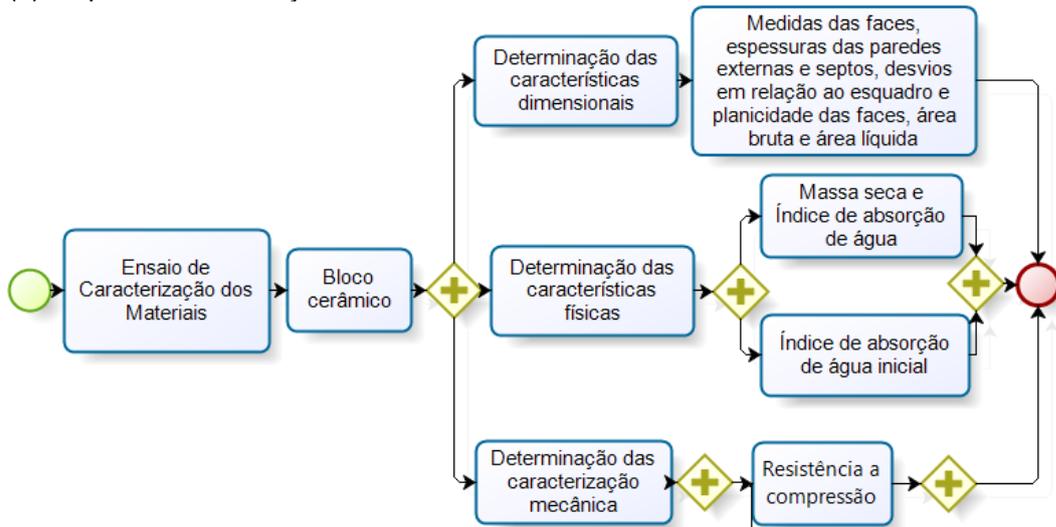
Procedimento Experimental	Norma Técnica
Determinação da caracterização geométrica dos blocos	
Medidas das faces - dimensões efetivas	
Espessura dos septos e paredes externas dos blocos	
Desvio em relação ao esquadro	NBR 15270-2 (2017)
Planeza das faces	
Área bruta e área líquida	
Determinação das características Físicas dos blocos	
Massa seca	
Índice de absorção	NBR 15270-2 (2017)
Índice de absorção de água inicial	
Determinação das características mecânicas dos blocos	
Resistência à Compressão	NBR 15270-2 (2017)
Determinação da caracterização física das argamassas	
Índice de consistência	NBR 13276 (2016)
Determinação da caracterização mecânica das argamassas	
Resistência à tração na flexão e à compressão	NBR 13279 (2005)
Compressão em prismas	
Ensaio de compressão em prismas	NBR 15812-3 (2017)

FONTE: Elaboração própria.

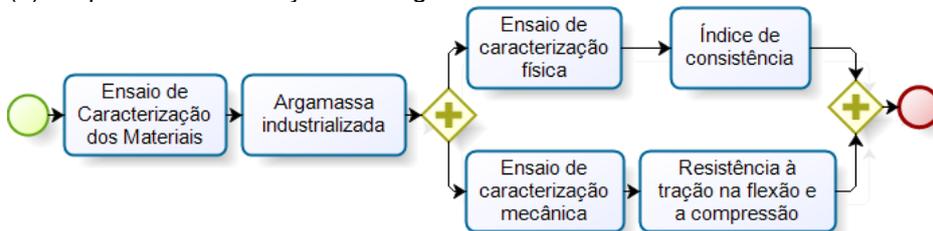
O programa experimental foi realizada em três etapas, conforme ilustra a Figura 12. Na primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização dos blocos cerâmicos. Na segunda, foram realizados os ensaios de caracterização das argamassas. A terceira etapa é a realização do ensaio de compressão em prismas, análise visual dos prismas, análise dos resultados com LVDTs (Trandutores de Deslocamento Variável Linear) e análise de deformações com DIC.

Figura 12. Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados.

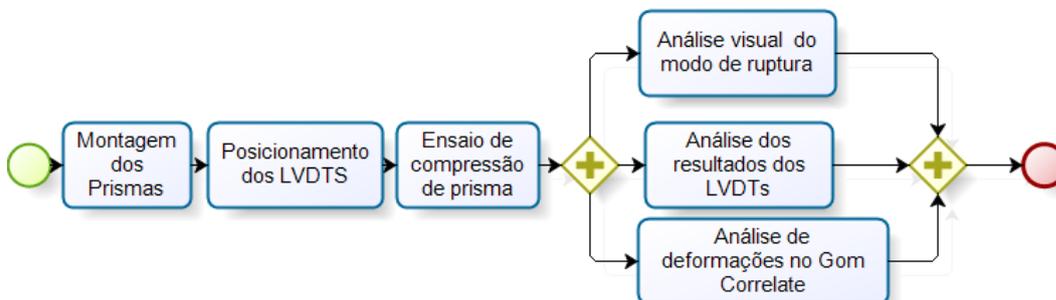
(a) Etapa 1: caracterização dos blocos



(b) Etapa 2: caracterização das argamassas



(c) Etapa 3: Ensaio de compressão em prismas



Fonte: Elaboração própria.

3.2 Caracterização dos blocos

Foram selecionados 13 blocos cerâmicos estruturais de parede vazada. Suas características estão expostas no Quadro 1. A caracterização geométrica dos blocos foi realizada através de medidas das faces, espessuras das paredes externas e septos, desvios em relação ao esquadro, planicidade das faces, determinação da área bruta e área líquida. Esses ensaios seguiram os procedimentos descritos na ABNT NBR 15270-2(2017).

Quadro 1. Tipologia e dimensões dos blocos utilizados na pesquisa.

Tipologia	Dimensões nominais (cm)	Resistência nominal (MPa)	Geometria do bloco
Bloco cerâmico de parede vazada	14 x 19 x 29	7	

FONTE: Elaboração própria.

3.2.1 Determinação das características dimensionais do bloco

Primeiramente, foi realizada a inspeção visual dos blocos cerâmicos. As amostras não podem apresentar defeitos sistemáticos, como trincas, quebras, variação significativa de cor, superfícies irregulares ou deformações que impeçam seu emprego na sua função esperada.

Para avaliar as características geométricas do bloco, foram utilizadas amostras compostas por 13 blocos, analisadas em relação as tolerâncias normativas. As medidas de largura, altura e comprimento foram realizadas com o auxílio de um paquímetro de precisão de 0,01 mm.

As tolerâncias dimensionais individuais para cada dimensão efetiva do bloco é de ± 5 mm. Já a tolerância dimensional relativa à medida das dimensões efetivas é de ± 3 mm.

Para as medições das paredes externas e septos intermediários, foram realizadas 4 medidas, com tolerância dimensional das paredes dos blocos de 0,3 mm. Já a tolerância normativa para o desvio em relação ao esquadro dos blocos é de 3 mm, foi utilizado esquadro metálico de $90 \pm 0,5^\circ$. O desvio da planeza das faces é de no máximo 3 mm.

Para determinar a área bruta foram utilizadas as medidas das faces citadas anteriormente, onde a área bruta do bloco é a largura (L) multiplicada pelo comprimento (C).

Na determinação da área líquida, os corpos-de-prova foram colocados em um recipiente de dimensões apropriadas, preenchido com água à temperatura ambiente, em volume suficiente para mantê-los totalmente imersos, durante 24 h, a fim de alcançar a saturação. Em seguida, os blocos foram pesados imersos em água a temperatura de $23 \pm 5^\circ\text{C}$, e foi definida a massa aparente “ m_a ”. Após, os blocos foram retirados do recipiente, secos com pano úmido, e, então, foi determinada a massa saturada “ m_u ” através da pesagem de cada corpo de prova saturado. A partir dos parâmetros encontrados, calculou-se a área líquida através da Equação (1).

$$A_{liq} (\%) = \frac{m_u - m_a}{H \times \gamma} \times 100 \quad (1)$$

Onde: A_{liq} – Área líquida do bloco estrutural, em cm^2 .

m_u – Massa do bloco úmido, em gramas.

m_a – Massa do bloco imerso, em gramas.

H – Altura média do bloco, em cm.

γ – Massa específica da água, tomada como sendo igual a 1,0.

Todos os blocos estavam devidamente identificados pelo fabricante, sem quebras ou trincas. Ainda, as amostras apresentavam-se conforme determina a ABNT NBR 15270-2 (2017).

As inspeções visuais e os ensaios quanto às dimensões efetivas, espessuras mínimas de paredes e septos e desvios máximos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Determinação das características dimensionas do bloco.

Bloco	Largura mm	Altura mm	Comprimento mm	Septos Externos mm	Septos Internos mm	Desvio Esq. mm	Flecha mm	Área Bruta mm ²
B1	141,77	192,30	291,39	9,10	7,93	0,21	0,09	41308,90
B2	141,21	193,27	291,86	9,35	8,20	0,89	0,18	41212,09
B3	141,56	193,43	291,64	9,63	8,06	0,79	1,11	41283,10
B4	141,95	193,46	291,64	9,57	8,74	0,48	0,81	41396,84
B5	141,68	193,81	291,85	9,53	8,33	0,40	0,18	41347,85
B6	141,89	193,78	291,37	9,68	8,81	0,70	0,09	41342,49
B7	141,94	193,03	291,63	9,70	8,19	0,44	0,50	41393,96
B8	141,85	193,44	291,60	9,58	8,53	0,24	0,49	41362,00
B9	141,67	193,44	291,26	9,86	8,68	0,08	0,19	41262,80
B10	141,58	193,59	291,93	9,52	8,62	0,72	0,20	41329,99
B11	141,57	192,41	291,94	9,33	8,46	0,15	0,16	41328,49
B12	141,43	192,38	291,38	9,35	8,34	0,68	0,49	41208,42
B13	141,68	192,87	291,75	9,58	8,76	0,81	0,89	41333,68
Média	141,67	193,17	291,63	9,52	8,43	0,51	0,41	41316,20
Desv. Pad.	0,213	0,528	0,229	0,197	0,285	0,276	0,338	60,168
Coef. Variação	0,15%	0,27%	0,08%	2,07%	3,38%	54,53%	82,34%	0,15%
Tolerân.	140±3	190±3	290±3	9±0,3	8±0,3	0±3	0±3	40600

Fonte: Elaboração própria.

Em geral, as dimensões dos blocos e espessuras mínimas dos septos apresentam valores dentro dos limites normativos, ultrapassando as variações dimensionais apenas em medidas individuais de alguns blocos.

Por sua vez, a Tabela 4 apresenta os resultados da determinação da área líquida dos blocos, assim como a massa seca, massa úmida e a relação da área líquida e área bruta.

Tabela 4. Área líquida dos blocos.

CP	m_a g	m_u g	$\dot{A}_{Liq.}$ mm ²	A_{liq}/A_b
B1	3595,90	6763,10	16470,53	0,40
B2	3835,50	6758,70	15124,95	0,37
B3	3607,40	6799,20	16501,49	0,40
B4	2589,60	6767,90	21597,75	0,52
B5	3585,20	6727,10	16211,66	0,39
B6	3609,90	6791,30	16448,57	0,40
B7	3618,10	6784,50	16340,18	0,39
B8	3583,10	6771,70	16518,68	0,40
B9	3553,20	6772,70	16643,83	0,40
B10	3613,00	6716,50	16031,72	0,39
B11	3579,10	6736,20	16408,62	0,40
B12	3807,60	6726,40	15172,45	0,37
B13	3592,50	6766,60	16457,63	0,40
Média			16609,85	0,40
Desvio padrão			1577,07	0,04
Coefficiente de variação			0,09	0,09

FONTE: Elaboração própria.

De acordo com a Tabela 4, a maior relação entre área líquida e área bruta foi do B4, com 0,52. Por sua vez, a menor relação foi de 0,37 para B2 e B12. Além disso, verifica-se que a relação média A_{liq}/A_b foi de 0,40.

3.2.2 Determinação das características físicas

3.2.2.1 Massa seca e índice de absorção de água

As amostras foram compostas de 13 corpos de prova. Primeiramente, foi retirado do corpo de prova o pó e outras partículas soltas. Após, subteu-se os corpos de prova à secagem em estufa a (105 ± 5) °C. Então, determinou-se a massa individual, em intervalos de 1 h, até que duas pesagens consecutivas de cada um deles apresentassem variação de no máximo 0,25%, pesando-os imediatamente após a remoção da estufa. E, por fim, mediu-se a massa seca (m_s) dos corpos-de-prova após a estabilização das pesagens, nas condições acima estabelecidas.

Após a determinação da massa seca (m_s), os corpos de prova foram totalmente imersos, durante 24 horas. Em seguida, foi escoada a água, bem como retirado o

excesso de água com pano úmido. Posteriormente os blocos foram pesados dentro do período de 15 minutos e os resultados anotados. Por fim, obtidas a massa seca “ m_s ” e massa úmida “ m_u ”, procedeu-se a realização dos cálculos de índice de absorção de água “AA”, através da Equação (2).

$$AA (\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Os limites normativos do índice de absorção de água são de 8% a 21%.

3.2.2.2 Índice de absorção de água inicial

A montagem dos equipamentos, os procedimentos de ensaio e o índice de absorção inicial foram realizados conforme especificações da norma técnica ABNT NBR 15270-2 (2017).

A amostra ficou em estufa com temperatura (105 ± 5) °C durante 24 horas. Posteriormente, foi resfriada naturalmente até atingir a temperatura ambiente e assim, começar o ensaio.

A partir dos resultados de ensaio, calcula-se o índice de absorção de água inicial (AAI) através da Equação (3).

$$AAI = 193,55 \times \frac{\Delta\rho}{A_{liq}} \quad (3)$$

Onde:

AAI é o índice de absorção d'água inicial (sucção) da face ensaiada dos blocos, expresso em (g/193,55cm²)/min;

$\Delta\rho$ é a variação de massa obtida no ensaio, em gramas;

A_{liq} é a área líquida dos blocos em (cm²), obtida através da subtração da área dos furos em relação à área bruta, com as dimensões determinadas como anteriormente.

Se o valor médio do índice de absorção inicial dos blocos resultar menor que o limite estabelecido pela norma (igual ou menor que 30 g/193,55 cm²/min), os blocos podem ser assentados sem a necessidade de ser previamente umedecidos.

Foram determinadas a massa seca (m_s) o índice de absorção de água (AA) e o índice de absorção inicial d'água (AAI). Os resultados finais da caracterização física estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5. Caracterização física dos blocos.

CP	Massa seca g	AA %	AAI g/193,55cm./min	Massa Espec. g/cm ³
B1	6119,80	10,51	33,42	0,77
B2	6140,30	10,07	28,02	0,77
B3	6144,80	10,65	29,89	0,77
B4	6133,00	10,35	31,51	0,77
B5	6123,10	9,86	35,89	0,76
B6	6183,10	9,84	22,42	0,77
B7	6179,00	9,80	27,11	0,77
B8	6146,20	10,18	30,65	0,77
B9	6136,40	10,37	27,90	0,77
B10	6166,50	8,92	27,30	0,77
B11	6111,00	10,23	37,69	0,77
B12	6117,00	9,96	29,65	0,77
B13	6127,60	10,43	29,93	0,77
Média	6140,60	10,09	30,11	0,77
Desv. Pad.	23,125	0,444	3,975	0,002
Coef. Variação	0,38%	4,40%	13,20%	0,31%

Fonte: Elaboração própria.

Consoante a Tabela 5, o coeficiente de variação entre o índice de absorção de água dos blocos foi de apenas 4,40%. Além disso, o AA está dentro dos limites normativos de 8 a 21%. Por sua vez, o valor médio do AAI foi próximo ao limite estabelecido na ABNT NBR 15270-2 (2005), de 30 g/193,55cm²/min. Em alguns blocos, os valores de absorção de água inicial ultrapassaram o valor normativo.

3.2.3 Determinação das características mecânicas

3.2.3.1 Resistência à compressão

Foram realizados ensaios de resistência à compressão dos blocos, com 13 blocos. Os blocos cerâmicos foram capeados com argamassa com traço 1:1 (água, cimento CP-V e areia), com resistência a compressão maior que a do bloco,

respeitando a espessura máxima normatizada de 3 mm. Posteriormente, os blocos foram submetidos à compressão, na condição seca, conforme a ABNT NBR 15270-2 (2017).

Todos os corpos de prova foram ensaiados de modo que a carga fosse aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar, sempre perpendicular ao comprimento e na face destinada ao assentamento. Para este ensaio, foi utilizada a máquina de ensaio universal INSTRON (5590-HVL), com capacidade de 1,5 MN, com taxa de aplicação de carga de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s, transmitida no travessão superior da máquina por uma rótula de 25 cm de diâmetro acoplada a uma placa de aço de 50 mm de espessura.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos ensaios a compressão dos blocos, pode-se visualizar a carga de ruptura e as tensões na área bruta e líquida, também mostra as resistências características dos blocos (f_{bk}) segundo as orientações da ABNT NBR 15270-1 (2017).

Tabela 6. Resultado de compressão dos blocos.

Bloco	Carga kN	Tensão de Ruptura MPa	
		Área Bruta	Área Líquida
B1	355,89	8,77	21,99
B2	447,44	11,02	30,03
B3	428,60	10,56	26,41
B4	438,28	10,80	20,69
B5	407,83	10,05	25,62
B6	472,22	11,63	29,23
B7	469,14	11,56	29,27
B8	454,31	11,19	28,02
B9	531,43	13,09	32,45
B10	472,49	11,64	30,00
B11	400,66	9,87	24,86
B12	435,37	10,72	29,13
B13	403,02	9,93	24,93
Média	439,74	10,83	27,13
Desvio Padrão	43,53	1,07	3,41
Coefficiente de variação		9,89%	12,57%
f_{bk}		8,95	20,83

Fonte: Elaboração própria.

As amostras apresentaram resistência média e resistência característica superior aos 7MPa, definidos pelo fabricante.

3.3 Caracterização das argamassas

Para a realização do procedimento experimental, foram utilizadas argamassas de assentamentos industrializadas de diferentes resistências. Foram adotadas três resistências de argamassa industrializadas diferentes, quais sejam, 2, 6 e 12 MPa, para conseguir analisar os diferentes modos de ruptura dos prismas.

3.3.1 Caracterização física

3.3.2.1 Preparação da argamassa e Índice de consistência

A preparação da argamassa industrializada e o índice de consistência das argamassas foram determinados conforme recomendações da ABNT NBR 13276 (2016). Os aparelhos utilizados para o ensaio foram balança com resolução de 0,1 g, misturador mecânico, cronômetro, espátula, mesa para índice de consistência, molde tronco cônico, soquete metálico e paquímetro.

Inicialmente, foi realizada a preparação da argamassa. Foram pesadas as quantidades necessárias de água e massa seca, com aproximação de 0,1 g. No misturador, antes de tudo, foi inserida a quantidade de água. Após, foi colocada a massa seca, de forma contínua, dentro de um período de 30 s. Em seguida, foi acionado o misturador em velocidade baixa, durante 30 s. A diante, desligou-se o misturador, removeu-se a pá de mistura, sendo raspada toda a superfície interna do recipiente e a pá. Após, foi recolocada a pá em um intervalo de 60 s. Por fim, foi ligado o misturador em velocidade alta pelo tempo indicado pelo fabricante.

Para o ensaio de índice de consistência foi preparada uma quantidade de argamassa suficiente, que enchesse o molde tronco-cônico. Após, foi posicionado o molde no centro da mesa do índice de consistência, o mesmo foi preenchido com três camadas sucessivas, de alturas iguais, e para cada camada foi aplicado 15, 10 e 5 golpes respectivamente, com o soquete. Posteriormente, foi realizado o rasamento com espátula metálica, retirado o molde e aplicou-se 30 golpes. Por fim, foi medido o diâmetro em três pontos, com o auxílio de um paquímetro e realizado a média.

Para as análises propostas nessa pesquisa, foram utilizadas três argamassas industrializadas de diferentes resistências. Assim, foram utilizadas argamassas de 2 MPa definidas como baixa resistência, 6 MPa (média resistência) e 12 MPa (alta

resistência). A relação de água e materiais secos, além da consistência considerada, estão na Tabela 7.

Tabela 7. Caracterização física das argamassas.

Resistência (MPa)	2	6	12
Água (mL)	610	460	475
Massa seca (g)	3000	3000	3000
Consistência (mm)	257	256	255
A/C (%)	16,33	15,33	15,83

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que se fixou a massa seca em 3000 g. O índice de consistência está de acordo com os valores recomendados pela Norma técnica de 260 ± 5 mm.

3.3.2 Caracterização mecânica

3.3.3.1 Resistência à tração na flexão e a compressão

Para a determinação da tração na flexão e a compressão da argamassa foram utilizadas as recomendações da ABNT NBR 13279 (2005). A cura foi realizada em condições ambiente do laboratório, durante 28 dias. Foram moldados seis corpos de prova para cada resistência de argamassa, totalizando 18 corpos de prova prismáticos de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm.

Para a realização do ensaio de tração na flexão foi utilizada uma máquina universal de ensaios Shimadzu (AGS-X), com capacidade de 5 kN, com uma velocidade de aplicação de carga de 50 ± 10 N/s. Por sua vez, o ensaio de compressão foi realizado na máquina de ensaio universal INSTRON (5590-HVL), com taxa de aplicação de carga de 500 ± 50 N/s para o ensaio de resistência à compressão.

Os resultados do ensaio de Tração na Flexão estão na Tabela 8, assim como os resultados de compressão simples estão na Tabela 9.

Tabela 8. Ensaio de tração na flexão das argamassas.

Argamassa	CP	Tensão De Ruptura MPa	Média MPa	Desvio Padrão MPa	Coefficiente de Variação %
2 MPa	CP 1	0,60	0,67	0,07	9,79%
	CP 2	0,73			
	CP 3	0,68			
6 MPa	CP 1	5,43	5,50	0,22	3,91%
	CP 2	5,74			
	CP 3	5,32			
12 MPa	CP 1	10,65	10,68	0,12	1,14%
	CP 2	10,57			
	CP 3	10,81			

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9. Ensaio de compressão das argamassas.

Argamassa	CP	Tensão De Ruptura MPa	Média MPa	Desvio Padrão MPa	Coefficiente de Variação %
2 MPa	CP 1	2,22	2,24	0,01	0,53%
	CP 2	2,24			
	CP 3	2,25			
6 MPa	CP 1	11,09	11,12	0,13	1,14%
	CP 2	11,01			
	CP 3	11,26			
12 MPa	CP 1	22,76	22,32	0,53	2,39%
	CP 2	21,73			
	CP 3	22,47			

Fonte: Elaboração própria.

A argamassa de 2 MPa, apresentou resistência a compressão de 2,24 MPa, com um coeficiente de variação de 0,53%. Já a argamassa de 6 MPa apresentou uma resistência de 11,12 MPa com coeficiente de variação de 1,14%. Por sua vez, a argamassa de 12 MPa possuiu uma resistência de 22,32 MPa com coeficiente de variação de 2,39%. Todas argamassas foram consideradas adequadas para a utilização no trabalho.

3.4 Compressão em prismas

Foram realizados ensaios de compressão em blocos estruturais de alvenaria, conforme as recomendações da Norma Técnica ABNT NBR 15812-3 (2017). Foram moldados seis prismas de dois blocos de altura para cada modelo de argamassa.

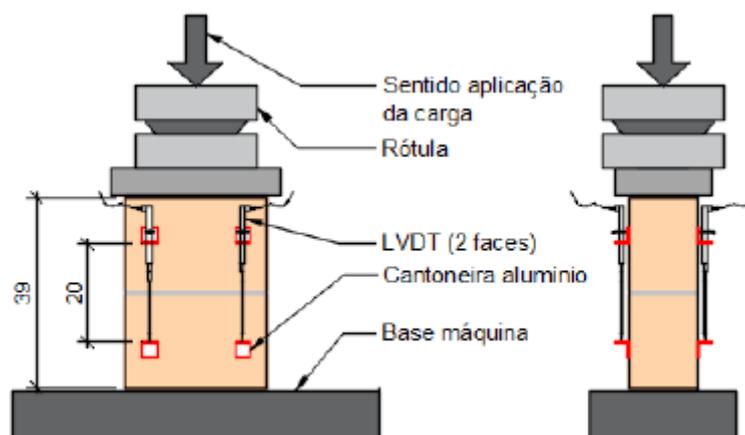
Inicialmente, os blocos foram molhados e colocados em uma superfície plana para seu assentamento, com o auxílio de esquadro e nível de bolha. Após, foi aplicada argamassa em toda área útil do bloco, com uma junta de assentamento entre 10 ± 3 mm, conforme os limites estabelecidos pela norma técnica. A fim de uniformizar a taxa de aplicação da carga nos prismas, as extremidades dos mesmos foram capeados com argamassa de cimento CP-V e areia (traço 1:1).

Os equipamentos e taxa de aplicação de carga para o ensaio de compressão de prismas foram os mesmos utilizados nos ensaios de compressão de blocos, já mencionados.

Posteriormente, os prismas foram pintados em toda sua superfície com tinta branca fosca. Em cima da pintura branca, os blocos foram pintados com tinta spray preta, com um padrão de pontos aleatórios.

Os prismas foram instrumentados com LVDTs de curso de 10 mm (sensibilidade de 0,001 mm), para obtenção de deslocamentos relativos dos prismas. Foram posicionados dois LVDTs por face, nos dois lados dos prismas, como ilustra a Figura 13.

Figura 13. Prisma confinado pelos pratos da prensa.



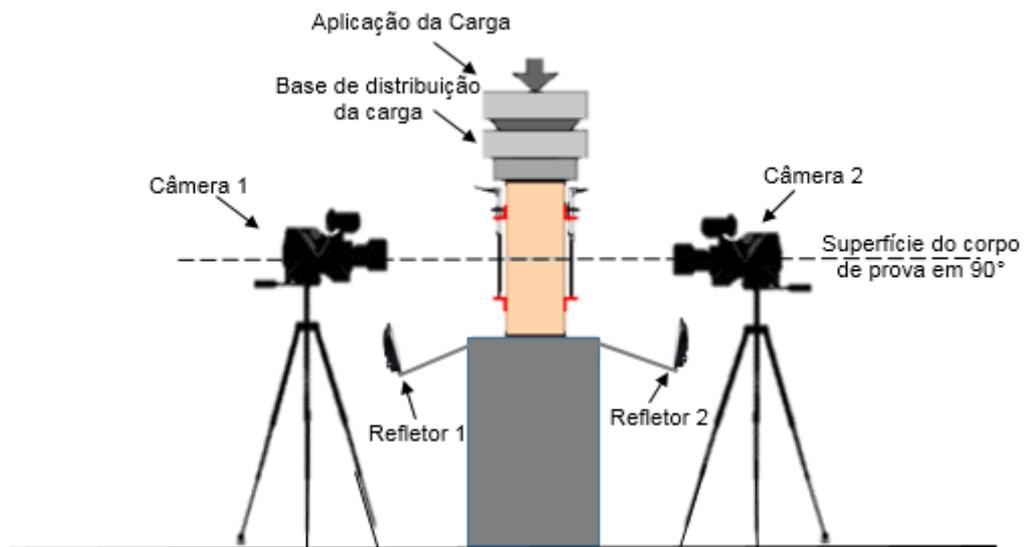
Fonte: Milani (2019).

3.5 Análise visual dos prismas comprimidos

Foram utilizadas duas câmeras fotográficas para a filmagem do ensaio de prisma, Canon T6, full HD a 30 quadros por segundo. Todos os prismas e corpos de

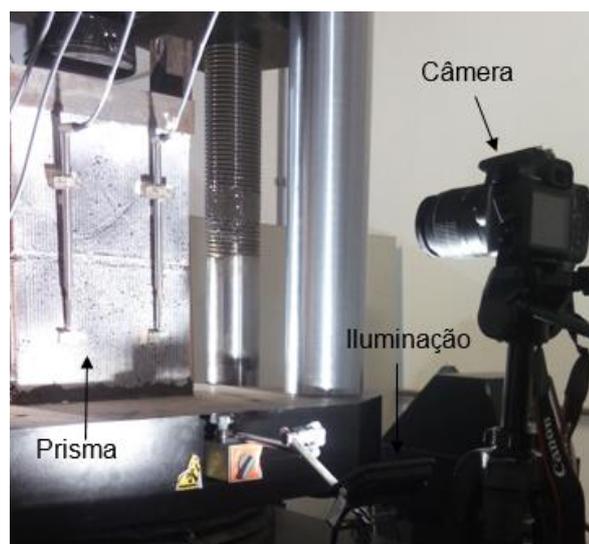
prova foram filmados dos dois lados, simultaneamente, com o objetivo de verificar o comportamento da ruptura de forma mais detalhada. Foi posicionada um refletor em frente à câmera para maior qualidade de filmagem. O esquema de ensaio é ilustrado nas Figura 14 e Figura 15.

Figura 14. Detalhe lateral do posicionamento da câmera e refletor no ensaio de compressão de prisma.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 15. Detalhe em perspectiva do posicionamento da câmera e refletor no ensaio de compressão de prisma.



Fonte: Elaboração própria.

3.5.1 GOM Correlate

Para análise no Software GOM Correlate, foram realizadas filmagens do ensaio de compressão dos prismas, a fim de gerar imagens de deformação. Inicialmente, foram importados os vídeos dos ensaios de compressão de prismas no software. Foram ajustados os estágios das fotos, sincronizando o tempo de início de leitura dos LVDTs, com início de carregamento e início de filmagem do ensaio.

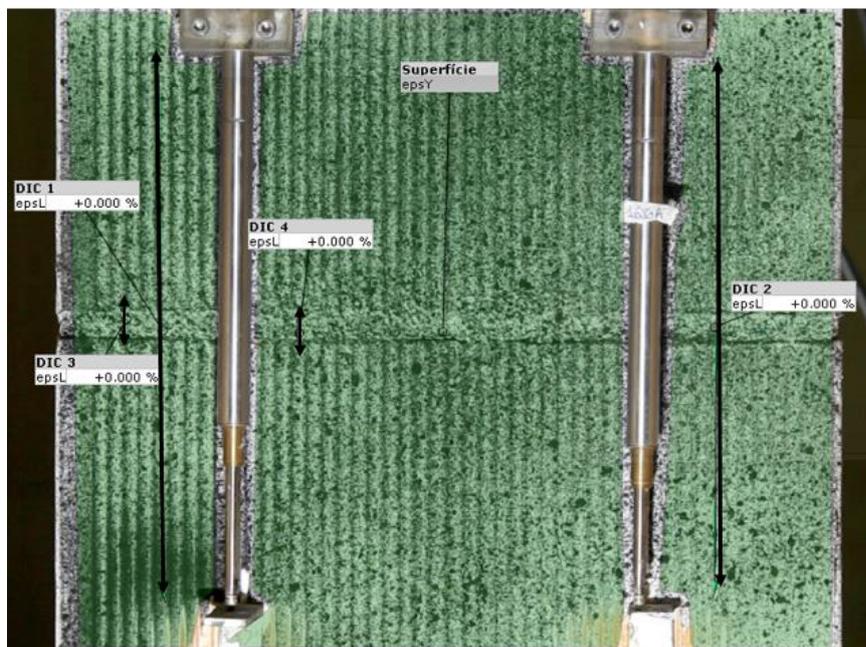
Após, foi criada a superfície de análise dos prismas, considerando como imagem de referência a primeira imagem do ensaio, antes de começar a compressão do prisma.

Posteriormente, foi realizada a definição de escala do desenho, onde marca-se dois pontos de referência na imagem e coloca-se o comprimento real dessa distância.

Foram criadas distâncias entre dois pontos nos prismas e analisadas as alterações de comprimento dessas distâncias. Ainda, foram criados pontos ao lado dos LVDTs, de mesmo comprimento, para comparar a deformação do LVDT com a deformação medida pelo GOM Correlate e, também, comparar medidas nas juntas de argamassa, a fim de verificar o esmagamento da junta nos pontos de maior deformação.

Por fim, foram gerados relatórios das deformações através de tabelas, imagens de deformação e gráficos. A Figura 16 exemplifica a distância entre dois pontos normalmente utilizada para análise das deformações, DIC 1 e DIC 2 são as distâncias com mesmo comprimento dos LVDTs para comparar os dois métodos de medição, DIC 3 e DIC 3 são os pontos próximos a junta de argamassa, para medição do esmagamento da junta.

Figura 16. Deformações utilizadas.



Fonte: Elaboração própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Compressão dos prismas

4.1.1 Prismas com argamassa de 2 MPa

Os resultados dos ensaios de compressão simples dos prismas com argamassa de 2 MPa são apresentados na Tabela 10. Nessa Tabela, são apresentados a carga de ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação de ruptura. A tensão e módulo de elasticidade são apresentados em relação à área bruta.

Tabela 10. Análise de Tensão de Ruptura e Módulo de Elasticidade dos prismas com argamassa de 2 MPa.

Prisma	Carga de Ruptura kN	Tensão de Ruptura MPa	Módulo de Elasticidade MPa	Deformação de Ruptura ‰
PR1	203,42	5,01	3873,77	2,75
PR2	156,38	3,85	3862,49	1,93
PR3	142,14	3,50	3800,41	1,88
PR4	114,94	2,83	3858,77	1,03
PR5	177,45	4,37	3729,34	2,35
PR6	188,74	4,65	3053,65	2,51
Média	158,87	3,91	3824,96	1,99
Desvio Padrão	32,52	0,80	319,51	0,61
Coef. Variável	20,47%		8,35%	30,81%

Fonte: Elaboração própria.

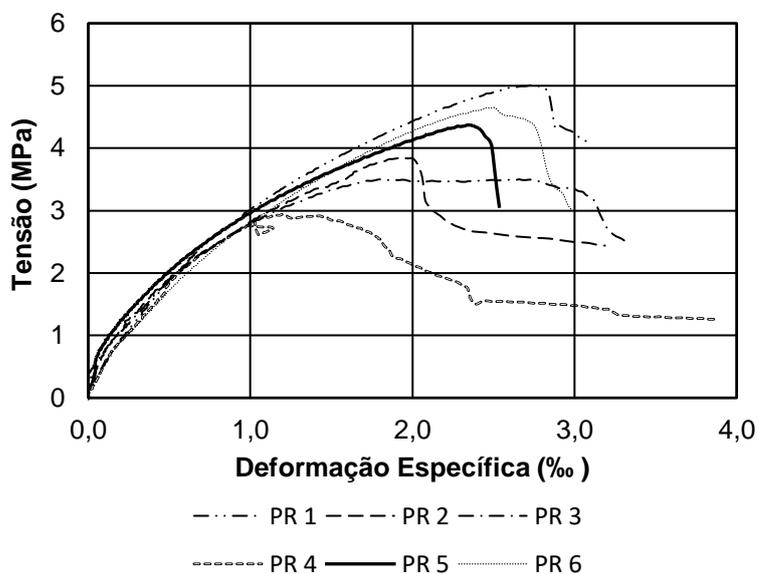
Através dos resultados apresentados verifica-se que a tensão de ruptura possui um coeficiente de variação de apenas 20,47%, o módulo de elasticidade apresenta coeficiente de variação de 8,35% e a deformação de ruptura apresenta variação de 30,81%.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 10, é possível verificar que a ruptura do prisma foi maior do que a ruptura dos corpos de prova de argamassa de

2 MPa. Isso ocorre, pois, o fenômeno do confinamento é responsável por incrementar a resistência da argamassa, além disso, os blocos estudados possuem grande absorção de água, resultando na perda de água da argamassa pelo bloco e aumentando a resistência da argamassa de assentamento.

Complementando as análises de ruptura dos prismas de argamassa fraca, a Figura 17, ilustra a curva tensão *versus* deformação específica dos prisma, de acordo com os deslocamentos medidos com os LVDTs. Através dessa imagem, pode-se observar um comportamento tensão-deformação semelhante entre os prismas, aproximadamente linear até próximo à ruptura.

Figura 17. Curva tensão *versus* deformação específica dos prismas com argamassa de 2 MPa.



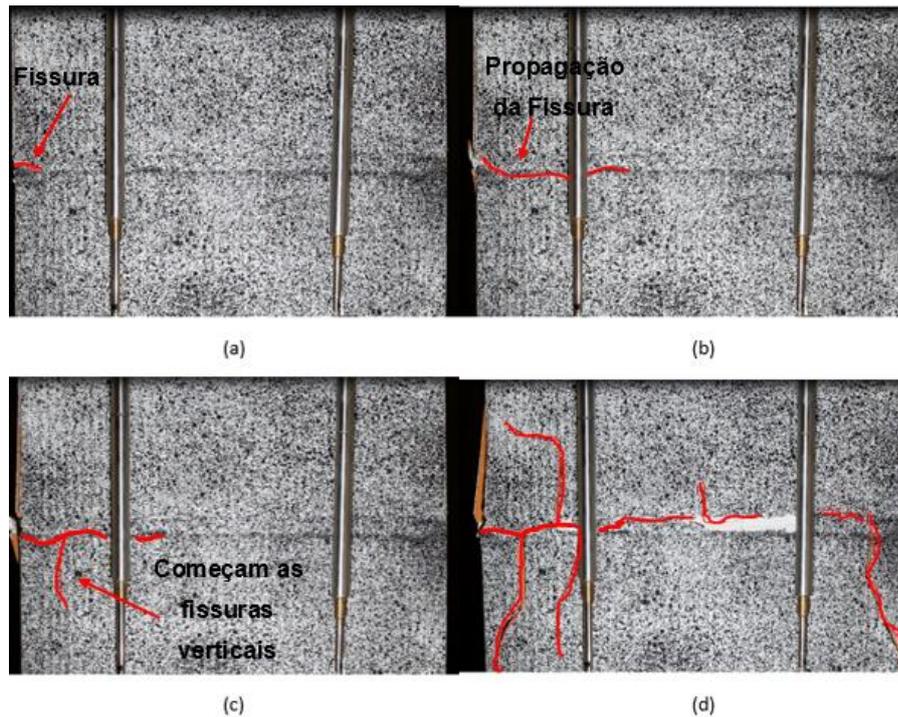
FONTE: Elaboração própria.

Além disso, ainda observando a Figura 17, pode-se analisar que o PR 1 apresentou maior tensão de ruptura, enquanto o PR 4 apresentou uma resistência inferior aos demais, possivelmente devido a alguma falha localizada.

É possível notar que as rupturas de todos os prismas foram lentas, com grande fissuração, iniciando com pequenas trincas na junta da argamassa e expandindo progressivamente até os blocos, atingindo o rompimento. A Figura 18 apresenta o modo de ruptura típico nos prismas de argamassa fraca. Em (a) surge a primeira fissura na junta de argamassa, perto da lateral o prisma. Em (b) a primeira fissura propaga-se horizontalmente por toda junta. Em (c) a partir da fissura na junta

propagam-se trincas para os blocos. E, por fim, em (d) o prisma rompe por esmagamento da junta da argamassa. Verifica-se que há uma fissuração vertical partindo da junta até o meio do bloco, nas laterais dos prismas e, lateralmente, ocorre o deslocamento do bloco.

Figura 18. Modo de ruptura dos prismas com argamassa de 2 MPa.



FONTE: Elaboração própria.

Essa forma de ruptura é um padrão que foi estudado por Lubeck (2016) e está sendo constatado também nessa pesquisa. Segundo Lubeck (2016), argamassas pouco resistentes contribuem para que as rupturas ocorram com grande fissuração e aviso.

Além disso, o autor cita que o modo de ruptura gera um deslocamento da superfície do bloco, ocasionado pelo acúmulo de tensão logo a baixo da junta de argamassa. A Figura 19 ilustra o prisma após a ruptura.

Figura 19. Vistas do prisma após a ruptura.



FONTE: Elaboração própria.

Na primeira perspectiva da Figura 19, observa-se a lateral do prisma, que possuiu esfacelamento da argamassa e deslocamento do bloco inferior. Já na segunda perspectiva, é possível analisar o prisma de frente e verificar que o mesmo tendeu a romper mais para o lado esquerdo e deslocar o bloco inferior. Verifica-se que o acúmulo de tensões ocorreu na parte de baixo da junta de argamassa e o maior acúmulo de tensões na esquerda do prisma. Na terceira perspectiva, constata-se o que foi mencionado na vista lateral e vista frontal.

Todos os prismas de argamassa de 2 MPa comportaram-se de forma parecida de prismas de parede vazada e baixa resistência de argamassa, conforme estudados por Lubeck (2016). Essas fissuras na junta ocorrem, na maioria das vezes, na extremidade inferior da junta, tendendo a propagar-se para os blocos.

Além disso, foi constatado por Lubeck (2016) e é possível observar nessa pesquisa que, a partir da formação da fissura vertical, houve concentração das tensões próximas às juntas, acarretando o esmagamento da junta horizontalmente, imediatamente antes da ruptura dos prismas.

4.1.2 Prismas com argamassa de 6 MPa

Através da Tabela 11 pode-se visualizar os resultados dos ensaios de compressão simples dos prismas com argamassa de 6 MPa. Nessa Tabela, são apresentados a carga de ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e

deformação de ruptura, onde a tensão e módulo de elasticidade são apresentados em relação à área bruta.

Tabela 11. Análise de Tensão de Ruptura e Módulo de Elasticidade dos prismas com argamassa de 6 MPa.

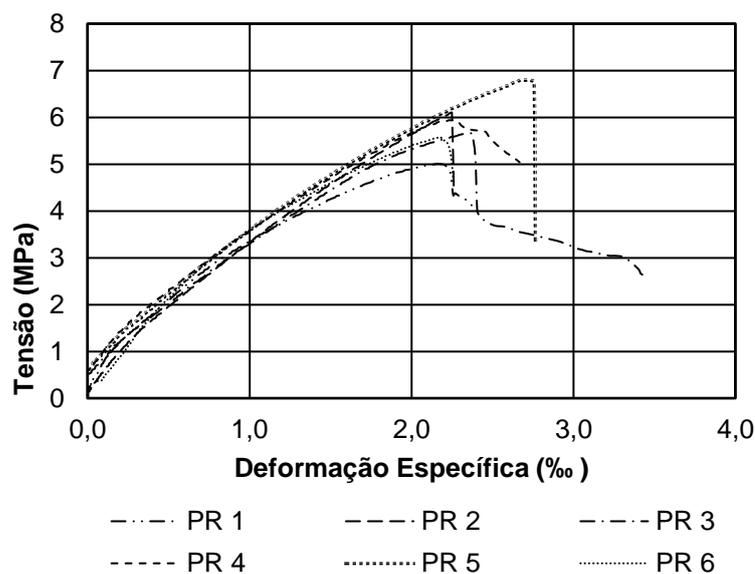
Prisma	Carga de Ruptura kN	Tensão de Ruptura MPa	Módulo de Elasticidade MPa	Deformação de Ruptura ‰
PR1	269,77	6,64	3590,23	2,59
PR2	247,53	6,10	3599,23	2,25
PR3	229,75	5,66	4126,92	2,38
PR4	241,27	5,94	3959,46	2,27
PR5	276,16	6,80	4346,64	2,72
PR6	226,56	5,58	4036,49	2,18
Média	252,89	6,23	3924,50	2,44
Desvio Padrão	20,51	0,51	299,46	0,22
Coef. Variável	8,11%		7,63%	8,81%

FONTE: Elaboração própria.

Verifica-se que a tensão de ruptura possui um coeficiente de variação de apenas 8,11%, mostrando que as rupturas dos prismas de 6 MPa possuíram um comportamento de ruptura mais uniforme comparado aos prismas de 2 MPa. O Módulo de Elasticidade possui coeficiente de variação de 7,63%, enquanto a deformação possuiu uma variação de 8,81%.

Complementando a análise da ruptura dos prismas de argamassa média, tem-se a Figura 20, que ilustra a curva Tensão *versus* deformação específica dos prismas de 6 MPa de acordo com os deslocamentos medidos com os LVDTs

Figura 20. Curva tensão *versus* deformação específica dos prismas com argamassa de 6 MPa.

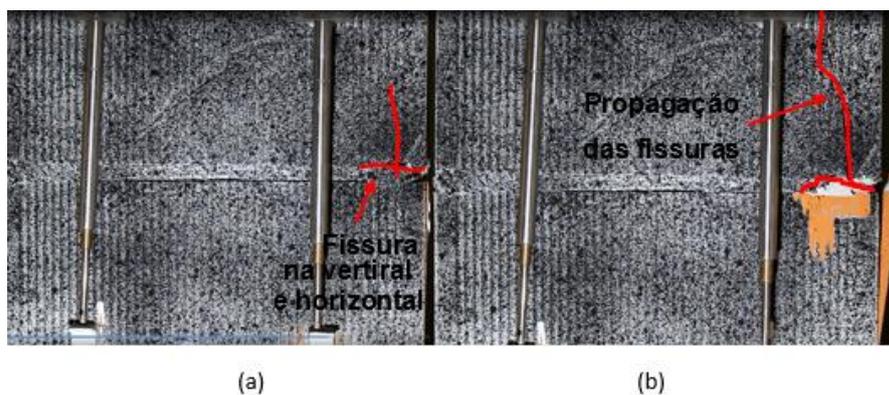


FONTE: Elaboração própria.

Através dos resultados, verifica-se um comportamento tensão-deformação semelhante entre os prismas de argamassa média, assim como os prismas com argamassa de 2 MPa.

Analisando o modo de ruptura, destaca-se que as rupturas de todos os prismas foram lentas. Começaram com pequenas trincas na junta da argamassa e no bloco, expandindo, progressivamente, e atingindo o rompimento. Assemelha-se com a ruptura dos prismas de 2 MPa. No entanto, com menos fissuração. A Figura 21 apresenta o modo de ruptura típico nos prismas de 6 MPa. Em (a) surge a primeira fissura na junta de argamassa e no bloco, na lateral do prisma. Em (b) as fissuras propagam, tanto na vertical como na horizontal e rompem. A Figura 22 apresenta a vista do prisma após a ruptura.

Figura 21. Modo de ruptura dos prismas com argamassa de 6 MPa.



FONTE: Elaboração própria.

Figura 22. Vistas do prisma após a ruptura.



FONTE: Elaboração própria.

Nota-se na Figura 22 que houve menos deslocamento no prisma com argamassa de 6 MPa e menos fissuração comparado ao que foi apresentado anteriormente para o prisma de 2 MPa. Além disso, a fissuração ocorreu tanto no canto esquerdo do prisma, como no canto direito, de forma aleatória, mas todos os prismas romperam por esmagamento da argamassa.

4.1.3 Prismas com argamassa de 12 MPa

Os resultados dos ensaios de compressão simples dos prismas com argamassa de 12 MPa são apresentados na Tabela 12, assim, é apresentada a carga de ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação de ruptura, onde a tensão e módulo de elasticidade são apresentados em relação à área bruta.

Tabela 12. Análise de Tensão de Ruptura e Módulo de Elasticidade dos prismas com argamassa de 12 MPa.

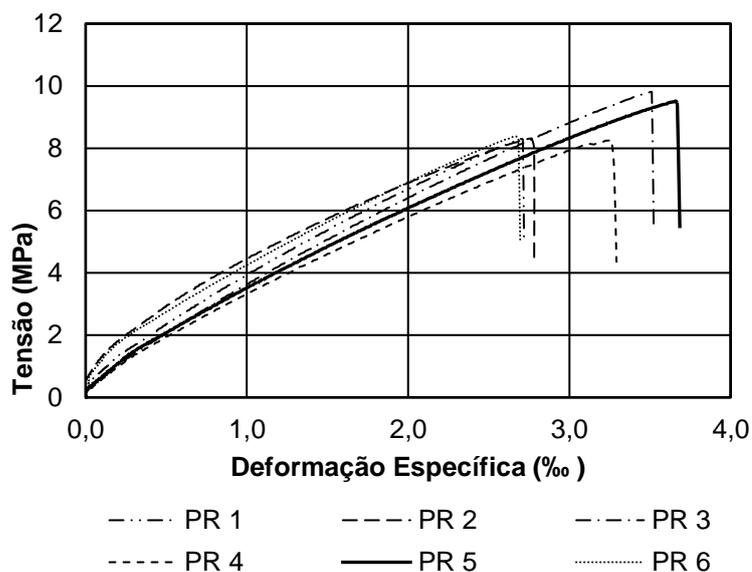
Prisma	Carga de Ruptura kN	Tensão de Ruptura MPa	Módulo de Elasticidade MPa	Deformação de Ruptura ‰
PR1	337,01	8,30	4539,25	2,711
PR2	337,50	8,31	4789,24	2,782
PR3	398,08	9,80	3816,29	3,511
PR4	335,49	8,26	3580,46	3,261
PR5	386,10	9,51	3780,98	3,661
PR6	340,03	8,38	5774,55	2,672
Média	358,84	8,84	4101,24	3,19
Desvio Padrão	28,48	0,70	831,08	0,44
Coef. Variável		7,94%	20,26%	13,66%

FONTE: Elaboração própria.

Analisando ainda a Tabela 12, pode-se verificar que a tensão de ruptura possui um coeficiente de variação de apenas 7,94%, o módulo de elasticidade apresenta coeficiente de variação de 20,26% e o coeficiente de variação da deformação de ruptura é de 13,66%.

É possível analisar na Figura 23 a curva tensão *versus* deformação específica do prisma de 12 MPa, de acordo com os deslocamentos medidos com os LVDTs.

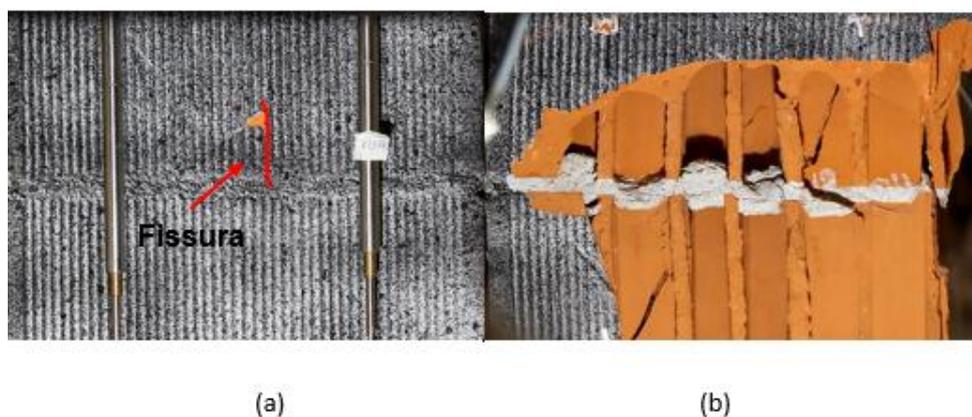
Figura 23. Curva tensão *versus* deformação específica dos prismas com argamassa de 12 MPa.



FONTE: Elaboração própria.

De acordo com a Figura 23, verifica-se um comportamento tensão-deformação semelhante entre os prismas. No entanto, as rupturas de todos os prismas com argamassa de 12 MPa foram abruptas, com grande acúmulo de energia, pouca fissuração, rompendo com pouco aviso. A Figura 24 ilustra o modo de ruptura dos prismas com argamassa de 12 MPa. Em (a) fissuras verticais surgem nos blocos logo antes da ruptura e em (b) rompe por tração no bloco, com desfragmentação de suas paredes. A Figura 25 apresenta o prisma após a ruptura.

Figura 24. Modo de ruptura dos prismas com argamassa de 12 MPa.



FONTE: Elaboração própria.

Figura 25. Vistas do prisma após a ruptura.



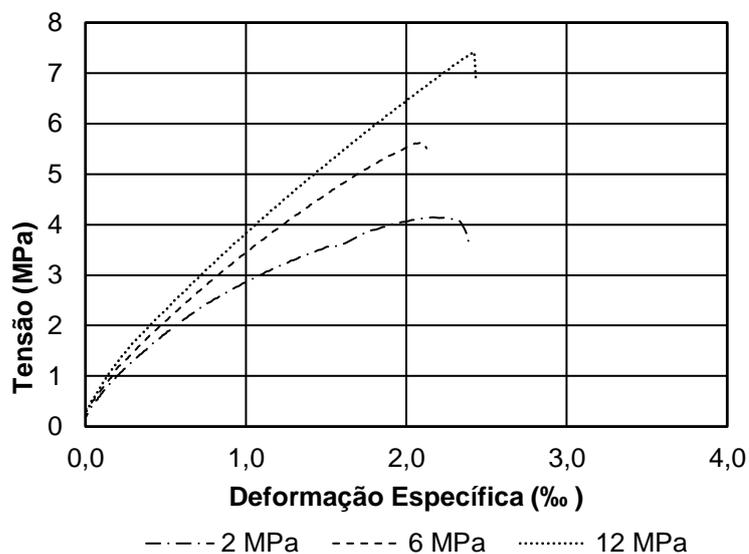
FONTE: Elaboração própria.

Nota-se, ao analisar a Figura 25, que os prismas apresentaram rupturas frágeis. Em alguns casos, especialmente onde o prisma rompeu com as maiores resistências, houve desfragmentação total do bloco.

4.2 Relação entre os prismas de diferentes argamassas

A Figura 26 apresenta a curva tensão média *versus* deformação específica média dos prismas de acordo com as medições realizadas pelos LVDTs para cada prisma de diferentes resistências de argamassa. A Tabela 13 compara a carga de ruptura média, tensão de ruptura média, módulo de elasticidade médio, deformação de ruptura medida pela média dos LVDTs, tensão de ruptura na junta de argamassa medida pela média do DIC 3 e DIC 4 para os prismas de diferentes resistências de argamassa.

Figura 26. Curva tensão *versus* deformação específica para prismas com diferentes resistências de argamassa.



FONTE: Elaboração própria.

Tabela 13. Comparação dos prismas com diferentes resistências de argamassa.

Argamassa	Carga de Ruptura kN	Tensão de Ruptura MPa	Módulo de Elasticidade MPa	Deformação de Ruptura LVDT médio ‰	Deformação de Ruptura DIC 3 ‰	Deformação de Ruptura DIC 4 ‰
1	158,87	3,91	3824,96	1,99	13,76	14,02
2	252,89	6,23	3924,50	2,44	12,01	9,99
3	358,84	8,84	4101,24	3,19	7,85	7,06

FONTE: Elaboração própria.

Nota-se que as diferentes resistências de argamassa influenciaram significativamente na resistência final dos prismas, visto que, quanto maior a resistência da argamassa, maior a resistência do prisma, maior a tensão para uma mesma deformação, maior o módulo de elasticidade e menor a deformação na junta de argamassa.

A Tabela 13 apresenta a relação entre as diferentes argamassas utilizadas e a resistência do bloco na área bruta e área líquida.

Tabela 14. Relação entre as resistências da argamassa e o bloco.

Argamassa	Resistência			f_{arg}/f_{bbruta}	f_{arg}/f_{bliq}
	MPa				
	Argamassa	Bloco na Área Bruta	Bloco na Área Líquida		
1	2,24			0,25	0,11
2	11,12	8,95	20,83	1,24	0,53
3	22,32			2,49	1,07

FONTE: Elaboração própria.

Mohamad (1998) recomenda que a resistência à compressão da argamassa seja entre 0,70 a 1 vez a resistência à compressão do bloco na área bruta. Já a ABNT NBR 15961(2011) especifica que a resistência da argamassa não deve exceder 70% da resistência do bloco em área líquida.

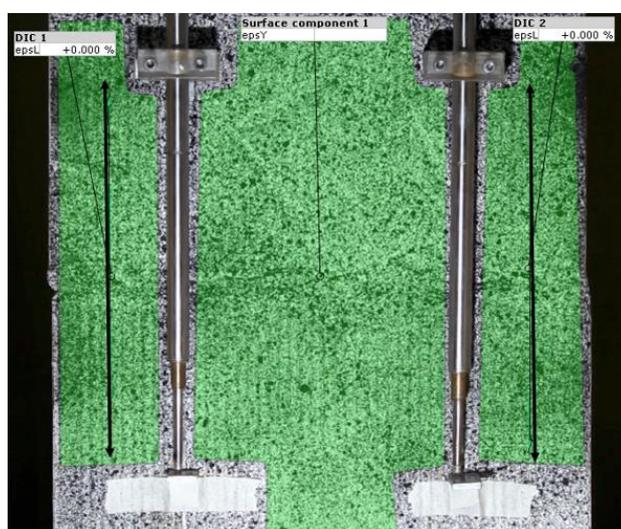
Nota-se que nenhuma argamassa estava dentro dos limites recomendados por Mohamad (1998), ainda a argamassa 1 possuiu resistência à compressão 0,25 vezes menor que a resistência a compressão do bloco, enquanto as argamassas 2 e 3 possuíram resistência maior, de 1,24 vezes e 2,49 vezes maior que a resistência do bloco.

Além disso, a argamassa 1 e 2 estavam dentro dos limites estabelecidos pela Norma Técnica que é a baixo de 70%, no entanto, a argamassa 3 excedeu a esse limite e teve um fator f_{arg}/f_{bbruta} de 107%.

4.3 Comparação LVDT *versus* DIC

Nesse capítulo serão descritas as comparações entre o LVDT e o DIC. Para essa análise, os prismas foram filmados a uma distância que se pudesse visualizar todo o LVDT. As bases de medida criadas no GOM Correlate foram da mesma dimensão do LVDT, sendo posicionada nas proximidades desse, conforme a ilustra a Figura 27.

Figura 27. Distâncias utilizadas para a DIC.



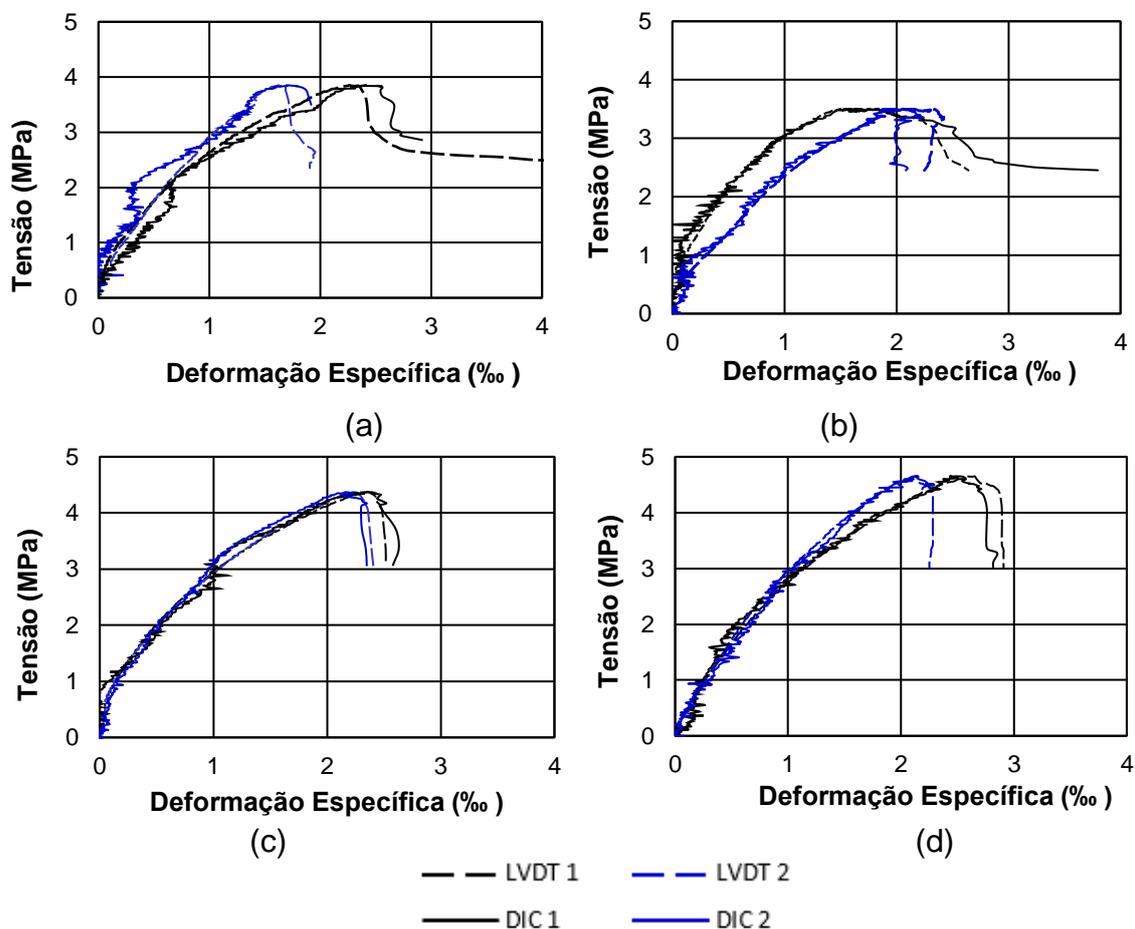
FONTE: Elaboração própria.

No primeiro item, será comparado os resultados obtidos para argamassa de 2 MPa. No item subsequente, a argamassa de 6 MPa, no terceiro será verificada a coerência dos resultados para argamassa de 12 MPa.

4.3.1 Prismas com argamassa de 2 MPa

A Figura 27 ilustra a curva tensão *versus* deformação específica dos prismas com argamassa de 2 MPa, nessa imagem, pode-se comparar o LVDT 1 com o DIC 1 e o LVDT 2 com DIC 2.

Figura 28. Curva tensão versus deformação do prisma com argamassa de 2MPa para diferentes métodos de medição: (a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4.



FONTE: Elaboração própria.

Através da Figura 27, verifica-se que ambas as curvas possuem comportamento semelhantes.

A Tabela 15 apresenta a comparação de deformação na carga máxima entre o LVDT e o DIC. Quando a razão entre os resultados for 1, os valores se igualaram.

Tabela 15. Comparação entre LVDTs e DICs do Prisma com argamassa de 2 MPa.

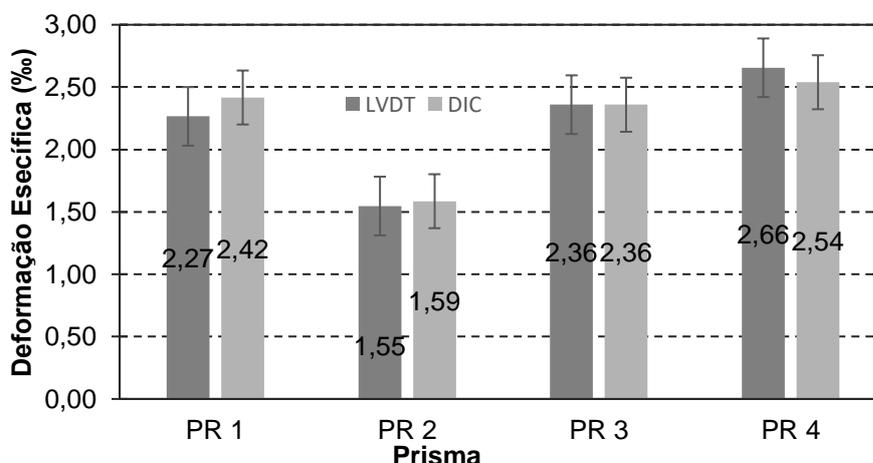
Prisma	LVDT 1	DIC 1	LVDT 2	DIC 2	Média	Média	DIC/	DIC/LVDT2
	‰	‰	‰	‰	1	2	LVDT1	
PR 1	2,27	2,42	1,63	1,70	2,34	1,66	1,07	1,05
PR 2	1,55	1,59	2,11	1,95	1,57	2,03	1,02	0,93
PR 3	2,36	2,36	2,23	2,16	2,36	2,20	1,00	0,97
PR 4	2,66	2,54	2,13	2,15	2,60	2,14	0,96	1,01

FONTE: Elaboração própria.

Através da Tabela 15, pode-se observar para o prisma 1 que o DIC 1 possuiu valor de deformação 1,07 vezes maior que o LVDT 1, enquanto o DIC 2, é 1,05 o LVDT 2. Para o prisma 2, a variação foi de DIC 1 igual a 1,02 do LVDT 1 e DIC 2 0,93 vezes o LVDT 2. Já o prisma 3 pode-se verificar que possui o mesmo valor no momento de carga máxima para o DIC 1 e o LVDT 1 e para a posição 2, DIC 2 ´é 0,97 LVDT 2. Por fim, nota-se para o prisma 4 que o DIC 1 é 0,96 vezes o LVDT 1 e o DIC 2 é 1,01 LVDT 2.

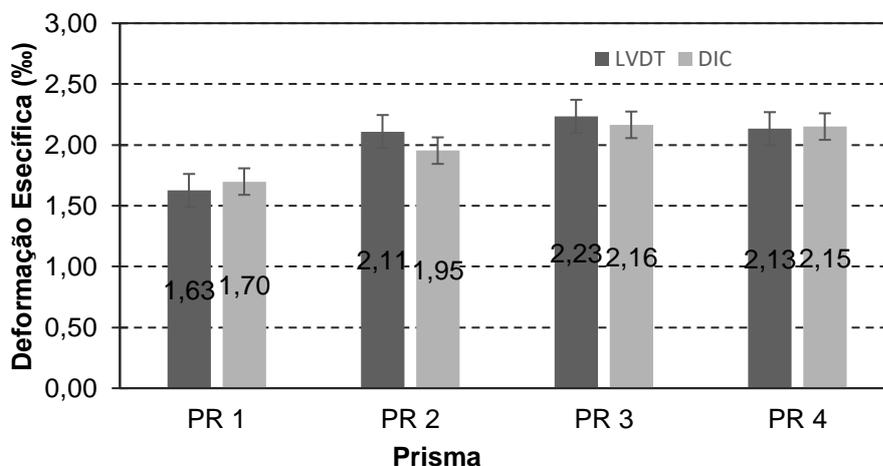
A Figura 28 e a Figura 29 também apresentam a relação entre os diferentes métodos de medição. Os rótulos de dados no centro da coluna são os valores das deformações específicas no momento de ruptura do prisma, os erros são uma relação de máximos e mínimos.

Figura 29. Deformação específica dos prismas para diferentes métodos de medição na posição 1.



FONTE: Elaboração própria.

Figura 30. Deformação específica dos prismas para diferentes métodos de medição na posição 2.



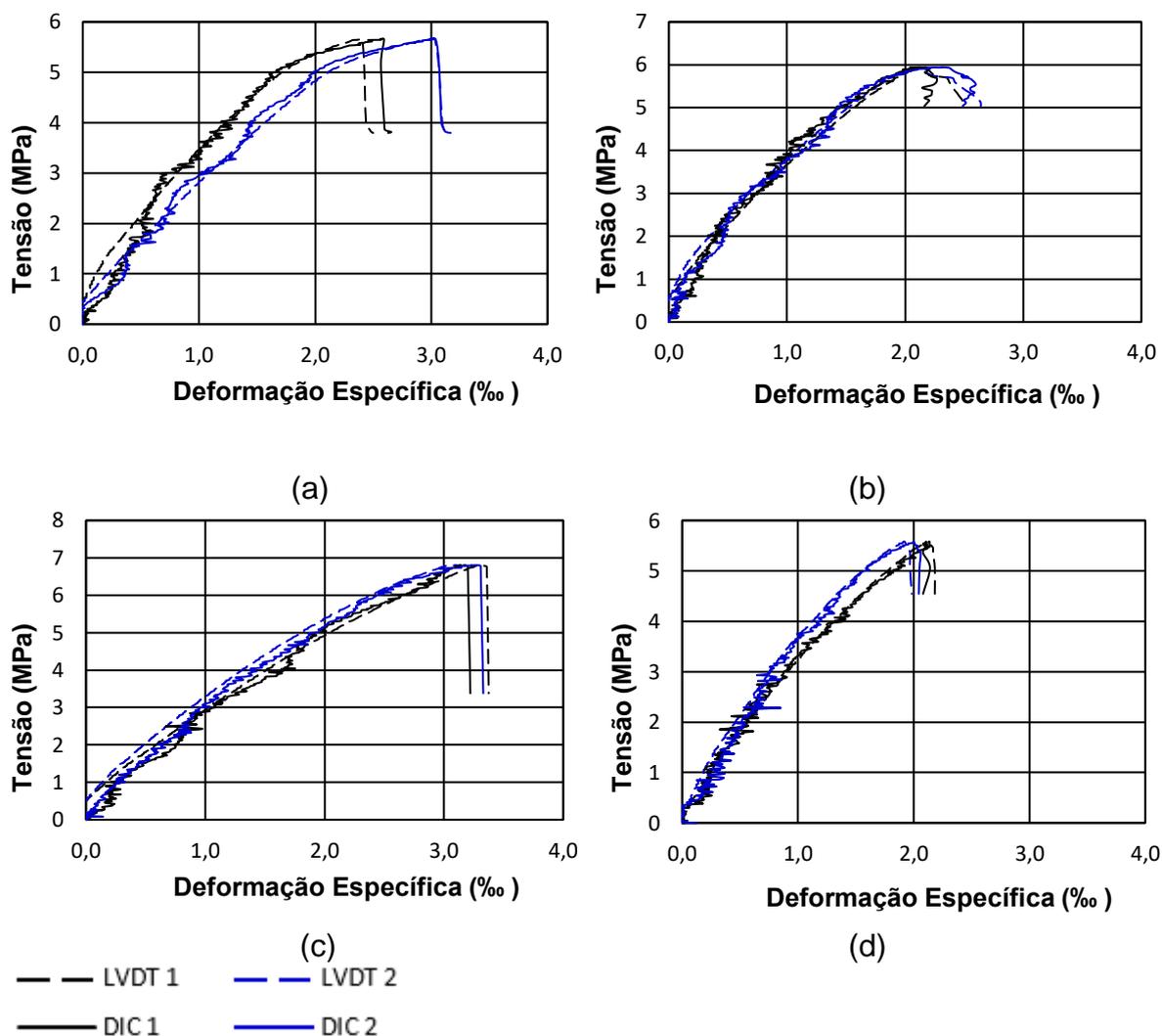
FONTE: Elaboração própria.

Verifica-se que os métodos de medição possuem resultados muito parecidos. Quando se analisa o valor mínimo para um método de medição em relação ao valor máximo do outro método de medição, os valores de deformação específica quase sempre se igualam.

4.3.2 Prismas com argamassa de 6 MPa

A Figura 30 a seguir ilustra as curvas tensão *versus* deformação específica dos prismas de 6 MPa, tanto para os LVDTs como para os DICs. Através dessa Figura, pode-se comparar o LVDT 1 com o DIC 1 e o LVDT 2 com o DIC 2.

Figura 31. Curva tensão *versus* deformação do prisma com argamassa de 6 MPa para diferentes métodos de medição: (a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4



FONTE: Elaboração própria.

Os valores de DIC 1 e LVDT 1 se assemelham, assim como os valores de DIC 2 e LVDT 2.

A Tabela 16 apresenta a comparação de deformação na carga máxima entre o LVDT e o DIC.

Tabela 16. Comparação entre LVDTs e DICs do Prisma com argamassa de 6 MPa.

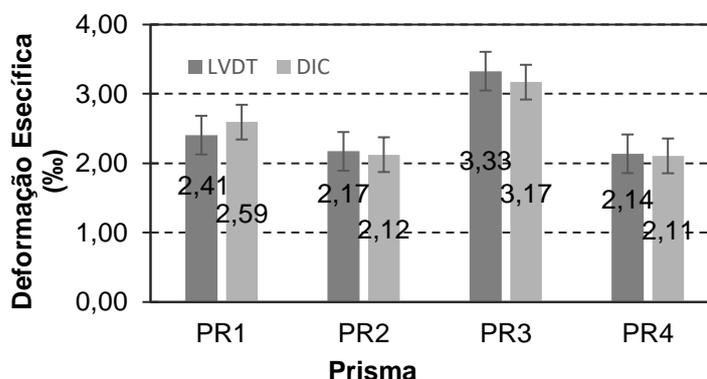
Prisma	LVDT 1 ‰	DIC 1 ‰	LVDT 2 ‰	DIC 2 ‰	Média 1	Média 2	DIC/ LVDT1	DIC/LVDT2
PR 1	2,41	2,59	3,04	3,03	2,50	3,04	1,08	1,00
PR 2	2,17	2,12	2,30	2,21	2,15	2,26	0,98	0,96
PR 3	3,33	3,17	3,25	3,16	3,25	3,20	0,95	0,97
PR 4	2,14	2,11	2,00	1,96	2,12	1,98	0,99	0,98

FONTE: Elaboração própria.

Através da Tabela 16, pode-se observar para o prisma 1 que o DIC 1 é 1,08 o LVDT 1, foi a maior variação de resultados comparando LVDT e DIC no momento de carga máxima. Enquanto o DIC 2 é 1 o LVDT 2, ou seja, no momento de ruptura a deformação específica é igual para ambos os métodos. O prisma 2 possuiu variação de 0,05‰ na posição 1 e 0,09‰ na posição 2. O prisma 3 possuiu variação de 0,16‰ na posição 1 e 0,09‰ na posição 2. Por fim, o prisma 4 apresentou valores de 0,03‰ na posição 1 e 0,04‰ na posição.

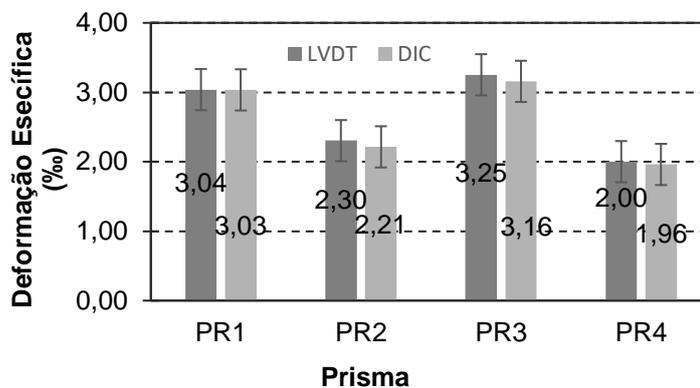
A Figura 31 e a Figura 33 também apresentam a relação entre os diferentes métodos de medição. Os rótulos de dados no centro da coluna são os valores das deformações específicas no momento de ruptura do prisma, os erros são uma relação de máximos e mínimos.

Figura 32. Deformação Específica dos Prismas para diferentes métodos de medição na posição 1.



FONTE: Elaboração própria.

Figura 33. Deformação Específica dos Prismas para diferentes métodos de medição na posição 2.



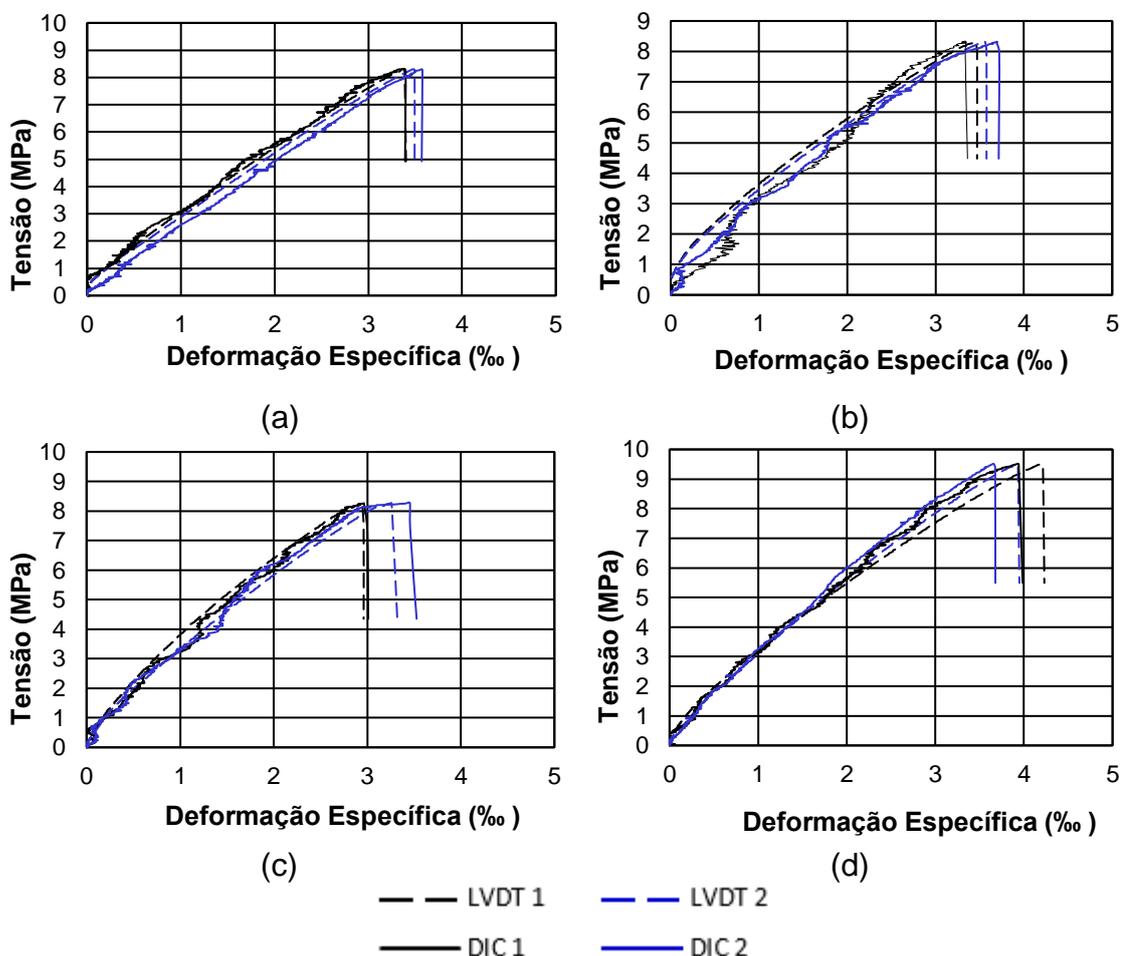
FONTE: Elaboração própria.

Verifica-se que os métodos de medição possuem resultados muito parecidos. Quando se analisa o valor mínimo para um método de medição em relação ao valor máximo do outro método de medição, os valores de deformação específica se igualam.

4.3.3 Prismas com argamassa de 12 MPa

A Figura 34 ilustra as curvas tensão *versus* deformação específica dos prismas de 12 MPa, para os dois métodos de medição. Assim, é possível comparar DIC 1 com LVDT 1 e DIC 2 com LVDT 2.

Figura 34. Curva tensão *versus* deformação dos Prismas com argamassa de 12 MPa para diferentes métodos de medição: (a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4



FONTE: Elaboração própria.

Verifica-se uma similaridade entre os resultados obtidos para os dois métodos, em ambas posições de análise. A Tabela 17 apresenta a comparação de deformação na carga máxima entre o LVDT e o DIC, tanto na posição 1 como posição 2, além disso, apresenta a razão entre os métodos de medição utilizados.

Tabela 17. Comparação entre LVDTs e DICs do Prisma com argamassa de 12 MPa.

Prisma	LVDT 1 ‰	DIC 1 ‰	LVDT 2 ‰	DIC 2 ‰	Média 1	Média 2	DIC/ LVDT1	DIC/LVDT2
PR 1	3,37	3,35	3,48	3,57	3,36	3,52	0,99	1,03
PR 2	3,45	3,35	3,56	3,69	3,40	3,62	0,97	1,04
PR 3	2,95	2,96	3,26	3,46	2,95	3,36	1,01	1,06
PR 4	4,20	3,94	3,93	3,66	4,07	3,80	0,94	0,93

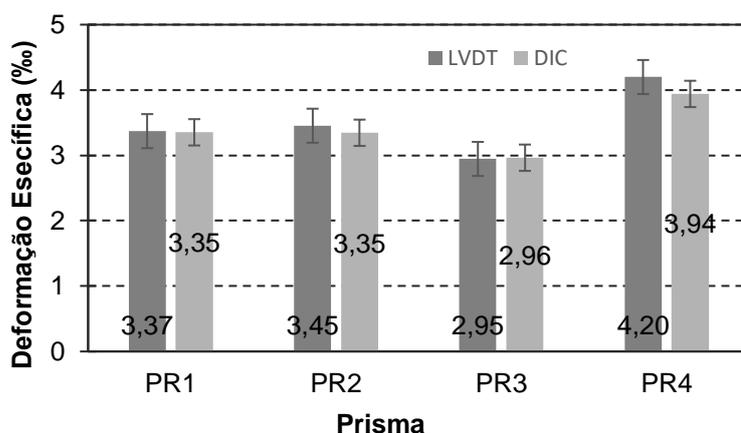
FONTE: Elaboração própria.

Verifica-se que a maior diferença entre os métodos na tensão de ruptura foi para o prisma 4, na posição 1 foi de 0,26‰ e na posição 2 foi de 0,27‰, os demais prismas possuíram menos variação, j

Para o prisma 1 o DIC 1 é 0,99 LVDT 1, já o DIC 2 é 1,03 LVDT 2. Para o prisma 2 o DIC 1 foi de 0,97 o LVDT 1 e DIC 2 foi 1,04 LVDT 2. Por fim, o prisma 3 possuiu variação de 1,01 DIC 1 em relação a LVDT 1 e 1,06 DIC 2 em relação a LVDT 2.

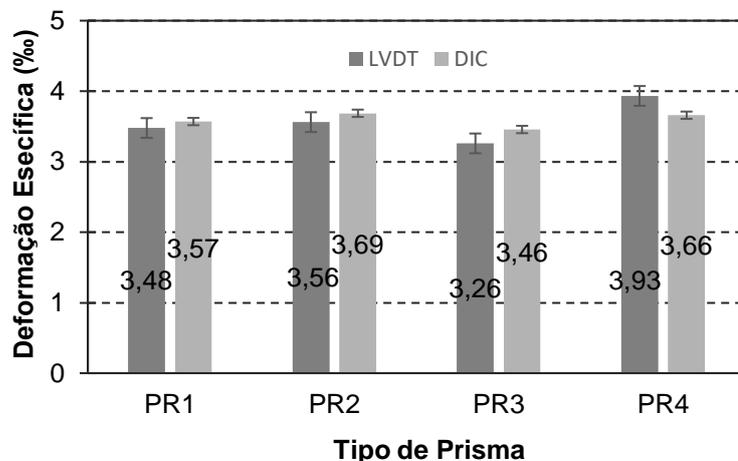
A Figura 35 e a Figura 36 também apresentam a relação entre os diferentes métodos de medição. Os rótulos de dados no centro da coluna são os valores das deformações específicas no momento de ruptura do prisma, as barras são uma relação de máximos e mínimos.

Figura 35. Deformação Específica dos Prismas para diferentes métodos de medição na posição 1



FONTE: Elaboração própria

Figura 36. Deformação Específica dos Prismas para diferentes métodos de medição na posição 2



FONTE: Elaboração própria

Verifica-se que os métodos de medição possuem resultados muito parecidos. Quando se analisa o valor mínimo para um método de medição em relação ao valor máximo do outro método de medição, os valores de deformação específica se igualam.

4.4 O esmagamento das juntas de argamassa nos prismas ensaiados à compressão

Assim como já estudado pelos autores aqui mencionados, quando a resistência da argamassa de assentamento é menor que a resistência dos blocos que se assentam, a junta se torna o elo frágil do prisma, proporcionando rupturas dúcteis, com bastante fissuração. Os prismas de argamassa de resistência baixa e média apresentaram rupturas dúcteis, rompendo por sua totalidade, devido o esmagamento da junta da argamassa. Por sua vez, o prisma de argamassa forte apresenta, em sua maioria, rupturas frágeis, onde o prisma se comportou como um material único.

Portanto, através do método de medição proposto nessa pesquisa, serão apresentados neste capítulo os valores de deformação na junta, em diferentes etapas de tensão, a fim de verificar como a junta deformou mais comparado ao conjunto argamassa-bloco, mesmo para prismas com argamassa forte.

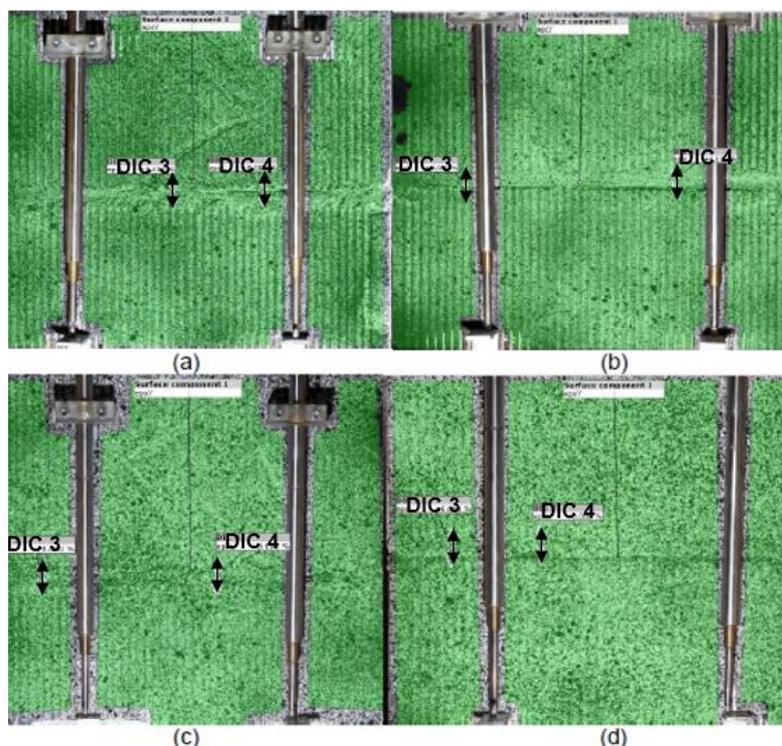
No primeiro item ressalta-se os valores de argamassa fraca (2 MPa). No item subsequente, a argamassa média (6 MPa) e no terceiro e último item, a argamassa forte (12 MPa).

4.4.1 Prismas com argamassa de 2 MPa

Foram realizadas análises nas juntas de assentamento em quatro prismas de argamassa de 2 MPa. Para tanto, foram escolhidos dois pontos em cada prisma, onde a argamassa deformava consideravelmente, conforme indicado na Figura 37.

Figura 37. Pontos de análise de deformação:

(a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4



FONTE: Elaboração própria.

Os resultados dos prismas de 2 MPa estão na Tabela 18, esses resultados relacionam a deformação total no prisma dada pela média dos LVDTs, com a deformação específica em distâncias aproximadas da espessura da junta de argamassa, dadas pelas medidas do DIC (DIC3 e DIC4). Na Tabela 18, na primeira coluna, é a indicação da amostra analisada. Na segunda, apresenta-se a tensão do prisma em diferentes momentos de ensaio. Foram analisadas a tensão inicialmente, com 1,5 MPa e, posteriormente, foram analisadas as tensões a cada 0,5 MPa até a tensão de ruptura. A terceira coluna apresenta a deformação específica média dos quatro LVDTs. Já as colunas quatro e cinco apresentam a deformação específica na

junta da argamassa em cada ponto (DIC 3 e DIC 4) e as colunas 6 e 7 indicam a razão entre as deformações DIC3/LVDT e DIC4/LVDT.

Tabela 18. Relação da deformação nas juntas dos prismas com argamassa de 2 MPa com a deformação total.

Prisma	Tensão MPa	Conjunto ‰	DIC 3 ‰	DIC 4 ‰	DIC3/LVDT	DIC4/LVDT
PR 1	1,50	0,34	1,22	0,53	3,63	1,58
	2,00	0,56	1,57	1,40	2,80	2,50
	2,50	0,82	2,50	1,84	3,04	2,24
	3,00	1,12	4,39	3,24	3,92	2,89
	3,50	1,57	6,65	5,82	4,22	3,70
	3,85	1,93	9,68	9,34	5,01	4,84
PR 2	1,50	0,36	1,16	2,01	3,23	5,60
	2,00	0,55	2,92	3,35	5,30	6,08
	2,50	0,81	5,43	5,52	6,71	6,83
	3,00	1,16	7,79	10,01	6,69	8,60
	3,50	1,80	16,45	21,51	9,13	11,95
PR 3	1,51	0,30	0,99	0,69	3,29	2,31
	2,00	0,49	1,37	1,75	2,78	3,55
	2,50	0,73	2,53	1,72	3,47	2,36
	3,01	1,02	4,30	2,83	4,20	2,76
	3,51	1,40	6,06	5,53	4,33	3,95
	4,01	1,87	8,98	6,61	4,80	3,53
	4,37	2,35	12,21	9,23	5,20	3,93
PR 4	1,50	0,42	1,04	0,40	2,46	0,95
	2,00	0,61	1,25	0,87	2,04	1,42
	2,50	0,84	1,49	1,81	1,77	2,16
	3,00	1,11	3,62	2,91	3,27	2,63
	3,50	1,43	5,67	5,98	3,97	4,19
	4,00	1,76	8,25	7,87	4,68	4,46
	4,50	2,24	12,53	13,11	5,60	5,86
	4,65	2,49	16,70	16,01	6,69	6,42

FONTE: Elaboração própria.

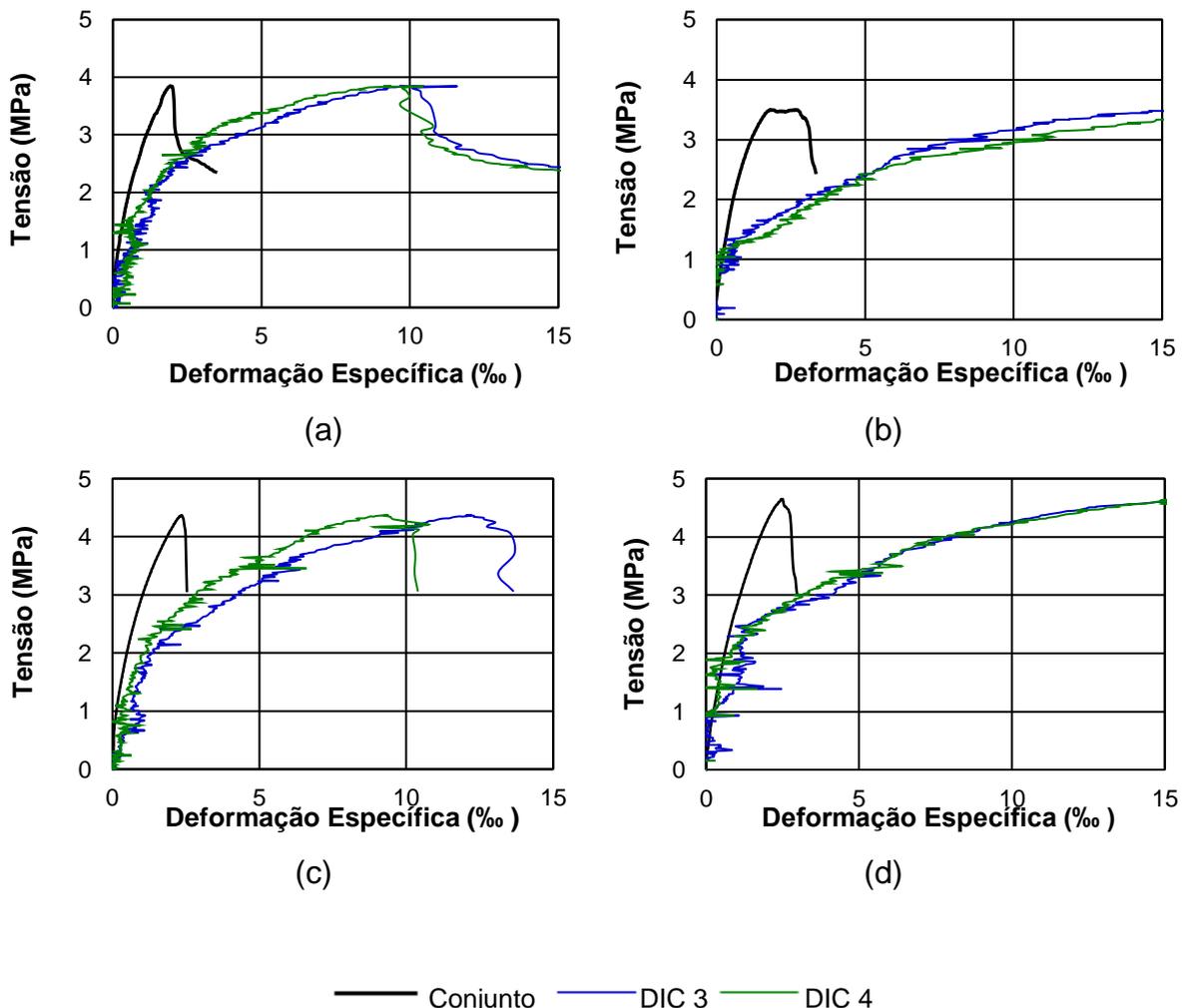
Em todos os casos analisados, a deformação na junta (DIC 3 e DIC4) sempre foi maior que a deformação total do prisma medida pela média do LVDT. No momento de ruptura do prisma 1, A deformação no DIC 3 era 5,01 vezes maior que a

deformação do LVDT médio e no DIC 4 esse valor chegou a 4,84 vezes. Para o prisma 2, esses valores foram de 9,13 vezes e 11,95 vezes maior para a posição DIC 3 e DIC 4 comparado ao LVDT médio. No prisma 3 e prisma 4 pode-se observar que também houve uma maior deformação na junta de argamassa. Para o prisma 3, o DIC 3 deformou 5,20 vezes mais que o LVDT médio e o DIC 4 deformou 3,93 vezes mais comparado também ao LVDT médio. Por fim, o prisma 4 teve 6,69 vezes mais para o DIC 1 e 6,42 vezes mais para DIC 2.

A Figura 38 ilustra a curva tensão *versus* deformação específica do valor de LVDT médio, comparado com a deformação na junta da argamassa analisado com o DIC para os dois pontos diferentes (ponto 3 e ponto 4).

Figura 38. Curva tensão *versus* deformação do prisma comparando LVDT médio e DIC na junta de argamassa:

(a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4.



FONTE: Elaboração própria.

A partir dos resultados expressos acima e análises visuais de ruptura, pode-se verificar que para o prisma 1, o início do esmagamento da junta de argamassa ocorre para em tensões próximas a 2,50 MPa, os valores de deformação específica são de 2,50‰ para o DIC 3 e 1,84‰ para o DIC 4.

Já o início de esmagamento da junta para o prisma 2 ocorre para tensões próximas a 1,30 MPa, nesse momento, a deformação específica do DIC 3 é de 0,65‰ e DIC 4 é de 1,20‰. Além disso, verifica-se que o prisma 2 teve menor tensão de ruptura e seu processo de esmagamento da junta de argamassa iniciou antes que os outros prismas

Para o prisma 3, o esmagamento da junta de argamassa inicia-se quando o bloco atinge tensões perto de 2,50 MPa, quando a junta de assentamento deforma 2,53‰ no DIC 3 e 1,72‰ no DIC 4.

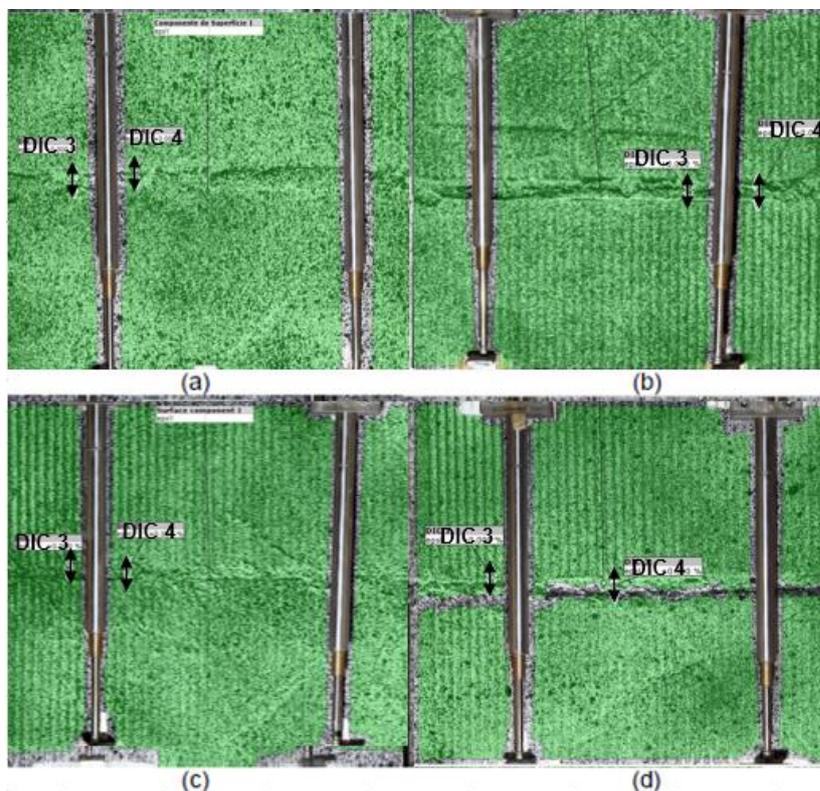
O esmagamento da junta de argamassa do prisma 4 ocorre em tensões próximos a 2,50 MPa e as deformações específicas para o DIC 3 e DIC 4 nesse instante é de 1,49‰ e 1,81‰ respectivamente.

4.4.2 Prismas com argamassa de 6 MPa

Foram realizadas análises nas juntas de assentamento em quatro prismas de argamassa de 6 MPa. Para isso, foram escolhidos dois pontos em cada prisma, onde a argamassa deformava consideravelmente, conforme indicado na Figura 39.

Figura 39. Pontos de análise de deformação:

(a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4.



FONTE: Elaboração própria.

Assim como apresentado nos prismas de argamassa de 2MPa, a Tabela 17 relaciona a deformação média do LVDT no prisma com a deformação específica na junta da argamassa de acordo com o DIC. Na primeira coluna, apresenta-se o prisma analisado. Já na segunda coluna a tensão do prisma em diferentes momentos de ensaio. Foram analisados a tensão inicialmente, com 1 MPa. Posteriormente, foram analisadas as tensões a cada de 1 MPa até a tensão de ruptura. A terceira coluna apresenta a deformação específica média dos quatro LVDTs. Por sua vez, a coluna quatro e a coluna cinco apresentam a deformação específica na junta da argamassa, em diferentes pontos. E nas duas últimas colunas apresenta-se a razão entre DIC3 com LVDT médio e DIC4 com LVDT médio, respectivamente.

Tabela 19. Relação da deformação nas juntas dos prismas com argamassa de 6 MPa com a deformação total.

Prisma	Tensão MPa	Conjunto ‰	DIC 3 ‰	DIC 4 ‰	DIC3/LVDT	DIC4/LVDT
PR 1	1,00	0,15	0,73	0,33	4,90	2,21
	2,00	0,50	2,67	0,81	5,39	1,64
	3,00	0,88	4,84	2,42	5,50	2,75
	4,00	1,31	7,64	3,47	5,84	2,65
	5,00	1,78	10,31	5,65	5,79	3,17
	5,65	2,38	15,82	11,31	6,66	4,76
PR 2	1,01	0,10	0,73	0,33	7,16	3,23
	2,00	0,39	2,45	1,08	6,33	2,78
	3,00	0,76	4,31	1,97	5,66	2,58
	4,01	1,18	6,74	2,86	5,69	2,42
	5,01	1,64	9,04	4,56	5,51	2,78
	5,94	2,27	13,12	9,08	5,79	4,01
PR 3	1,01	0,11	0,75	0,24	7,07	2,27
	2,01	0,43	0,88	0,44	2,08	1,03
	3,00	0,78	1,51	0,19	1,94	0,25
	4,00	1,16	2,06	1,31	1,77	1,12
	5,01	1,61	3,51	2,55	2,17	1,58
	6,00	2,14	5,07	3,67	2,37	1,72
	6,80	2,72	9,28	8,95	3,41	3,29
PR 4	1,00	0,19	0,56	0,94	2,99	5,00
	2,01	0,50	1,29	1,10	2,60	2,21
	3,01	0,83	1,89	1,00	2,27	1,20
	4,01	1,23	3,56	3,79	2,88	3,07
	5,00	1,68	5,75	6,22	3,43	3,71
	5,58	2,05	9,81	10,62	4,78	5,18

FONTE: Elaboração própria.

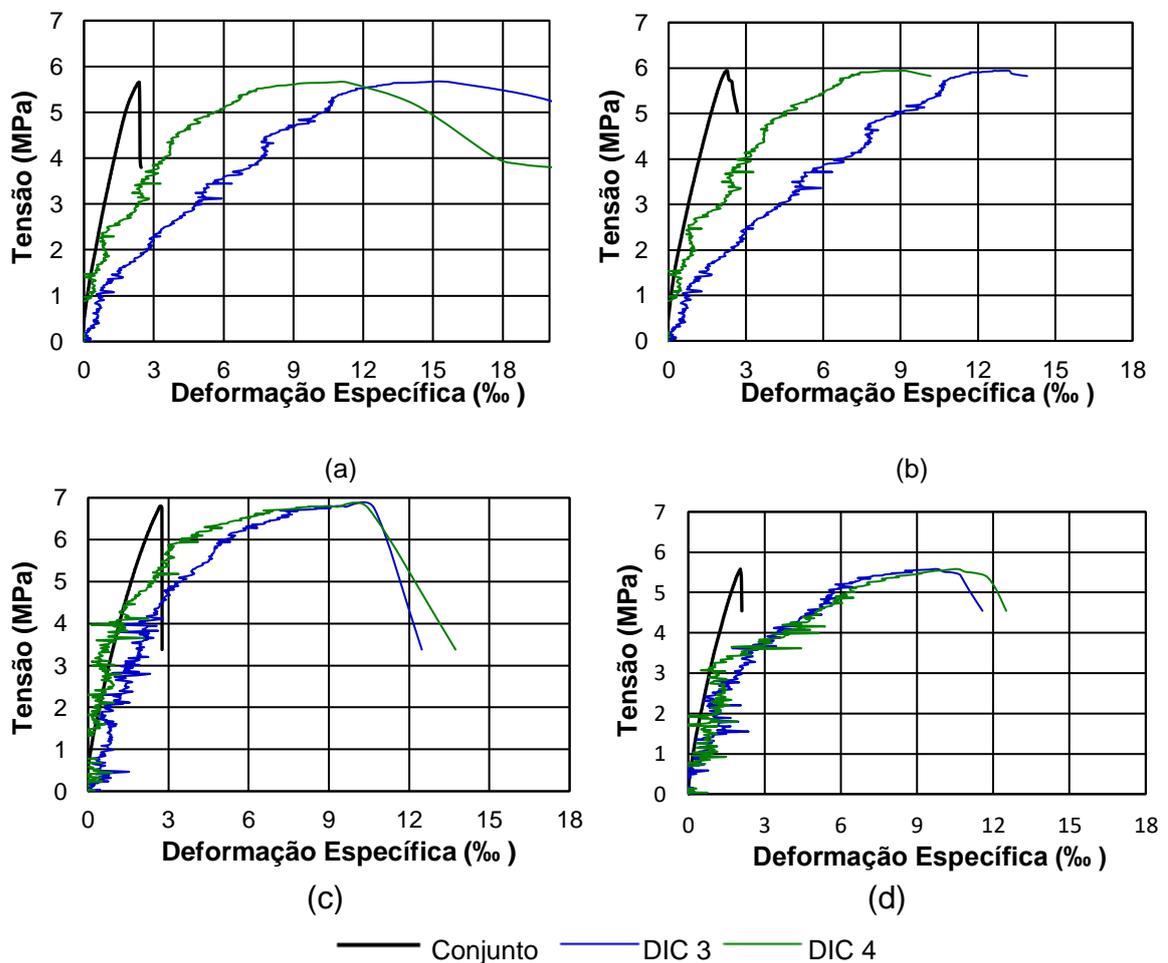
Em todos os casos analisados, a deformação na junta foi maior que a deformação total do prisma medida pela média do LVDT. No momento de ruptura do prisma 1, A deformação no DIC 3 era 6,66 vezes maior que a deformação do LVDT médio e no DIC 4 essa razão foi de 4,76 vezes. Para o prisma 2, esses valores chegaram a 5,79 vezes e 4,01 vezes maior para a posição DIC 3 e DIC 4 respectivamente, comparado ao LVDT médio. No prisma 3 e prisma 4 pode-se observar que também houve uma maior deformação na junta de argamassa. Para o

prisma 3, o DIC 3 deformou 3,41 vezes mais que o LVDT médio e o DIC 4 deformou 3,29 vezes mais comparado também ao LVDT médio. Por fim, o prisma 4 deformou no momento de ruptura, 4,78 vezes mais para o DIC 1 e 5,18 vezes mais para DIC 2.

Logo, antes mesmo de chegar a tensão de ruptura, a argamassa já estava com uma deformação tão avançada, que provocaria o esmagamento do bloco. É o que se observa na Figura 40, que ilustra a curva tensão *versus* deformação específica dos mesmos prismas comparando o LVDT médio com o DIC 3 e DIC 4.

Figura 40. Curva tensão *versus* deformação dos prismas comparando os LVDTs com a DIC na junta:

(a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4.



FONTE: Elaboração Própria.

A partir dos resultados acima e análises visuais de modo de ruptura, pode-se verificar que para o prisma 1, o início do esmagamento da junta de argamassa ocorre

para em tensões próximas a 2,50 MPa, os valores de deformação específica são de 3,75‰ para o DIC 3 e 1,53‰ para o DIC 4.

O início de esmagamento da junta para o prisma 2 ocorre para tensões próximas a 3,00 MPa, nesse momento, a deformação específica do DIC 3 é de 5,66‰ e DIC 4 é de 2,58‰.

Para o prisma 3, o esmagamento da junta de argamassa inicia-se quando o bloco atinge tensões perto de 4,50 MPa, quando a junta de assentamento deforma 2,81‰ no DIC 3 1,44‰ no DIC 4.

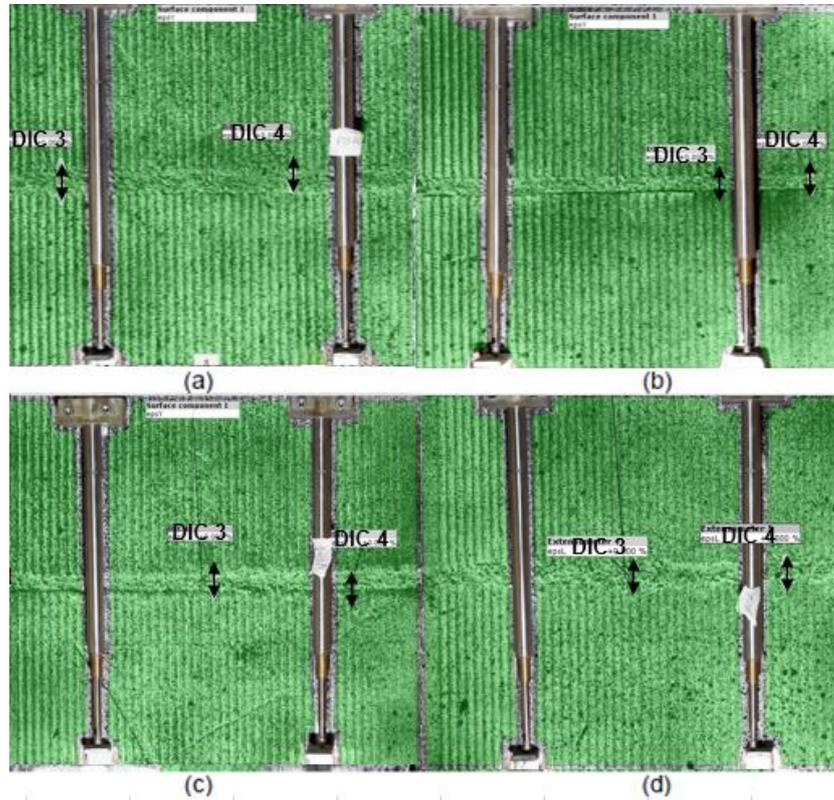
Por fim, o esmagamento da junta de argamassa do prisma 4 ocorre em tensões próximos a 3,50 MPa e as deformações específicas para o DIC 3 e DIC 4 nesse instante é de 2,54‰ e 2,28‰ respectivamente.

4.4.3 Prismas com argamassa de 12 MPa

Para finalizar esse capítulo, foram realizadas análises nas juntas de assentamento em quatro prismas de argamassa de 12 MPa. Para tanto, foram escolhidos dois pontos em cada prisma, onde a argamassa deformava consideravelmente, conforme indicado na Figura 41.

Figura 41. Pontos de análise de deformação.

(a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4



FONTE: Elaboração própria.

Assim como as análises realizadas nos outros itens, a Tabela 20 relaciona a deformação total no prisma com a deformação específica na junta da argamassa para os prismas de argamassa forte. A primeira coluna apresenta o prisma analisado, a segunda, a tensão, já a terceira coluna apresenta a deformação específica média dos quatro LVDTs. A coluna quatro e a coluna cinco apresentam a deformação específica na junta da argamassa, em diferentes pontos. Por seu turno, a coluna seis, analisa a razão entre o LVDT e DIC 3 e, por fim a coluna sete analisa a razão do LVDT com a DIC 4.

Tabela 20. Relação da deformação nas juntas dos prismas com argamassa de 12 MPa com a deformação total.

Prisma	Tensão MPa	Conjunto ‰	DIC 3 ‰	DIC 4 ‰	DIC3/LVDT	DIC4/LVDT
PR 1	1,50	0,34	1,22	0,53	3,63	1,58
	2,00	0,56	1,57	1,40	2,80	2,50
	2,50	0,82	2,50	1,84	3,04	2,24
	3,00	1,12	4,39	3,24	3,92	2,89
	3,50	1,57	6,65	5,82	4,22	3,70
	3,85	1,93	9,68	9,34	5,01	4,84
PR 2	1,50	0,36	1,53	0,55	4,26	1,54
	2,00	0,55	2,58	2,10	4,68	3,82
	2,50	0,81	5,04	4,85	6,23	5,99
	3,00	1,16	9,54	5,94	8,19	5,10
	3,50	1,80	21,47	14,78	11,92	8,21
PR 3	1,51	0,30	0,99	0,69	3,29	2,31
	2,00	0,49	1,37	1,75	2,78	3,55
	2,50	0,73	2,53	1,72	3,47	2,36
	3,01	1,02	4,30	2,83	4,20	2,76
	3,51	1,40	6,06	5,53	4,33	3,95
	4,01	1,87	8,98	6,61	4,80	3,53
	4,37	2,35	12,21	9,23	5,20	3,93
PR 4	1,50	0,42	1,02	1,54	2,42	3,65
	2,00	0,61	0,97	1,80	1,58	2,94
	2,50	0,84	1,90	2,36	2,26	2,81
	3,00	1,11	1,83	1,67	1,66	1,50
	3,50	1,43	3,50	3,22	2,45	2,25
	4,00	1,76	6,83	4,40	3,87	2,50
	4,50	2,24	8,37	6,85	3,74	3,06
	4,65	2,49	10,66	8,25	4,27	3,31

FONTE: Elaboração própria.

A partir da Tabela 20, podemos verificar que a junta deformou mais em quase todos os casos, exceto o prisma 1 quando atinge tensões de 2 MPa, a deformação no LVDT médio é de 0,40‰ enquanto a deformação no DIC 3 é de 0,40.

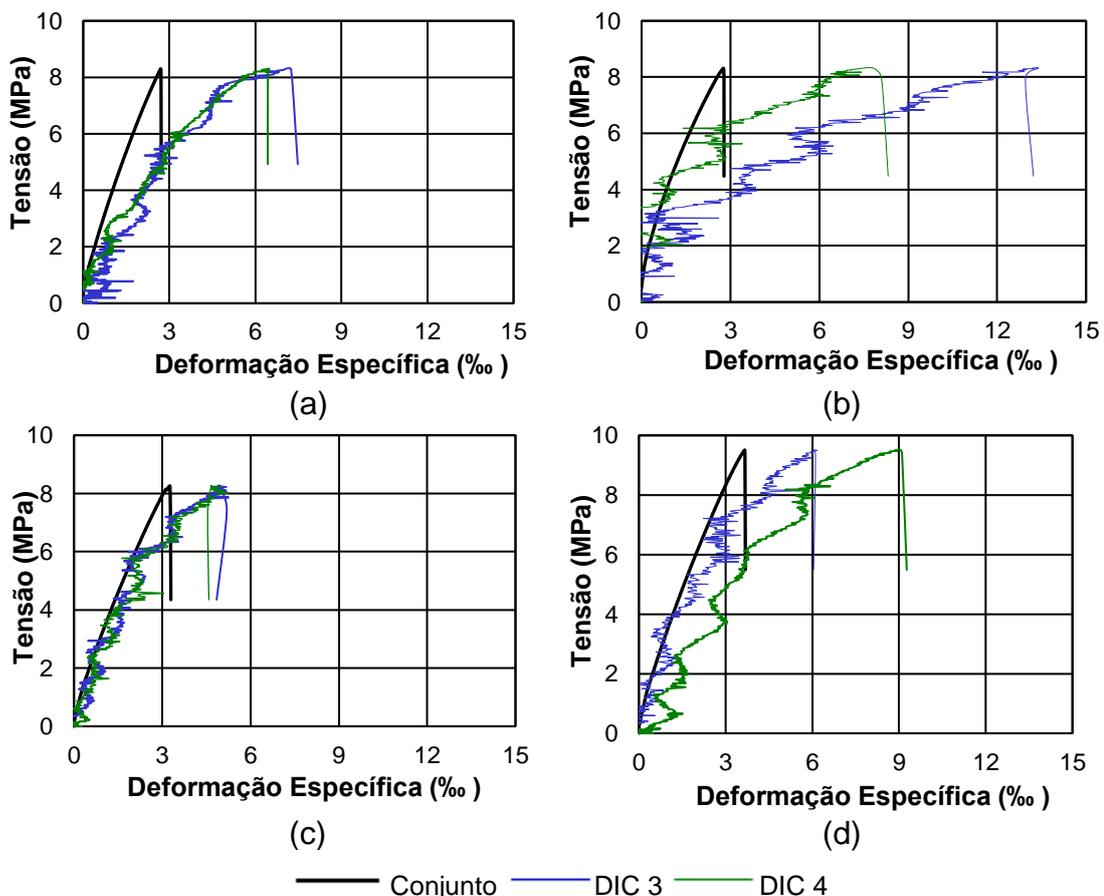
Isso também ocorre para o prisma 3 quando atinge tensões de 2 MPa, a deformação no LVDT médio nesse momento é de 0,52‰ e no DIC 4 é de 0,27‰.

Ao compararmos as deformações específicas na tensão de ruptura nota-se que a junta de argamassa deforma 4,96 vezes mais para o prisma 1 comparada a deformação total do prisma, 4,84 vezes mais para o prisma 2, 5,13 vezes mais para o prisma 3 e 2,7 vezes mais para o prisma 4.

Através dos resultados, pode-se verificar que a junta de argamassa deformou bem mais, comparado ao conjunto. Além disso, sempre uma distância analisada na junta, deformava mais que a outra, comprovando que a deformação na argamassa de assentamento possui valores aleatórios em sua extensão. A Figura 42, apresenta o diagrama tensão *versus* deformação específica dos prismas de argamassa forte, como visto na figura acima e enfatiza-se na Figura 42, a deformação na junta de argamassa é muito maior que a deformação do conjunto.

Figura 42. Curva tensão *versus* deformação dos prismas comparando os LVDTs com a DIC na junta.

(a) Prisma 1 (b) Prisma 2 (c) Prisma 3 (d) Prisma 4.



FONTE: Elaboração própria.

Através da Figura 42 pode-se observar que a curva tensão *versus* deformação específica não evidencia com clareza quando começou o processo de esmagamento da junta de argamassa em nenhum dos casos e nem mesmo com a análise visual da ruptura dos prismas pode-se verificar o esmagamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a aplicação da correlação de imagem digital, com uso do software GOM Correlate na alvenaria estrutural através da análise do comportamento de prismas de blocos cerâmicos de parede vazada não-grauteados construídos com argamassas de diferentes resistências. Por isso, de maneira a sedimentar os resultados e discussões apresentados ao longo dessa pesquisa, conclui-se de modo geral, que:

- A correlação de imagem digital aplicada no software GOM Correlate é coerente com os resultados encontrados com o uso de LVDTs;
- As diferentes resistências de argamassa influenciaram significativamente na resistência final dos prismas, assim como no modo de ruptura dos mesmos;
- A argamassa fraca, induziu a ruptura dos prismas por esmagamento da junta, além disso, influenciou que os prismas rompessem com resistências menores;
- Os prismas com argamassa forte, possuíram uma ruptura frágil, pouco fissuração e romperam sem aviso;
- A junta de argamassa possui uma deformação significativa comparada a deformação do conjunto bloco-argamassa, mesmo para prismas com argamassa de alta resistência.

Por fim, de acordo com as conclusões apresentadas, deve-se aprofundar ainda mais a forma de medição por correlação de imagem digital, visando calibração dos parâmetros de medição. Diante disso, sugere-se trabalhos futuros para adquirir um ainda mais conhecimento sobre esse novo método de medição.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

1. Avaliar o modo de ruptura de prismas comprimidos através do GOM Correlate, variando o tipo de bloco, resistência de argamassa e altura da junta, de maneira a definir a proporção adequada entre a resistência de argamassa e a resistência do bloco para que não ocorra o esmagamento;
2. Realizar essa pesquisa com diferentes estilos de pinturas, câmeras e iluminação, afim de estabelecer um padrão para melhores resultados;

3. Incrementar a correlação de imagem digital em corpos de prova de argamassa, tanto para os ensaios de compressão como os ensaios de tração, para calcular o módulo de elasticidade das mesmas;
4. Realizar mais análises no GOM Correlate, tentando encontrar um padrão para cálculo de coeficiente de Poisson.

REFERÊNCIAS

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016

_____. **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.

_____. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - parte 2: métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural - Blocos cerâmicos - Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15812-3**: Alvenaria estrutural - Blocos cerâmicos - parte 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15961-1**: Alvenaria estrutural - Blocos de concreto. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011.

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, set/out, 1989.

BENBOUDJEMA, F.; MAUROUX, T.; TURCRY, P.; AIT-MOKTHAR, A.; DEVES, O. **Experimental analysis of drying shrinkage cracking in coating mortars by digital image correlation**. 2013. 235 p.

BESNARD, G., HILD, F., & ROUX, S. **Finite-element displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier bands.**” *Exp. Mech*, n. 46, p. 789-804, 2006.

BODUN, P.; SHIBUSAWA, S.; SASAO, A.; SAKAI, K. **Crack pattern analysis for moisture prediction in drying dredged material.** *Soil Physical Conditions and Plant Growth (Japan)*, n. 83, p. 3-16, 2000.

BRUCK, H., McNEILL, S., SUTTON, M., & PETERS, W. **Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction.** *Experimental Mechanics*, p 261-267, 1989.

CARVALHO, J. N.; **Desempenho estrutural de prismas de blocos cerâmicos com diferentes formas e dimensões.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

CHEEMA, T. S. & KLINGNER R. E. Compressive Strength of Concrete Masonry Prism. American Concrete Institute- **ACI Structural Journal**, v. 83, n 1, p. 88-97, jan, 1986.

DAI, X., YANG, F., CHEN, Z., SHAO, X., HE, X. Strain field estimation based on digital image correlation and radial basis fuction. **Journal Optcsand Lasers in Engineering**, v. 65, p. 64-72, 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.

GOM. GOM Correlate- Software de avaliação para testes em 3D. [**Especificações disponibilizadas na internet**]. Disponível em: <www.gom.com>. Acesso em 10 de agosto de 2019.

HWANG, S., HORN, J., & WANG, H. **Strain measument of nickel thin film by a digital image correlation method**. Strain , v. 44, p. 215-222, 2008.

LUBECK, 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..

M McNARY, S. W. **Basic properties of clay-unit masonry in compression**. 1984. M.Sc thesis. Colorado, University of Colorado, 1984.

MILANI, A.S. **Influência de cortes no comportamento mecânico de paredes em alvenaria estrutural**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. Dissertação de Mestrado – UFSC – Maio 1998.

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

MOURA, R.T. **Modelagem e ensaios mecânicos de polímeros termoplásticos sob carregamentos quase-estático e dinâmico**. 2013. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

PAN, B., XIE, H., GUO, Z., HUA, T. Full-field strain measument using a twodimensional savtzky-golay digital differentiator in digital image correlation. Optical Engineering, v.46, n.3, 2007.

PAN, B., QUIAN, K., XIE, H. e ASUNDI, A., “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review.” *Measurement Science and Technology*, v. 20, 2009, p. 1-17.

PETERS, W.H., RANSON, W.F. **Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis, Optial Engineering**, v. 21, p. 427, 1982.

PETERS, W. H., RANSON, W. F., SUTTON, M.A., CHU, T. C., & ANDERSON, J. (1983). Application of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 22(6), 738-742.

QUEIROZ, W. L. R. **Projeto de um equipamento de fadiga para caracterização do dano em telhas de aço devido à ação do vento aplicando correlação digital de imagens e modelagem computacional**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

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., PITANGUEIRA, R.L.S., RIBEIRO, G.O., CALDAS, R.B. Estudo do efeito de tamanho usando correlação de imagem digital. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, n.3, mai/jun, 2015.

SCHENK, T. (1999). **Digital Photogrammetry- Volume I**. Laurelviile: TerraScience, 1999, 428 p.

Shrive, N. G. (1985). Compressive strength and strength testing of masonry. **Proc. 7 IBMAC**, Eds. T. McNeilly and J. C. Scrivener, Melbourne, BDRI, 1985, p. 699-710.

SKARŻYŃSKI, Ł.; SYROKA, E.; TEJCHMAN, J. Measurements and Calculations of the Width of the Fracture Process Zones on the Surface of Notched Concrete Beams. *Strain*, v. 47, 2011, p. 319-332.

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 de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

SUN, Z., LYONS, J. S., MCNEILL, S. R. Measuring microscope deformations with digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 27, p. 409-428, 1997.

SUTTON, M., CHENG, M., PETERS, W., CHAO, Y., MCNEILL, S. **Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis.** *Image and Vision Computing*, v. 4, n. 3, p. 143-150, 1986.

SUTTON, M. A., ORTEU, J. J. & SCHREIER, H. W., **Image Correlation for shape, Motion and Deformation Measurements**, Springer, pp. 81-117, New York, 2009.

VENDROUX, G. & KNAUSS, W. G. **Submicron deformation field measurements. Part 2. Improved digital image correlation.** *Experimental Mechanics*, v. 38, n.2, p. 86-92, 1988.