

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Gabriel Biacchi Cervo

**EMPREGO DA CORRELAÇÃO POR IMAGEM PARA AVALIAÇÃO
DO COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE
ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO ESTRUTURAL**

Santa Maria, RS

2021

Gabriel Biacchi Cervo

**EMPREGO DA CORRELAÇÃO POR IMAGEM PARA AVALIAÇÃO DO
COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ARGAMASSAS DE
ASSENTAMENTO ESTRUTURAL**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Civil**

Orientador: André Lübeck

Santa Maria, RS
2021

Gabriel Biacchi Cervo

**EMPREGO DA CORRELAÇÃO POR IMAGEM PARA AVALIAÇÃO DO
COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ARGAMASSAS DE
ASSENTAMENTO ESTRUTURAL**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Civil**

Aprovado em 25 de fevereiro de 2021:

André Lübeck, Prof. Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Alisson Simonetti Milani, Prof. Dr. (UNIPAMPA)

Gihad Mohamad, Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Paulo e Janice, por nunca medirem esforços para educar seus filhos, sempre estimulando a buscarmos nossos máximos potenciais. Meu pai com seus ensinamentos e sugestões e minha mãe com todo carinho, dedicação e suporte que me mantiveram forte. Ao meu irmão Matheus que, mesmo tão novo, já me inspira como exemplo de alguém que busca seus sonhos com foco, objetivo e disciplina.

A Gabriela, por ter me apoiado tanto, sempre me orientando de forma que eu aprimorasse minhas conquistas.

Aos meus amigos, colegas que compartilharam comigo esses cinco anos do curso de engenharia, os quais amadurecemos junto.

Ao meu orientador Prof^o André Lübeck que me conduziu com sabedoria em todo o processo de estudo e desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores que contribuíram com meu desenvolvimento técnico e pessoal, me tornando um profissional capacitado e uma pessoa melhor.

A Universidade Federal de Santa Maria, por toda infraestrutura fornecida durante esse período.

À Alcance Engenharia e Construção e seus engenheiros responsáveis, por me dar a oportunidade de iniciar meu estágio, finalizando meu período na empresa como auxiliar de engenharia, agradeço a confiança.

Por fim, a todos que participaram da minha caminhada durante os anos os quais busquei capacitação profissional para, agora, colocá-la em prática.

“Tudo pode ser tirado de uma pessoa, exceto uma coisa: a liberdade de escolher sua
atitude em qualquer circunstância da vida”

Viktor Emil Frankl – médico austríaco

RESUMO

EMPREGO DA CORRELAÇÃO POR IMAGEM PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO ESTRUTURAL

AUTOR: Gabriel Biacchi Cervo

ORIENTADOR: André Lübeck

Com o aumento do número de construções que vem optando pelo método construtivo de alvenaria estrutural, faz-se necessário um maior aperfeiçoamento técnico das características estruturais deste método, visto que ele ainda não é totalmente compreendido. Com isso, este trabalho busca estudar o comportamento mecânico de dois traços, medidos em volume de cimento, cal e areia (1:0,5:4 e 1:1:6), de argamassa de assentamento estrutural. Para isto, foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50mm e altura de 100mm, que foram ensaiados à compressão axial após 28 dias de cura, no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Os corpos de prova foram instrumentados com *strain gauges* e as rupturas foram filmadas a fim de permitir a análise por correlação digital de imagens (DIC, *Digital Image Correlation*). Os gráficos obtidos de tensão-deformação mostraram que, quanto maior a resistência das argamassas, maior também são as deformações medidas na ruptura. As variações das deformações *versus* níveis de tensões mostraram que as rupturas das argamassas de ambos os traços estudados começavam a ocorrer a partir de níveis de tensão acima de 0,9. Percebeu-se, durante a análise das correlações, que existiu uma uniformidade nas deformações apresentadas entre ambos os métodos, ou seja, a leitura pela técnica DIC esteve muito próxima da leitura apresentada pela instrumentação com *strain gauge*.

Palavras chave: Argamassa Assentamento Estrutural. Tensão-Deformação. Análise por Imagem.

ABSTRACT

IMAGE CORRELATION EMPLOYMENT TO ASSESS TENSION-DEFORMATION BEHAVIOR OF STRUCTURAL SETTLEMENT MORTARS

AUTHOR: Gabriel Biacchi Cervo

ADVISOR: André Lübeck

With the increase in the number of constructions that have been opting for the structural masonry construction method, a greater technical improvement of the structural characteristics of this method is necessary, since it is not yet fully understood. With this, this work seeks to study the mechanical behavior of two proportions, measured in volume of cement, lime and sand (1: 0.5: 4 and 1: 1: 6), of structural mortar. For this, cylindrical specimens with a diameter of 50mm and a height of 100mm were molded, which were tested for axial compression after 28 days of curing, at the Materials and Civil Construction Laboratory of the Federal University of Santa Maria (UFSM). The specimens were instrumented with strain gauges and the ruptures were filmed in order to allow analysis by digital image correlation (DIC). The stress-strain graphics showed that the greater the strength of the mortars, the greater are the deformations measured at break. The variations of the deformations versus stress levels showed that the mortar breaks of both studied proportions started to occur from stress levels above 0.9. It was noticed, during the analysis of the correlations, that there was a uniformity in the deformations presented between both methods, that is, the readings by the DIC technique was very close to the reading presented by the instrumentation with strain gauge.

Key Words: Mortar Structural Settlement. Stress-Deformation. Image Analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Efeito do confinamento em juntas comprimidas triaxial em argamassas (a) e em blocos comprimido e tracionado biaxialmente (b) | 17 |
| Figura 2 - Tensões laterais devido a aderência entre argamassa e bloco | 18 |
| Figura 3 – Comportamento tensão-deformação da argamassa confinada | 21 |
| Figura 4 - Discretização de posições, pontos e intensidade de pixels de uma imagem qualquer | 23 |
| Figura 5 - Corpo de prova pintados com tinta acrílica branca fosca e spray preto fosco..... | 28 |
| Figura 6 - Instrumentação ensaio..... | 29 |
| Figura 7 - Filmagem com foco no centro dos corpos de prova ensaiados..... | 30 |
| Figura 8 - Análise das imagens no software GOM Correlate..... | 31 |
| Figura 9 - Elaboração de retas verticais e horizontais no software GOM Correlate | 31 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia | 26 |
| Gráfico 2 – Curvas tensão-deformação específica axial traço 1:0,5:4 | 33 |
| Gráfico 3 – Curvas tensão-deformação específica axial traço 1:1:6 | 34 |
| Gráfico 4 - Tensão-deformação específica axial, traço 1 (1:0,5:4) e traço 2 (1:1:6), strain gauge | 36 |
| Gráfico 5 – Curvas nível de tensão x deformação específica axial traço 1:0,5:4..... | 37 |
| Gráfico 6 - Curvas nível de tensão x deformação específica axial traço 1:1:6 | 37 |
| Gráfico 7 - Variação da deformação específica axial x nível de tensão traço 1:0,5:4..... | 38 |
| Gráfico 8 - Variação da deformação específica axial x nível de tensão traço 1:1:6..... | 39 |
| Gráfico 9 - Correlação tensão x deformação específica axial, GOM x strain gauge traço 1:0,5:4 | 40 |
| Gráfico 10 - Correlação tensão x deformação específica axial, GOM x strain gauge traço 1:1:6 | 40 |
| Gráfico 11 - Comparação nível de tensão versus deformação específica axial traço 1:0,5:4, GOM x strain gauge | 41 |
| Gráfico 12 - Comparação nível de tensão versus deformação específica axial traço 1:1:6, GOM x strain gauge..... | 41 |
| Gráfico 13 - Tensão x deformação específica axial, traço 1 (1:0,5:4) e traço 2 (1:1:6), GOM | 42 |
| Gráfico 14 - Médias de tensão x deformação específica axial, traço 1:0,5:4 e traço 1:1:6, GOM e strain gauge | 43 |
| Gráfico 15 - Variação da deformação específica axial x nível de tensão traço 1:0,5:4..... | 44 |
| Gráfico 16 - Variação da deformação específica axial por nível de tensão traço 1:1:6 | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Coeficiente angular da reta para os diferentes traços ensaiados..... | 20 |
| Tabela 2 – Resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos corpos de prova ensaiados..... | 22 |
| Tabela 3 - Quantidades dos insumos em massa (kg)..... | 27 |
| Tabela 4 - Valores obtidos através dos ensaios de absorção de água por capilaridade para os traços 1:0,5:4 e 1:1:6 | 32 |
| Tabela 5 - Valores de resistência, deformação específica axial máxima e módulo de elasticidade dos corpos de prova do traço 1:0,5:4..... | 34 |
| Tabela 6 - Valores de resistência, deformação específica axial máxima e módulo de elasticidade dos corpos de prova do traço 1:1:6..... | 35 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DIC – Digital Image ADFD – *Abu Dhabi Fund for Development*

LMCC – Laboratório de Materiais e Construção Civil

LVDT – *Linear Variable Differential Transducer*

NBR – Norma Técnica Brasileira

RS – Rio Grande do Sul

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 OBJETIVO CENTRAL..... | 15 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 15 |
| | |
| 2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA..... | 16 |
| 2.1 RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL | 16 |
| 2.2 CONFINAMENTO DA ARGAMASSA | 17 |
| 2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA | 19 |
| 2.4 COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DA ARGAMASSA..... | 20 |
| 2.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DA ARGAMASSA | 21 |
| 2.6 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (DIGITAL IMAGE CORRELATION – DIC)..... | 23 |
| | |
| 3. METODOLOGIA..... | 25 |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS..... | 25 |
| 3.2 PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA..... | 26 |
| 3.2.1 Ensaios de caracterização da argamassa no estado fresco | 26 |
| 3.2.2 Preparação da argamassa segundo a NBR 16541 (2016)..... | 27 |
| 3.3 DESCRIÇÃO DAS NORMAS E ENSAIOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS | 27 |
| | |
| 4. RESULTADOS | 32 |
| 4.1 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO: ABSORÇÃO DE ÁGUA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE | 32 |
| 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO: COMPORTAMENTO NÍVEL DE TENSÃO – DEFORMAÇÃO | 36 |
| 4.3 VARIAÇÕES DAS DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS AXIAIS VERSUS NÍVEIS DE TENSÕES..... | 38 |
| 4.4 CORRELAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS AXIAIS ATRAVÉS DA ANÁLISE POR IMAGEM E POR LVDT..... | 39 |
| | |
| 5. CONCLUSÃO..... | 45 |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 45 |
| | |
| REFERÊNCIAS | 46 |

1. INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural se caracteriza por ser um método construtivo em que é possível obter vantagens econômicas frente a outros métodos convencionais, por exemplo, o concreto armado. A racionalização dos processos é um fator que contribui para a economia, visto que é um sistema que possibilita técnicas executivas mais simplificadas. A alvenaria estrutural está diretamente ligada a projetos compatibilizados, o que acarreta na eliminação de interferências e diminuição dos desperdícios dos materiais e mão de obra. Dessa maneira, essa técnica se tornou bastante competitiva no país (ROMAN *et al*, 1998).

De acordo com Lübeck (2016), por meio da evolução no domínio dos materiais e das técnicas construtivas pelos seres humanos, é que surgiu a possibilidade de a alvenaria estrutural se tornar viável para edificações de grande altura.

Com o crescimento do interesse por essa técnica, cresceu também a intensificação de pesquisas, práticas de projeto e, também, o maior domínio nos cálculos estruturais. Contudo, Lübeck (2016) comenta que o mesmo crescimento nas pesquisas que permitiu um avanço das técnicas construtivas, demonstrou também a lacuna existente no conhecimento sobre o comportamento do material, principalmente próximo à ruptura.

Segundo Santana e Araújo (2017), deve-se considerar que os conhecimentos a respeito do comportamento da alvenaria estrutural ainda devem ser mais aprofundados para que seja possível alcançar o desenvolvimento tecnológico semelhante ao de outras estruturas convencionais comumente utilizadas.

No Brasil, o material estrutural mais tradicionalmente utilizado é o concreto armado, e suas primeiras normativas foram desenvolvidas na década de 1940. A evolução da normatização envolvendo as estruturas em concreto armado são as mais desenvolvidas e ricas. Outros materiais como aço, madeira e alvenaria estrutural tiveram suas normas publicadas posteriormente. As normativas de alvenaria estrutural tiveram suas primeiras publicações no final da década de 1980 (LÜBECK, 2016). A partir de então, o interesse por esse sistema estrutural começou a ganhar notoriedade no país, pois passou a ser utilizado como uma alternativa técnica e econômica viável para suprir o déficit habitacional existente (PASQUALI, 2007).

Devido à escassez das normas brasileiras, é comum os projetistas utilizarem normas estrangeiras, como as norte-americanas e europeias, pioneiras nessa área. No Brasil, a norma de alvenaria estrutural é a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR (Norma

Técnica Brasileira) 16868 (2020). Segundo Machado (2019), a complexidade e variabilidade do comportamento da alvenaria, atrelada à falta de conhecimento completo a respeito desta técnica são os fatores que limitam as normas brasileiras a apenas os estados limites de ruptura, desconsiderando assim as deformações específicas atuantes e também a tipologia dos materiais que compõe as paredes.

Segundo os trabalhos de Mohamad (2007) e Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015), definir o limite da resistência da alvenaria estrutural aos estados limites últimos pode fazer com que a estrutura apresente um grau incerto de segurança ou seja até mesmo insegura. Para Machado (2019), ter em projeto as verificações das deformações limites é importante, pois são elas que trazem o alerta de que a estrutura pode estar com problemas. Além disso, o conhecimento dessas deformações limites é fundamental para entender a compatibilidade do comportamento dos materiais.

Antigamente os pesquisadores acreditavam que a argamassa de assentamento tinha apenas a função de unir as partes e acomodar as deformações. Mohamad (2007) avaliou em seus estudos o modo de ruptura e o comportamento tensão-deformação de prismas de alvenaria com blocos de concreto utilizando dois tipos de argamassas de assentamento e concluiu que a argamassa comanda a ruptura da alvenaria.

Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015) avaliaram a forma de ruptura a partir do comportamento tensão-deformação de prismas com blocos de alta resistência ensaiados à compressão e afirmaram que a alvenaria, antes mesmo de atingir a carga máxima de ruptura, deixa de atuar como um conjunto monolítico. Isso ocorre devido a degradação da junta de argamassa.

De acordo com Lübeck (2016), os resultados dessas pesquisas apontam que as argamassas de assentamento têm influência direta sob a forma de ruptura da alvenaria. A partir das variações das combinações de tipologia das argamassas e blocos, pode acarretar em situações onde há o esmagamento da junta para cargas inferiores à carga considerada de ruptura. Dessa maneira, ao utilizar, em projetos, apenas as cargas do estado limite último, os resultados são níveis de segurança inferiores aos idealizados, algo inaceitável dentro da prática de projeto estrutural (LÜBECK, 2016).

Em Lima, Lima e Assis (2012) e Mota *et al.* (2012) também se identificam a influência da resistência da argamassa no modo de ruptura da alvenaria. Além disso, os pesquisadores conseguiram comprovar que quanto maior a espessura da junta de assentamento, maior é a chance de ocorrer o esmagamento da argamassa.

Conforme Lübeck (2016), a negligência existente na identificação do esmagamento das juntas de assentamento se deve à dificuldade existente de identificá-la. Devido à inconveniência de reproduzir e identificar a ocorrência desse fenômeno, sua descrição fenomenológica não se torna clara. O autor cita também que, apesar da dificuldade existente para acompanhamento do esmagamento da junta, a identificação desta é de extrema necessidade para o entendimento da mecânica de ruptura da alvenaria comprimida.

Em seu estudo, Lübeck (2016) também observou que, além da resistência à compressão e a espessura da junta de assentamento, existe também uma relação entre o modo de ruptura da alvenaria com a influência da área líquida e da área bruta dos blocos utilizados. Pode-se perceber nos experimentos de sua pesquisa com blocos cerâmicos de parede vazadas, que o fenômeno do confinamento da junta não ocorre, dada a pequena área de contato das paredes do bloco com a junta de argamassa, fenômeno este que aumentaria a resistência, a deformação na ruptura e a ductibilidade. Dessa maneira, sem o confinamento, a ductibilidade diminui, tornando a ruptura frágil, sem aviso ou aparecimento de fissuras.

Segundo Machado (2019), é necessária uma delimitação da resistência à compressão das argamassas de assentamento de forma que não seja tão alta a ponto de comprometer a ductibilidade e nem tão baixa de forma que induza a ruptura através do esmagamento das juntas.

Dessa maneira, para que se possa aprimorar o conhecimento quanto ao comportamento mecânico dos materiais constituintes da alvenaria estrutural e, conseqüentemente, os desempenhos dos projetos nesta técnica construtiva, este trabalho visa aprofundar os estudos referentes ao comportamento mecânico das argamassas comprimidas axialmente.

1.1 OBJETIVO CENTRAL

Avaliar o desempenho mecânico de corpos de prova de dois tipos de argamassas comprimidos axialmente, através da instrumentação tradicional e da técnica DIC

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar o comportamento tensão-deformação de argamassas com traço 1:0,5:4 e 1:1:6 comprimidas axialmente.
- Correlacionar as deformações obtidas através da instrumentação com *strain gauges* e pela técnica *Digital Image Correlation* (DIC).

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem como finalidade abordar os principais conceitos envolvidos na pesquisa, os quais direcionam a metodologia e os resultados atingidos a partir dos ensaios nos corpos de prova. Serão abordados os conceitos básicos da alvenaria estrutural e, principalmente, as propriedades mecânicas das argamassas de assentamento.

2.1 RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL

A alvenaria estrutural é um método construtivo que quando carregada verticalmente, surgem esforços de tração nos blocos e de compressão na argamassa de assentamento. Isso ocorre devido à aderência existente entre eles, a qual garante o confinamento da argamassa e resulta na compatibilização entre os componentes constituintes da alvenaria.

Lübeck (2016) mostra que uma gama variada de autores buscou entender e descrever o modo de ruptura da alvenaria, baseando-se nas propriedades dos seus componentes. Hildsfort (1969, *apud* MOHAMAD, 1998), por exemplo, foi um dos primeiros pesquisadores o qual direcionou seus estudos aos mecanismos de ruptura da alvenaria comprimida, sendo que seu critério predominante era a similaridade entre as tensões dos materiais (MOHAMAD, 1998). Estes estudos de Hildsfort (1969, *apud* MOHAMAD, 1998) tiveram como resultado a constatação de que a ruptura da alvenaria seria governada pela interação entre os componentes (bloco e argamassa) e que a ruptura ocorreria quando a resistência da argamassa fosse vencida.

Mohamad, Lourenço e Roman (2007) afirmaram que a carga última de um prisma de alvenaria só é atingida após o acontecimento de três fenômenos que interagem entre si: perda de coesão da argamassa; esmagamento da argamassa; e quando a parede do bloco fissa e o prisma como um todo rompe. Além disso, eles afirmaram que é de extrema importância entender o papel do coeficiente de Poisson da argamassa sobre o comportamento do conjunto para que se possa ter um maior entendimento das situações que envolvem a ruptura da alvenaria (STALTER, 2019).

Afshari e Kaldjan (1989), por sua vez, defendem suas pesquisas em que a diminuição da resistência da alvenaria, quando submetida à compressão, ocorre devido a fatores que são responsáveis pelo surgimento de tensões horizontais.

Dessa maneira, percebe-se a importância do estudo das argamassas e sua influência no modo de ruptura da alvenaria estrutural. Mohamad (1998) comenta que, mesmo com o grande

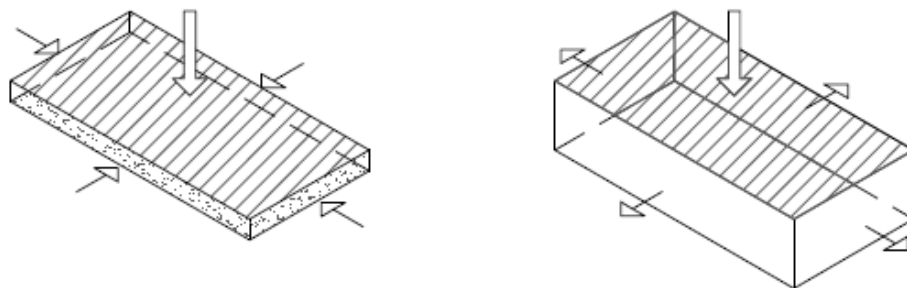
interesse em se estudar esse fenômeno da alvenaria estrutural, ele ainda não é completamente compreendido, acarretando em generalizações não condizentes com o estado real da alvenaria

2.2 CONFINAMENTO DA ARGAMASSA

O confinamento da argamassa quando aplicado como junta de assentamento é o resultado do carregamento vertical em uma parede de alvenaria. Esse fenômeno ocorre devido à aderência existente entre o bloco e a argamassa, de forma que a argamassa, mais deformável, tende a se expandir lateralmente mais que o bloco.

A aderência existente entre os blocos e a argamassa força uma deformação final intermediária a que cada componente possuiria caso se deformasse individualmente. Dessa forma, criam-se tensões laterais, sendo que os blocos ficam sujeitos à compressão e à tração biaxial e a argamassa à compressão triaxial, conforme Figura 1.

Figura 1 – Efeito do confinamento em juntas comprimidas triaxial em argamassas (a) e em blocos comprimido e tracionado biaxialmente (b)



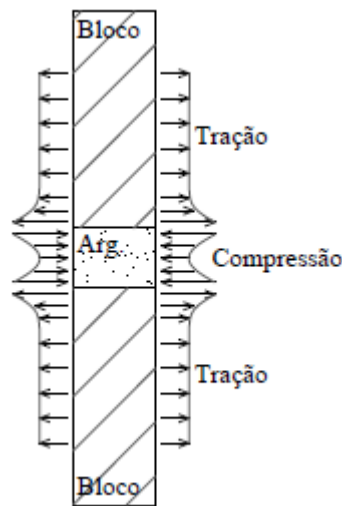
Fonte: Adaptada de Lübeck (2016)

Faz-se importante destacar, como pode ser observado na Figura 2, que as tensões laterais não são uniformes ao longo da altura dos elementos – elas são maiores na interface. Afshari e Kaldjan (1989) afirmam que quanto maiores as tensões horizontais, menor é a resistência à compressão da alvenaria. Assim, quanto menor for a espessura da junta de assentamento, ou quanto menor a proporção de rigidez entre o módulo de elasticidade da argamassa e do bloco, maiores são as tensões horizontais.

Lübeck (2016) mostra que diferentes pesquisadores buscaram identificar como o efeito do confinamento modifica a resistência à compressão da argamassa, o seu comportamento

tensão-deformação, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e também a variação volumétrica específica. A maioria dos estudos buscou reproduzir o confinamento através do ensaio de compressão triaxial, onde o corpo de prova é submetido a uma pressão lateral e é carregado axialmente até a ruptura. Porém, esse ensaio não reproduz exatamente o confinamento da argamassa pois as pressões laterais variam diretamente em função da tensão axial aplicada, e, por outro lado, o equipamento de ensaio triaxial normalmente não consegue uma variação constante e a pressão lateral é aplicada em etapas.

Figura 2 - Tensões laterais devido a aderência entre argamassa e bloco



Fonte: Afshari e Kaldjan (1989), adaptada por Lübeck (2016)

Uma forma encontrada para estudar os efeitos do confinamento é a de ensaiar à compressão axial os corpos de prova de pequena relação altura/espessura. Os aparatos de aplicação de carga das prensas que se utilizam para os ensaios normalmente geram atrito com o corpo de prova e, com isso, acabam gerando uma restrição dos deslocamentos laterais, criando assim um estado de confinamento.

Stalter (2019), em seus estudos, ensaiou corpos de prova com duas diferentes alturas e dois tipos de traços de argamassa – sendo as alturas de 100mm e 33mm e os traços 1:0,5:4 e 1:1:6. Nos ensaios com as argamassas de maior resistência (1:0,5:4) a autora percebeu que os corpos de prova com menor altura possuíram uma deformação axial maior, ou seja, havendo o aumento do confinamento houve também um aumento da deformação e conseqüentemente maior ductilidade.

2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA

A resistência à compressão da argamassa deve ser suficiente para suportar as solicitações as quais a alvenaria está submetida, de modo que não exceda a resistência do bloco. Mohamad (1998) concluiu em seu estudo que deve haver uma compatibilidade entre as argamassas e a tipologia do bloco utilizado, recomendando-se que a resistência à compressão da argamassa esteja entre 0,7 e 1,0 vez a resistência à compressão do bloco na área bruta (MOHAMAD,1998). Já a NBR 16868 (2020) especifica que a resistência à compressão da argamassa não deve exceder em 70% da resistência do bloco na área líquida.

De acordo com Lübeck (2016), há consenso entre estudiosos em relação ao crescimento da resistência da argamassa em função do confinamento lateral. O entendimento sobre esse assunto é de que a resistência à compressão cresce como uma função linear da tensão de confinamento lateral, conforme Equação 1.

$$f_m^* = f_a + k\sigma_3 \quad (1)$$

Onde: f_m^* é a tensão de compressão da argamassa confinada.
 f_a é a resistência a compressão uniaxial da argamassa.
 σ_3 é a tensão de confinamento lateral.
 k é o coeficiente angular da reta.

Lübeck (2016) cita que o coeficiente angular da reta depende das propriedades da argamassa que foi testada. Diferentes pesquisadores avaliaram a resistência da argamassa confinada chegando a valores distintos de coeficientes angulares. Khoo (1972), Atkinson *et al.* (1985) e Mohamad (1998) estudaram a influência do confinamento da argamassa sobre sua resistência à compressão (LÜBECK, 2016). Em seus ensaios de compressão axial de corpos de prova de argamassa, Stalter (2019) verificou que o comportamento dos corpos de prova de mesma resistência e altura de 100mm foi bastante semelhante. A média da resistência foi de 11,34 MPa para o traço 1:0,5:4 e 6,56 MPa para o traço 1:1:6.

Na Tabela 1 apresentam-se os traços de argamassas estudados, resistências à compressão e o coeficiente angular da reta envolvida. Pode-se perceber, a partir da análise desta tabela, que o traço da argamassa influi diretamente no coeficiente angular da reta.

Tabela 1 – Coeficiente angular da reta para os diferentes traços ensaiados

| Pesquisador | Traço de argamassa em volume de cimento, cal e areia | Resistência uniaxial da argamassa (MPa) | Coeficiente angular da reta envoltória, k |
|------------------------|--|---|---|
| Khoo (1972) | 1:0,25:3 | 21,47 | 3,30 |
| | 1:1:6 | 6,54 | 2,17 |
| Atkinson et al. (1985) | 1:0,25:3 | 32,0 | 5,10 |
| | 1:0,5:4,5 | 22,0 | 3,30 |
| | 1:1:6 | 15,0 | 2,30 |
| | 1:2:9 | 6,5 | 2,20 |
| Mohamad (1998) | 1:0,25:3 | 34,9 | 4,00 |
| | 1:0,5:4,5 | 21,4 | 3,60 |
| | 1:1:6 | 11,8 | 2,60 |
| | 1:2:9 | 5,2 | 2,50 |

Fonte: Adaptada de Lübeck (2016)

2.4 COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DA ARGAMASSA

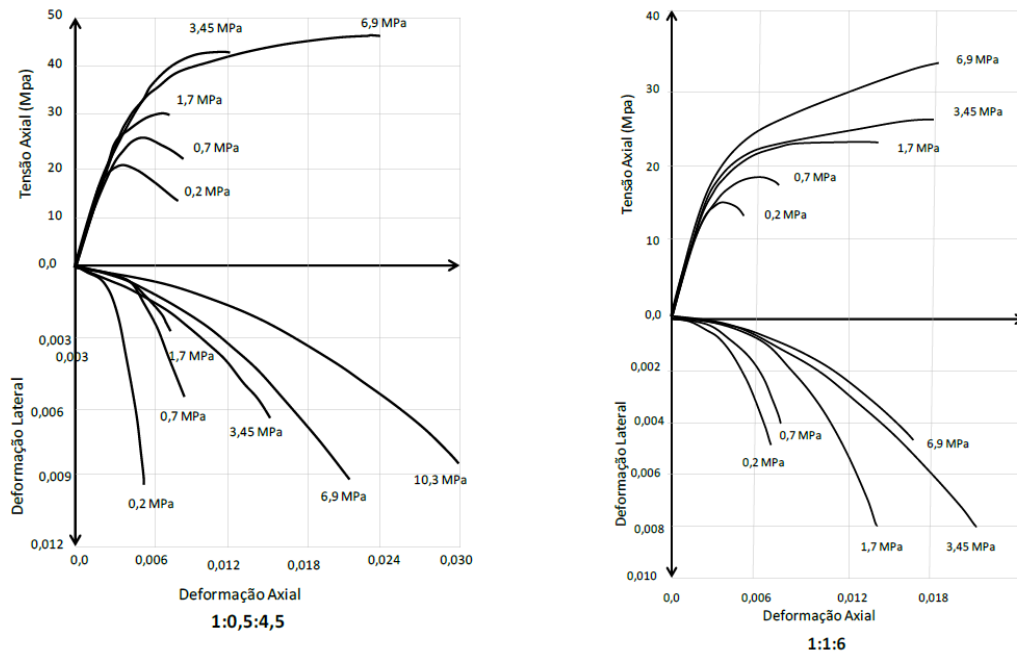
A representação gráfica da tensão-deformação trata-se de uma curva que demonstra o comportamento da deformação específica quando a argamassa é submetida a um determinado carregamento.

Segundo Lübeck (2016), pelo fato de a argamassa possuir uma natureza porosa, apresenta uma tendência à ruptura frágil. A presença da tensão lateral confinante altera o comportamento da argamassa, acrescentando a ela ductilidade.

A partir dos estudos de Atkinson *et al.* (1985), percebe-se como o comportamento da argamassa varia em função do confinamento lateral. As argamassas testadas foram 1:0,5:4,5 e 1:1:6, medidas em volume de cimento, cal e areia. Na Figura 3 apresentam-se as curvas obtidas e os valores junto às curvas correspondem à tensão lateral confinante que foi aplicada.

Ao analisar a Figura 3, pode-se observar que níveis elevados de tensão de confinamento resultaram em mudanças no comportamento de deformação, principalmente na argamassa 1:0,5:4,5, mudando de comportamento frágil para comportamento dúctil.

Figura 3 – Comportamento tensão-deformação da argamassa confinada



Fonte: Atkinson et al (1985), adaptada de Lübeck (2016)

2.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DA ARGAMASSA

O módulo de elasticidade é uma propriedade dos materiais que representa a relação entre a tensão aplicada e a deformação específica resultante. É definido pela declividade da curva tensão-deformação. Nas argamassas, o módulo de elasticidade é comumente avaliado com o intuito de garantir que o material tenha capacidade de absorver os esforços provenientes da movimentação da alvenaria. Stalter (2019) explica que, quanto mais resistente for a argamassa, maior a capacidade de deformação e, conseqüentemente, maior o módulo de elasticidade. A autora também mostra que quanto maior o grau de confinamento da argamassa, menor será o módulo de elasticidade.

Mohamad (1998) aponta que o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica da argamassa que comanda a maneira como ocorrem as transferências de tensões entre o bloco e a argamassa.

Khoo (1972), Atkinson *et al.* (1985) e Mohamad (1998) realizaram estudos a respeito da influência das tensões de confinamento no módulo de elasticidade e os pesquisadores encontraram resultados divergentes. De acordo com Lübeck (2016), essa variação dos resultados deve-se à dificuldade de realizar as medições de deformações nos ensaios triaxiais.

As três pesquisas realizaram as medições com relógios comparadores e prensa não servo-controlada.

Stalter (2019) notou em sua pesquisa que o aumento do confinamento gera um aumento na resistência dos traços e uma diminuição nos módulos de elasticidade, conforme pode ser percebido na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos corpos de prova ensaiados

| Traço | h (mm) | Amostra | Resistência máxima à compressão (MPa) | Módulo elasticidade (GPa) |
|---------|--------|------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1:0,5:4 | 100 | 1 | 11,058 | 13,997 |
| | | 2 | 12,355 | 15,395 |
| | | 3 | 12,247 | 14,089 |
| | | 4 | 10,258 | 13,862 |
| | | 5 | 10,797 | 12,686 |
| | | Média | 11,343 | 14,006 |
| | | Desv. Pad. | 0,922 | 0,962 |
| 1:1:6 | 100 | 1 | 6,527 | 8,751 |
| | | 2 | 6,581 | 9,321 |
| | | 3 | 6,342 | 9,036 |
| | | 4 | 6,263 | 9,304 |
| | | 5 | 7,081 | 9,531 |
| | | Média | 6,559 | 9,189 |
| | | Desv. Pad. | 0,320 | 0,301 |
| 1:0,5:4 | 30 | 1 | 14,151 | 14,283 |
| | | 2 | 13,871 | 13,158 |
| | | 3 | 13,690 | 10,523 |
| | | 4 | 12,926 | 7,198 |
| | | 5 | 14,436 | 10,957 |
| | | Média | 13,815 | 11,224 |
| | | Desv. Pad. | 0,572 | 2,733 |
| 1:1:6 | 30 | 1 | 8,180 | 6,829 |
| | | 2 | 8,014 | 7,911 |
| | | 3 | 9,319 | 8,038 |
| | | 4 | 8,120 | 6,422 |
| | | 5 | 7,573 | 10,076 |
| | | Média | 8,241 | 7,855 |
| | | Desv. Pad. | 0,648 | 1,421 |

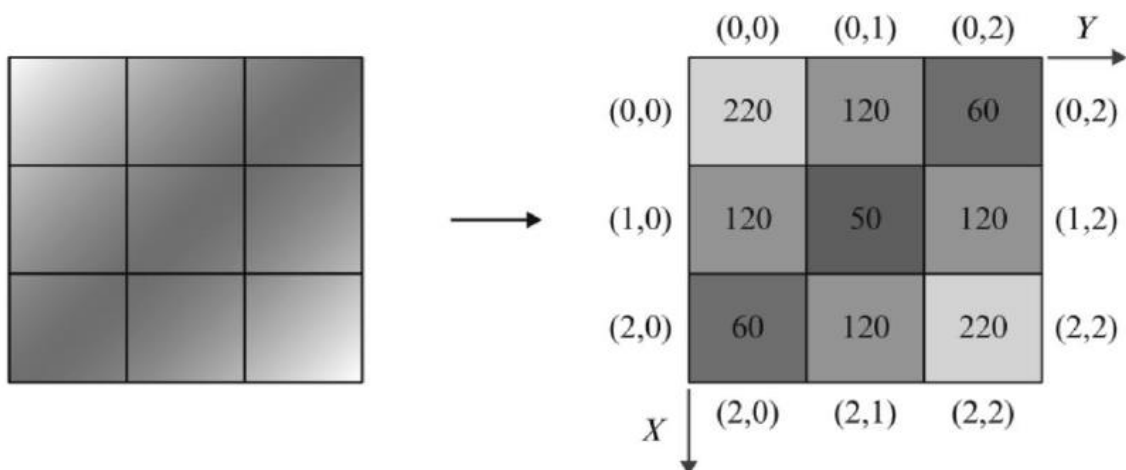
Fonte: Adaptada de Stalter (2019)

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

A correlação digital de imagens tal qual usa-se nos dias de hoje, foi inicialmente descoberta por pesquisadores como Peters e Ranson (1982) na Universidade da Carolina do Sul nos Estados Unidos. No Brasil, segundo Ottoni (2020) ainda há poucos trabalhos explorando a técnica DIC.

Conforme Beleza (2017), as imagens digitais são o fundamento da técnica DIC em que, para que se possa utilizá-las pelo algoritmo, é necessário ser possível discretizar seus elementos unitários: os pixels. O objetivo desta técnica é extrair de cada imagem uma matriz de intensidade de blocos $N \times N$ pixels e procurá-las na imagem seguinte, conforme esquema da Figura 4.

Figura 4 - Discretização de posições, pontos e intensidade de pixels de uma imagem qualquer



Fonte: Beleza (2017)

Em seu estudo, Ottoni (2020) buscou avaliar a curva tensão-deformação e o modo de ruptura de prismas constituídos de blocos cerâmicos de parede maciça e de parede vazada, combinando-os com diferentes traços de argamassas de assentamento. Cada tipo de bloco foi combinado com duas resistências diferentes de argamassa e ensaiados à compressão.

As análises das deformações do estudo de Ottoni (2020) foram obtidas de duas maneiras: através de *strain gauges* e pela técnica DIC. As conclusões de seu trabalho demonstraram que os dados os quais obteve através do DIC apresentaram proximidade com os dados obtidos através dos *strain gauges* para os prismas. Porém, para as medições feitas nas juntas de assentamento, houveram algumas variações significativas devido à dificuldade de

leitura através dos *strain gauges*. Então, Ottoni (2020) acredita que as medidas fornecidas pelo DIC representam melhor o comportamento geral da junta de argamassa em todas as tipologias ensaiadas.

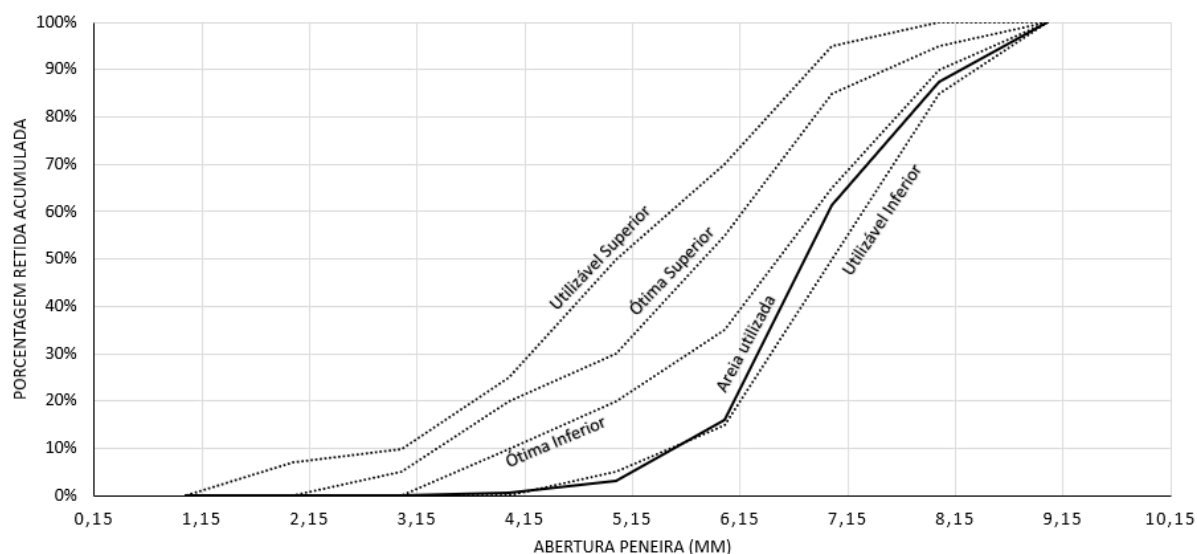
3. METODOLOGIA

Neste item, serão apresentados a caracterização dos materiais e os ensaios realizados, tanto para caracterização das argamassas no estado fresco quanto sua avaliação mecânica no estado endurecido. Foram escolhidos dois traços segundo a norma britânica BS 5628-1 (2005), o traço tipo ii (1: 0,5: 4) e o tipo iii (1: 1: 6), sendo definidos em volume de cimento, cal e areia, respectivamente. O controle da produção das argamassas foi realizado em massa. Todos os procedimentos foram desenvolvidos conforme as normas brasileiras vigentes e realizados no Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no Rio Grande do Sul (RS).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Para a execução das argamassas, utilizou-se cimento CP-V (NBR 16697/2018), com massa específica de $3,02 \text{ g/cm}^3$ (NBR 16605/2017) e massa unitária de $1,30 \text{ g/cm}^3$ (adaptado de NBR NM 45/2006). A areia utilizada é uma areia média, natural de rio, com diâmetro máximo de 1,18 mm e módulo de finura de 2,69 (NBR NM 248/2003). A massa específica da areia apresentou valor de $2,64 \text{ g/cm}^3$ (NBR NM 52/2009) e a massa unitária de $1,49 \text{ g/cm}^3$ (NBR NM 45/2006). A curva granulométrica da areia é apresentada no Gráfico 1 abaixo (NBR NM 248/2003). Utilizou-se cal hidratada especial CH-II (NBR 7175/2003), com massa unitária de $0,78 \text{ g/cm}^3$ (adaptado de NBR NM 45/2006) e massa específica de $2,53 \text{ g/cm}^3$ (NBR 16605/2017).

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

3.2 PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

3.2.1 Ensaios de caracterização da argamassa no estado fresco

Para a preparação da argamassa, misturou-se a partir das quantidades dos traços em massa o cimento, cal e areia em uma argamassadeira planetária segundo as diretrizes da NBR 16541 (2016).

Os índices de consistência dos traços do tipo ii e tipo iii foram determinados conforme a NBR 13276 (2016) e apresentaram os valores de 265mm e 257mm, respectivamente.

Para a realização do ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado seguiu-se a norma NBR 13278 (2005) de forma que o traço tipo ii apresentou uma densidade de massa de 2,09 g/cm³ com um teor de ar incorporado de 6%. Já o traço tipo iii apresentou uma densidade de massa de 2,04 g/cm³ e um teor de ar incorporado de 7%.

Os ensaios para a retenção de água, de ambos os traços, foram realizados segundo a NBR 1377 (2005) e apresentaram valores de 92,53% e 77,83% respectivos ao traço tipo ii e traço tipo iii.

3.2.2 Preparação da argamassa segundo a NBR 16541 (2016)

As argamassas foram preparadas segundo as recomendações da NBR 16541 (2016). Cada traço foi preparado em duas amostras suficientes para a montagem de cinco corpos de prova cilíndricos de dimensões 50mm x 100mm, correspondente a diâmetro e altura, respectivamente. As medidas em massa utilizadas em cada traço são apresentadas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Quantidades dos insumos em massa (kg)

| Traço em volume | Cimento | Cal | Areia | Água |
|-----------------|---------|------|-------|------|
| 1:0,5:4 | 1,00 | 0,35 | 5,71 | 1,00 |
| 1:1:6 | 1,00 | 0,71 | 8,56 | 1,50 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

As argamassas foram curadas ao ar, em ambiente controlado com temperatura média de 23 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 10 %.

3.3 DESCRIÇÃO DAS NORMAS E ENSAIOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS

Os corpos de prova, após moldados e curados, foram retificados em uma máquina *Stuhkert Maq*® de forma a garantir a perfeita planicidade das faces superior e inferior. As medidas das deformações verticais foram realizadas de duas maneiras: através de dois extensômetros elétricos (*strain gauges*) com dimensão de grade de 3 x 2mm, colados diretamente na face do corpo de prova com uma cola a base de cianocrilato em posição diametralmente oposta, e com o uso da correlação digital de imagens (DIC). Para o emprego do DIC, os corpos de prova foram pintados com tinta acrílica branca fosca e depois jateados com spray preto fosco (Figura 5) de forma que se criasse um contraste de cores para posterior interpretação das imagens no software GOM Correlate. Utilizou-se uma câmera Nikon D5300 com uma lente macro Nikon, 105mm, fixa, com redutor de vibração. Para melhorar a qualidade das imagens tomadas, foram utilizados dois refletores LED de cor branca (Figura 6) e buscou-se dar foco no centro dos corpos de prova (Figura 7).

A carga aplicada foi medida com uma célula de carga tipo S com capacidade de 50 kN (Figura 6). Os ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica INSTRON, modelo HDX

1500, com controle de deslocamento com taxa de 0,1mm/min e para aquisição dos dados foi usado um sistema Spyder da marca HBM.

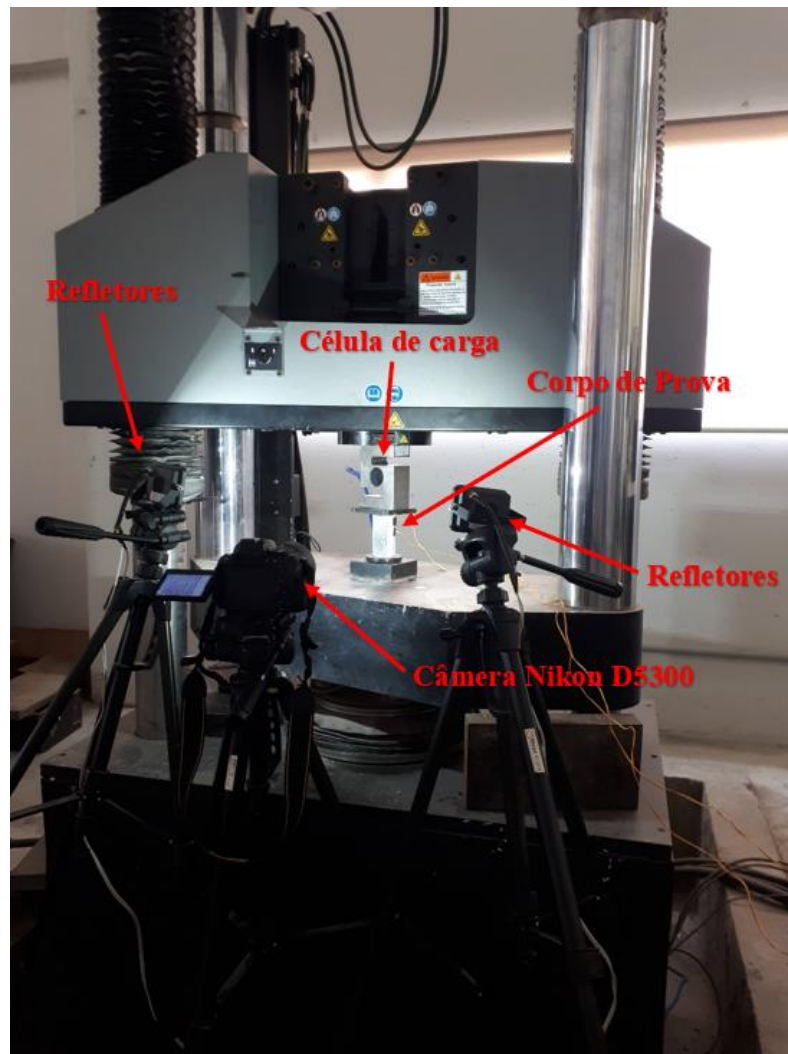
Figura 5 - Corpo de prova pintados com tinta acrílica branca fosca e spray preto fosco



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

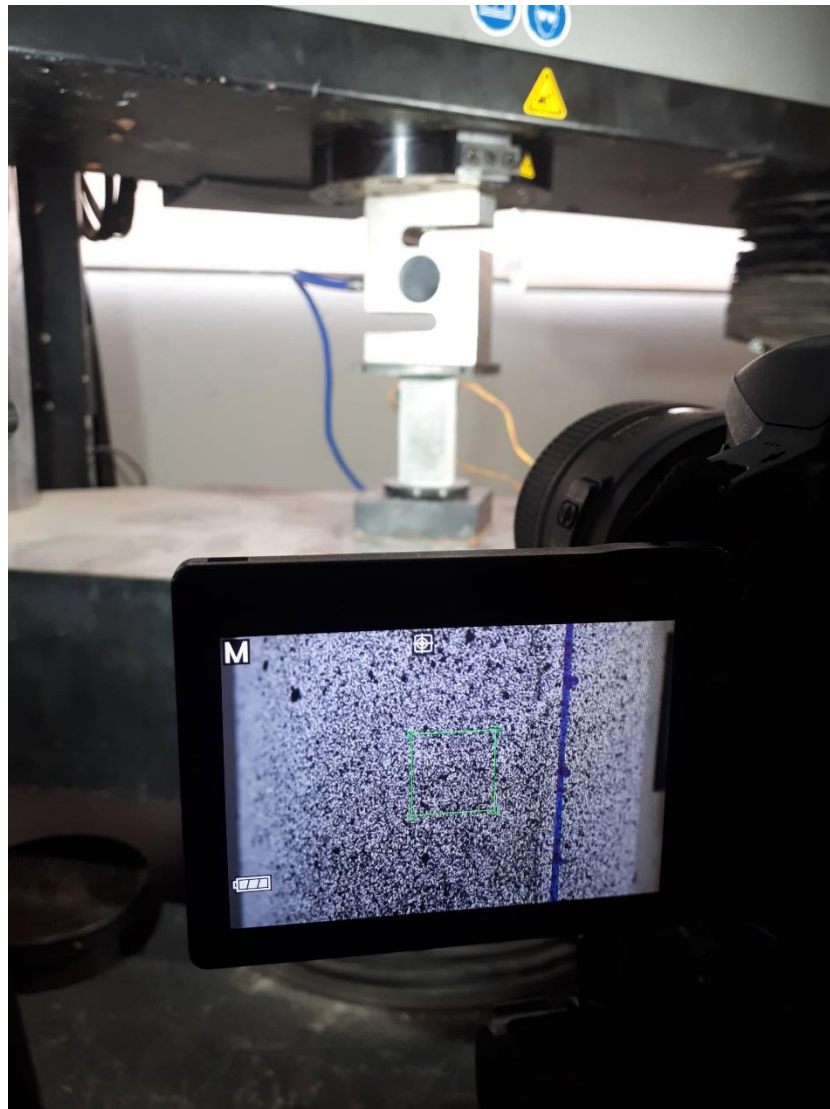
Dessa maneira, foram ensaiados cinco corpos de prova cilíndricos para cada traço os quais foram feitos ciclos de carga e descarga (segundo NBR 8522/2017) até aproximadamente 30% da carga máxima para uniformizar as deformações e então os corpos de prova foram carregados até a ruptura.

Figura 6 - Instrumentação ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

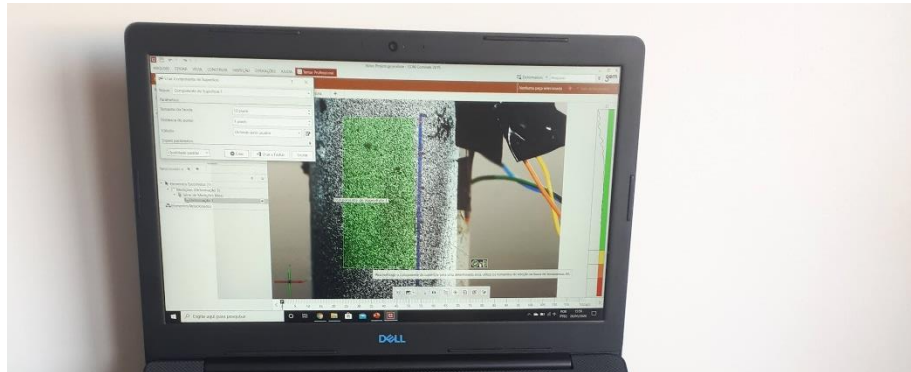
Figura 7 - Filmagem com foco no centro dos corpos de prova ensaiados



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

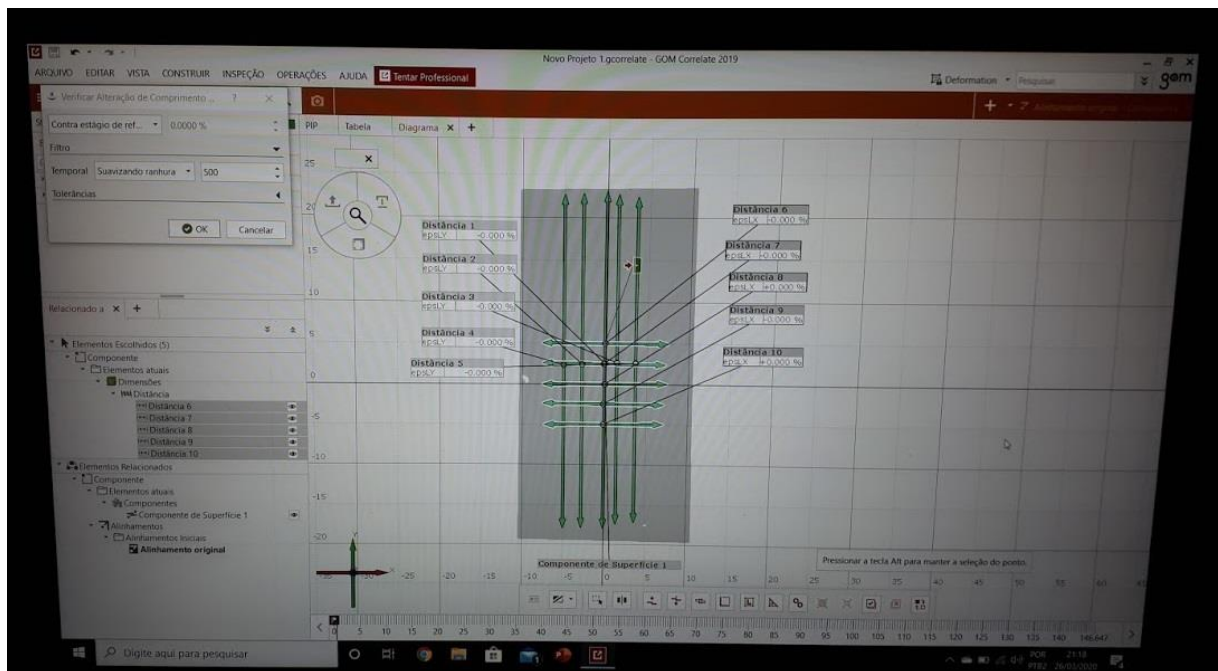
Os vídeos obtidos foram importados para o software *GOM Correlate*. Para a análise das deformações específicas foram criadas retas verticais e horizontais de referência – no mínimo 5 retas por direção e por corpo de prova. As deformações específicas apresentadas são a média das deformações obtidas em cada uma dessas retas traçadas. Na Figura 8 apresenta-se a superfície analisada para um corpo de prova. O tom verde indica a região onde as medidas via DIC são consistentes, e a Figura 9 exemplifica as retas traçadas para um corpo de prova.

Figura 8 - Análise das imagens no software GOM Correlate



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Figura 9 - Elaboração de retas verticais no software GOM Correlate



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

4. RESULTADOS

Buscando-se testar as resistências das argamassas com traço 1:0,5:4 e 1:1:6 (cimento, cal e areia), foram realizados ensaios de compressão axial em cinco corpos de prova aos 28 dias de cura.

4.1 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO: ABSORÇÃO DE ÁGUA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os ensaios respectivos à absorção de água por capilaridade foram executados conforme a NBR 15259 (2005) e seus respectivos valores se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores obtidos através dos ensaios de absorção de água por capilaridade para os traços 1:0,5:4 e 1:1:6

| Traço em volume | A ₁₀ (g/cm ²) | Desvio Padrão (g/cm ²) | A ₉₀ (g/cm ²) | Desvio Padrão (g/cm ²) |
|-----------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1:0,5:4 | 0,131 | 0,00759 | 0,364 | 0,0159 |
| 1:1:6 | 0,207 | 0,0131 | 0,693 | 0,1157 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Nota: Onde A₁₀ significa a absorção de água aos dez minutos de ensaio e A₉₀ a absorção de água aos noventa minutos de ensaio.

A resistência média encontrada para o traço 1:0,5:4 foi de 16,11 MPa com um desvio padrão de 0,20 MPa. Já para os corpos de prova do traço 1:1:6, a resistência média foi de 5,87 MPa com desvio padrão de 0,53 MPa. Valores médios de resistências condizentes aos apresentados por Stalter (2019), os quais foram 11,34MPa para o traço 1:0,5:4 e 6,56MPa para o traço 1:1:6, com desvio padrão de 0,92 e 0,32, respectivamente.

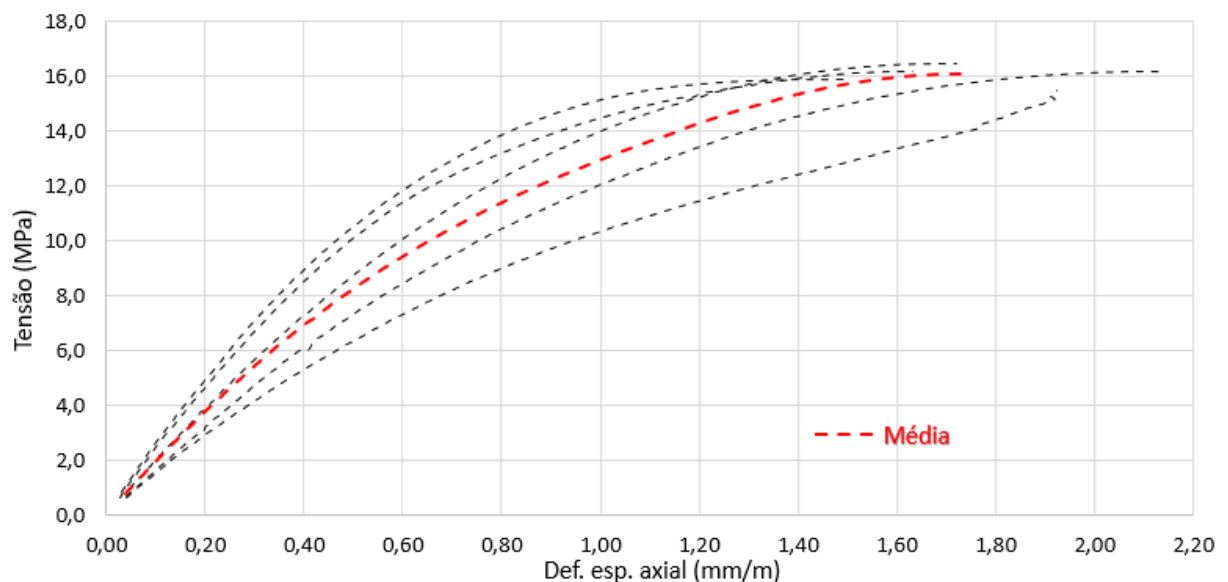
A partir das resistências médias calculadas, buscou-se verificar os comportamentos individuais de cada tipo de argamassas e, assim, procurou-se analisar as curvas de tensão-deformação específicas axiais dos corpos de prova ensaiados.

As curvas de tensão-deformação específicas axiais do traço 1:0,5:4 e 1:1:6 estão apresentadas nos Gráficos 2 e 3, respectivamente. As curvas em vermelho e azul representam a resistência média para cada traço. Os valores das resistências, a deformação específica máxima e os módulos de elasticidade, dos traços 1:0,5:4 e 1:1:6 estão apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

A leitura das deformações ocorreu através de dois *strain gauges* colados em lados opostos do corpo de prova e forneceram os valores das deformações axiais, em milímetros por metro (mm/m).

As leituras das deformações apresentadas ocorreram até o valor de máxima tensão. Próximo à ruptura, devido a propagação de microfissuras internas nos corpos de prova, as medidas de deformação apresentaram maiores variações. Após a ruptura, as deformações não foram medidas pois a prensa utilizada não é servo-controlada. Analisando o Gráfico 2, percebe-se uma uniformidade nas deformações específicas axiais dos corpos de prova, com variação nessas deformações (entre máxima e mínima) em torno de 0,6 mm/m.

Gráfico 2 – Curvas tensão-deformação específica axial traço 1:0,5:4



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

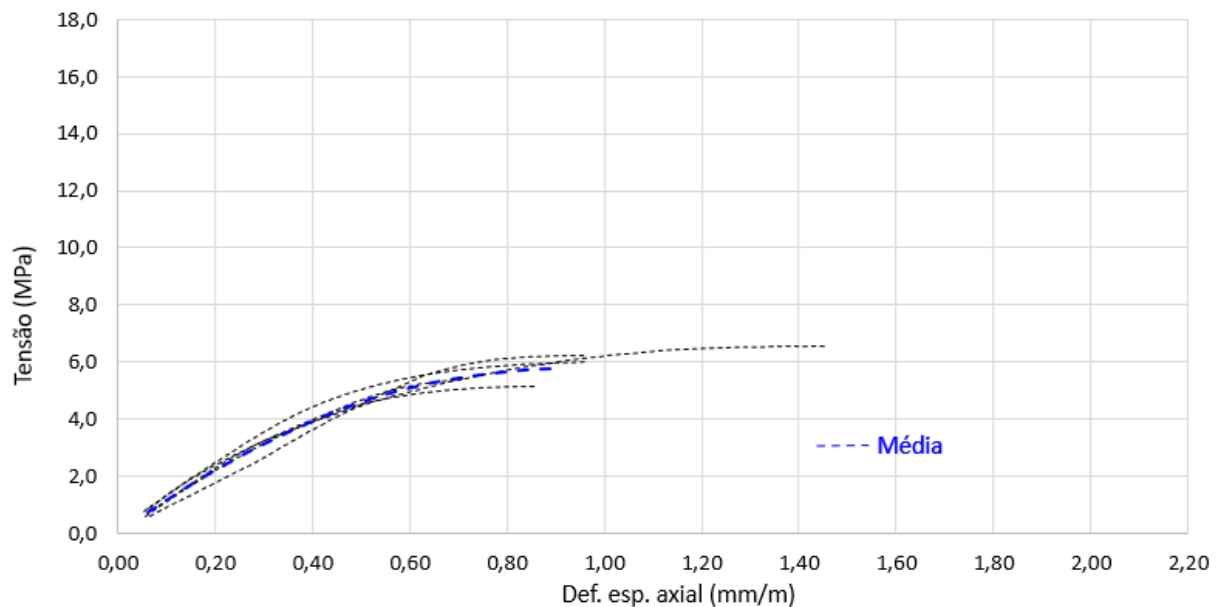
Tabela 5 - Valores de resistência, deformação específica axial máxima e módulo de elasticidade dos corpos de prova do traço 1:0,5:4

| | Resistência (MPa) | Def. Esp. Máxima (mm/m) | Mód. Elasticidade (GPa) |
|---------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| CP1 | 15,95 | 1,90 | 13,27 |
| CP2 | 16,17 | 2,15 | 15,50 |
| CP3 | 16,15 | 1,63 | 22,28 |
| CP4 | 15,86 | 1,53 | 24,69 |
| CP5 | 16,44 | 1,72 | 18,28 |
| Média | 16,11 | 1,79 | 18,80 |
| Desvio Padrão | 0,20 | 0,22 | 4,21 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Nota: Onde CP significa corpo de prova

Gráfico 3 – Curvas tensão-deformação específica axial traço 1:1:6



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

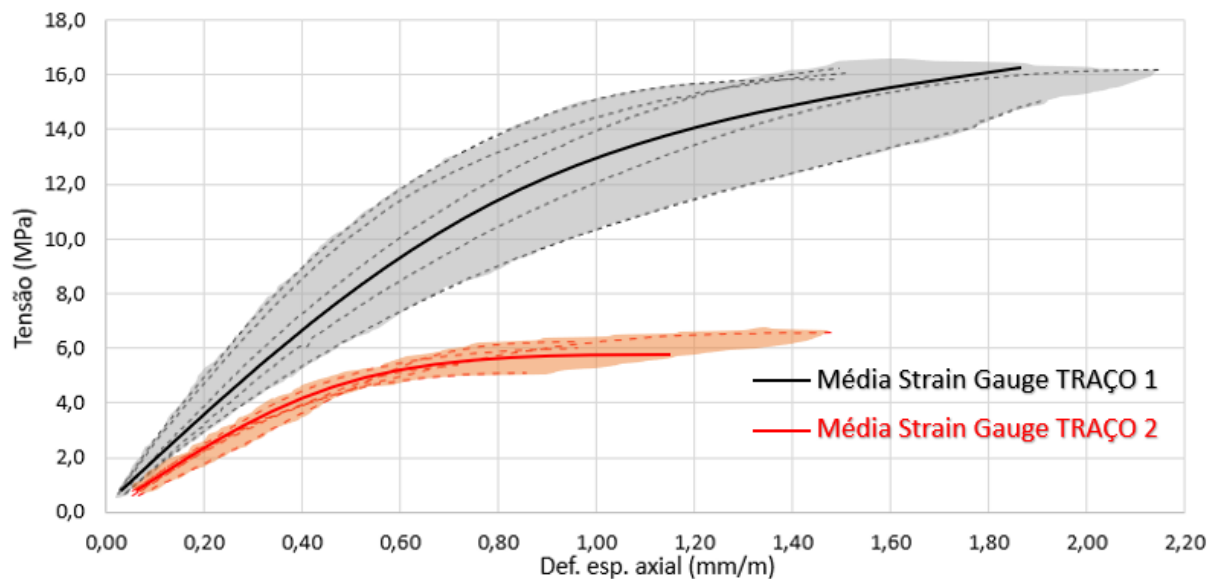
Tabela 6 - Valores de resistência, deformação específica axial máxima e módulo de elasticidade dos corpos de prova do traço 1:1:6

| | Resistência (MPa) | Def. Esp. Máxima (mm/m) | Mód. Elasticidade (GPa) |
|---------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| CP1 | 6,24 | 0,96 | 9,07 |
| CP2 | 5,39 | 0,73 | 11,57 |
| CP3 | 6,57 | 1,10 | 10,67 |
| CP4 | 6,03 | 1,14 | 12,86 |
| CP5 | 5,13 | 0,86 | 10,43 |
| Média | 5,87 | 0,96 | 10,92 |
| Desvio Padrão | 0,53 | 0,15 | 1,26 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

No Gráfico 4, faz-se a correlação entre resistências e deformações máximas atingidas para cada traço estudado. Devido as características do traço 1:1:6 (mais pobre), este possui resistências mais baixas quando comparado ao traço 1:0,5:4, o mesmo acontece para o módulo de elasticidade. O traço 2 (1:1:6) possui módulo de elasticidade menor, média 10,92 GPa, quando comparado ao do traço 1 (1:0,5:4), com média de 18,80 GPa.

Gráfico 4 - Tensão-deformação específica axial, traço 1 (1:0,5:4) e traço 2 (1:1:6), *strain gauge*

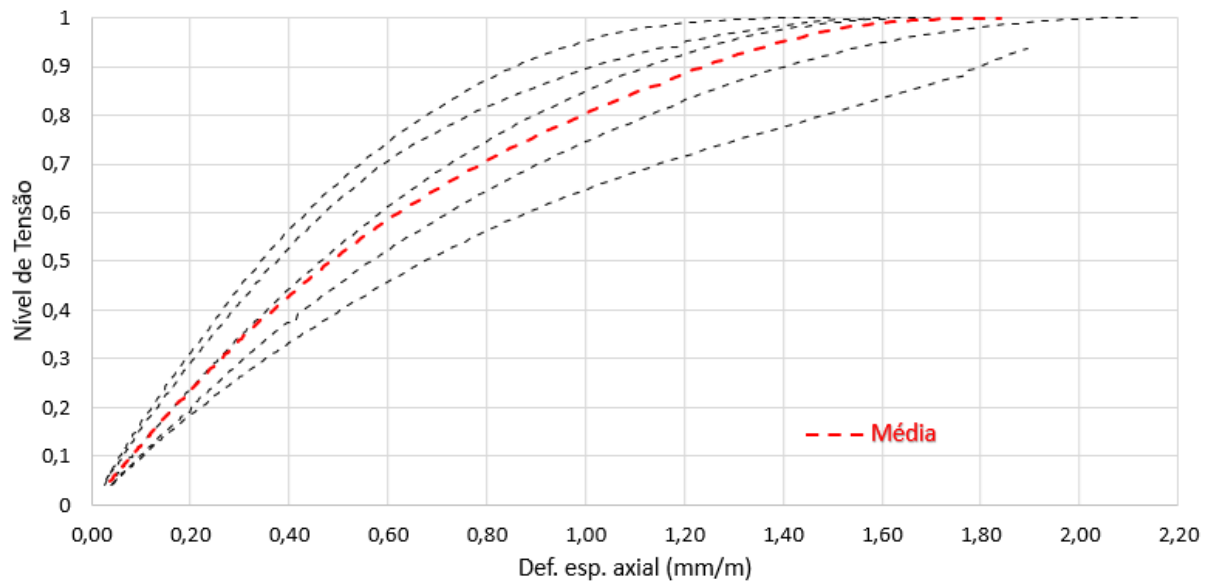


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO: COMPORTAMENTO NÍVEL DE TENSÃO – DEFORMAÇÃO

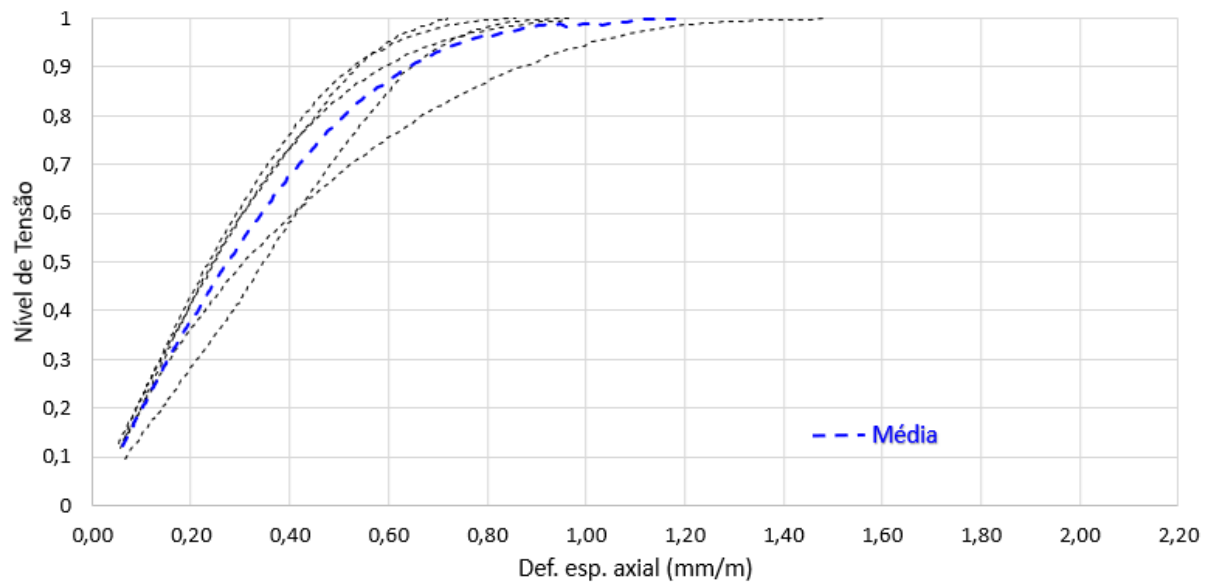
Juntamente às análises anteriores, buscou-se apresentar os gráficos referentes aos níveis de tensões versus deformações específicas axiais de ambos os traços. O nível de tensão é dado pela razão entre a tensão aplicada e a máxima tensão medida para cada corpo de prova. Com isso, no decorrer do tempo de análise, tem-se os Gráficos 5 e 6 demonstrando o comportamento para os traços 1:0,5:4 e 1:1:6, respectivamente. Percebe-se que os níveis de tensões também apresentaram comportamento uniforme.

Gráfico 5 – Curvas nível de tensão x deformação específica axial traço 1:0,5:4



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Gráfico 6 - Curvas nível de tensão x deformação específica axial traço 1:1:6



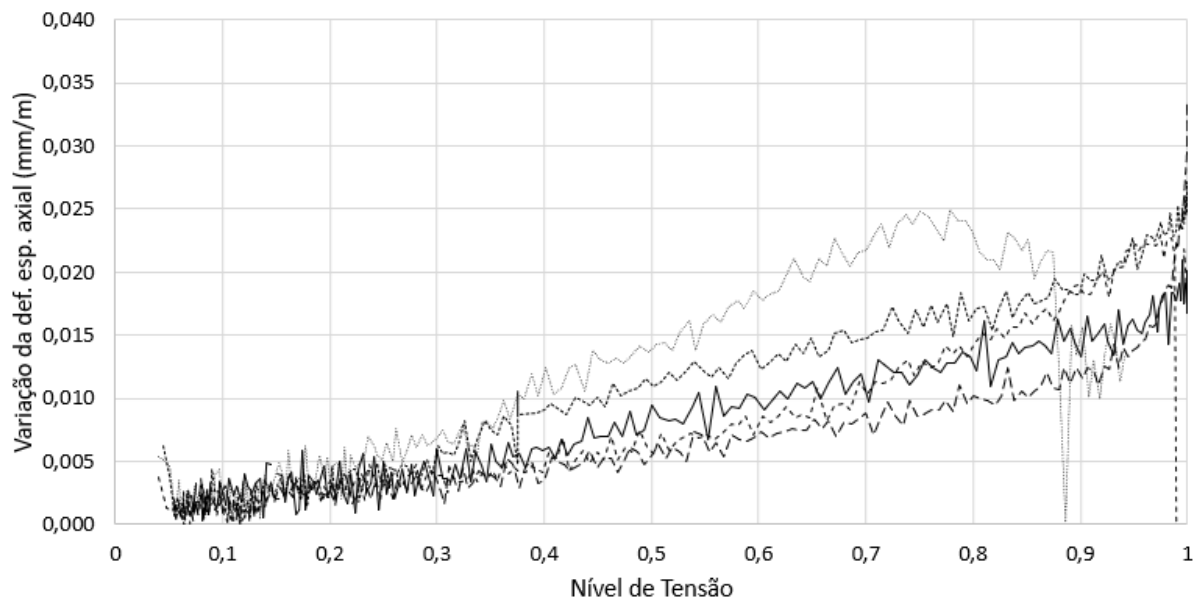
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.3 VARIAÇÕES DAS DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS AXIAIS VERSUS NÍVEIS DE TENSÕES

Nos Gráficos 7 e 8, buscou-se apresentar a variação da deformação específica axial *versus* o nível de tensão para ambos os traços. Essa variação é obtida através da subtração da deformação específica axial em um determinado instante de tempo (segundo) pela deformação no instante anterior.

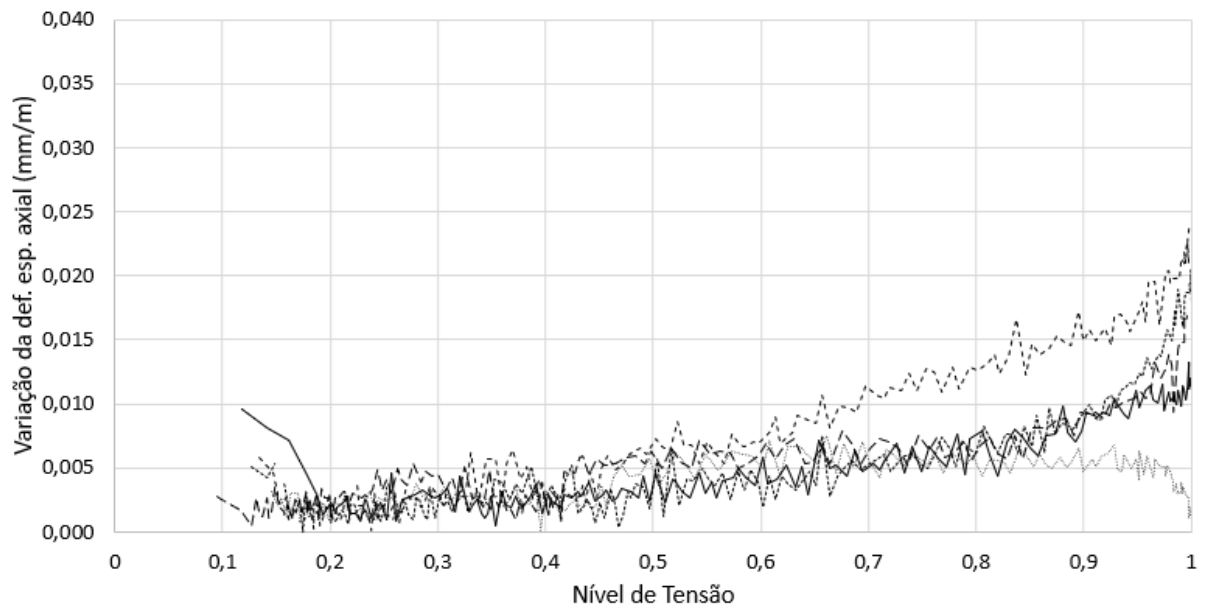
Os gráficos apresentaram um aspecto serrilhado devido aos ruídos de leitura. Mesmo assim, optou-se por não realizar nenhum processo de suavização. Percebe-se pela análise dos gráficos que, para ambas as argamassas, o processo de ruptura se iniciou para níveis de tensão acima de 0,9, com exceção de um corpo de prova da argamassa 1:0,5:4 que iniciou para um nível de tensão de 0,8, aproximadamente. Essa ruptura pode ser percebida quando há uma interrupção no comportamento da curva representada

Gráfico 7 - Variação da deformação específica axial x nível de tensão traço 1:0,5:4



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Gráfico 8 - Variação da deformação específica axial x nível de tensão traço 1:1:6



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

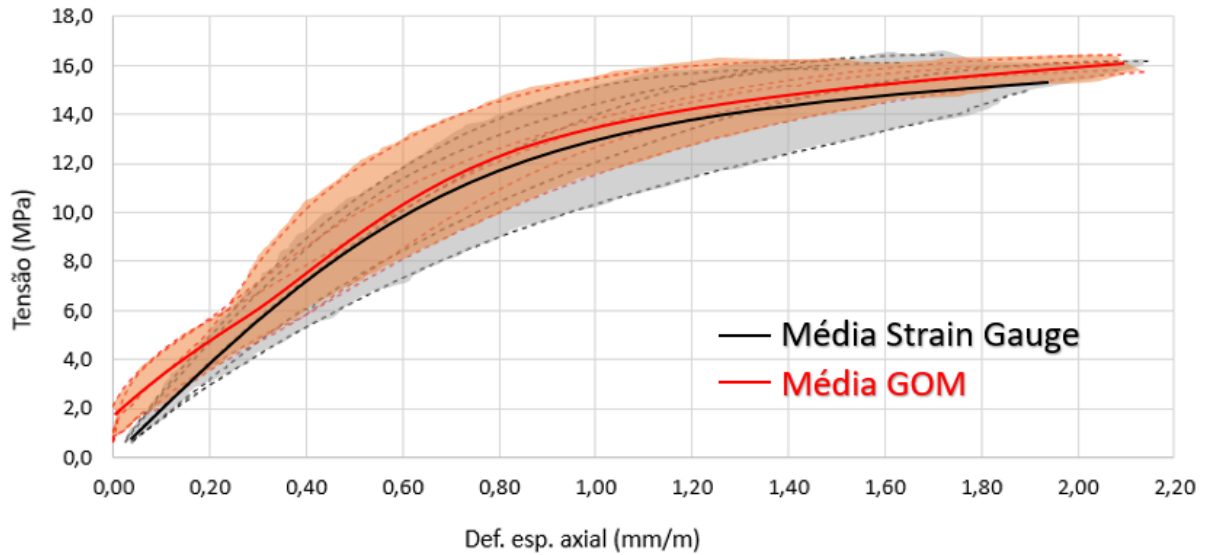
4.4 CORRELAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS AXIAIS ATRAVÉS DA ANÁLISE POR IMAGEM E POR LVDT

Buscando-se fazer uma análise entre as medições aferidas através do método de leitura pelos *strain gauges* (Transdutor de Deslocamento Variável Linear, ou, em inglês, *Linear Variable Differential Transducer*, LVDT) e também pelo método de análise de deformação por imagem (software GOM), obteve-se as correlações entre a tensão e deformação específica axial para o traço 1:0,5:4 (Gráfico 9) e para o traço 1:1:6 (Gráfico 10).

Analisando o traço 1:0,5:4, percebe-se uma uniformidade de comportamento quando se compara as leituras de tensão *versus* deformação específica axial obtidas pelos métodos aqui estudados. Ambos apresentaram uma linha de tendência média muito próxima, demonstrando uma boa correlação entre as leituras obtidas pelo LVDT e pelo GOM.

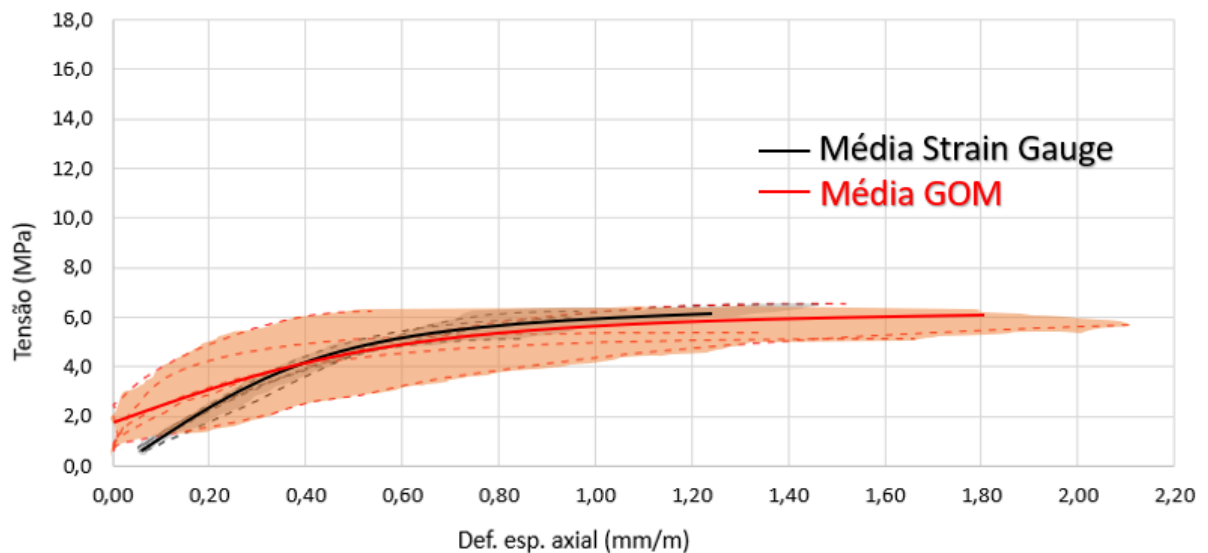
Já para o traço 1:1:6, as leituras médias obtidas também apresentaram um comportamento semelhante. Um ponto a se considerar é que, pelo método de análise de deformações por imagem, as leituras das deformações foram maiores quando comparadas às dos *strain gauges*, ou seja, para valores de tensões semelhantes, obteve-se deformações maiores.

Gráfico 9 - Correlação tensão x deformação específica axial, GOM x *strain gauge* traço 1:0,5:4



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

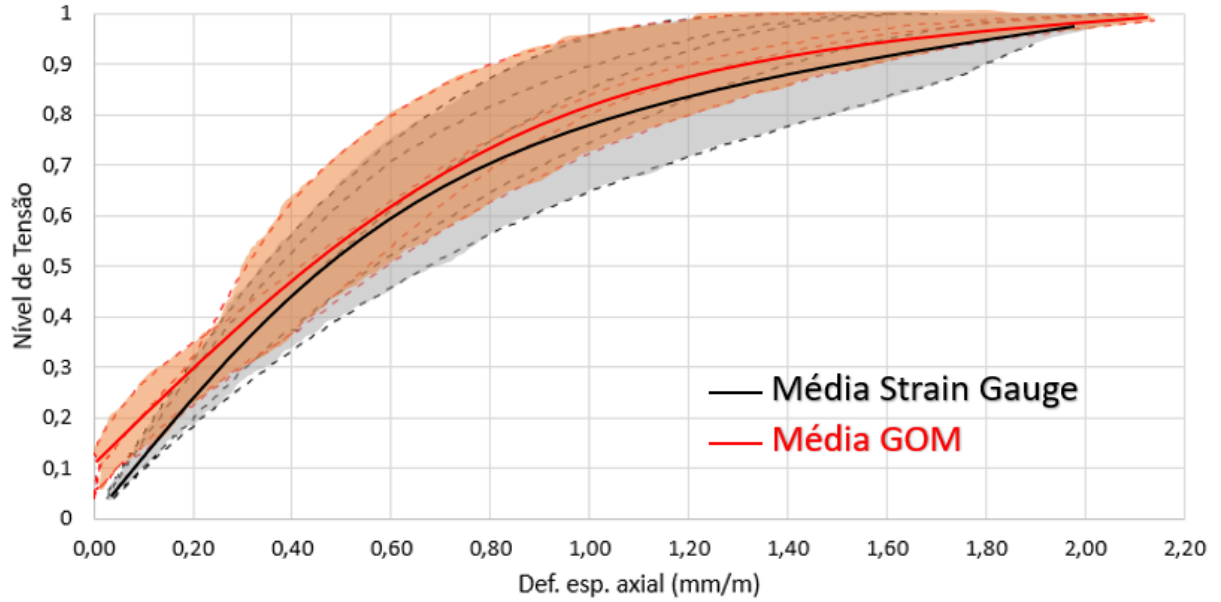
Gráfico 10 - Correlação tensão x deformação específica axial, GOM x *strain gauge* traço 1:1:6



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

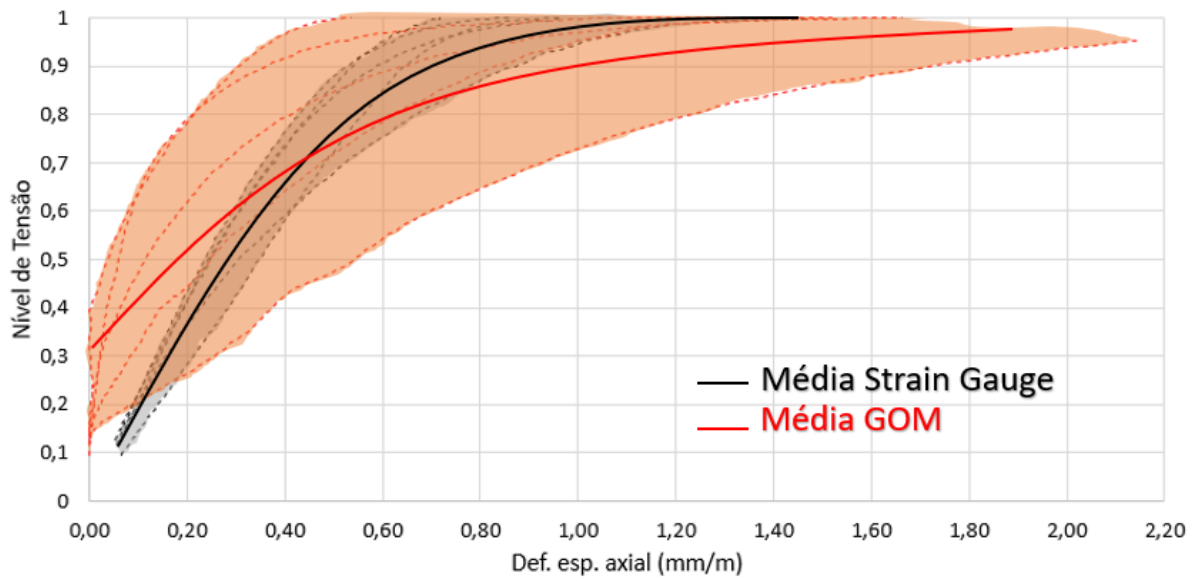
Comparando agora os níveis de tensão pelas deformações específicas axiais apresentadas nos Gráficos 11 e 12, representando o traço 1:0,5:4 e traço 1:1:6, respectivamente, tem-se:

Gráfico 11 - Comparação nível de tensão versus deformação específica axial traço 1:0,5:4, GOM x *strain gauge*



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Gráfico 12 - Comparação nível de tensão versus deformação específica axial traço 1:1:6, GOM x *strain gauge*



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

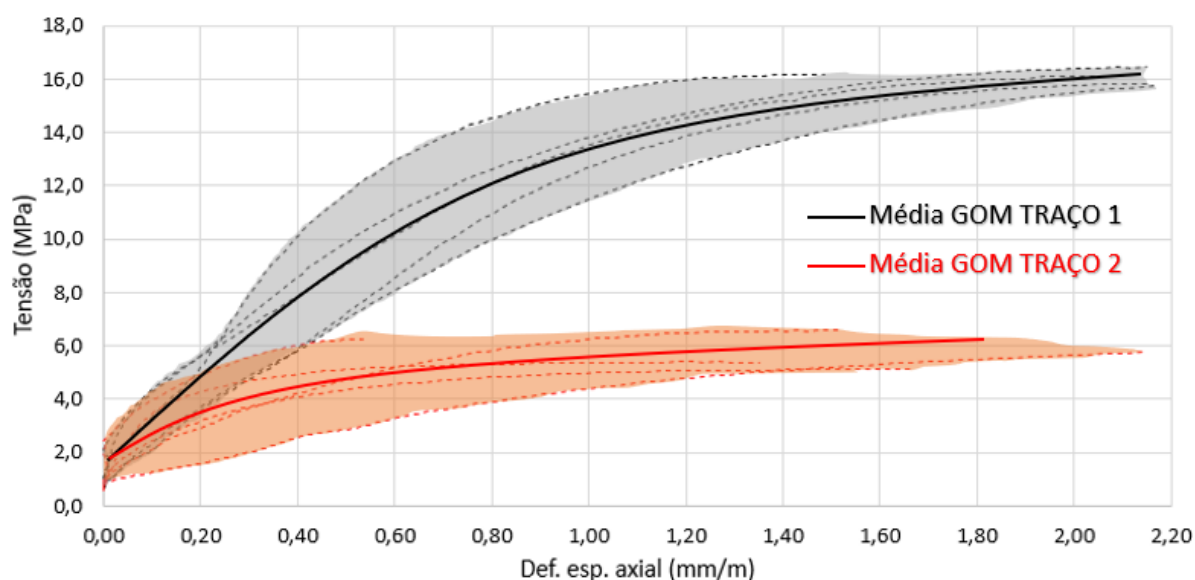
Da mesma maneira que para as leituras das tensões *versus* deformações específicas axiais do traço 1:0,5:4 (Gráfico 9) obteve-se uma linha de tendência média entre *strain gauge*

e GOM muito próxima, o mesmo ocorre quando se analisa os níveis de tensões *versus* deformações específicas axiais para o mesmo traço.

Ao analisar o Gráfico 12, percebe-se novamente que as leituras obtidas pelo método de análise por imagem ocorreram de forma que apresentaram deformações mais significativas quando comparada às leituras pelo LVDT, para valores de níveis de tensões iguais. Apesar de tal situação, ambos os métodos apresentam uma linha de tendência média semelhante.

Apresentando então, no Gráfico 13, as tensões *versus* deformações específicas axiais de forma correlacionada, entre o traço 1:0,5:4 e 1:1:6. Tal correlação buscou apresentar as médias obtidas entre ambos os traços aqui estudados através da análise de deformação por imagem.

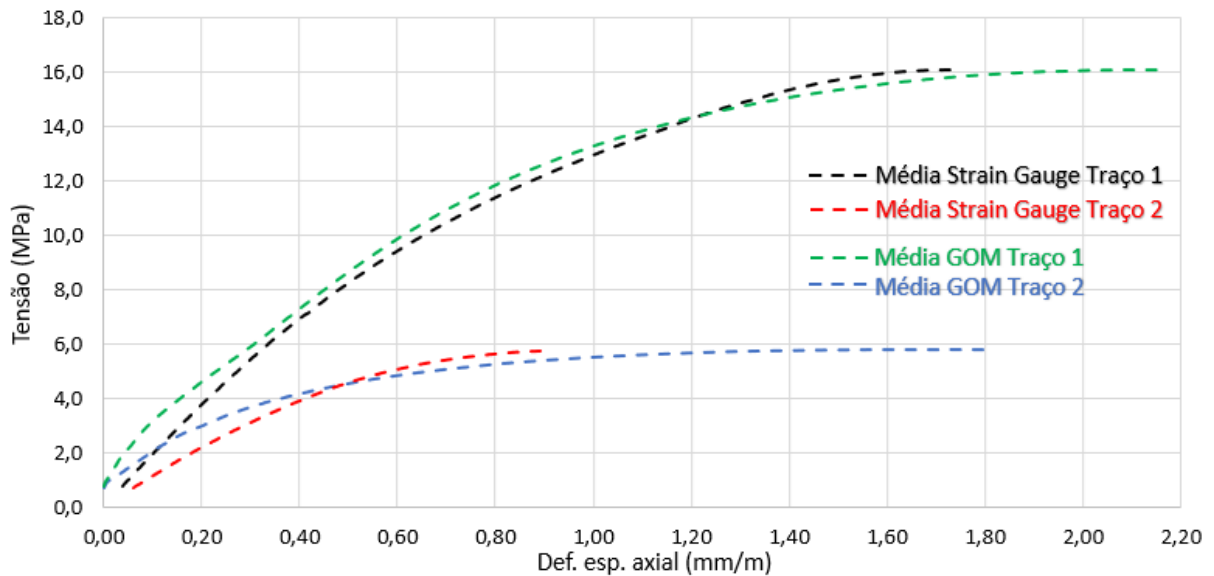
Gráfico 13 - Tensão x deformação específica axial, traço 1 (1:0,5:4) e traço 2 (1:1:6), GOM



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Já no Gráfico 14 temos a relação completa das correlações feitas neste estudo. Podemos, através da análise do gráfico, obter uma comparação direta entre as deformações específicas axiais entre ambos traços, tanto pela análise por imagem, quanto pela análise pelo LVDT. Percebe-se uma uniformidade nas deformações apresentadas, para ambos os métodos, demonstrando uma boa correlação de leitura.

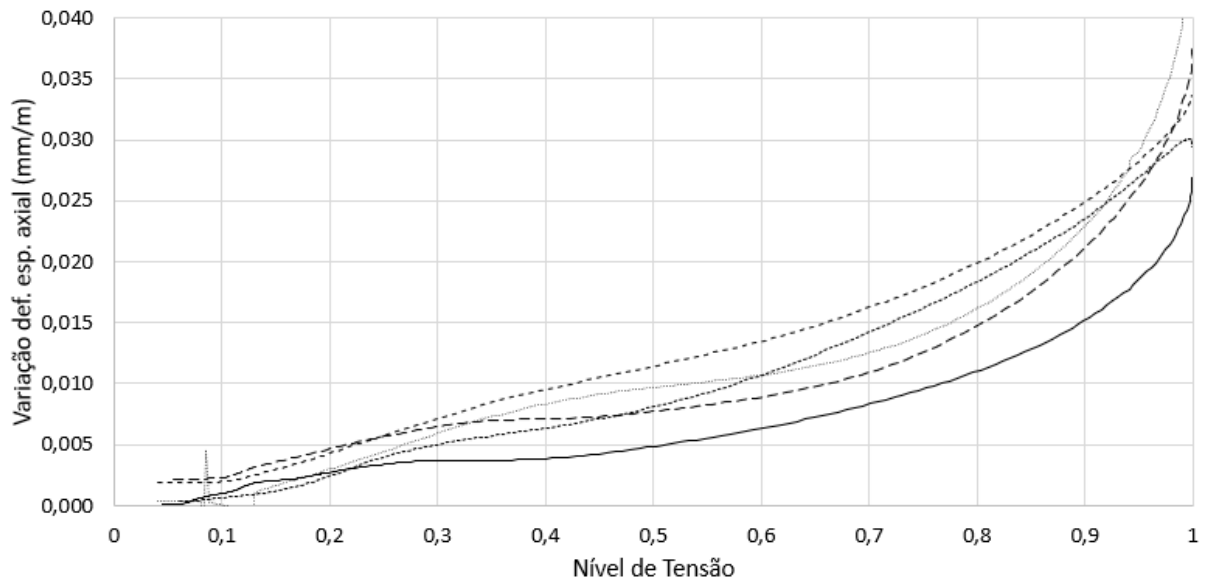
Gráfico 14 - Médias de tensão x deformação específica axial, traço 1:0,5:4 e traço 1:1:6, GOM e *strain gauge*



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

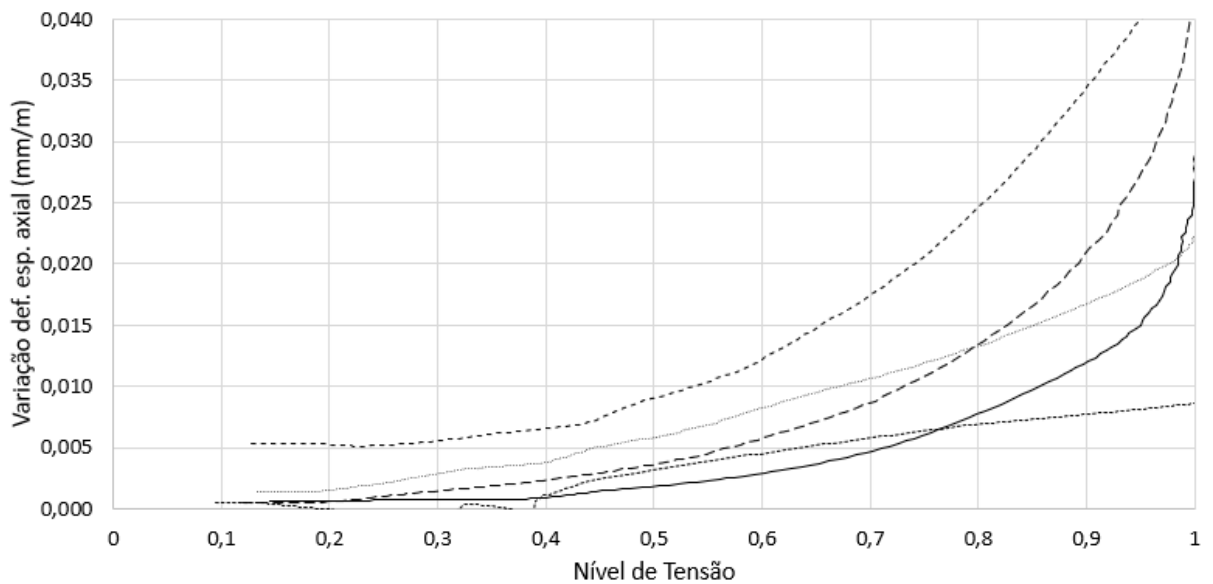
Da mesma forma que foi apresentado anteriormente a variação das deformações através do método LVDT, buscou-se nos Gráficos 15 e 16, apresentar as variações obtidas pelo software GOM para o traço 1:0,5:4 e 1:1:6, respectivamente. Nota-se que nesta análise os ruídos de leitura não se fazem presentes. Isso ocorre pelo fato de o método utilizado não estar sujeito a instabilidades de corrente elétrica ou a tipologia do *strain gauge* utilizado.

Gráfico 15 - Variação da deformação específica axial x nível de tensão traço 1:0,5:4



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Gráfico 16 - Variação da deformação específica axial por nível de tensão traço 1:1:6



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

5. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou caracterizar o comportamento mecânico de corpos de prova de dois tipos diferentes de argamassas ensaiados à compressão axial através da análise do comportamento tensão-deformação específica.

Nos ensaios executados foram utilizados dois tipos de argamassa de assentamento com proporções de cimento, cal e areia de 1:0,5:4 e 1:1:6, de forma a analisar a influência das diferentes resistências.

Com os resultados obtidos em ensaios, através dos gráficos tensão-deformação, foi possível perceber que, quanto mais resistente a argamassa, maiores foram as deformações medidas na ruptura.

Os gráficos das variações das deformações *versus* os níveis de tensão mostraram que as rupturas das argamassas de ambos os traços começavam a ocorrer a partir de níveis de tensão acima de 0,9.

Analisando as deformações de ambos os traços com ambos os métodos de instrumentação, foi possível perceber a semelhança de resultados, ou seja, a leitura pela técnica DIC esteve muito próxima da leitura apresentada pela instrumentação com *strain gauges*.

Além disso, a correlação entre ambas as técnicas de leitura, apresentada entre os níveis de tensão *versus* deformações específicas axiais para o traço 1:0,5:4 também foram muito semelhantes. Já para o traço 1:1:6, apesar de terem apresentado uma maior variação entre os corpos de prova, obteve-se uma linha de tendência média bastante próxima.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho, foram verificadas algumas possibilidades de continuidade da pesquisa, entre elas:

- a) Empregar a correlação por imagem para a avaliação do comportamento tensão-deformação transversal de argamassas de assentamento estrutural
- b) Avaliar através da correlação de imagens o comportamento tensão-deformação de corpos de prova com diferentes alturas ensaiados a compressão axial, de forma a avaliar o seu comportamento com diferentes graus de confinamento

REFERÊNCIAS

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1**: Alvenaria Estrutural. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16868-2**: Alvenaria Estrutural. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16868-3**: Alvenaria Estrutural. Parte 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

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

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

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

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

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

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

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

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

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

BRITISH STANDARD (BS). **BS 56288-1**: Code of practice for use of masonry – Part 1: Structural use of unreinforced masonry. Londres, 2005. 64p.

KHOO, C. L. **A Failure criterion for brickwork in axial compression**. Tese (Doutorado) – Curso de Filosofia, Departamento de Engenharia Civil e Ciência da Construção. University of Edinburgh, Edinburgo, Escócia, 1972.

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

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

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

MOHAMAD, G.. **Mechanism failure of concrete block masonry under compression**. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, n. 2, p. 181-192, 2007.

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

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

OTTONI, T. P.. **deformações e modo de ruptura em prismas de alvenaria de blocos cerâmicos: análise experimental com extensometria e correlação de imagem**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

PASQUALI, I.. **Influência do tipo de argamassamento na resistência a compressão de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

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

ROMAN, H. R. *et al.* **Análise de Alvenaria Estrutural**. Universidade Corporativa Caixa. GDA. NPC. UFSC, 1998.

SANTANA, J. F. de A.; ARAUJO, T. D. P. de. Avaliação numérica de prismas de blocos de concreto para alvenaria estrutural. *In: XXXVIII Iberian-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Florianópolis, 2017. p. 1-17.

SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO JR, L. R.; PILAR, R.. Influência do tipo de argamassa e suas propriedades do estado fresco nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto para edifícios altos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 4, p. 1008-1023, dez. 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762015000401008&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 20 jan. 2021.

STALTER, T. da C. **Comportamento tensão-deformação de corpos de prova de argamassas de diferentes resistências submetidos a compressão axial**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.