

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL DOUTORADO**

BENÍCIO DE MORAIS LACERDA

**CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL E MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA À
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS EM REVESTIMENTOS DE
ARGAMASSA SOB TRAÇÃO**

SÃO LEOPOLDO

2023

BENÍCIO DE MORAIS LACERDA

**CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL E MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA À
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS EM REVESTIMENTOS DE
ARGAMASSA SOB TRAÇÃO**

Tese apresentada como requisito para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(UNISINOS)

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo

2023

L131c Lacerda, Benício de Moraes.

Correlação de imagem digital e modelagem numérica aplicada à determinação de propriedades elásticas em revestimentos de argamassa sob tração / Benício de Moraes Lacerda. – 2023.

238 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

“Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak.”

1. Resistência de aderência à tração. 2. Módulo de elasticidade. 3. Coeficiente de Poisson. 4. Carbonatação. 5. Envelhecimento acelerado. 6. Correlação de imagem digital. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

BENÍCIO DE MORAIS LACERDA

**CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL E MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA À
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS EM REVESTIMENTOS DE
ARGAMASSA SOB TRAÇÃO**

Tese apresentada como requisito para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(UNISINOS)

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

Aprovado em 18 de agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Profª Dra. Cristiane Pauletti
Universidade Luterana do Brasil (ULBRA)

Profª Dra. Lia Lorena Pimentel
Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas)

Profª Dra. Nadia Cazarim da Silva Forti
Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas)

Profª Dra. Marlova Piva Kulakowski
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Dedico este estudo à minha família, que foi a maior incentivadora na realização desta pesquisa, em especial, à minha esposa Deise Tamin P. Hirata e à minha filha Gabrielle Yumi Hirata Lacerda. Aos meus pais Nildo M. Lacerda e Júlia de Moraes Lacerda.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo dom da vida e por conceder sabedoria e inteligência necessária para a realização deste trabalho.

À minha esposa Deise Hirata pelo incentivo, apoio e compreensão para seguir em frente e por ter cuidado da nossa filha Gabrielle Hirata nos momentos que precisei me dedicar para vencer cada uma das etapas requeridas no processo evolutivo da tese.

Aos meus pais Nildo Lacerda e Júlia Lacerda pelo total apoio e incentivo para a concretização da pesquisa estando sempre ao meu lado.

Ao meu orientador Dr. Claudio de Souza Karmierczak, pela troca de saber, pelo esclarecimento das dúvidas, indicação de referências, pela disponibilização do seu tempo para direcionar a pesquisa a um viés conclusivo e por confiar que os desafios poderiam ser vencidos com sabedoria e dedicação contínua.

A professora Dra. Nadia Cazarim da Silva Forti que forneceu informações importantes para a realização da simulação numérica.

Agradeço a colega de pesquisa Camila Werner Menegotto pela troca de conhecimento, pelo incentivo e companheirismo nessa jornada ao ter dedicado o seu tempo para os ensaios experimentais, o que possibilitou a publicação dos resultados parciais do trabalho.

Aos funcionários da Escola Politécnica da UNISINOS, secretaria, técnicos e a todos que, de alguma forma, colaboraram diretamente para a realização desta tese.

RESUMO

A argamassa de revestimento cimentícia, que trabalha aderida a substratos cerâmicos ou de concreto, é um material de construção em constante evolução. As propriedades elásticas da argamassa são influenciadas pelas propriedades do substrato, da argamassa e pela ligação interfacial entre os dois, onde ocorre a aderência, e exercem grande influência na durabilidade do sistema. Este trabalho possui o objetivo de sistematizar uma metodologia de aplicação da correlação de imagem digital (CID) e de utilizar a modelagem numérica para a avaliação das propriedades elásticas de argamassas de revestimento aplicadas sobre substratos cerâmicos quando submetidos a esforços de tração. Foi utilizado um único traço de argamassa aplicada sobre dois tipos de substratos cerâmicos. As amostras foram submetidas a carbonatação acelerada em câmara com 3 % de concentração de CO₂ por um período de 147 dias e posteriormente submetidas ao efeito de degradação por envelhecimento acelerado proveniente de 20 ciclos de molhagem e secagem. O trabalho foi composto de duas etapas, uma experimental e outra numérica. Na etapa experimental, um programa de ensaio foi desenvolvido a fim de quantificar e avaliar os parâmetros da resistência de aderência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em ensaios monitorados por correlação de imagem digital. A segunda etapa consistiu na modelagem e simulação numérica do programa experimental utilizando, como dados de entrada, os resultados médios obtidos da correlação de imagem digital. Os resultados experimentais indicaram que há diferenças de módulo elástico ao longo da espessura de um mesmo revestimento, que diminuem a partir da face externa, em direção à região central e à interface com o substrato cerâmico. A resistência de aderência à tração entre as amostras REF foi maior em relação às amostras envelhecidas e carbonatadas. A simulação numérica permitiu construir e analisar em elementos finitos um modelo adequado para a escala proposta do estudo experimental a partir dos resultados da CID. As condições de contorno aplicadas nos modelos numéricos sob o ensaio de resistência de aderência à tração influenciaram diretamente na ligação da interface, região passível de planos de rupturas, como também no seu comportamento global.

Palavras-chave: resistência de aderência à tração, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, carbonatação, envelhecimento acelerado, correlação de imagem digital.

ABSTRACT

Cementitious coating mortar, which works adhered to ceramic or concrete substrates, is a construction material in constant evolution. The elastic properties of the mortar are influenced by the properties of the substrate, the mortar and the interfacial connection between them, where adhesion occurs, and have a great influence on the durability of the system. This work aims to systematize a methodology for applying digital image correlation (DIC) and using numerical modeling to evaluate the elastic properties of coating mortars applied to ceramic substrates when subjected to tensile stress. A single batch of mortar was used, applied to two types of ceramic substrates. The samples were subjected to accelerated carbonation in a chamber with 3% CO₂ concentration for a period of 147 days and subsequently subjected to the effect of degradation through accelerated aging resulting from 20 cycles of wetting and drying. The work consisted of two stages, one experimental and the other numerical. In the experimental stage, a test program was developed in order to quantify and evaluate the parameters of tensile adhesion strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio in tests monitored by digital image correlation. The second stage consisted of modeling and numerical simulation of the experimental program using, as input data, the average results obtained from digital image correlation. The experimental results indicated that there are differences in elastic modulus throughout the thickness of the same coating, which decrease from the external face, towards the central region and the interface with the ceramic substrate. The tensile adhesion strength among the REF samples was higher compared to the aged and carbonated samples. Numerical simulation allowed the construction and analysis in finite elements of a model suitable for the proposed scale of the experimental study based on the DIC results. The boundary conditions applied in the numerical models under the tensile bond strength test directly influenced the interface connection, a region susceptible to rupture planes, as well as its global behavior.

Keywords: tensile bond strength, elasticity modulus, Poisson coefficient, carbonation, the accelerated aging process, digital image correlation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escala cronológica dos materiais utilizados em argamassas como assentamento ou revestimento	29
Figura 2 – Análise visual da estrutura de um substrato cerâmico e argamassa.	31
Figura 3 – Ângulo de contato formado a partir da força interfacial em equilíbrio proposta pela equação de Young.....	35
Figura 4 – Relação das características da partícula, características físicas e da argamassa no estado fresco	38
Figura 5 – Aumento da densidade da argamassa em função dos dias de carbonatação.....	43
Figura 6 – Permeabilidade à água em função dos dias carbonatado.....	43
Figura 7 – Coeficiente de Poisson em função dos dias carbonatado.....	44
Figura 8 – Módulo de elasticidade dinâmico em função do tempo de carbonatação	44
Figura 9 – Resistência à compressão de corpos de provas carbonatados e não carbonatados.....	47
Figura 10 – Perda de água x taxa de absorção inicial de argamassas estudados por Davison (1961).....	49
Figura 11 – Modelagem e elementos numéricos simulados no Ansys.....	57
Figura 12 – Tensão normal e deslocamentos numéricos obtidos do Ansys.....	59
Figura 13 – Aplicação de carga térmica em argamassa de revestimento	60
Figura 14 – Modelo numérico em elementos finitos	61
Figura 15 – Aplicação de carga térmica parcialmente na argamassa	61
Figura 16 – Aplicação de carga térmica em toda a extensão da argamassa	62
Figura 17 – Rastreamento de pontos na Correlação de Imagem Digital.....	63
Figura 18 – Princípios da correlação de imagem digital.....	66
Figura 19 – Exemplos de padrões de pinturas com pontos de diferentes raios	67
Figura 20 – Erro de medição por correlação de imagem digital	68
Figura 21 – Avaliação da influência da pintura na distribuição dos pontos do subconjunto	69
Figura 22 – Relação do erro e deformação específica para os padrões de pinturas A, B, C e D.....	70
Figura 23 – Metodologia de detecção de fissura elaborada por Gehri, Mata-Falcón e Kaufmann (2020).....	73

Figura 24 – Definições do subconjunto a partir da região de interesse usado no CID	74
Figura 25 – Detecção de fissuras do painel de concreto por CID correspondente ao valor de força última de 202 kN.....	75
Figura 26 – Ensaio experimental realizado por Drougkas et al. (2020).....	76
Figura 27 – Deslocamentos verticais em mm obtidos após análise da correlação de imagem digital em 30 e 45 kN dos painéis de alvenaria sob compressão vertical.	77
Figura 28 – Proposta de modelagem numérica dos painéis de alvenaria	79
Figura 29 – Sistema de coordenada local dos elementos coesivos	81
Figura 30 – Superfícies de ruptura para as tensões biaxiais da simulação numérica	82
Figura 31 – Superfície de ruptura do painel de alvenaria orientado a 45° simulados numericamente.....	83
Figura 32 – Paredes de blocos cerâmicos submetidas a força horizontal, estudadas por Raijmakers e Vermeltoort (1992)	84
Figura 33 – Comparação do modo de ruptura do painel de alvenaria.....	86
Figura 34 – Padrão de fissuras do painel de alvenaria com distribuição das tensões mínimas principais (N/mm ²) sob tensão de compressão vertical inicial de 0,3 MPa .	86
Figura 35 - Estratégias para a modelagem numérica na análise de estruturas de alvenarias de blocos cerâmicos	88
Figura 36 – Mecanismos de ruptura de alvenaria	89
Figura 37 – Micro modelagem detalhada dos blocos cerâmicos.....	89
Figura 38 – Definição da superfície mestre-escrava no Abaqus	91
Figura 39 - Fluxograma das etapas do estudo experimental	93
Figura 40 – Exemplares de blocos cerâmicos para confecção dos substratos	94
Figura 41 – Moldagem das amostras aplicadas por Menegotto (2023).....	96
Figura 42 – Caneta de microagulhamento	100
Figura 43 – Montagem do ensaio de resistência de aderência à tração	101
Figura 44 – Esquema para o ensaio de correlação de imagem digital.....	102
Figura 45 – Cenário de aquisição de imagens para o ensaio de resistência de aderência à tração.....	103
Figura 46 – Fluxograma para aplicação do método de correlação de imagem digital	106
Figura 47 – Etapas para a execução da simulação numérica	108

Figura 48 – Estratégia para a modelagem do bloco cerâmico para simulação de resistência de aderência à tração.....	109
Figura 49 – Elementos de ligação da interface de espessura zero	109
Figura 50 – Esquema da simulação de interação de contato entre os materiais utilizada na modelagem numérica.....	110
Figura 51 – Critério de falha Mohr-Coulomb para obtenção do ângulo de atrito interfacial.....	111
Figura 52 – Esquema de interação numérica na interface substrato-argamassa....	112
Figura 53 – Elemento finito C3D8R.....	114
Figura 54 – Estudo de malha de elementos finitos aplicada na amostra do substrato cerâmico e argamassa	115
Figura 55 - Interação surface-to-surface entre substrato cerâmico e argamassa ...	115
Figura 56 – Avaliação de padrão de pontos utilizando tinta de Spray.....	117
Figura 57 – Resultado da análise em 3 regiões distintas utilizando tinta de Spray.	118
Figura 58 – Padrão de pinturas realizadas com esponja com diferentes densidades de pontos.....	119
Figura 59 – Resultado da análise do padrão de pontos feitos com tinta de carimbo e esponja.....	120
Figura 60 – Padrão de pinturas realizadas com caneta de microagulhamento e diferentes densidades de pontos.....	122
Figura 61 – Resultado da análise do padrão de pontos feitos com tinta de carimbo e caneta de microagulhamento	123
Figura 62 – Teste de Movimento no valor de 5 mm	125
Figura 63 – Resultado de detecção de movimento translacional de 5 mm no NCorr	126
Figura 64 – Movimento translacional de 1 mm da amostra.....	127
Figura 65 – Resultado de detecção de movimento translacional de 1 mm	127
Figura 66 – Resultado de detecção de movimento por erro de leitura na captura de imagem estática	128
Figura 67 – Resultado da deformação específica Eyy avaliados por erro de leitura na captura de imagem estática	129
Figura 68 – Resistência de aderência à tração das amostras REF e CARB E da olaria 1	130
Figura 69 – Resistência de aderência à tração das amostras CARB E da olaria 2.	131

Figura 70 – Resistência de aderência à tração das amostras CARB E da olaria 1 e olaria 2	132
Figura 71 – Identificação dos extensômetros virtuais pela correlação de imagem digital.....	135
Figura 72 – Correlação de imagem digital processadas no NCorr.....	135
Figura 73 – Curva resistência à tração x deformação específica obtidos por correlação de imagem digital.....	136
Figura 74 – Módulo de Elasticidade das amostras REF – olaria 1	138
Figura 75 – Módulo de Elasticidade para as amostras CARB E da olaria 1.....	139
Figura 76 – Módulo de Elasticidade da amostra CARB E x REF da olaria 1 de toda a amostra	140
Figura 77 – Módulo de Elasticidade para as amostras CARB E da olaria 2.....	142
Figura 78 – Módulo de Elasticidade para as amostras CARB E olaria 1 e olaria 2.	143
Figura 79 - Tela gráfica de aquisição de dados para cálculo do coeficiente de Poisson	146
Figura 80 – Evolução das deformações específicas da correlação de imagem digital para o cálculo do coeficiente de Poisson	148
Figura 81 – Resultados do coeficiente de Poisson.....	149
Figura 82 – Coeficientes de Poisson das amostras REF – olaria 1.....	150
Figura 83 – Coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 1	151
Figura 84 – Coeficientes de Poisson das amostras REF x CARB E – olaria 1	152
Figura 85 – Coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 2	153
Figura 86 – Coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 1 x olaria 2...	154
Figura 87 – Análise estatística PCA Coeficiente de Poisson x Módulo Elástico	157
Figura 88 – Estudo de Malha com elemento finito de 0,25 cm.....	158
Figura 89 – Estudo de Malha com elemento finito de 0,5 cm.....	158
Figura 90 – Estudo de Malha com elemento finito de 0,75 cm.....	159
Figura 91 - Estudo da influência da malha nos resultados de tensão e deformação específica	159
Figura 92 – Aplicação do carregamento no modelo numérico para avaliação do coeficiente de viscosidade	161
Figura 93 – Ruptura interfacial da simulação numérica	162
Figura 94 – Diferença de médias entre os modelos numéricos no estudo de sensibilidade interfacial	163

Figura 95 – Pressão de contato interfacial ao variar o coeficiente de viscosidade..	164
Figura 96 – Local de medição da resistência de aderência à tração interfacial ao variar o coeficiente de viscosidade.....	165
Figura 97 – Resistência de aderência à tração no momento da ruptura ao variar o coeficiente de viscosidade	166
Figura 98 – Estudo do coeficiente de viscosidade - Experimental x Numérico	167
Figura 99 – Distribuição das tensões na direção vertical do modelo numérico REF169 e REF170	170
Figura 100 – Porcentagem de tensões entre camadas distribuídas na direção vertical (S22) dos modelos numéricos REF169 e REF170.....	171
Figura 101 – Resistência de aderência à tração Experimental x Numérico – REF.	171
Figura 102 – Porcentagem de tensões entre camadas distribuídas na direção vertical (S22) dos modelos numéricos CARB E OL1 78 e 79.....	173
Figura 103 – Resistência de aderência à tração Experimental x Numérico – CARB E OL1	173
Figura 104 – Porcentagem de tensões entre camadas distribuídas na direção vertical (S22) dos modelos numéricos CARB E OL2 143 e 155.....	175
Figura 105 – Resistência de aderência à tração Experimental x Numérico – CARB E OL2	175
Figura 106 – Resistência de aderência à tração da simulação numérica	177
Figura 107 – Diferença de médias de resistência de aderência à tração entre os modelos numéricos	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espessura limites para argamassa de revestimento	32
Tabela 2 – Propriedades mecânica e física dos materiais utilizados na simulação numérica.....	57
Tabela 3 – Propriedade das argamassas utilizadas no Ansys	58
Tabela 4 – Parâmetros físicos e mecânicos do substrato concreto, argamassa e da interface	60
Tabela 5 – Resultados das propriedades mecânicas e elásticas de Drougkas et al. (2020).....	76
Tabela 6 – Resultados do coeficiente de Poisson pelo método da correlação de imagem digital	77
Tabela 7 – Propriedades dos materiais para o tijolo e interface de argamassa	81
Tabela 8 – Resultados da simulação numérica de tensão biaxial	82
Tabela 9 – Propriedades dos materiais para o tijolo e interface de argamassa	85
Tabela 10 – Propriedades não lineares da interface	85
Tabela 11 – Propriedades mecânicas para modelagem numérica de alvenaria	90
Tabela 12 – Número de amostras confeccionadas	95
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de caracterização dos blocos cerâmicos da Olaria 1 e Olaria 2	95
Tabela 14 – Resultado de caracterização da argamassa no estado fresco	97
Tabela 15 – Resultado de caracterização da argamassa no estado endurecido	97
Tabela 16 – Tabela para o pré-processamento da imagem: Total de fotos e duração do ensaio de resistência de aderência à tração para amostra REF	105
Tabela 17 - Tabela para o pré-processamento da imagem: Cálculo do passo de carga no ensaio de resistência de aderência à tração	105
Tabela 18 – Parâmetros numéricos para estudo de sensibilidade interfacial.....	112
Tabela 19 – Estudo de sensibilidade dos parâmetros inelásticos da interface.....	113
Tabela 20 – Resultados estatística de resistência de aderência à tração da olaria 1	130
Tabela 21 – Resultados da ANOVA da resistência de aderência à tração das amostras REF x CARB E da olaria 1	131
Tabela 22 – Resultados estatística de resistência de aderência à tração da olaria 2	132

Tabela 23 – Resultados estatística de resistência de aderência à tração das amostras CARB E olaria 1 x olaria 2.....	133
Tabela 24 – Resultados da ANOVA da resistência de aderência à tração das amostras CARB E olaria 1 x olaria 2.....	133
Tabela 25 – Resultados dos ensaios experimentais de resistência de aderência à tração	134
Tabela 26 – Análise estatística do módulo elástico das amostras REF – olaria 1...	138
Tabela 27 – Análise estatística do módulo elástico para as amostras CARB E – olaria 1	139
Tabela 28 – Resultados da ANOVA dos módulos elásticos das amostras CARB E x REF – olaria 1	141
Tabela 29 - Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias do Módulo Elástico REF x CARB E da olaria 1	141
Tabela 30 – Análise estatística do módulo elástico para as amostras CARB E – olaria 2	142
Tabela 31 – Resultados da ANOVA dos módulos elásticos das amostras CARB E olaria 1 x olaria 2.....	144
Tabela 32 - Testes simultâneos de Tukey para as diferenças de médias do módulo elástico CARB E da olaria 1 x olaria 2	144
Tabela 33 – Análise estatística para os coeficientes de Poisson das amostras REF – olaria 1	150
Tabela 34 – Análise estatística para os coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 1	151
Tabela 35 – Resultados da ANOVA dos coeficientes de Poisson das amostras REF x CARB E da olaria 1	152
Tabela 36 – Análise estatística para os coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 2	154
Tabela 37 – Resultados da ANOVA dos coeficientes de Poisson das amostras CARB E olaria 1 x olaria 2	155
Tabela 38 – Coeficientes de Poisson na análise lateral e central das amostras.....	155
Tabela 39 – Resumo dos resultados dos coeficientes de Poisson das amostras REF, CARB e CARB E das olarias 1 e 2.....	156
Tabela 40 – Tempo computacional requerido para conduzir as análises.....	160

Tabela 41 – Análise das tensões \times coeficiente de viscosidade para estudos de sensibilidade interfacial	161
Tabela 42 – Análise estatística do estudo de sensibilidade interfacial do coeficiente de viscosidade.....	162
Tabela 43 – Teste simultâneo para as diferenças de médias	163
Tabela 44 – Resultados R_t e módulo de elasticidade E dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras REF	167
Tabela 45 – Resultados R_t e módulo de elasticidade E dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras CARB E OL1	168
Tabela 46 – Resultados R_t e módulo de elasticidade E dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras CARB E OL2	168
Tabela 47 – Resultados do coeficiente de Poisson dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras REF	168
Tabela 48 – Resultados do coeficiente de Poisson dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras CARB E OL1	169
Tabela 49 – Resultados do coeficiente de Poisson dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras CARB E OL2	169
Tabela 50 – Resultado estatístico de resistência de aderência à tração REF experimental \times numérico	172
Tabela 51 – Resultados do Teste t pareado aplicada nas amostras REF experimental \times numérico	172
Tabela 52 – Resultado estatístico de resistência de aderência à tração CARB E OL1 experimental \times numérico	174
Tabela 53 – Resultados do Teste t pareado aplicada nas amostras CARB E OL1 experimental \times numérico	174
Tabela 54 – Resultado estatístico de resistência de aderência à tração CARB E OL2 experimental \times numérico	176
Tabela 55 – Resultados do Teste t pareado aplicada nas amostras CARB E OL2 experimental \times numérico	176
Tabela 56 – Resultado estatístico de resistência de aderência à tração CARB E OL2 experimental \times numérico	178
Tabela 57 – Testes simultâneos de Tukey para as diferenças de médias da resistência de aderência à tração da simulação numérica	178

Tabela 58 – Resultados do processamento das amostras experimentais CARB E pela correlação de imagem digital.....	198
Tabela 59 – Resultados do processamento das amostras experimentais REF pela correlação de imagem digital.....	224

SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BS	British Standard
CARB	Carbonatada
CARB E	Carbonatada Envelhecida
CID	Correlação de Imagem Digital
EN	Europäischen Norm
FRX	Fluorescência de Raios-X
GMAT	Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem
ISO	International Organization For Standardization
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
OL 1	Olaria 1
OL 2	Olaria 2
PCA	Análise de Componentes Principais
REF	Referência
RILEM	Réunion International Des Laboratories d'Essais et Matériaux
v-FEX	Coeficiente de Poisson da Face Externa
v-CEN	Coeficiente de Poisson da Região Central
v-INT	Coeficiente de Poisson da Interface
E-FEX	Módulo Elástico da Face Externa
E-CEN	Módulo Elástico da Região Central
E-INT	Módulo Elástico da Interface

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E HIPÓTESES	24
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 Objetivo Geral	25
1.2.2 Objetivos Específicos	25
1.3 JUSTIFICATIVA	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	29
2.2 FATORES QUE AFETAM A DURABILIDADE DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO	32
2.3 ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO EM SUBSTRATOS ..	34
2.4 MECANISMOS DE ADERÊNCIA EM ARGAMASSAS ENDURECIDAS	39
2.5 FENÔMENO DA CARBONATAÇÃO	41
2.6 PROPRIEDADES DOS SUBSTRATOS	48
2.7 CARACTERÍSTICAS DE SUBSTRATOS CERÂMICOS	53
3. MÉTODOS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS	56
3.1 ESTUDOS NUMÉRICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	56
3.2 MÉTODO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL (CID)	62
3.3 ESTUDOS DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL APLICADA EM SUBSTRATOS REVESTIDOS POR MATRIZ CIMENTÍCIA	73
3.4 TRABALHOS DE ANÁLISE NUMÉRICA DE ALVENARIA	78
4 MATERIAIS E MÉTODO	92
4.1 BLOCOS CERÂMICOS PARA A CONFECÇÃO DOS SUBSTRATOS	94
4.1.2 Processo de Carbonatação	97
4.1.3 Processo de Envelhecimento Acelerado aplicado nas Argamassas de revestimentos	98
4.2 DETERMINAÇÃO DA RESOLUÇÃO DA CÂMERA UTILIZADA POR CID	98
4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MALHA DE DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS NA REGIÃO DE INTERESSE DA ARGAMASSA	99
4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO COM USO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	100

4.4.1	Verificação do Erro e da Precisão da Detecção de Movimento no Software Ncorr.....	104
4.4.2	Sincronização das imagens capturadas para o ensaio de resistência de aderência à tração com a correlação de imagem digital	104
4.4.3	Processamento das imagens tratadas no programa de correlação de imagem digital	106
4.5	MODELAGEM NUMÉRICA DOS BLOCOS CERÂMICOS REVESTIDOS COM ARGAMASSA.....	107
4.5.1	Limitação dos modelos numéricos	108
4.5.2	Estratégia de modelagem numérica dos blocos cerâmicos, da argamassa e da interface substrato cerâmico - argamassa.....	108
4.5.3	Interface de ligação numérica substrato-argamassa	110
4.5.4	Elemento finito utilizado na modelagem numérica.....	114
4.5.5	Teste de malha do modelo numérico.....	114
4.5.6	Teste do comportamento da viscosidade do elemento finito C3D8R	115
4.6	Análise Estatística dos Resultados Obtidos por CID e Modelos Numéricos.....	116
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	117
5.1	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MALHA DE AMOSTRAS CARBONATADAS COM ENVELHECIMENTO ACELERADO E SEM ENVELHECIMENTO ACELERADO	117
5.2	AVALIAÇÃO DA DETECÇÃO DE MOVIMENTO PELO NCORR.....	125
5.3	AVALIAÇÃO DO ERRO DE LEITURA DE CAPTURA DE IMAGEM.....	128
5.4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	129
5.5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE POR CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL.....	134
5.6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DO COEFICIENTE DE POISSON POR CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL.....	145
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA.....	158
6.1	AVALIAÇÃO DA MALHA DO MODELO NUMÉRICO	158

6.2 AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE INTERFACIAL DO COEFICIENTE DE VISCOSIDADE.....	160
6.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	167
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	180
7.1 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	183
REFERÊNCIAS.....	185
APÊNDICE A – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS EXPERIMENTAIS CARB E PELA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	198
APÊNDICE B – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS EXPERIMENTAIS REF PELA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL.....	224
APÊNDICE C – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS EXPERIMENTAIS E OS MODELOS NUMÉRICOS	234

1 INTRODUÇÃO

Por vários anos, os estudos referentes aos materiais de construção acompanharam a evolução tecnológica, pois o homem tem se preocupado em obter maior durabilidade de suas obras. Um dos materiais em constante evolução é a argamassa de revestimento que tem sido alvo de diversas investigações encontradas nos estudos de Torres, Veiga e Freitas (2018), Bellei et. al 2021, Arnold (2021) e Oliveira (2022), Travincas et. al (2023) principalmente no que se refere à aderência, cuja complexidade do objeto exige a caracterização dos materiais envolvidos, argamassa e substrato, bem como as condições em que as argamassas de revestimentos estão imersas nas condições de exposição e técnicas executivas e técnicas executivas.

Verifica-se, na indústria da construção civil, uma crescente exigência do meio técnico para padronização e normalização de propriedades mecânicas, físicas e química dos materiais de construção a fim de que o fabricante comprove a qualidade do produto fornecido ao mercado. Muitas dúvidas sobre o real funcionamento do fenômeno de aderência ainda não podem ser respondidas com relação aos mecanismos envolvidos.

Nesse contexto, Carasek (2017), Vaz e Carasek (2019) descrevem que a aderência está ligada com a extensão e a resistência do contato entre uma argamassa e uma base porosa. A base porosa é representada pelo substrato de alvenarias de tijolos cerâmicos, blocos de concreto, bloco autoclavado entre outros. Os mecanismos de aderência ocorrem tanto nas argamassas frescas, denominada de adesão inicial, como na argamassa endurecida, especificada como a aderência propriamente dita. Segundo a mesma autora, a adesão inicial relaciona-se com as características reológicas durante o preparo da argamassa.

As argamassas de revestimento são produtos obtidos das misturas de cimento, agregado miúdo e água com ou sem aditivos e em proporções adequadas. São utilizadas na execução de revestimentos de paredes e deve ter desempenhos padronizados em relação a exigências tais como: acústica, estanqueidade e conforto térmico. A aderência da argamassa de revestimento sobre o substrato cerâmico em superfícies rugosas é frequentemente utilizada para aumentar a ligação interfacial, segundo Zanelatto et. al (2019), apesar de existir poucos estudos que avaliam às implicações da resistência à tração e da interação entre os materiais.

Nesse sentido, há questionamentos ainda não respondidos, como o porquê as argamassas de revestimentos de fachadas podem apresentar patologias relacionadas à fissuração, deslocamento do substrato cerâmico, bem como perda de resistência interfacial substrato-argamassa e retração. Uma das hipóteses consiste no estudo da aderência que ocorre entre o material argamassa e o material cerâmico, já que é uma propriedade que abrange de diversos parâmetros e conceitos que dificultam o seu entendimento. Sabe-se que não há uma teoria universal que explica por completo esse mecanismo e sim hipóteses ainda em estudo, como por exemplo, se a influência da força capilar ou de Van der Waals são suficientes para garantir o contato entre os materiais.

Estudos experimentais, conforme Paulon (1991), Carasek (1996) e Mindess (1996) já indicaram que o mecanismo de aderência influencia na resposta mecânica, bem como na durabilidade de materiais cimentícios, como é o caso da argamassa de revestimento.

No estado endurecido da argamassa, Masuero e Stolz (2015) definem que o fenômeno mecânico está relacionado ao intertravamento das partículas constituintes da argamassa e que depende da extensão da adesão, definida como a relação entre a superfície de contato efetiva e a área total potencial que pode ser ligada. As autoras mediram a percentagem efetiva de área de não contato da argamassa a ser lançadas da altura de 30 cm e 100 cm para substratos do tipo acrílico, polietileno e vidro com o auxílio de uma 3D Laser Scanner. A energia de lançamento das argamassas influencia diretamente na aderência da argamassa ao substrato. À medida que a altura de lançamento foi elevada de 30 cm para 100 cm, houve uma redução da área de não contato no substrato de todas as amostras.

Existem diversos fatores que afetam a durabilidade e desempenho da interface argamassa-substrato, como por exemplo a carbonatação da matriz cimentícia, como também os constantes ciclos de molhagem e secagem decorrentes e aquecimento e resfriamento causados pelas intempéries que a argamassa de revestimento sobre um substrato cerâmico está sujeito e que pode contribuir em um efeito deletério da aderência, conforme observados nos trabalhos de Wolf e Dal Molin (1989), Cultrone, Sebastián e Huertas (2005), Santaguida et al. (2005), Freitas Jr. et al. (2019), Tolentino Souza et al. (2021), Kosiachevskyi et al. (2023) e Lima et al. (2023).

Observa-se que o mecanismo de aderência em base cimentícia tem sido alvo de inúmeras pesquisas, porém os parâmetros que determinam o contato superficial das matrizes cimentícias ainda não são compreendidos. Nesse sentido, as pesquisas não se consolidaram no entendimento da aderência no estado endurecido principalmente em argamassa de revestimentos e argamassas carbonatadas envelhecidas e a sua interação com substratos cerâmicos frente às respostas mecânicas sob tração.

Dessa maneira, o programa experimental desta Tese refere-se ao estudo das propriedades elásticas de argamassa de revestimentos não carbonatadas e argamassas carbonatadas envelhecidas submetidas ao ensaio de aderência à tração. Os ensaios foram realizados conjuntamente com pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Unisinos (PPGEC), especificamente do grupo de pesquisa em Materiais e Reciclagem (GMat).

Neste contexto, esta tese justifica-se por contribuir no desenvolvimento de uma metodologia para análise das propriedades mecânicas da argamassa de revestimento quando submetido a esforços de tração, considerando o efeito simultâneo das propriedades da argamassa de revestimento e de sua aderência ao substrato, a fim de entender o comportamento destas matrizes cimentícias, uma vez que as normas técnicas especificam somente valores mínimos de resistência de aderência à tração na ligação interfacial de argamassa de revestimentos. O método avaliativo é o de correlação de imagem digital (CID) aplicado no ensaio de tração em amostras de pequenas dimensões da argamassa de revestimento sobre substratos cerâmicos e, em segundo momento, prever o comportamento mecânico por simulação numérica. A correlação de imagem digital é uma técnica de medição óptica que, segundo Liu et al. (2015) e Nguyen et al (2017), utiliza imagens digitais para determinar as deformações e movimentações em materiais, uma vez que compara as imagens de uma superfície antes e depois da aplicação de um carregamento. Essa técnica é baseada em algoritmos que procuram por correspondências entre pontos em imagens de referência e imagens deformadas. Essas correspondências são usadas para calcular a magnitude e direção dos deslocamentos e deformações. O procedimento consiste na aplicação de uma malha de pontos pretos distribuídos aleatoriamente sobre a superfície em que se pretende analisar e, em seguida, com uma câmera de alta resolução é feita a captura da amostra, chamada de imagem de referência. Aplica-se então carregamento na

amostra por meio de uma máquina de ensaio e faz-se a captura de imagens sucessivas para a obtenção de imagens deformadas.

O método de correlação de imagem digital pode ser aplicado em uma ampla variedade de materiais, incluindo metais, plásticos compósitos, cerâmicas. Neste trabalho pretende-se utilizá-la em argamassas de revestimento sobre substrato cerâmico submetidas ao ensaio de aderência à tração.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E HIPÓTESES

Na construção civil é possível elaborar diversos tipos de argamassas de revestimento para aplicação em substratos cerâmicos, sendo que existem diferenças de comportamento mecânico frente às condições em que elas são expostas, principalmente quando submetidas à ciclos de molhagem e resfriamento proveniente da chuva, bem como à carbonatação desenvolvida progressivamente na matriz cimentícia. Esses fatores podem afetar as propriedades elásticas, no que diz respeito à zona interfacial de interação entre a argamassa e o substrato cerâmico, a resistência de aderência à tração, módulo de elasticidade, deformações específicas e coeficientes de Poisson. Dessa maneira, o presente estudo buscou viabilizar um programa experimental utilizando correlação de imagem digital que respondam as seguintes hipóteses:

- a) Existe variabilidade na resistência de aderência à tração de argamassas de revestimentos e argamassas carbonatadas sujeitas ao envelhecimento acelerado sobre substratos cerâmicos.
- b) O método da correlação de imagem digital é capaz de avaliar deformações específicas do ensaio de tração para amostras de pequenas dimensões, como é o caso da argamassa de revestimento sobre substratos cerâmicos.
- c) As dimensões reduzidas das amostras permitem atingir uma resolução suficiente na avaliação por correlação da imagem digital que permitem explicar, quantitativamente, a resistência de aderência à tração, a variação do módulo de elasticidade, deformações específicas e coeficientes de Poisson quando aplicado correlação de imagem digital em diferentes regiões de uma mesma amostra.
- d) É possível a validação das respostas das propriedades elásticas obtidas por correlação de imagem digital através de simulação numérica computacional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é sistematizar uma metodologia de aplicação da correlação de imagem digital e modelagem numérica para a avaliação das propriedades elásticas de argamassas de revestimento aplicadas sobre substratos cerâmicos quando submetidos a esforços de tração.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- a) Aplicar a correlação de imagem digital para a determinação de propriedades elásticas de argamassa de revestimento em substrato cerâmico submetidos a tração;
- b) Avaliar a heterogeneidade nas deformações observadas em ensaios de tração em um mesmo tipo de revestimento aplicado sobre substrato cerâmico;
- c) Avaliar o efeito simultâneo da carbonatação e do envelhecimento por ciclos térmicos no comportamento elástico de argamassas de revestimento;
- d) Modelar numericamente, em elementos finitos, o ensaio de aderência à tração da argamassa no substrato cerâmico de alvenaria com a aplicação de elementos coesivos lineares e não lineares a fim de predição comportamental das amostras e da influência da zona interfacial de aderência de argamassa;
- e) Analisar e comparar as respostas mecânicas obtidas numericamente com os modelos experimentais da correlação de imagem digital.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os blocos cerâmicos cujo assentamento e revestimento é realizado com argamassas vem sendo utilizados há milênios, sendo hoje ainda amplamente

utilizados em fachadas e paredes internas de edifícios em nosso país. Observa-se que apesar de seu constante uso, ainda há carência de definições normativas e estudos técnico-científicos, o que resulta em muitas manifestações patológicas, o que pode aumentar a geração de resíduos e prejuízos ao usuário em função da necessidade de substituição desses revestimentos antes do término da vida útil de projeto, quando, em função de deficiências na aderência, ocorrem descolamentos.

Os revestimentos cimentícios em fachadas de edificações estão sujeitos a ciclos de aquecimento e resfriamento, e também a ciclos de molhagem e secagem o que contribui para o surgimento de esforços de tração e cisalhamento ao longo de sua vida útil.

Simultaneamente, ao longo da vida útil do revestimento, tanto a camada de argamassa quanto a interface substrato cerâmico/argamassa pode estar sujeito ao processo de carbonatação e ao envelhecimento.

A carbonatação aumenta suas propriedades elásticas como observados nos trabalhos de Castellote et al. (2009), Pham (2013), e You, Jeong e Hyng (2014). Mas, a falta de compreensão de alguns fatores relacionadas à carbonatação como a relação de tensões e deformações quanto à resistência de aderência em argamassas sujeitas à carbonatação como também ao envelhecimento acelerado faz com que esse tema ainda esteja em discussão conforme descrito nos estudos de Poletanović et al. (2019), Maia, Ramos e Veiga (2019), Maia et al. (2021), Jin, Tian e Li (2022).

O efeito da carbonatação ocorre simultaneamente ao envelhecimento microestrutural da argamassa, supondo-se que de forma contínua contribui para o aparecimento de fissuras que se propagam até a ocorrência do deslocamento.

Para Costa (2014) não há compreensão sobre a aderência e os mecanismos que determinam o contato superficial de substratos cimentícios, seja pela falta de explorar a influência das características superficiais no contato de sua interface ou pela falta de técnica de caracterização e estudo sistêmico da interação entre os materiais.

Uma das formas de medição de fissuras e deformações de uma amostra sólida é pela técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) e que pode ser aplicada para prever o comportamento mecânico, como por exemplo, de corpos de provas de argamassas. Dessa maneira, é possível fazer a correlação de ensaios de tração e

relacionar as suas tensões e deformações que ocorrem na interface substrato cerâmico argamassa de amostras carbonatadas e não carbonatadas.

Outra forma de predição do comportamento mecânico da zona interfacial de material sólido é realizada pela modelagem numérica. Porém, no âmbito deste trabalho, não foi possível encontrar pesquisas, dados e exemplos que demonstrem o comportamento de argamassas de revestimento e argamassas carbonatadas envelhecidas sob o ensaio de tração pela utilização da correlação de imagem digital e análise numérica. Uma possível justificativa para esta lacuna pode estar associada a necessidade de avaliações em amostras de pequenas dimensões, o que resulta da necessidade de se desenvolver uma metodologia avaliativa para minimizar a interferência de fatores inerentes ao ensaio desde o preparo das amostras em escalas menores e, conseqüentemente, da forma em se avaliar a intensidade de tensões e das propriedades elásticas que se diferem, por exemplo, de painéis de alvenaria de maiores dimensões. Nesse sentido, aplicar a correlação de imagem digital para o objeto de estudo desta tese, consiste em desenvolver uma técnica avaliativa da distribuição do padrão de pontos na área de interesse, tamanho da amostra, distância focal, definição da resolução da câmera para a captura de imagem, iluminação e detecção de translação de movimento de corpo rígido.

A precisão de medição das propriedades elásticas em materiais de pequenas deformações é um desafio, uma vez que, segundo McClung et al. (2011), a utilização de métodos convencionais como o extensômetro pode afetar a medição de materiais devido a realização minuciosa da solda nos terminais do extensômetro bem como na rigidez e peso adicional imposta no material durante o processo de colagem. Em contrapartida, Pan (2018) descreve a utilização da correlação de imagem digital como um método óptico e eficaz na determinação de medições sem contato e que pode ser utilizado para a determinação das propriedades elásticas como o módulo elástico, deformações e o coeficiente de Poisson.

Ressalta-se ainda que as normas técnicas como a ABNT NBR 13749:2013, ABNT NBR 15575-4:2013 e ABNT NBR 13528-3:2019 direcionam, de forma isolada, as propriedades físicas e mecânicas para os substratos bem como para as argamassas de revestimento e não explicam a interação interfacial existente entre os dois materiais. Quanto à análise numérica não há dados de pesquisas relacionados à simulação de argamassas de revestimentos sobre o substrato cerâmico submetidas à tração. A grande maioria refere-se à outros ensaios

computacionais como os de Meyer (2011) que explorou a resistência à compressão, tensões principais e deformações plásticas na ruptura; Drougkas, Roca e Molins (2013) realizaram um conjunto de ensaios numéricos para a determinação da resistência à compressão de painéis de alvenaria a partir de leis constitutiva combinada por fissuras plásticas; Capraro et al. (2019) avaliaram numericamente a influência da forma e dimensão de corpos de provas de argamassa estando sob compressão; Zhang et al. (2023) realizaram simulação numérica do comportamento do dano da interface substrato cerâmico-argamassa induzida por retração.

Portanto, este projeto dedica-se a conhecer melhor os efeitos da exposição a fatores naturais de degradação (como a carbonatação e as variações térmicas) e da aderência da matriz cimentícia aplicada sobre substrato cerâmico, a fim de explorar o seu entendimento, bem como nortear parâmetros importantes a respeito dos seus mecanismos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

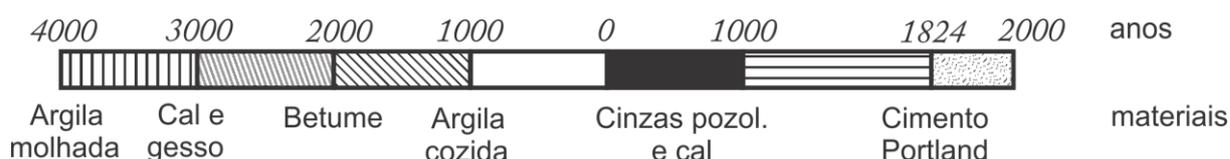
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um dos primeiros materiais empregados para unir e revestir elementos construtivos foi a argila molhada. Para Domone e Illston (2010), as argamassas feitas de cal e areia foram usados pelos gregos há três mil anos. Os egípcios empregavam argamassa na construção das pirâmides e túmulos há 2.000 a.C. Mas durante o segundo século a.C, os romanos utilizaram um cimento com mistura de cal e cinzas vulcânicas de uma fonte perto de Pozzuoli (Itália) resultando no efeito pozolânico no cenário da argamassa.

Esta cinza continha sílica e alumina em uma forma quimicamente ativa que combinada com a cal resultava em silicatos e aluminatos de cálcio.

Apesar dos poucos registros históricos sobre a utilização de argamassas como assentamento ou revestimento relatados na arqueologia e história da arquitetura, Martinelli e Helene (1991) elaboraram uma ordem cronológica de sua composição apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Escala cronológica dos materiais utilizados em argamassas como assentamento ou revestimento



Fonte: Adaptado de Martinelli e Helene (1991)

Alexandre et al. (2018) explicam que a variação das propriedades dos substratos cerâmicos influencia diretamente na eficiência dos sistemas de revestimentos das construções. Esta variação das propriedades da cerâmica decorre, como por exemplo, da variação de composição da matéria-prima e das diferentes reações da matéria-prima sob a ação de calor influenciada pela duração do ciclo e da temperatura de queima. Estes fatores definem o tipo de produto produzido bem como interfere em suas características técnicas, como a porosidade e a rugosidade superficial.

A matéria-prima de argilas cerâmicas consiste em argilas, quartzo, óxido de ferro e carbonato. Para Holanda e Sousa (2005), os materiais cerâmicos são considerados complexos, uma vez que cada um de seus componentes constituintes contribuem em suas propriedades finais. Os autores estudaram o processamento de revestimentos cerâmicos compostos de argila, calcário e quartzo do Brasil concluindo que o composto calcáreo e a máxima temperatura de queima, em torno de 1000 °C, afetam na formação do silicato de cálcio e contribui na densificação dos revestimentos cerâmicos. O principal efeito observado do composto calcáreo foi o aumento da absorção de água e redução da retração linear.

Neste sentido, Cava et al. (2002) formularam uma série de massas cerâmicas, porém sem a presença do carbonato. O objetivo de seus estudos foi analisar, a partir de matérias-primas convencionais e não convencionais, o efeito da absorção de água e de sua retração em função da temperatura. Para isso, acompanharam as alterações mineralógicas e microestruturais das massas decorrentes do processo de queima por meio de microscopia eletrônica de varredura. Os autores concluíram que à medida que a temperatura se elevou houve redução da absorção de água das massas cerâmicas e aumento da retração linear.

A influência da temperatura nas propriedades da argila para fabricação de produtos cerâmicos pode ser vista em Monteiro e Vieira (2004), os quais caracterizaram duas argilas na produção cerâmica vermelha por meio de difração de raio-X, análises químicas dos materiais constituintes, bem como mensuraram parâmetros de granulométricos e de plasticidade. Quanto às propriedades físicas e mecânicas, realizaram ensaios de absorção de água, retração e resistência à flexão. Verifica-se que não há grande variação de propriedades entre o mesmo produto fornecido por diferentes olarias, e que não existe uma regra que permita a seleção dos produtos cerâmicos em função das propriedades que importam para a aderência. De forma geral foram observados que o aumento da temperatura de queima reduziu a absorção de água, em contrapartida, houve aumento da retração linear. Para temperaturas de queima a 850 °C a absorção de água observada entre as olarias foi de 22% a 24% com 3% de retração linear. Para a máxima temperatura de queima, a absorção de água variou entre 6% a 8% com retração linear entre 11% a 12%.

Para o entendimento da aderência podem ser citados os principais estudos que contribuíram no desenvolvimento da tese. Sabe-se que um dos primeiros

autores a contribuir sobre a coesão vem desde 1805 com o trabalho de Young (1805). Palmer e Parsons (1934), Kampf (1963), Boyton e Gutschick (1964), Tabor (1975) e Lawrence e Page (1994), Ramos et al. (2012), Martínez et al. (2013), Lukasik, Michalowski e Michalak (2020), Melo et al. (2020) e Salustio et al. (2022) apresentaram os resultados de modelos experimentais quanto às propriedades mecânicas de argamassas e os fatores que interferem na aderência com substratos cerâmicos.

Brezezinski, Collatto e Kazmierczak, (2007) buscaram analisar a diferença de propriedades de uma argamassa industrializada quando aplicada sobre substratos de bloco cerâmico de vedação, bloco de concreto e tijolo maciço com a construção de doze mini-paredes de alvenaria. O substrato se diferiu em relação ao seu preparo, com e sem chapisco, para a idade dos ensaios realizados em 7 e 28 dias. A Figura 2 apresenta uma análise visual da microestrutura dos substratos ensaiados, onde é possível observar a interface do substrato e chapisco, bem como a interface da argamassa e substrato.

Figura 2 – Análise visual da estrutura de um substrato cerâmico e argamassa.



Fonte: Brezezinski, Collatto e Kazmierczak (2007)

Este capítulo apresenta, de forma resumida, os mecanismos que contribuem na aderência de argamassa sobre substratos superficiais porosos tais como blocos cerâmicos ou estruturas de concreto. Nos itens a seguir são detalhados os fatores intervenientes do fenômeno da aderência buscando correlacionar parâmetros de rugosidades superficiais do substrato com a retenção de água, consistência e plasticidade, teor de ar incorporado e as propriedades da adesão das argamassas com a aderência entre os substratos em argamassas no estado fresco. Por fim, têm-se os mecanismos de aderência entre substratos e argamassas endurecidas e sua correlação no comportamento mecânico do material quanto à porosidade e rugosidade.

2.2 FATORES QUE AFETAM A DURABILIDADE DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

No cenário econômico é comum empresas buscarem qualidade na execução de serviços com redução de custos. Esses resultados são possíveis desde que haja racionalização das etapas de serviços das partes de uma edificação, tal como compatibilização de projetos e execução. O somatório do desempenho de cada parte reflete no desempenho da edificação como um todo. Entre essas etapas de serviços encontra-se os revestimentos de argamassas.

A ABNT NBR 7200:1998 especifica que os substratos de revestimentos devem ser planos, nivelados e possuírem prumos para o recebimento do revestimento. Uma vez que, em seu item 8.1.4, o grau de absorção da base, proporciona a microancoragem e a rugosidade superficial está relacionada com a macroancoragem, ambos influenciam na aderência do revestimento. Neste ponto, ABNT NBR 13749:2013 estabelece o limite de prumo da argamassa de revestimento de paredes internas no valor de $H/900$, sendo H a altura da parede. Os limites da espessura da argamassa de revestimento estão especificados na Tabela 1

Tabela 1 – Espessura limites para argamassa de revestimento

Revestimento	Espessura
Paredes internas	5 mm a 20 mm
Paredes externas	20 mm a 30 mm

Fonte: Adaptado da NBR 13749:2013

A norma europeia *British Standard* (BS 5262:1976) faz recomendações para o preparo de substratos externos que irão receber revestimentos, bem como direciona a sua manutenção e reparo. Esta norma relata que a exposição das camadas de revestimentos é diretamente afetada quando há combinação do frio, vento, sol e chuva, cujos efeitos dependem do seu grau de exposição. O item 18 da mesma norma especifica que há três categorias de exposição:

a) condição severa: quando há exposição fortemente das forças da chuva e vento. É aplicada para edificações localizadas em regiões costeiras, morros e construção projetada para prédio de maior altura em relação aos vizinhos;

b) condição moderada: as paredes externas são parcialmente protegidas por beirais ou por outra edificação de mesma altura em seu entorno. Geralmente se aplica a cidade e subúrbio;

c) condição protegida: aplica-se a distritos com incidência de chuvas moderadamente baixas, cujas paredes são protegidas das intempéries ou por edificação de mesma ou maiores alturas. São destinadas a edificação térreas e de um pavimento.

De acordo com as condições de exposição das camadas de revestimentos, o item 32 da BS 5262:1976 especifica para o chapisco (“*spatterdash*”) uma espessura limite de 5 mm, o emboço (“*undercoat*”) deve ser maior que 8 mm e menor que 16 mm para uma camada de revestimento e reboco (“*final coat*”) deve ter 6 mm de espessura.

Nesse sentido, a norma americana *American Society for Testing and Materials* (ASTM, C926) especifica para a camada do emboço (“*brow coats*”) um valor limite de 19 mm e para o reboco (“*finish coat*”), o valor de 3 mm.

Já a norma francesa NF DTU 26.1 P1-1 do *Centre Scientifique et Technique du bâtiment* (CSTB, 2008) descreve o preparo e a execução de revestimentos de argamassa de cimentos e limita o chapisco (“*gobetis d’accrochage*”) a 5 mm, 15 a 20 mm para emboço (“*deuxième couche*”) e a camada de reboco (“*couche de finition*”) geralmente é da ordem de 5 mm a 8 mm mas nunca inferior a 3 mm.

Observa-se que apesar de diferentes padronizações normativas quanto à espessura da camada de revestimento, todas elas exigem condições técnicas mínimas para garantia do preparo da base para que os mecanismos da aderência superficial de substratos ocorram.

No Brasil, a ABNT NBR 15575-4:2013 é a norma que estabelece a qualidade e a durabilidade de sistemas de vedações verticais das edificações em apresentar um desempenho mínimo ao longo de sua vida útil sob condições de uso. Nesse sentido, a durabilidade dos materiais da edificação quando expostos ao uso e às intempéries não deve apresentar manifestações patológica que comprometam a integridade da edificação e do seu desempenho. Os revestimentos de argamassas são materiais que estão com maior incidência do intemperismo e são expostos às ações diversas de vento, calor, umidade, vibrações, carbonatação, deformações de solicitações do uso e ocupação dentre outros.

Dentre as manifestações patológicas existentes em fachadas de edificações deve-se levar em consideração a importância do entendimento dos mecanismos de aderência na interface substrato cerâmico/argamassa.

Dentre os processos de degradação dos revestimentos podem ser citados a carbonatação e o processo de envelhecimento acelerado de argamassas provenientes dos ciclos de molhagem e secagem, consequência do intemperismo.

2.3 ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO EM SUBSTRATOS

A perda de aderência entre a argamassa e substratos de revestimentos cerâmicos geralmente causa manifestações patológicas e gera prejuízos econômicos e pode contribuir com o efeito deletério dos sistemas construtivos de uma edificação.

Para Carasek (1996), a aderência e adesão são empregados como sinônimos, embora há similaridade os mecanismos envolventes entre os termos são distintos. Enquanto a extensão e a resistência do contato entre uma argamassa e um substrato poroso são utilizadas para descrever a aderência no estado endurecido, a adesão correlaciona-se as propriedades reológicas da pasta de cimento. Dentre as propriedades relacionadas a aderência de argamassas no estado fresco, podem ser citados: adesão, retenção de água, consistência, plasticidade e teor de ar incorporado, além das propriedades do substrato e os procedimentos de aplicação.

O entendimento da dispersão de líquidos sobre superfícies sólidas é um desafio da física contemporânea. Gouin (2003) explica que o movimento de dois fluidos imiscíveis sobre um sólido forma, em sua interseção, uma linha de contato. A interface sólido-líquido exerce papel fundamental em aplicações industriais de micro e nano fluidos, bioengenharia, petróleo, engenharia química, etc. O seu entendimento serve para o desenvolvimento de novos produtos como, por exemplo, lubrificantes e permite associar o mecanismo da influência do fluido para o crescimento de cristais, partículas de cimento, etc. Diversas observações associadas ao movimento da linha de contato de fluidos sobre superfícies foram realizadas por Buxuan et al. (2007), Duursma, Sefiane e David (2010), Kiryushin (2012), Zhao (2014), Shin, Chergui e Juric (2018).

Nesses estudos constata-se a existência de um ângulo de contato dinâmico. Este ângulo foi nomeado a princípio por Young (1805) em seus estudos sobre capilaridade, a partir do qual a compreensão desse fenômeno permaneceu incompleto.

O estudo de Young (1805) procurou descrever o ângulo de contato de um líquido em uma superfície sólida, a fim de explicar a ação da capilaridade no fenômeno da adesão. Ele propôs que o ângulo de contato é determinado por um equilíbrio de forças interfacial que provocam a adesão, conforme apresenta a Figura 3.

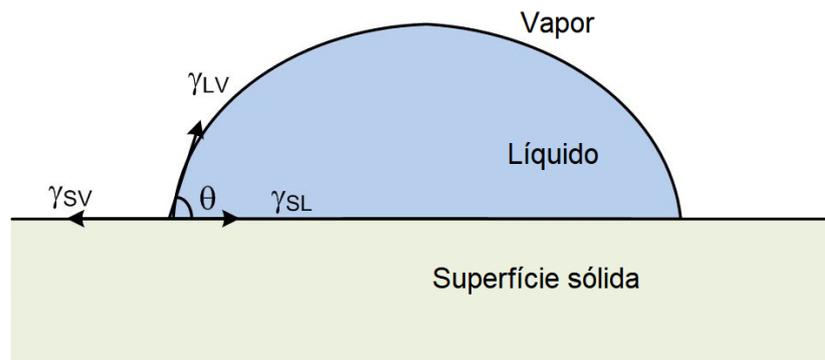
O ângulo de contato é descrito pela seguinte equação a partir a partir do equilíbrio de força formado entre dois materiais:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos\theta \quad (1)$$

Onde:

γ_{SV} , γ_{SL} e γ_{LV} correspondem, respectivamente, as forças interfacial sólido-vapor, sólido-líquido e líquido-vapor por unidade de comprimento da linha de contato. Com θ o ângulo de contato entre as três fases interfaciais.

Figura 3 – Ângulo de contato formado a partir da força interfacial em equilíbrio proposta pela equação de Young



Fonte: Adaptado de Makkonen (2016)

Mas Schrader (1995) cita que a equação (1) foi reescrita por Anthanase Dupre em 1869, a qual descreve a equação de adesão relativa do líquido em contato com a superfície sólida na seguinte forma:

$$W_A = \gamma_{LV} \cdot (1 + \cos\theta) \quad (2)$$

Onde:

W_A = trabalho de adesão;

γ_{LV} = força interfacial líquido-vapor;

θ = o ângulo de contato entre as três fases interfaciais.

A equação (2), conhecida como equação de Young-Drupe, estabelece o trabalho de adesão que traduz a energia de ligação interfacial entre líquidos e sólidos. Nesse sentido, uma redução do ângulo de contato θ permite aumentar o trabalho de adesão entre sólidos e líquidos, como por exemplo substratos cerâmicos e argamassa.

O equilíbrio de forças interfaciais da Figura 3 permite observar que quanto menor o valor da tensão superficial, por exemplo, de uma argamassa sobre um substrato sólido, menor o ângulo de contato θ o que favorece a adesão. Para Carasek (1996), Zhao (2014), Shin, Chergui e Juric (2018) este fenômeno melhora a adesão ao propiciar um maior contato físico com o substrato. Estes fatores chamaram a atenção para a importância das condições superficiais de argamassas de assentamento durante a aplicação de um revestimento ou bloco cerâmico.

De acordo com Cordeiro dos Santos, Augusto e Becere (2015), o contato da argamassa de revestimento com o substrato induz a sucção da água pelos seus capilares mais finos, e ao ser introduzida em seus poros e saliências dissolve os aglomerantes da matriz argamassada e propicia a precipitação de géis de silicatos do cimento. Segundo os autores, esse material precipitado é responsável pela ancoragem da argamassa ao substrato durante o processo de cura. Outro aspecto relacionado a retenção de água de argamassas refere-se à elevada área específica do aglomerante, ou seja, a soma das áreas das superfícies de todos os grãos do aglomerante contidos em um volume unitário.

Diversos autores têm estudado a relação entre a resistência de aderência e a retenção de água, dentre eles destacam-se Evans et al. (1953), Avancini e Louback (2003), Brito e Silva (2007), Hanzic et al. (2008), Canova, Miotto e De Mori (2015), Vilas Boas, Machado e Pinto (2016) e Heinen et al. (2018).

A consistência e a plasticidade são propriedades inerentes à condição de trabalhabilidade das argamassas de revestimentos. As definições existentes na literatura derivam dos conceitos estabelecidos no documento de RILEM (1982), a qual descreve:

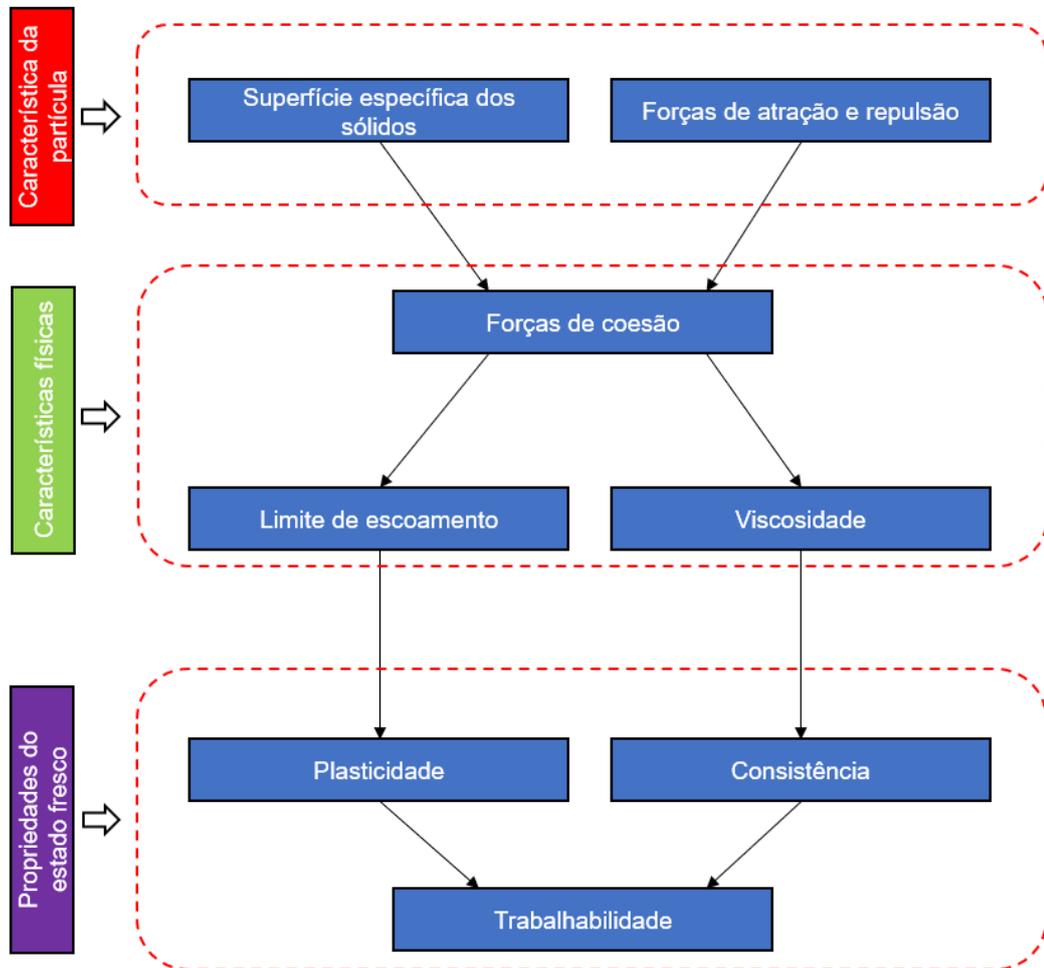
- Consistência: é a propriedade da argamassa que tende em resistir às deformações;
- Plasticidade: é a propriedade pela qual a argamassa se deforma sem sofrer ruptura e continua deformada após a redução das tensões que lhe foi imposta.

Outros fatores influenciam nessas propriedades como, por exemplo:

- teor de água;
- teor de ar incorporado na matriz argamassada;
- tipo de aditivo aplicado (incorporador de ar, retentores de água, dentre outros);
- natureza das partículas finas adicionadas à argamassa (argilosos, calcáreos, etc.);
- granulometria da areia.

Observa-se, neste ponto, a correlação entre a consistência e a plasticidade, cujas propriedades não podem ser analisadas de forma independente quando se deseja estabelecer condições de trabalhabilidade. Durante a produção da argamassa, a análise visual é fundamental para avaliar a trabalhabilidade, porém, não exclui a necessidade do entendimento dos mecanismos envolventes entre os materiais que compõem a mistura. Nesse contexto, Cincotto e Rago (1999) estabeleceram uma metodologia (Figura 4) a fim de buscar o entendimento do fenômeno da trabalhabilidade. A coesão entre as partículas é de fundamental importância para explicar a reologia da matriz argamassada e reflete no seu limite de escoamento e viscosidade.

Figura 4 – Relação das características da partícula, características físicas e da argamassa no estado fresco



Fonte: Adaptado de Cincotto e Rago (1999)

Bauer et al. (2005) explicam que a adesão inicial da argamassa ao ser lançada em substrato é garantida pela propriedade da consistência, uma vez que ela deve ultrapassar a tensão de escoamento e permitir o seu fluxo superficial. Com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade das argamassas no estado fresco, os autores ensaiaram diversas argamassas industrializadas com variações em sua trabalhabilidade e projetabilidade para um tempo de mistura em 1,5 e 2 minutos, por meio do método Vane. Os resultados evidenciaram que o aumento do teor de água e tempo de mistura alteraram a consistência e indicaram diferentes condições de aplicabilidade das argamassas de revestimentos.

O teor de ar incorporado em uma matriz cimentícia possui influência direta na trabalhabilidade. Nesse sentido, Resende (2010) explica que aditivos incorporadores de ar são utilizados para o preparo de argamassas em obras, uma vez que atuam

como plastificante ao melhorar a trabalhabilidade, contribui na resistência à compressão e tração, reduz a relação água/cimento, além da exsudação e fissuração.

Os incorporadores de ar estão ligados diretamente ao desempenho final do revestimento aplicado, uma vez que os efeitos gerados na matriz cimentícia após o seu estágio endurecido são consequências de fatores externos, como por exemplo, o preparo, transporte e modo de aplicação da argamassa.

Em termos de resistência de aderência devido o modo de aplicação Paravisi (2008) e Carasek (2012) descrevem que existem diferenças na aplicação manual e a projeção mecanizada, uma vez que o tipo de aplicação, o preparo da base e a ergonomia influenciam na aderência. É fácil verificar que com a aplicação manual o profissional não consegue de maneira uniforme obter a mesma força ou energia de aplicação da argamassa no substrato nas diferentes alturas exigidos na execução. Diferentemente da aplicação mecanizada a qual é possível obter aplicação uniforme para uma mesma energia de impacto em diferentes níveis.

2.4 MECANISMOS DE ADERÊNCIA EM ARGAMASSAS ENDURECIDAS

A aderência da argamassa endurecida ao substrato relaciona-se com a penetração da pasta da argamassa nos interstícios e rugosidade da base de aplicação. Esse mecanismo, para Kampf (1963), Chase (1983), Cao e Lawrence (1988), Carasek (1996) e Sarhosis, Garrity e Sheng (2015) deriva-se do contato mecânico interfacial.

Nesse ponto, Kampf (1963) descreveu a natureza mecânica do contato argamassa e tijolo. Segundo ele, a aderência interfacial deve-se a atração molecular exercida entre as superfícies dos corpos em contato. Sendo a coesão uma atração molecular pela qual as partículas de um corpo estão unidas em toda a extensão do contato entre a argamassa e uma unidade de alvenaria. Essa ligação pode ser medida pela força necessária para separar a argamassa da unidade de alvenaria ou pela resistência que a área de contato oferece para a passagem da água. Os elétrons da camada de valência do átomo são responsáveis por produzir forças que os unem para formarem moléculas. Quando a carga em um átomo é reduzida, a carga no outro é aumentada na mesma proporção.

Nesse sentido, é razoável assumir que essas forças são responsáveis pela adesão e coesão de argamassas.

Para Sasse e Snethlage (1997), a resistência à aderência entre a argamassa e o substrato é controlada pelos seguintes mecanismos:

- Pontes minerais: os cristais de calcita ao crescerem nos poros do substrato fornecem ligação mecânica adicional e uma ligação química entre os cristais de calcita no ligante e no material do substrato;
- Adesão mecânica: resulta do intertravamento mecânico entre argamassa e substrato. Este efeito possui melhor desempenho quando a superfície do substrato é rugosa antes da aplicação da argamassa;
- Forças eletrostáticas, que podem ocorrer como ligações de hidrogênio ou força de Van der Waals. Portanto, eles são significativos apenas no caso de fechamento intermolecular no contato entre o ligante da argamassa e o substrato.

Martínez et al. (2013), Lukasik, Michalowski e Michalak (2020), Melo et al. (2020) relatam a importância da resistência mecânica das argamassas de revestimentos, uma vez que ela está ligada à sua vida útil ao resistir a abrasão superficial, impacto, tração, cisalhamento e compressão. No estado endurecido, às tensões atuantes na interface com o substrato deve ser garantida pelos mecanismos da aderência ao resistirem as tensões normais ou tangenciais, segundo Carneiro (1993), ABNT NBR 13528-3:2019 e Salustio et al. (2022).

Estas tensões, segundo a norma europeia BS 5262:1976 podem ocorrer devido à movimentação do substrato, em decorrência de sua natureza, pelo processo de retração a qual produz esforços de tração e cortante atuantes ao longo do plano de adesão do substrato.

Outro fator que contribui para o surgimento dessas tensões é devido à sua exposição climática, já que as variações térmicas provocam a dilatação e a contração do revestimento segundo a BS 5262:1976 e Carneiro (1993). Por fim, tem-se as tensões geradas nos revestimentos provenientes de deformações estruturais ou recalques de fundações.

Lopes dos Santos et. al. (2020) analisaram o efeito microestrutural da influência das características dos agregados na resistência à tração de argamassas a base de cal de substratos porosos. Os autores prepararam a argamassa utilizando pó de cálcio hidratado e cal hidráulica natural.

Embora as argamassas com areia calcárea tenham tido alta retenção de água, elas apresentam baixos valores de resistência de aderência. Os autores não encontraram relação linear entre a retenção da água e a resistência à tração na interface dos substratos. Também foi observada que uma relação entre a mineralogia da areia e da composição dos substratos podem existir desde que haja similaridade composicional entre os agregados e os substratos favorecidos pelas ligações intermoleculares entre esses elementos. Em relação à distribuição dos poros entre a argamassa e o substrato, elas foram influenciadas pelo volume e diâmetros de poros maiores que 1 μm . Ou seja, quando a abertura dos poros das argamassas foram superiores ao diâmetro dos poros críticos do substrato, este favoreceu o transporte de partículas finas para a interface e, conseqüentemente, fortaleceu a região de ligação.

2.5 FENÔMENO DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação é um fenômeno físico-químico que ocorre na matriz cimentícia pela combinação do CO_2 e dos produtos hidratados do cimento. Para Pham (2013) e Leemann et al. (2018) o processo da carbonatação tem influência na evolução das propriedades das argamassas como comportamento mecânico, absorção de água, distribuição dos tamanhos dos poros e pH. O hidróxido de cálcio é proveniente da cal e formado na hidratação dos silicatos de cálcio (C_2S e C_3S). O novo carbonato de cálcio, obtido do processo da carbonatação, melhora a resistência mecânica após alteração de sua microestrutura.

Para a melhor compreensão a seguir são descritos uma síntese sobre a carbonatação de materiais cimentícios, parâmetros inerentes à carbonatação e carbonatação acelerada.

O dióxido de carbono ao entrar pelos poros de materiais cimentícios e reagir com a água forma o ácido carbônico que por sua vez irá reagir com o hidróxido de cálcio presente e gerar carbonato de cálcio, diminuindo o pH do material. Esse fenômeno pode ocorrer de forma gradual e lento devido às reações envolvidas. Os mecanismos da carbonatação e suas reações foram amplamente estudadas nos trabalhos de Houst (1993), Thierry (2005), Jeong, Bassir e Ramézani (2009), Pina (2009), Pham (2013), Andrade et al. (2018), Leemann et al. (2018) e Romero-Hermida et al. (2021).

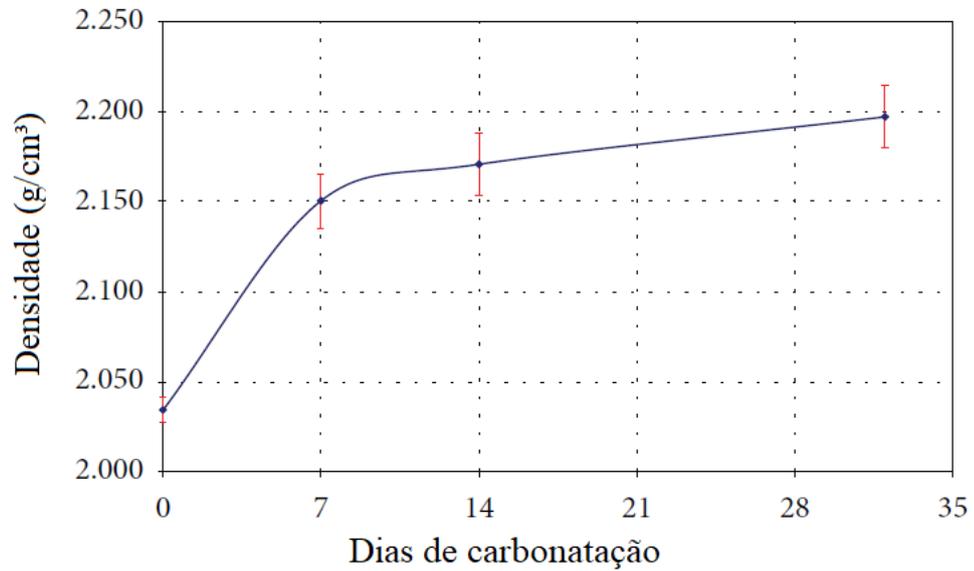
Pham (2013), Andrade et al. (2018) e Leemann et al. (2018) explicam que a transformação progressiva dos principais constituintes da matriz cimentícia, a portlandita Ca(OH)_2 e o silicato de cálcio hidratado C-S-H em carbonato de cálcio CaCO_3 em contato com o dióxido de carbono da atmosfera e água presente nos poros da matriz cimentícia vem acompanhado de uma redução de pH. Os progressos dessas reações de carbonatação alteram a microestrutura da matriz como as variações das porosidades, superfície específica e distribuição dos poros. Conseqüentemente, as alterações microestruturais levam a mudanças macrofísicas como o volume da fase sólida, a permeabilidade ao gás, propriedades térmicas e propriedades mecânicas.

Nota-se que a coerência sobre as observações micro e macroescala ainda é discutida. Enquanto alguns autores observaram uma redução à permeabilidade a água, descrito nos trabalhos de Ngala e Page (1997) e Mickael (2005), os resultados encontrados não explicam o aumento da permeabilidade ao gás, conforme o estudo de Jaafar (2003).

O trabalho de Pham (2013) propôs investigar a evolução de uma microestrutura causada pela carbonatação de uma matriz cimentícia de argamassa. Foi utilizada a relação água/cimento de 0,5 e relação areia/cimento igual a 3. No final da mistura, a argamassa foi colocada em moldes cilíndricos com diâmetro de 40 mm e altura de 60 mm e desmoldadas após 24 horas. Para o ensaio de carbonatação, as amostras foram secas a 105°C até atingir massa constante e armazenada por 7 dias a 20°C em uma câmara com 65 % de umidade relativa. Em seguida, as amostras foram submetidas à difusão de CO_2 em ambiente controlado e sujeita a concentração de CO_2 em um tempo definido. Por fim, a região carbonatada foi identificada com a aplicação de fenolftaleína, tendo como resultado à média de 3 amostras.

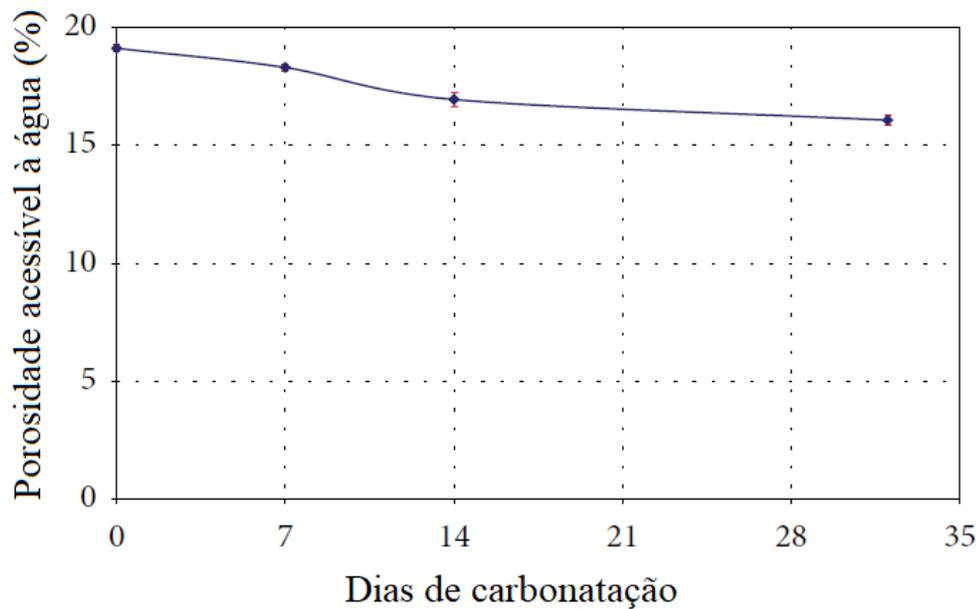
Quanto à propriedade física, foi observado um aumento contínuo da densidade da argamassa carbonatada em função do tempo (Figura 5) e redução da porosidade, o que implicou em redução da permeabilidade à água (Figura 6).

Figura 5 – Aumento da densidade da argamassa em função dos dias de carbonatação



Fonte: Adaptado de Pham (2013)

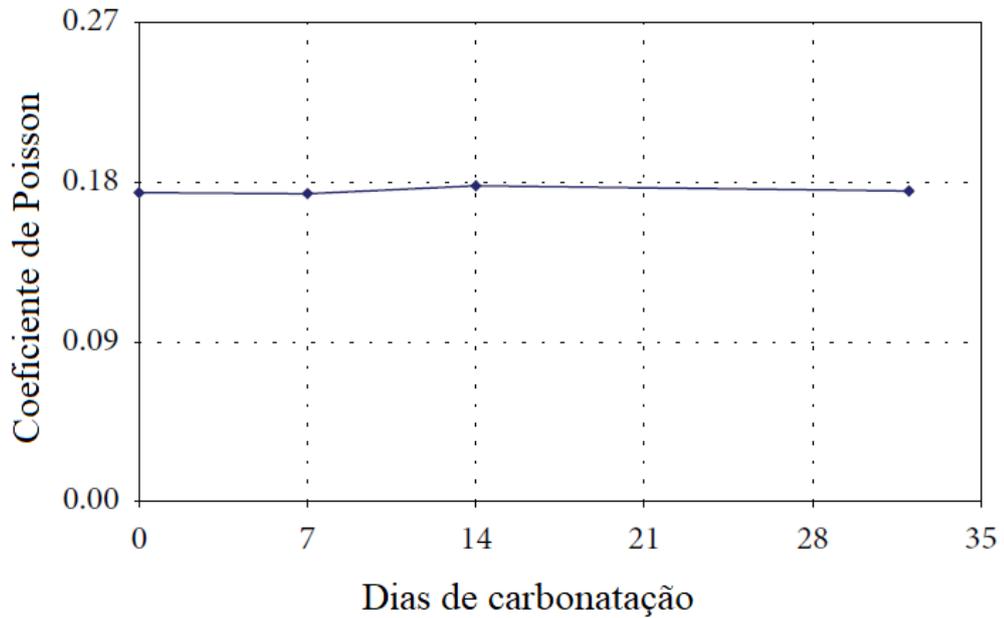
Figura 6 – Permeabilidade à água em função dos dias carbonatado



Fonte: Adaptado de Pham (2013)

Em relação às propriedades mecânica, foi observado que o coeficiente de Poisson permaneceu a uma taxa constante (Figura 7) antes e após a carbonatação.

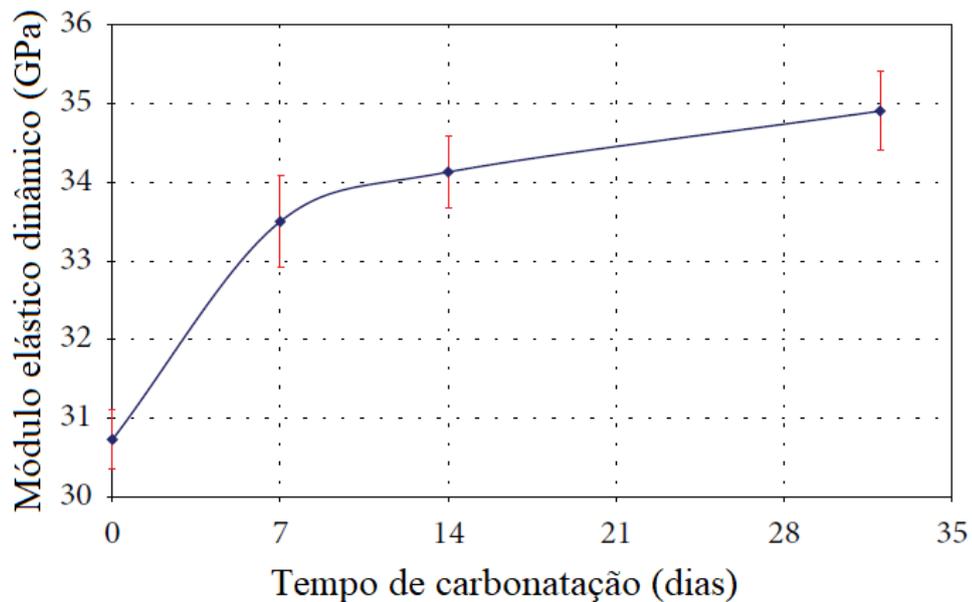
Figura 7 – Coeficiente de Poisson em função dos dias carbonatado



Fonte: Adaptado de Pham (2013)

Em contrapartida, o módulo de elasticidade dinâmico aumentou em função do tempo de carbonatação (Figura 8).

Figura 8 – Módulo de elasticidade dinâmico em função do tempo de carbonatação



Fonte: Adaptado de Pham (2013)

Estes resultados apontam para uma argamassa mais rígida após a carbonatação dos materiais cimentícios.

A carbonatação depende de diversos fatores que desencadeiam o seu fenômeno, conforme explicam Wolf e Dal Molin (1989), Johannesson e Utgenannt (2001), Dong et al. (2014), Elsalamawy, Mohamed e Kamal (2019), Steiner et al. (2020) os poros da matriz cimentícia não devem estar secos e nem saturados, uma vez que as condições ideais da umidade relativa do ar devem ocorrer entre 50% e 70 %.

As condições de exposição da concentração de CO₂ com ou sem proteção do intemperismo são parâmetros notáveis da carbonatação. Vale observar que em condições reais, Santaguida et al. (2005) explicam que a concentração de CO₂ não são constantes ao longo do tempo e tem o seu coeficiente de difusão sensível quanto aos ciclos de molhagens ocasionadas pelo intemperismo. No entanto, a quantidade de CO₂ necessária para carbonatar um volume de material cimentício está ligada à quantidade de CO₂ presente em sua matriz, como pode ser observado no trabalho de Castellote et al. (2009). Os autores investigaram às alterações químicas e as alterações de fases de argamassas quando expostas à carbonatação acelerada nas concentrações de 3 %, 10 % e 100 % e as compararam com o fenômeno de carbonatação natural, com concentração de 0,03 %. A caracterização dos materiais ocorreu pelas análises termogravimétricas e Difração de Raios X (DRX). Castellote et al. (2009) verificaram que a carbonatação das amostras resultou em uma polimerização progressiva do C-S-H que levou à formação de um gel de silicato de cálcio modificado com aumento da concentração interna do CO₂. Quando a concentração de CO₂ foi de 3 % observou que o gel C-S-H modificado era inferior aos das amostras não carbonatada. Ao carbonatar a 10 % e a 100 %, o gel modificado C-S-H desapareceu por completo resultante da descalcificação. Por fim, ao comparar a concentração de CO₂, os autores concluíram que as amostras de até 3 % apresentaram uma microestrutura semelhante à carbonatação natural do que as amostras com 10 % e 100 % de concentração. Isto indicou que os ensaios acelerados que pretendam simular a carbonatação natural não devem superar esta concentração.

Dentre outros parâmetros inerentes à carbonatação podem ser citados à difusão, a permeabilidade e a absorção capilar. Cascudo e Carasek (2011) explicam que os poros capilares que ficam parcialmente saturados permitem o transporte do CO₂ e permite que a difusão iônica ocorra no interior da matriz cimentícia.

A permeabilidade consiste na facilidade a qual líquidos e gases se movimentem no interior de argamassas, concreto, etc. Para Cascudo e Carasek (2011), ela representa a interligação dos poros, e dessa maneira, a facilidade de uma substância líquida ou gasosa em permear um volume de matriz cimentícia. Nesse sentido, poros de maiores diâmetros atuam como agente facilitador do transporte interno de substâncias, como por exemplo, o CO₂, o que implica descrever que o transporte de dióxido de carbono será mais intenso quanto maior forem as conexões entre os poros. No entanto, é importante observar que a permeabilidade não é o parâmetro predominante de ocorrência da carbonatação, mas sim um dos meios que facilitam a sua ocorrência.

Para Helene (1993) e Neville (2013), a absorção capilar está relacionada com forças de atração dos poros da estrutura sobre líquidos em contato com a superfície. Os autores, observaram que este fenômeno é mais ativo nos poros de 0,1 µm a 1000 µm denominados de poros ativos.

Observa-se aqui que a sintetização do fenômeno de carbonatação em um modelo simplificado é complexo uma vez que ela é afetada por diversos fatores.

A carbonatação acelerada é um método de ensaio que permite desencadear as reações de carbonatação com controle dos fatores que a influenciam a fim de obter os resultados em um menor intervalo de tempo.

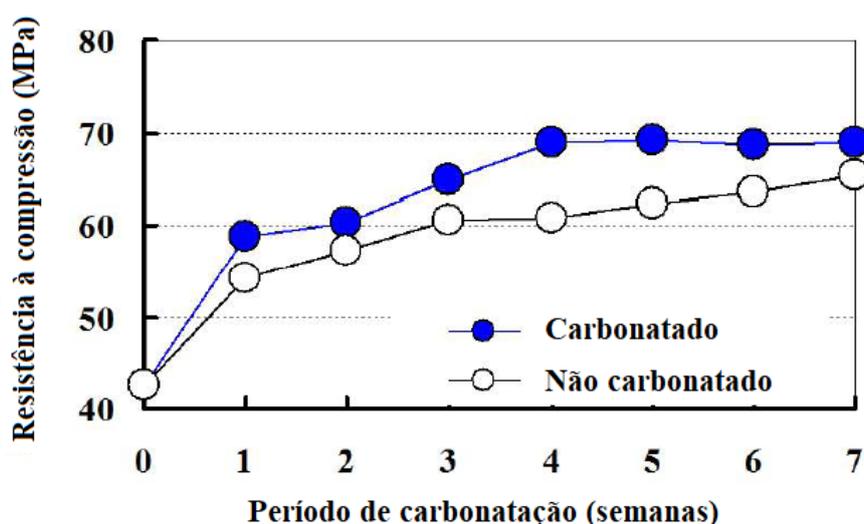
Este ensaio já vem sendo discutido há anos por diversos pesquisadores no Brasil e no mundo. Pauletti (2009), Da Silva et al. (2009) e Harrison et al. (2012) apresentaram em seus trabalhos um levantamento de diversos ensaios já realizados para a carbonatação acelerada quanto às dimensões dos corpos-de-provas, tipo de cura, diversificação de condicionamento, concentração de CO₂, temperatura, umidade relativa e tempo de exposição.

Pauletti (2009) explica que não há padronização do método de ensaio acelerado o que dificulta realizar a análise comparativa entre diferentes estudos. Mas, podem ser citadas a norma francesa XP P18-458 (2008), a norma internacional ISO 1920-12 (2015) e a norma europeia TC 12390-12 (CEN, 2010) que descrevem métodos de ensaios com baixo teor de CO₂ para a carbonatação natural. O ensaio acelerado permite medir a frente de carbonatação, onde pode-se aplicar modelos matemáticos, como por exemplo, os modelos descritos nos trabalhos de Papadakis, (1989) que correlacionou a carbonatação em função do tempo e condições de exposição dos compósitos cimentícios. Papadakis, Vayenas e Fardis (1991)

propuseram ensaios experimentais de carbonatação acelerada em corpos de provas de concreto e argamassas a fim de validação do seu modelo matemático e correlacionar os ensaios acelerados com a carbonatação natural.

Em estudos mais recentes podem ser citados You, Jeong e Hyng (2014) que submeteram ao ensaio acelerado de corpos-de-provas de argamassas e mediram a evolução da profundidade de carbonatação por seis semanas, bem como mensuraram a porosidade, a absorção de água, à penetração de íons de cloreto e a resistência à compressão. Os resultados comprovaram que a carbonatação aumentou a resistência à compressão (Figura 9) e reduziu a permeabilidade e penetração dos íons de cloreto.

Figura 9 – Resistência à compressão de corpos de provas carbonatados e não carbonatados



Fonte: Adaptado de You, Jeong e Hyng (2014)

Por fim, os autores concluíram que a carbonatação trouxe melhoria no desempenho mecânico da matriz cimentícia.

Recentemente, observa-se pesquisas inovadoras sobre o efeito da carbonatação nas propriedades mecânicas as quais destaca-se o estudo de Zhan et al. (2017) que analisaram a influência da utilização de agregados finos de demolição com adições de hidróxido de cálcio, cloreto de cálcio e nitrato de cálcio em argamassa na carbonatação, Tassos et al. (2018) avaliaram a influência dos tipos de cimento na carbonatação de concreto, Ramesh e Kondraivendhan (2020) avaliaram a resistência à compressão, o pH e a profundidade de carbonatação ao substituírem

parcialmente o cimento por pó de zeólita natural na produção de concreto. Os autores concluíram que as amostras que tiveram a substituição parcial do cimento tiveram resistência à compressão maior em relação às amostras sem substituição, menor pH e maiores extensões da profundidade de carbonatação. Os trabalhos de Lee et al. (2021) investigaram a influência de nano tubos de carbono na carbonatação em argamassas e realizaram ensaios de carbonatação acelerada, tração na flexão, compressão, porosidade e resistência elétrica. Por fim, o estudo de Lunardi (2021) buscou avaliar experimentalmente o efeito de ciclos térmicos na resistência de aderência de argamassa de revestimentos e a sua durabilidade quando sujeitas à carbonatação. Foi constatado, após uma série de experimentos, que houve melhoria na resistência de aderência à tração tanto na interface de ligação substrato-argamassa quanto na argamassa. O mesmo não ocorreu nos ensaios realizados para amostras carbonatadas com envelhecimento acelerado, cujo efeito da degradação prejudicou à resistência de aderência e aumentou o coeficiente de variação em todos os ensaios.

2.6 PROPRIEDADES DOS SUBSTRATOS

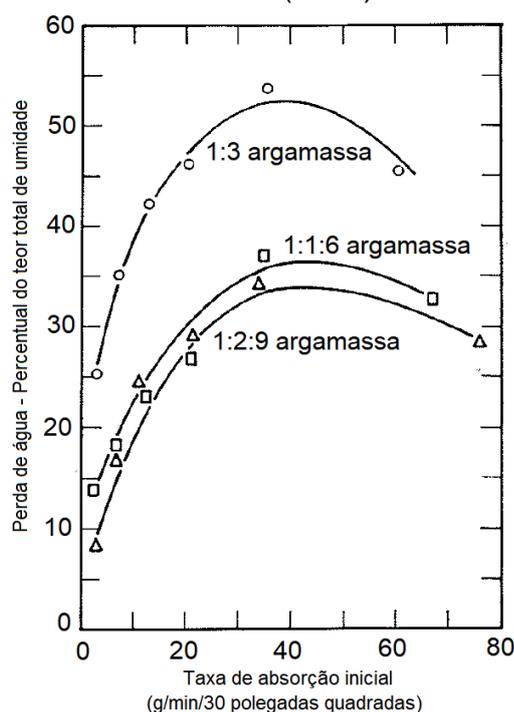
A escolha do substrato/base de aplicação em argamassas de revestimento exige atenção, uma vez que a sua natureza influencia na resistência de aderência interfacial entre os materiais constituintes. Diversos estudos têm dado importância aos mecanismos envolventes do processo de aderência interfacial de diferentes substratos onde a argamassa é aplicada, e a sua correlação no comportamento mecânico do material. Dentre eles, podem ser citados as contribuições de Scartezini e Carasek (2003) que avaliaram a resistência de aderência dos revestimentos de argamassa ao considerarem os materiais blocos cerâmicos ou de concreto e o preparo do substrato (umedecidos, chapiscado e com solução de cal). Os resultados indicaram que a rugosidade superficial dos substratos de blocos de concreto proporcionou uma resistência de aderência superior ao substrato de bloco cerâmico. Além disso, foram verificados que além do tipo de substrato, o tipo de preparo e a cura influenciaram na resistência de aderência à tração.

De acordo com Stull e Johnson (1940) em produtos argilosos formados a partir da argila plástica e seca, a sua estrutura interna consiste em massa

compactada de grãos minerais e, durante o processo de queima, os poros mudam de tamanho até um ponto abaixo da condição vítrea.

Davison (1961) analisou a influência da perda de água em três argamassas nos traços 1:3 (cimento e areia) e 1:1:6 (cimento-cal-areia) e 1:2:9 (cimento-cal-areia) aplicados em substratos cerâmicos com taxa de absorção variando de 2,5 a 75 g/min/30 polegadas quadradas (194 cm²), conforme apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Perda de água x taxa de absorção inicial de argamassas estudados por Davison (1961)



Fonte: Adaptado de Davison (1961)

Os resultados indicaram maior perda de água da argamassa quando aplicada em substratos cerâmicos de sucção inicial intermediária em relação aqueles substratos cerâmicos de alta sucção inicial de água.

Para Detriche et al. (1985), o transporte de água na argamassa fresca é definido pelo substrato e pelas suas estruturas porosas e superficiais. Os autores descreveram que logo após a aplicação da argamassa fresca no substrato, inicia-se a movimentação da água da argamassa para o substrato, uma vez que os raios médios capilares da argamassa são superiores aos raios médios do substrato. Esse processo é resultante do mecanismo de absorção capilar, cuja movimentação da água é acompanhada da retração da camada da argamassa decorrente da redução de seus poros. Os autores avaliaram os parâmetros característicos da argamassa em relação ao transporte da água por absorção capilar e da evaporação e

apresentaram as suas consequências na hidratação do ligante e nas características mecânicas da argamassa. Por esta razão analisaram a influência da espessura da camada de argamassa (7mm, 15 mm e 23 mm) e da superfície porosa, a dosagem por ligante e a granulometria da areia.

A argamassa foi aplicada em dois tipos de substratos um dos quais é não poroso (SNP) feito de plástico (PVC) e o outro poroso (SP), constituído por terracota caracterizada por capilares de raios de média de $0,13 \mu\text{m}$ para uma área específica de $1820 \text{ m}^2/\text{kg}$ e uma porosidade de 23%. As condições de cura foram determinadas por uma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa ambiente de 60%.

Os autores concluíram que o diâmetro dos capilares e a movimentação da água constituem os parâmetros essenciais na retração da argamassa. As camadas mais finas da argamassa em contato com uma base porosa apresenta hidratação incompleta e sofre fortes tensões mecânicas.

Dupin, Detriche e Maso (1988) explicam que um material poroso absorve por capilaridade grandes frações da fase líquida da argamassa. A sucção proveniente da porosidade do substrato influencia diretamente na hidratação dos constituintes de cimento, cujos espaço intergranulares são preenchidos de água. Os raios dos poros da matriz porosa da argamassa diminuem à medida em que ocorre a hidratação do cimento ao longo do tempo. Este processo permite explicar qualitativamente os movimentos de água quando a argamassa entra em contato com o substrato poroso, cujos capilares encontram-se inicialmente vazios. Assim, enquanto o raio médio dos capilares da argamassa for maior do que o de capilares do substrato poroso, o movimento da água é realizado da argamassa até o substrato poroso.

Porém, durante a retração da argamassa, causada pela capilaridade e hidratação do ligante, o raio médio dos capilares da argamassa diminui até se tornar igual a dos capilares porosos do substrato. Quando o raio médio dos capilares da argamassa torna-se menor do que os capilares do substrato poroso, a direção do movimento da água é invertida, ou seja, o fluxo das moléculas de água ocorre do substrato poroso para a argamassa. Como consequência, para que o aglutinante possa hidratar corretamente, a retenção de água da argamassa deve ser suficiente, e ocorre nas seguintes condições:

1. a área específica do ligante é a maior possível e leva em consideração a finura do cimento e a adição de cal hidráulica;

2. a fase granular contém grãos da ordem ou superiores a 1 mm de diâmetro, o que alonga os caminhos capilares entre a argamassa e o material poroso;
3. a retenção de água da argamassa é aumentada pelo uso de aditivo;
4. a absorção de água pelo substrato poroso desacelera após a cristalização dos primeiros produtos hidratados.

Em relação à ligação mecânica Dupin, Detriche e Maso (1988) observaram microscopicamente regiões da argamassa ricas em cristais de etringitas, formadas a partir dos íons sulfatos. Os cristais de etringita possuem forma acircular e diâmetro aparente da ordem de 0,05 μm .

Durante os ensaios de tração de suas amostras, os autores observaram que:

- a) Se os capilares do material poroso tiverem dimensões semelhantes às das etringitas, a ruptura ocorre em baixa tensão de tração, por separação entre a argamassa e os poros;
- b) Se muitos cristais de etringita penetrarem nos capilares do material poroso, a ruptura ocorre para elevadas tensões de tração na argamassa. Esta ruptura é resultante do menor grau de hidratação da argamassa nesta zona e o valor da tensão de tração correspondente aumenta com a retenção de água da argamassa.

Para Carasek (1996) a aderência entre um substrato poroso e a argamassa é um mecanismo mecânico, cuja transferência da água na interface base/argamassa possibilita a entrada da pasta de cimento. A hidratação da pasta precipita hidróxidos e silicatos e contribuem para a ancoragem do revestimento. A autora realizou a caracterização da porosidade dos substratos de bloco de concreto, bloco cerâmico, concreto celular, sílico-calcário e concreto leve e identificou por meio de microscopia eletrônica a natureza e os produtos formados na região dos poros. Como resultados descreveu que o intertravamento de cristais de etringita nos poros é o principal responsável pela aderência.

Para Hewlett (2001), a resistência da pasta de cimento é devida à presença de uma rede tridimensional de fases de hidrato que pode resistir a tensões externas sem sofrer ruptura. Substratos com alta porosidade permitem que uma maior quantidade de água seja absorvida e podem provocar uma hidratação ineficiente do cimento da argamassa, cuja água remanescente pode não ser suficiente para hidratar todo o cimento e conseqüentemente formar regiões frágeis.

A absorção capilar pelo substrato é influenciada pela base porosa absorvente cujos mecanismos envolventes, para Barbosa, John e Pileggi (2009) são definidos por:

- Molhagem do substrato pelo contato com a argamassa: essa etapa é caracterizada pela perda de água da argamassa para a base devido a sucção capilar e perda de água por evaporação;
- Transporte de materiais finos por meio do fluxo capilar: o processo de absorção da interface substrato/argamassa permite o transporte de suspensões cimentícias que é influenciada pelo tamanho dos poros do substrato;
- Hidratação do cimento: os grãos de cimento que inicialmente se encontram soltos se aglutinam uns aos outros, até a formação de um esqueleto sólido ou cristais que dão estabilidade da estrutura geral. A continuidade de hidratação conduz ao endurecimento responsável pela aquisição permanente de qualidades mecânicas.

Pólito, Carvalho Junior e Brandão (2010) caracterizaram a interface entre argamassas mistas e blocos cerâmicos em alvenaria por meio de análise microestrutural. Para a verificação da profundidade de penetração dos produtos de hidratação na interface substrato/argamassas, foi realizada a análise por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). Os autores confirmaram que a etringita é a principal responsável no favorecimento da aderência na região da interface, haja vista a ocorrência do intertravamento dos cristais no interior dos poros dos substratos, que atingiram profundidade máxima de 500 μm . Também na interface, os autores observaram diferentes morfologias dos produtos de hidratação, o qual a etringita foi dominante devido à mobilidade dos íons sulfato, alumínio e cálcio no processo de hidratação do cimento e, onde houve maior sucção do fluido destes íons para o interior dos poros devido à proximidade ao substrato.

Pagnussat (2013) investigou a relação da resistência de aderência de sistema de argamassa de revestimento aplicados a substratos cerâmicos com temperaturas de queimas de 700, 800, 900 e 1000 $^{\circ}\text{C}$. A resistência da aderência à tração também foi analisada pela condição da interface argamassa/substrato definidos em dois momentos: área de contato sem tratamento e redução do contato superficial por meio do selamento dos poros. Os resultados de Pagnussat (2013) demonstraram que o selamento superficial dos substratos reduziu os valores da resistência de aderência à tração, o que evidencia a importância da absorção da água para a

hidratação das partículas de cimento e sua contribuição no mecanismo de aderência em revestimentos.

2.7 CARACTERÍSTICAS DE SUBSTRATOS CERÂMICOS

As argamassas são de fundamental importância no assentamento de blocos, bem como nos revestimentos de lajes e alvenarias. Uma outra aplicação consiste na fixação de revestimentos cerâmicos. Durante o processo de fabricação, Holanda e Souza (2005) explicam que as matérias-primas constituintes de substratos cerâmicos (argilas, quartzo, óxido de ferro e carbonato) são misturadas em proporções as quais são consideradas a influência de cada componente nas propriedades dos materiais finais, seguidos por etapas gerais de processamento como prensagem, moldagem e queima.

Um parâmetro utilizado em empresas para verificação da resistência de aderência de argamassa de revestimentos sobre substratos cerâmicos é feito por meio de ensaios de arrancamento. Este ensaio é realizado conforme as diretrizes da ABNT NBR 13749:2013, o qual estabelece o limite de resistência de aderência à tração de 0,20 MPa para revestimentos internos e de 0,30 MPa para revestimentos externos.

Diversos autores buscaram correlacionar os parâmetros principais que afetam a aderência em substratos cerâmicos.

Monteiro e Vieira (2004) investigaram as características de duas argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha em três regiões de Campos dos Goytacazes, sudeste do Brasil. As amostras mais ricas em minerais argilosos apresentaram maior retração linear e diminuição da absorção de água em comparação com os outros. Yakub, Du e Soboyejo (2012) produziram massas cerâmicas com três tipos de porosidades a partir da sinterização da argila vermelha e resíduos de serragem de madeira. A porosidade e a densidade foram caracterizadas, respectivamente, pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio e picnômetro de gás hélio. As propriedades mecânicas e físicas foram mensuradas tais como: módulo elástico, densidade e porosidade. Essas propriedades foram incorporadas em modelos de elementos específicos para análise computacional das distribuições de tensão exercida pelas pressões hidrostáticas na região dos poros cerâmicos. O trabalho de Costa, Cardoso e John (2017)

investigaram a influência da substituição do cimento por finos de calcário correspondente a 30 % e 60 % de volume no comportamento das propriedades mecânicas de argamassas de revestimento e a sua resistência interfacial argamassa-substrato cerâmico. Os autores constataram que o módulo de elasticidade e a resistência de aderência à tração das argamassas diminuíram com o aumento do teor de calcário. No entanto, a substituição do cimento por finos de calcário correspondente à 30 % do volume aumentou a resistência de aderência à tração interfacial, provavelmente devido à densificação da zona interfacial que colaborou no travamento intergranular dos materiais. Bello et al. (2017) avaliaram a resistência de aderência à tração de argamassas de revestimentos sobre substratos cerâmicos em obras da região de Porto Alegre aplicados manualmente e com projeção mecânica contínua. Os autores constataram que para diferentes alturas de aplicação da argamassa, os resultados não foram estatisticamente significativos. Quando comparados com o modo de aplicação, a projeção mecânica contínua foi superior ao modo de aplicação manual e influenciou na resistência de aderência à tração.

Azevedo et al. (2018) analisaram a influência da temperatura de queima de substratos cerâmicos sobre propriedades de adesão da argamassa à base de cimento e cal. Os autores elaboraram 35 blocos cerâmicos de superfície plana, sem ranhura e com diferentes temperaturas de queima: 750 ° C, 850 ° C e 950 ° C. Os resultados indicaram que a temperatura de queima é uma variável que influencia diretamente nas propriedades da cerâmica vermelha, com maior ganho de resistência à aderência à tração para os substratos cerâmicos queimados a 950 ° C, uma vez que apresentaram um alto índice de absorção inicial de água em comparação aos substratos cerâmicos produzidos com temperaturas de queima de 750 °C e 850 °C. Silva, Brito e Dhir (2019) reportaram que o uso de agregados reciclados em argamassas de revestimentos aplicados sobre substratos cerâmicos não influenciou na resistência de aderência à tração quando comparados com argamassas de revestimentos compostos de agregados naturais e que o uso de agregado reciclado muito fino substituídos parcialmente por areia natural reduziu o consumo de cimento entre 20 % a 33 %.

Observa-se que um substrato cerâmico sujeita à tensões de tração possui diferenças de deformação entre a região da argamassa carbonatadas na superfície e não carbonatadas (na região de interface com o substrato), que segundo Bastos

(2001), ocorre devido o CO_2 do ar ao reagir com os compósitos hidratados do cimento da argamassa endurecida e que propicia o aumento volumétrico devido a formação de compostos carbonatados. Esta diferença de propriedades em um mesmo substrato resulta em diferentes comportamentos nos revestimentos não detectados em ensaios realizados logo após a cura, e que correspondem a grande maioria das pesquisas publicadas sobre revestimentos. Assim, é necessário avaliar de que maneira as propriedades dos revestimentos são influenciadas pela heterogeneidade das propriedades mecânicas do revestimento.

3. MÉTODOS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

3.1 ESTUDOS NUMÉRICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Usualmente procedimentos experimentais são utilizados no desenvolvimento de projetos e processos construtivos. Contudo, se não houver uma modelagem teórica com a prática experimental pode tornar-se uma tarefa dispendiosa. A modelagem numérica permite reduzir o número de corpos de prova ensaiados bem como realizar medições de propriedades físicas, mecânicas, térmicas, etc. É possível obter resultados em diferentes posições do modelo, alterar as variáveis do estudo, desde que as relações constitutivas sejam adequadas ao modelo proposto a fim de gerar soluções numéricas mais próximas aos comportamentos realísticos realizados. Isto significa redução de custos e maior eficiência e confiabilidade na obtenção dos resultados.

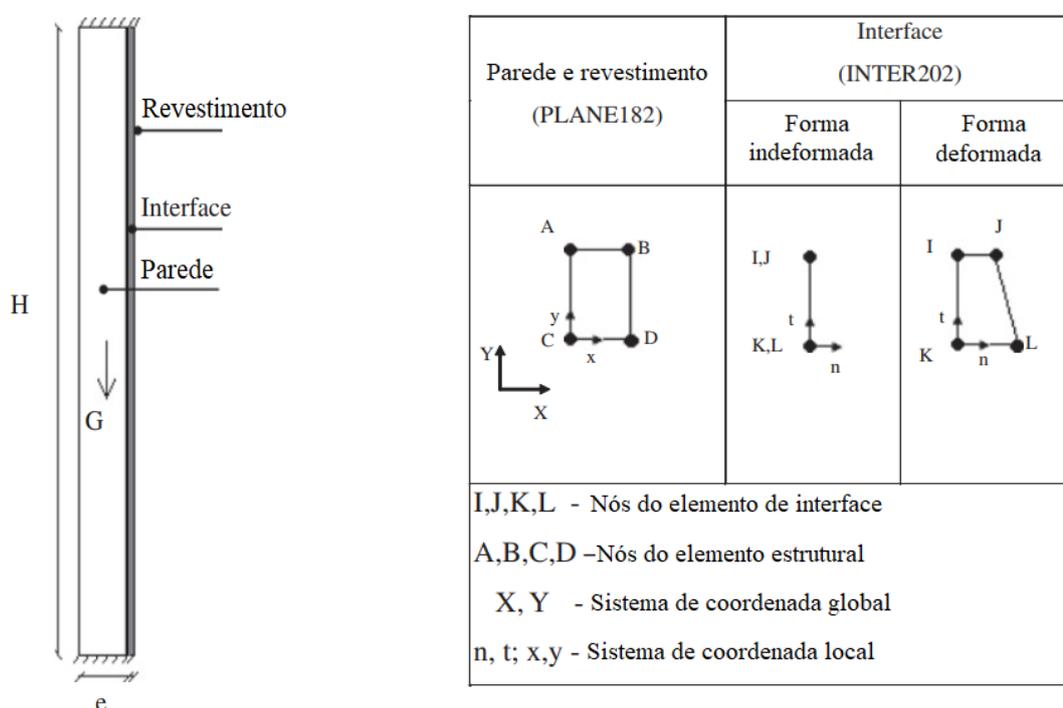
De acordo com Lacerda e Pereira (2017), a capacidade do entendimento físico e matemático exige a habilidade de visualização e definição de materiais a serem utilizados, bem como impor restrições verdadeiras e limitação prática. Existem diversos trabalhos publicados em meio técnico capazes de prever um conjunto de comportamento realísticos realizados experimentalmente por meio de modelagem numérica.

Moaveni (2008) descreve que a modelagem matemática de equações diferenciais auxilia na resolução de problemas de engenharia, uma vez que se aplicam leis e princípios de natureza sistemática e permite detalhar o comportamento físico real quando submetido a uma determinada condição de carregamento e de restrição de movimentação. Essas leis e princípios fundamentais, segundo Alves Filho (2012), devido à complexidade de resolução do objeto em análise, a solução analítica torna-se impossível, exigindo grandes e excessivas simplificações o que permite reduzir os acertos e erros de métodos experimentais. Assim para transpor a complexidade de prever comportamentos de um objeto ou fenômenos da natureza, frequentemente recorrem-se às aproximações numéricas.

O entendimento dos mecanismos da adesão de argamassas é complexo e está ligada a força resistente na separação de dois corpos sólidos. A ligação da argamassa ao substrato depende da penetração dos finos em seus poros e

cavidades e permite a formação de produtos de hidratação como a etringita e do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Com objetivo de analisar esse mecanismo, Matos Silva, Flores-Colen e Gaspar (2013) analisaram a perda de adesão na interface da argamassa de revestimento e substrato de parede por meio de simulação numérica (Figura 11 a). A modelagem numérica foi realizada no programa computacional ANSYS, cujos autores utilizaram para a parede e a camada de revestimento, o elemento numérico PLANE182 e para a interface o elemento INTER202 (Figura 11 b).

Figura 11 – Modelagem e elementos numéricos simulados no Ansys



a) Esquema da modelagem numérica b) Elementos finitos utilizados na simulação

Fonte: Adaptado de Matos Silva, Flores-Colen e Gaspar (2013)

As propriedades mecânicas e físicas utilizados pelos autores para a argamassa e a parede estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânica e física dos materiais utilizados na simulação numérica

Propriedades	Revestimento	Parede de alvenaria de tijolo
Módulo de Young (GPa)	9942	2000
Coefficiente de Poisson	0,2	0,2

Massa específica seca (kg/m ³)	1550	900
--	------	-----

Fonte: Adaptado de Matos Silva, Flores-Colen e Gaspar (2013)

Para a simulação, os autores inseriram um carregamento uniforme de vento de sucção na fachada da parede de 3 m de altura e 25 cm de espessura e mensuraram o valor da resistência da interface do revestimento de 2,5 cm até a ruptura quando aplicada na fachada da parede uma tensão de tração de 1 kPa. A ideia era que a parede se comportasse da mesma maneira que ocorre nos ensaios de resistência à tração (*pull-off*). Neste sentido, os autores variaram a relação das propriedades da interface δ_n e δ_t associados, respectivamente, a separação interfacial na direção normal e tangencial dos elementos, ou seja, o maior valor de δ_n ocorre para a tensão máxima normal $\sigma_{m\acute{a}x}$. Já o δ_t possui maior valor quando a tensão cisalhante é igual a $\frac{\sqrt{2}}{2}\delta_t$. Dessa maneira, os autores consideram os parâmetros $\sigma_{m\acute{a}x}$ igual a 0,3 MPa ou 1,0 MPa, e para cada $\sigma_{m\acute{a}x}$, a relação (δ_n/δ_t) foi considerada igual a 0,01; 1 e 100. Para cada par das variáveis $\sigma_{m\acute{a}x}$ e δ_n/δ_t , o parâmetro δ_n foi igual a 1×10^{-1} ; 1×10^{-2} ; 1×10^{-3} ; 1×10^{-4} m. Os autores inseriram numericamente três tipos de argamassas de revestimento conforme apresentada na Tabela 3.

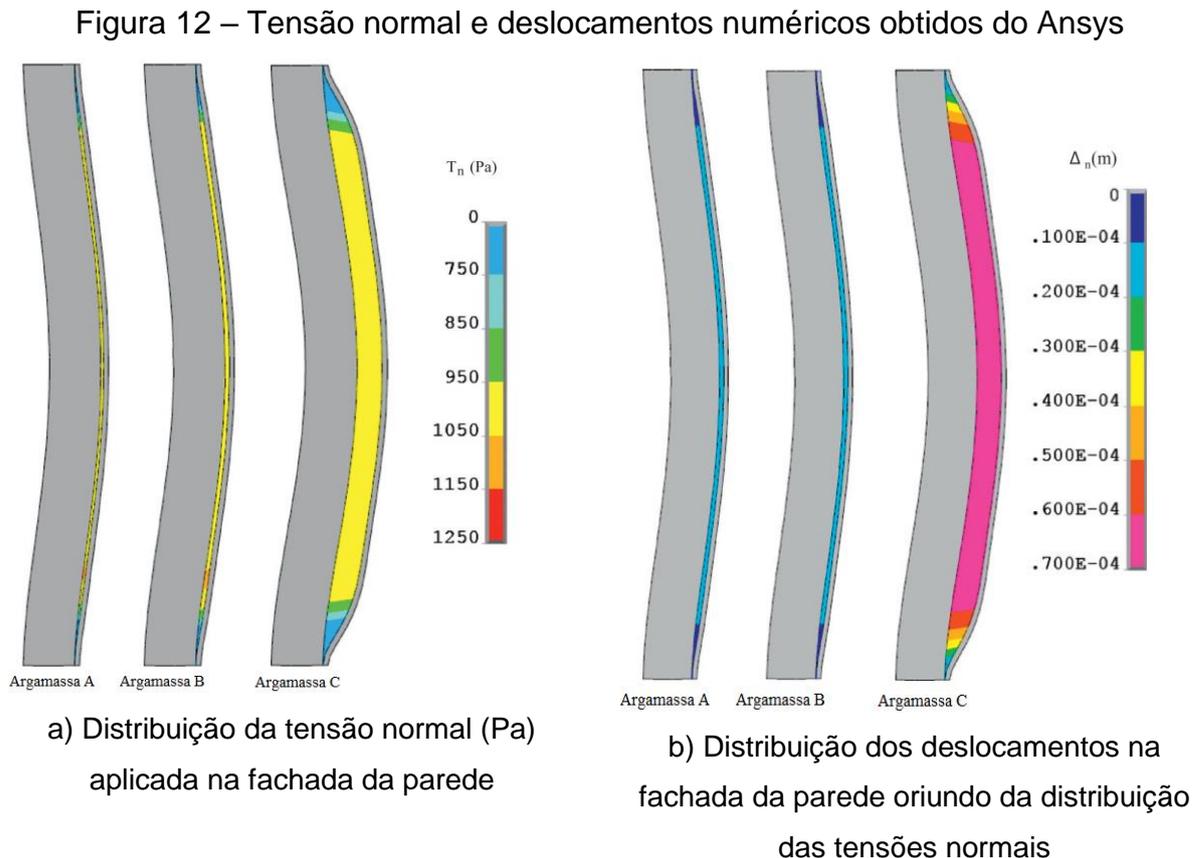
Cinco propriedades são conhecidas: módulo de elasticidade dinâmica ($E_{din.}$); coeficiente de Poisson (ν), resistência à compressão (f_c), massa específica (μ) e resistência à aderência (f_u).

Tabela 3 – Propriedade das argamassas utilizadas no Ansys

Argamassa	$E_{din.}$ (MPa)	ν	f_c (MPa)	μ (kg/m ³)	f_u (MPa)
A: Industrializada (Pré-misturada)	16150	0,2	12,56	1660	0,54
B: Tradicional - traço 1:4 (cimento:areia)	7420	0,2	3,98	1350	0,34
C: Cal não hidráulica - traço 1:2 (cal:areia)	2120	0,2	0,84	1720	0,06

Fonte: Adaptado de Matos Silva, Flores-Colen e Gaspar (2013), tradução nossa

A Figura 12 apresenta os resultados da distribuição de tensão normal e os valores dos deslocamentos interfaciais (Δ_n), cisalhante e os deslocamentos obtidos na interface argamassa-substrato.



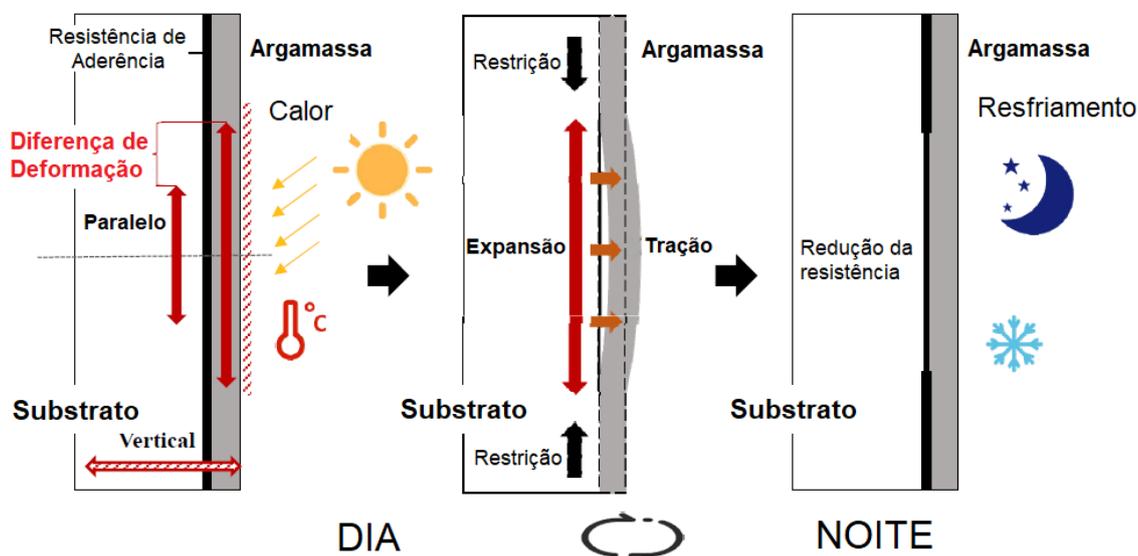
Fonte: Adaptado de Matos Silva, Flores-Colen e Gaspar (2013)

Os autores concluíram que os resultados numéricos com menor valor de δ_n e maior valor de $\sigma_{\text{máx}}$ conduziram a uma interface mais rígida na direção normal e, conseqüentemente, permitiu uma maior aderência da argamassa-substrato. O parâmetro δ_t pouco influenciou na resistência de aderência na direção normal da interface, em contrapartida, maiores valores da relação δ_n/δ_t e menores valores de δ_t elevaram a rigidez ao cisalhamento na interface.

Zhang, Teramoto e Ohkubo (2020) propuseram um método experimental e numérico para avaliar a durabilidade de resistência de aderência de argamassa em concreto quando aplicada uma carga térmica cíclica na argamassa de revestimento

a fim de acelerar a sua degradação. A ideia dos autores foi simular à exposição da argamassa sujeita à radiação solar (Figura 13).

Figura 13 – Aplicação de carga térmica em argamassa de revestimento



Fonte: Adaptado de Zhang, Teramoto e Ohkubo (2020), tradução nossa

As seguintes propriedades mecânicas foram aplicadas numericamente a fim de obter condições idênticas as do laboratório, conforme apresentada na Tabela 4.

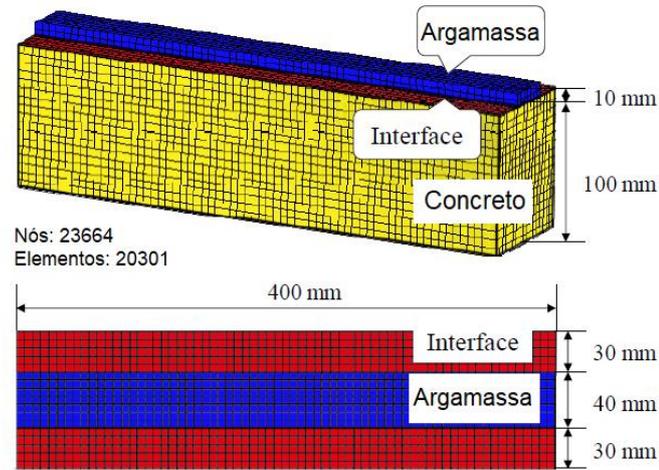
Tabela 4 – Parâmetros físicos e mecânicos do substrato concreto, argamassa e da interface

Parâmetro	Concreto	Argamassa	Interface
Densidade (kg/m ³)	2300	2100	-
Coef. Exp. Térmica (1/°C)	1,10×10 ⁻⁵	1,50×10 ⁻⁵	-
Módulo Elástico (GPa)	28	20	-
Coef. Poisson	0,2	0,2	-
Resistência de aderência à tração (Pa)	2,78×10 ⁶	3,50×10 ⁶	-
Resistência à compressão (Pa)	3,00×10 ⁷	3,96×10 ⁷	-
Máxima Tensão Normal (Pa)			1,05×10 ⁶
Máxima Tensão Tangencial (Pa)			9,73×10 ⁵

Fonte: Adaptado de Zhang, Teramoto e Ohkubo (2020), tradução nossa

Os autores realizaram por meio de irradiação um aumento da temperatura ambiente para 70° C em 105 minutos e, em seguida, fizeram o resfriamento da argamassa de revestimento por meio de aspersão de água durante 15 minutos até completar 300 ciclos. O mesmo foi feito numericamente pela modelagem no software ANSYS Workbench, conforme apresentada na Figura 14.

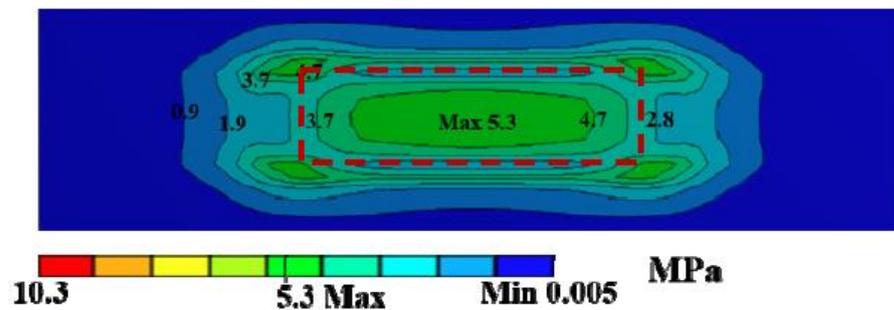
Figura 14 – Modelo numérico em elementos finitos



Fonte: Adaptado de Zhang, Teramoto e Ohkubo (2020), tradução nossa

Após a aplicação da carga térmica em uma região parcial da argamassa os autores concluíram que a deformação da argamassa se comportou de forma consistente quando comparada com modelos físicos reais (Figura 15).

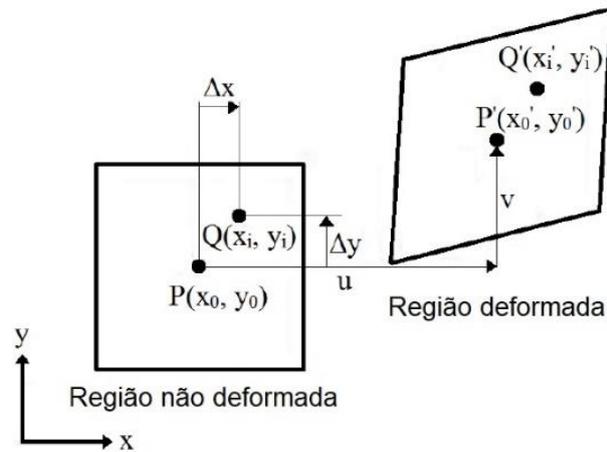
Figura 15 – Aplicação de carga térmica parcialmente na argamassa



Fonte: Adaptado de Zhang, Teramoto e Ohkubo (2020)

Quando aplicada a carga térmica em toda a região da argamassa, o modelo numérico mostrou inconsistência comportamental ao reproduzir o mecanismo de degradação das paredes reais devido a dilatação térmica da argamassa não ser suficientemente restrita (Figura 16).

Figura 17 – Rastreamento de pontos na Correlação de Imagem Digital



Fonte: Adaptado de Nguyen et. al. (2017)

O mapeamento dos deslocamentos dos pontos, conforme apresentada na Figura 17, consiste em localizar as coordenadas iniciais do ponto Q (x_i, y_i) em relação ao ponto central P(x_0, y_0) da imagem de referência não deformada para obtenção das coordenadas na região deformada do ponto Q (x_i', y_i') definidos pelas seguintes funções:

$$\begin{aligned} x_i' &= x_i + \xi(x_i, y_i) \\ y_i' &= y_i + \eta(x_i, y_i) \end{aligned} \quad (3)$$

De acordo com Nguyen et. al. (2017), a função que permite a translação, rotação e as suas combinações é descrita por:

$$\begin{aligned} \xi(x_i, y_i) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ \eta(x_i, y_i) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{aligned} \quad (4)$$

Estas equações descrevem, $\Delta x = x_i - x_0$; $\Delta y = y_i - y_0$; sendo u e v os deslocamentos nas direções x e y, respectivamente em relação ao centro da região de referência e u_x, u_y, v_x, v_y são os valores dos deslocamentos de primeira ordem após a deformação.

Os valores das deformações obtidos pela correlação de imagem digital geralmente referem-se às deformações de Lagrangian-Green. Em geral, essa deformação é descrita como um tensor o qual representa a rotação rígida de um

corpo não deformado sem produzir qualquer deformação. A deformação de Lagrangian-Green nas direções x , y e na direção do cisalhamento xy é definida por:

$$\begin{aligned}
 e_{xx}^G &= \frac{1}{2} \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \left[2e_{xx} + (e_{xx})^2 + (e_{xy})^2 \right] \\
 e_{yy}^G &= \frac{1}{2} \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \left[2e_{yy} + (e_{yy})^2 + (e_{xy})^2 \right] \\
 e_{xy}^G &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u \partial u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial v \partial v}{\partial x \partial y} \right) = e_{xy} \left[1 + \frac{1}{2} (e_{xx} + e_{yy}) \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

Onde $\partial u / \partial x = e_{xx}$ e $\partial v / \partial y = e_{yy}$ correspondem aos valores de deformações infinitesimais, respectivamente nas direções x e y . A deformação de Lagrangian-Green é obtida pelo somatório de todos os termos infinitesimais das deformações e de sua forma quadrática. O termo quadrático de Green refere-se à propriedade de rotação independente do corpo rígido.

Para o caso de estado uniaxial de tensão o deslocamento axial u , sendo o comprimento final L_f correspondente o comprimento final após o estado deformado e L_0 o comprimento inicial obtido por:

$$u = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \cdot x = x \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \tag{6}$$

Assim, considerando na direção x , a direção de aplicação do carregamento, as deformações infinitesimais são idênticas as deformações de Biot definidos por:

$$\varepsilon_{xx} \equiv \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\Delta L}{L_0} \equiv \varepsilon_{xx}^{(B)} \tag{7}$$

Nesse sentido, sob estado uniaxial de tensão, considera-se ausência de deformação cisalhante $\varepsilon_{xy} = 0$. Dessa maneira, A deformação de Lagrangian-Green fica simplificada por:

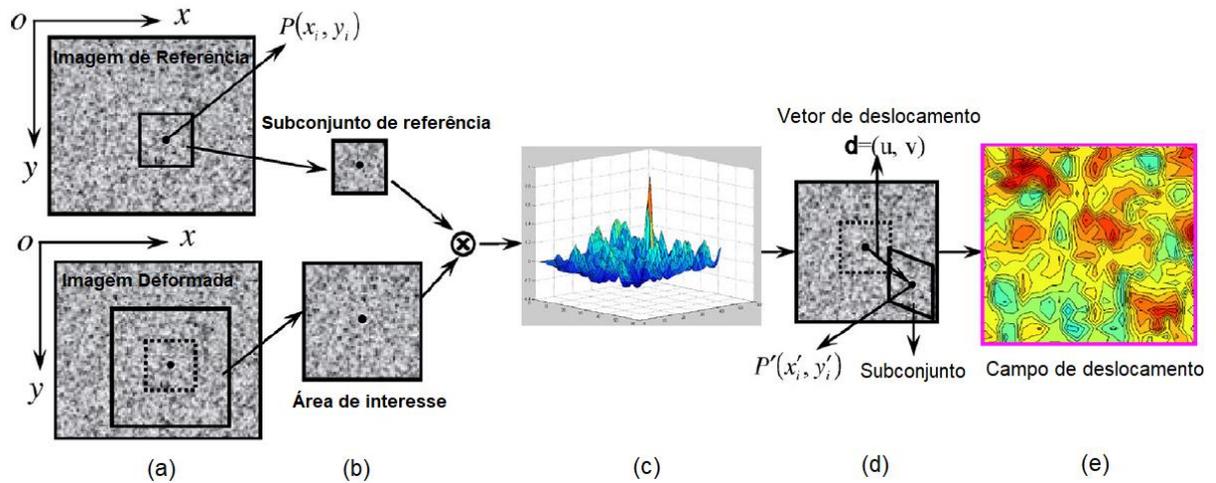
$$\begin{aligned}
 e_{xx}^G &= \frac{1}{2} \left[2e_{xx}^{(B)} + (e_{xx}^{(B)})^2 \right] \\
 e_{yy}^G &= \frac{1}{2} \left[2e_{yy}^{(B)} + (e_{yy}^{(B)})^2 \right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

As deformações de Biot podem ser calculadas utilizando-se das deformações Lagrangian-Green. Observa-se que quando as deformações são pequenas, o termo quadrático pode ser considerado nulo e a deformação Lagrangian-Green se iguala a deformação de Biot.

Os resultados dos deslocamentos e deformações obtidos da correlação de imagem digital são influenciados pelo sistema de medição, condições luminosas e padrão de pontos. O sistema de medição está relacionado à captura da imagem pela lente da câmera, distância focal e software utilizado. A lente da câmera é responsável em transmitir o feixe de luz, refletido pela superfície do objeto em direção às células de armazenamento da câmera. Essas células, traduzem a luz que incide em níveis de tensão de cor que vão de 0 a 255 e são armazenadas em forma de matriz de pixels, conforme são explicados nos trabalhos de Wang e Cuitino (2002), Yaofeng e Pang (2007).

Dessa maneira, Lecompte et al. (2005) e Liu et al. (2015) afirmam que duas imagens de amostras em diferentes estados de deformação são comparadas em termos de assinatura de pixel. Para a imagem não deformada (Figura 18a) procura-se o mesmo pixel na imagem deformada (Figura 18b) a fim de obter uma função de similaridade, na maioria dos casos, uma função de mínimos quadrados e onde calcula-se o coeficiente de correlação de cada pixel (Figura 18c). A unicidade de cada assinatura só é garantida se a superfície tem um padrão não repetitivo, isotrópico e de alto contraste, a fim de garantia de qualidade da região de interesse representada pelo subconjunto de pixels. Essa coleção de pixels é chamada de subconjunto ou janela de correlação. O resultado do deslocamento, expresso no ponto central P do subconjunto, é uma média dos deslocamentos dos pixels dentro do subconjunto (Figura 18d) para então obter o campo de deslocamentos (Figura 18e).

Figura 18 – Princípios da correlação de imagem digital



Fonte: Liu et al. (2015), tradução nossa

O coeficiente de correlação pode ser obtido pela seguinte função:

$$C(X) = \frac{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i - f_m)] \cdot [g(x'_i, y'_i - g_m)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i - f_m)]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n [g(x'_i, y'_i - g_m)]^2}} \quad (9)$$

Onde $f(x_i, y_i)$ e $g(x'_i, y'_i)$ são, respectivamente, os valores de intensidade no ponto (x_i, y_i) do subconjunto de referência e (x'_i, y'_i) da região deformada. Os valores de f_m e g_m representam, respectivamente, a intensidade média da referência e deformada do subconjunto, com n o número de pixels contidos no subconjunto de referência. Sendo X o vetor de deformação desejado. A relação das coordenadas (x_i, y_i) e (x'_i, y'_i) é obtida da função de primeira ordem dada por:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i + u + u_x \Delta x_i + u_y \Delta y_i \\ y'_i &= y_i + v + v_x \Delta x_i + v_y \Delta y_i \end{aligned} \quad (10)$$

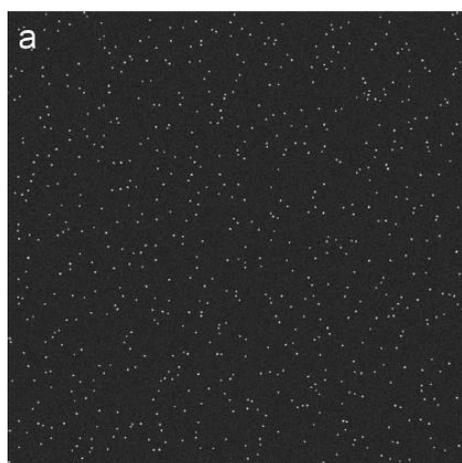
Com u e v os componentes de deslocamentos no ponto (x, y) ; $\Delta x_i = x'_i - x$, $\Delta y_i = y'_i - y$, $x'_i = x_i + u_i$, $y'_i = y_i + v_i$, sendo u_x , u_y , v_x e v_y representam o gradiente de deslocamento de primeira ordem obtidos da iteração Newton-Raphson calculado por:

$$X^{k+1} = X^k - \frac{\nabla C(X^k)}{\nabla \nabla C(X^k)} \quad (11)$$

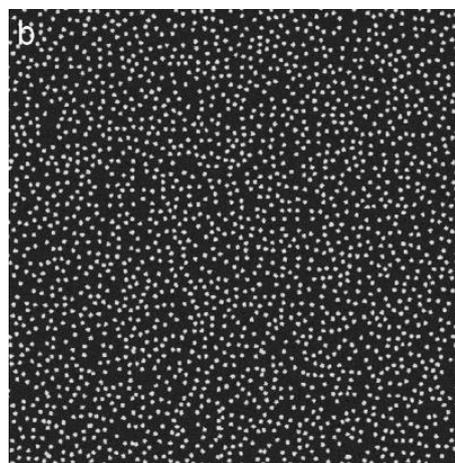
Sendo X^k e X^{k+1} representam os valores iterativos com $X = [u \ u_x \ u_y \ v \ v_x \ v_y]$, $\nabla C(X)$ é o gradiente de correlação e $\nabla \nabla C(X)$ representa a derivada de segunda ordem do coeficiente de correlação, conforme descritos nos trabalhos de Hild e Roux (2006) e Pan et al. (2009).

Crammond, Boyd e Dulieu-Barton (2013) explicam que a relação entre o tamanho e a densidade dos pontos das pinturas na área de interesse pode ser usada para mostrar que as propriedades morfométricas, como tamanho, forma e distribuição são importantes indicadores do padrão qualidade. Dessa forma, foi desenvolvido um programa capaz de gerar diferentes combinações entre o tamanho dos pontos e sua densidade na área de interesse com raio dos pontos da pintura variando de 2 a 9 pixels e subconjunto de referência de 128×128 pixels. Assim, subconjuntos menores apresentam menor variação na forma do que os de maiores dimensões. Por exemplo, a Figura 19a apresenta pontos com raio de 3 pixels e a Figura 19b contendo raios de 8 pixels.

Figura 19 – Exemplos de padrões de pinturas com pontos de diferentes raios



a) Pontos com raio de 3 pixels



b) Pontos com raio de 8 pixels

Fonte: Crammond, Boyd e Dulieu-Barton (2013)

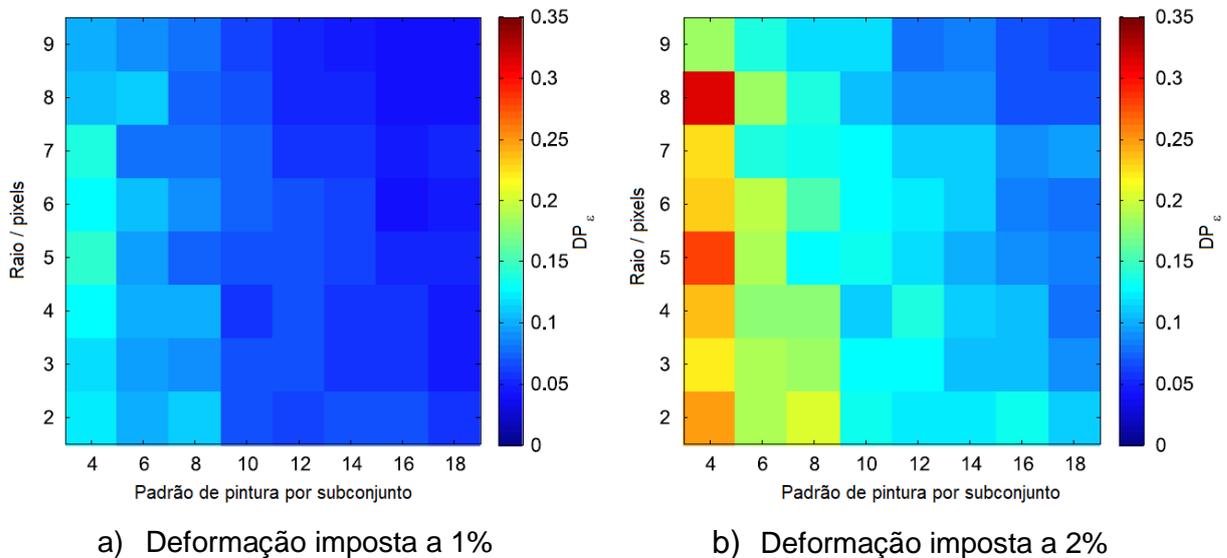
Crammond, Boyd e Dulieu-Barton (2013) submetem os padrões de pinturas a deformações impostas em intervalos de 0,1 % até o máximo de 2 % em um subconjunto de 128×128 pixels. É importante observar que, o uso da correlação de imagem digital na engenharia, geralmente, os erros são avaliados sob o nível de tensão. Porém, os autores afirmam que qualquer alteração na resposta da tensão derivativa do processo de correlação de imagem digital pode ser atribuída à

mudanças no padrão de pinturas e não a incertezas resultantes da baixa qualidade da correlação de imagem. Quanto à análise de deformações específicas, o desvio padrão DP entre um campo de deformação imposta ($\varepsilon_{imposta}$) e as obtidas pela correlação de imagem digital (ε_{DIC}), para n pontos avaliados do subconjunto é calculado por:

$$DP_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{n \sum (\varepsilon_{DIC} - \varepsilon_{imposta})^2 - \left(\sum (\varepsilon_{DIC} - \varepsilon_{imposta}) \right)^2}{n(n-1)}} \quad (12)$$

A Figura 20 apresenta o erro na medida de deformações específicas simuladas, respectivamente, para a deformação imposta de 1 % e 2 %.

Figura 20 – Erro de medição por correlação de imagem digital

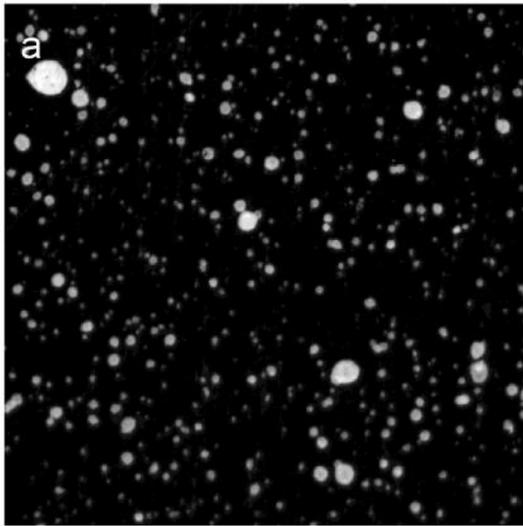


Fonte: Adaptado de Crammond, Boyd e Dulieu-Barton (2013), tradução nossa

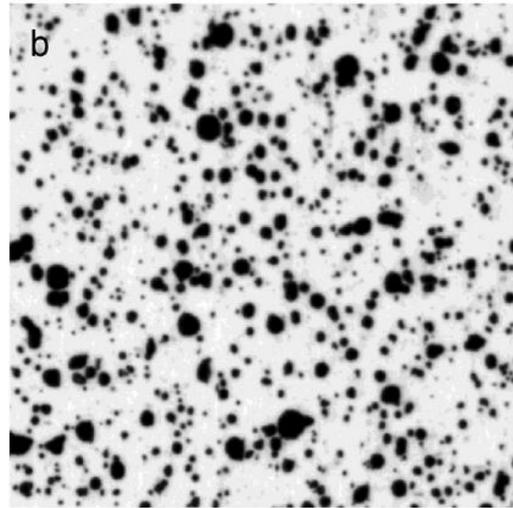
É possível observar um gradiente claro indo da esquerda para a direita em ambas imagens da Figura 20. Este gradiente mostra que ocorreu maior erro médio em subconjuntos contendo uma menor distribuição de pontos. O erro reduz em regiões de maior densidade de pontos da pintura, uma vez que favorece o rastreamento para o cálculo do campo de deslocamento, neste exemplo, da esquerda para a direita.

Os mesmos autores verificaram também a influência do padrão de pintura ao utilizarem tinta de spray e outra com tinta de aerógrafo alterando o contraste com fundo branco e fundo preto (Figura 21).

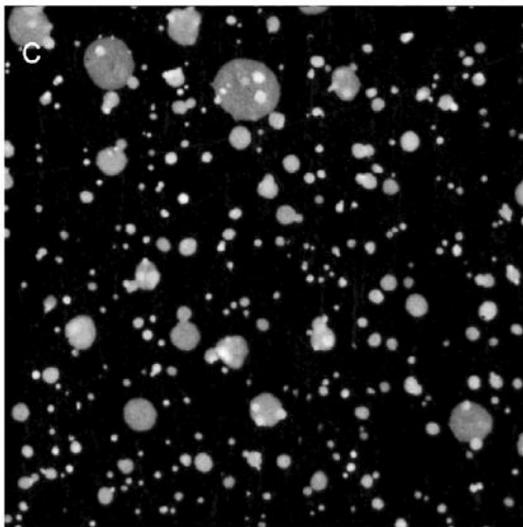
Figura 21 – Avaliação da influência da pintura na distribuição dos pontos do subconjunto



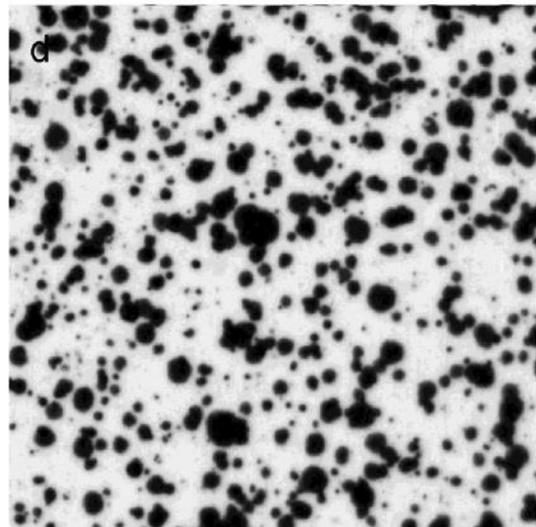
a) Padrão A – pintura por aerógrafo



b) Padrão B – pintura por aerógrafo



c) Padrão C – pintura por spray

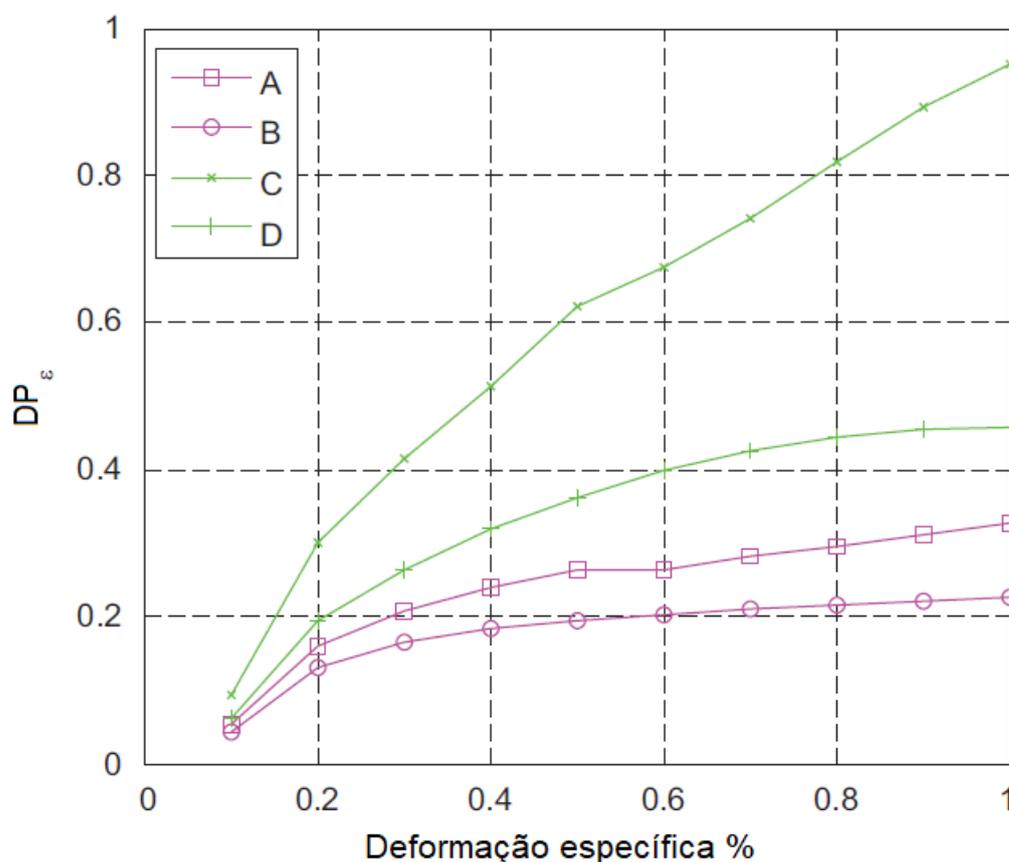


d) Padrão D – pintura por spray

Fonte: Adaptado de Crammond, Boyd e Dulieu-Barton (2013), tradução nossa

A Figura 22 apresenta a relação do desvio padrão DP em função da porcentagem de deformação específica para os padrões de pintura de A a D.

Figura 22 – Relação do erro e deformação específica para os padrões de pinturas A, B, C e D.



Fonte: Adaptado de Crammond, Boyd e Dulieu-Barton (2013), tradução nossa

A análise local demonstrou grandes diferenças entre as propriedades da pintura e também que a mudança da tinta de spray para um aerógrafo foi benéfica na mensuração global dos erros.

Por meio da correlação de imagem digital é possível calcular o coeficiente de Poisson para materiais sólidos elástico linear.

Um material sólido é considerado elástico linear se a força necessária para uma variação dimensional é proporcional com a força aplicada. Para Timoshenko (1983), a resposta mecânica de um material elástico homogêneo e isotrópico é amplamente caracterizada por duas constantes físicas derivadas de ensaios experimentais. Por exemplo, no campo da tensão de tração ou de compressão são caracterizados pelo módulo de elasticidade, chamado também de módulo de Young e pelo coeficiente de Poisson.

O coeficiente de Poisson é uma das propriedades mais importantes no estudo da caracterização de materiais sólidos homogêneos e é definido pela relação da deformação transversal pela deformação longitudinal.

Embora, o coeficiente de Poisson pode ser considerado uma constante para pequenas deformações, Greaves et al. (2011) reportam que ela pode ser aplicada para materiais que apresentam deformações elevadas. Nesse sentido, Mihai e Gorieli (2017) descrevem que para um material elástico não linear, o coeficiente de Poisson pode ser expresso utilizando-se de medidas como os de Lagrangian-Green e Hencky.

Existem também, para materiais sob pequenas deformações específicas, a possibilidade de se obter comportamentos geométricos não lineares utilizados em aplicações da engenharia. Em geral, as respostas mecânicas de materiais elásticos não lineares não podem ser representadas por constantes, porém são descritos por parâmetros que são funções escalares da deformação.

A complexidade de definir tais funções vem do fato de que existem várias maneiras de definir deformações e tensões em deformações não lineares, dando origem a múltiplas funções não lineares correspondentes para o mesmo parâmetro linear. Para Evans (2017), Staber e Guillemot (2017) e Wex et al. (2015), a escolha dessas funções depende de como um experimento particular é conduzido e como os dados experimentais são processados.

Para um material elástico sujeito a grandes deformações, segundo Janmey et al. (2006), Nunes e Moreira (2013), Fu, Chui e Teo (2013) a abordagem que se faz é aproximar as constantes que aparecem no modelo matemático e aplicar técnicas de otimização numérica a fim de minimizar valores residuais da relação tensão-deformação e dos dados experimentais.

Quando a geometria e condições de contorno de um corpo deformado são complexas, geralmente, de acordo com Belytschko et al. (2001), Wriggers (2007), Crespo, Latorre e Montans (2017) recorrem-se às simulações numéricas em que as suas propriedades são alteradas até que a resposta mecânica de tensão e deformação corresponda aquelas obtidas dos ensaios experimentais. Na prática o custo computacional deve ser levado em consideração, especialmente quando geometrias complexas e malha de elementos finitos muito pequenas estão envolvidas.

Na correlação de imagem digital, a saída de resultados das deformações específicas dos programas computacionais, como a utilizada no NCorr são as de Lagrangian-Green, descrita na seção 3.2 deste estudo. Porém, Mihai e Gorieli (2017) explicam que as deformações de Hencky e Biot são mais utilizadas na prática para a determinação de propriedades elásticas.

Hill (1970) define a deformação elástica não linear aplicada para materiais não homogêneos pela seguinte equação:

$$e_n(a) = \begin{cases} \ln(a) & \text{Se } n = 0 \\ \frac{a^n - 1}{n} & \text{Se } n \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

Onde, $n = 0, 1, 2$ representam, respectivamente, a deformação de Hencky $e^{(H)}$, deformação de Biot $e^{(B)}$ e deformação Lagrangian-Green $e^{(G)}$. No estado uniaxial de tensão na direção de x , a deformação Hencky ($n=0$) é igual a $e_{xx}^{(H)} = \ln(a)$ e $e_{yy}^{(H)} = \ln(\lambda)$, e a deformação Biot ($n=1$) é igual a $e_{xx}^{(B)} = a - 1$ e $e_{yy}^{(B)} = \lambda - 1$. Sendo a e λ a variação do comprimento pelo comprimento inicial, respectivamente nas direções longitudinal e transversal. Observa-se que tanto os valores de a e λ podem ser obtidas das deformações de Biot. e serem utilizadas para calcular a deformação de Hencky.

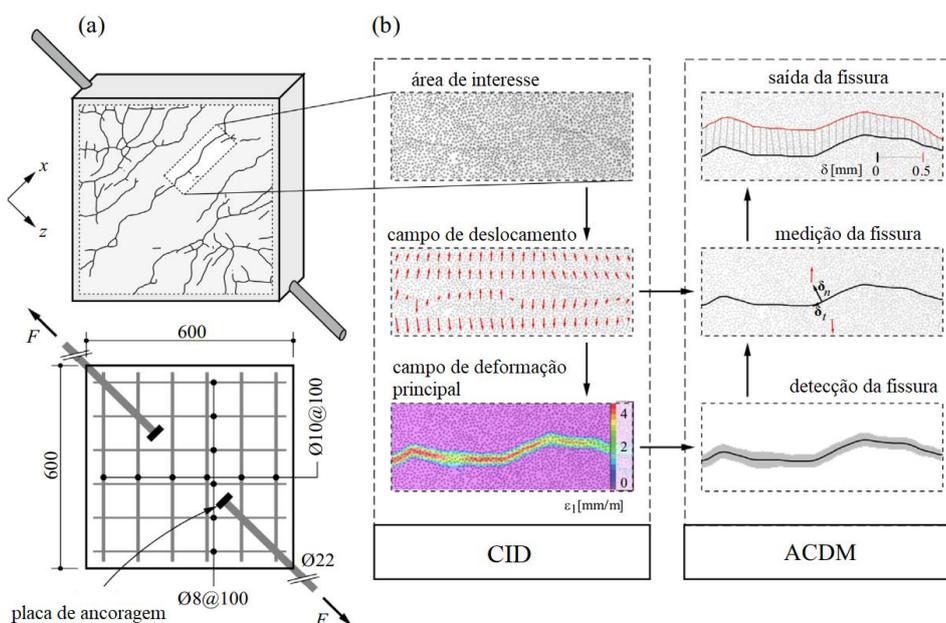
No âmbito da engenharia, considerando o estudo desta tese, geralmente a alvenaria composta pelo bloco cerâmico revestida de argamassa é descrita, de forma simplificada, como um material isotrópico, mas a realidade não é esta. Os sistemas formados por blocos cerâmicos revestidos por argamassa são constituídos por diferentes materiais que trabalham conjuntamente caracterizando-a em um compósito.

A fim de compreensão desse método, as próximas seções descrevem estudos de comportamento mecânico realizados pelo uso da correlação de imagem digital.

3.3 ESTUDOS DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL APLICADA EM SUBSTRATOS REVESTIDOS POR MATRIZ CIMENTÍCIA

A investigação do comportamento mecânico de materiais semi-frágeis foi realizada numericamente no trabalho de Gehri, Mata-Falcón e Kaufmann (2020). O objetivo consistiu em investigar a inclinação, comprimento, espaçamento e direção de deslocamentos da fissuração por meio da correlação de imagem digital (CID) aplicada em painéis de concreto. Um dos lados dos painéis foi instrumentado com uma câmera com resolução de imagem de 2,63 pixels/mm e analisados no software comercial VIC-3D e por uma ferramenta computacional de detecção de fissuras implementada no MatLab denominada de *Automated Crack Detection and Crack Measurement* (ACDM). Para os autores, a principal vantagem do CID em relação às técnicas clássicas de medição consiste em sua versatilidade, uma vez que permite monitorar toda a superfície da amostra e extrair informações sobre o comportamento estrutural na fase de pós-processamento. A metodologia utilizada para o mapeamento das fissuras está apresentada na Figura 23 a e o fluxograma para a detecção de fissuras pela ferramenta ACDM bem como pela correção de imagem digital.

Figura 23 – Metodologia de detecção de fissura elaborada por Gehri, Mata-Falcón e Kaufmann (2020)



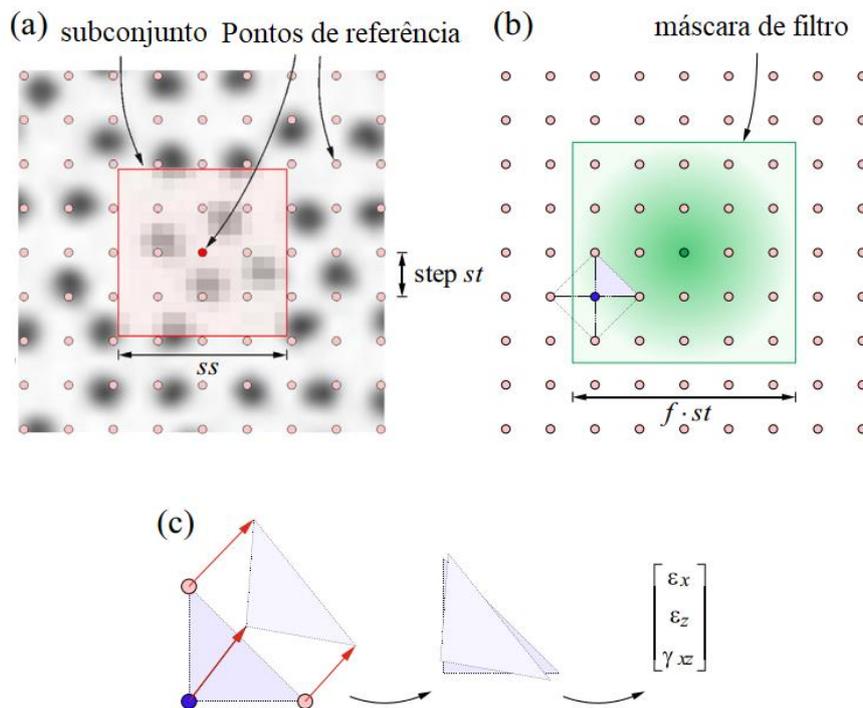
- a) Esquema do ensaio experimental b) Fluxograma para uso da correlação de imagem digital (CID) e da detecção de fissuras (ACDM)

Fonte: Adaptado de Gehri, Mata-Falcón e Kaufmann (2020), tradução nossa

Para rastrear os deslocamentos de pixels entre as imagens adquiridas, os autores estabeleceram áreas exclusivas conhecidas como subconjuntos de dimensão “ ss ” no estado indeformado da região de interesse (Figura 24a). O centro de cada subconjunto é rastreado para cada par de imagens no estado deformado pela correlação de imagem. O espaçamento entre os pontos do subconjunto recebeu a denominação de “ $step\ st$ ” (Figura 24a). Para os autores, é comum que a dimensão entre os pontos seja da ordem de 1/2 a 1/3 do tamanho do subconjunto, não ultrapassando a medida de 1/6. Os autores inseriram uma máscara de filtro Gaussiano de centro definido a fim de suavizar as deformações locais (Figura 24b). Por fim, o campo de deformação (ϵ) e rotação (γ) são calculados a partir de pontos de referências apresentados na Figura 24c.

Figura 24 – Definições do subconjunto a partir da região de interesse usado no

CID

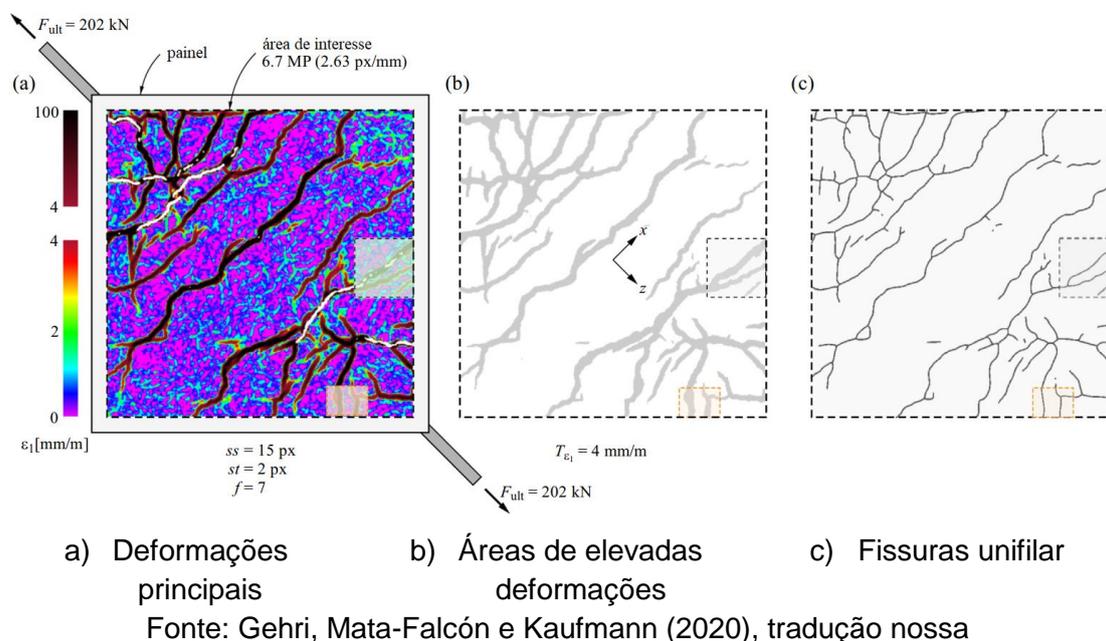


Fonte: Adaptado de Gehri, Mata-Falcón e Kaufmann (2020), tradução nossa

Ao analisarem as deformações principais de tração (Figura 25a), bem como área de elevadas deformações (Figura 25b), foi possível transformar as fissuras em segmentos unifilares (Figura 25c) para receberem as nomenclaturas dos nós e das ramificações. Os autores definiram as áreas exclusivas dos subconjuntos de

dimensão “ ss ” igual a 15 pixels e o espaçamento entre os pontos do subconjunto “ $step\ st$ ” igual a 2 pixels.

Figura 25 – Detecção de fissuras do painel de concreto por CID correspondente ao valor de força última de 202 kN.



Os autores concluíram que a ferramenta de detecção de fissuração mostrou excelente desempenho na comparação das fissuras físicas apresentadas no bloco de concreto. Fissuras com aberturas mínimas correspondentes a 0,05 px correspondente a uma imagem de 0,38 mm/px de resolução podem ser detectadas para um campo de visão situada a 2 metros da amostra. Dessa maneira, a utilização de ferramentas estatísticas é essencial para a consolidação das respostas mais detalhadas, principalmente ao analisar experimentos em larga escala.

Drougkas et al. (2020) buscaram determinar as propriedades ortotrópicas de materiais compósitos utilizados em alvenarias a partir de suas propriedades isotrópicas. Os autores realizaram ensaios de compressão e de flexão em amostras de tijolos e argamassa, bem como construíram painéis de alvenaria para monitorar os deslocamentos horizontais e verticais instrumentados por LVDTs e calcularam as linhas de contorno de deslocamentos utilizando a metodologia de correlação de imagem digital. Essa metodologia permitiu a determinação das propriedades elásticas ortotrópicas dos compósitos da alvenaria como o Módulo de Young (E), resistência à compressão (f_c) e coeficiente de Poisson (ν).

Também os mesmos ensaios foram realizados para 8 amostras cúbicas de tijolos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 40 mm. Durante os ensaios foram realizados três ciclos de carregamento e descarregamento compostos de 10 %, 20 % e 50 % do valor estimado de sua ruptura a uma taxa controlada de 0,2 mm/min (Figura 26a).

Os deslocamentos foram medidos pela utilização de LVDTs, conforme apresentada na Figura 26b. A caracterização da resistência à flexão (f_{flex}) dos tijolos e da argamassa foram realizadas pelo ensaio de flexão de três pontos (Figura 26c) em amostras de 40 mm x 40 mm x 160 mm, com o carregamento aplicado a uma taxa controlada de 0,2 mm/min.

Figura 26 – Ensaio experimental realizado por Drougkas et al. (2020)



Fonte: Drougkas et al. (2020)

Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados das propriedades mecânicas e elásticas de Drougkas et al. (2020)

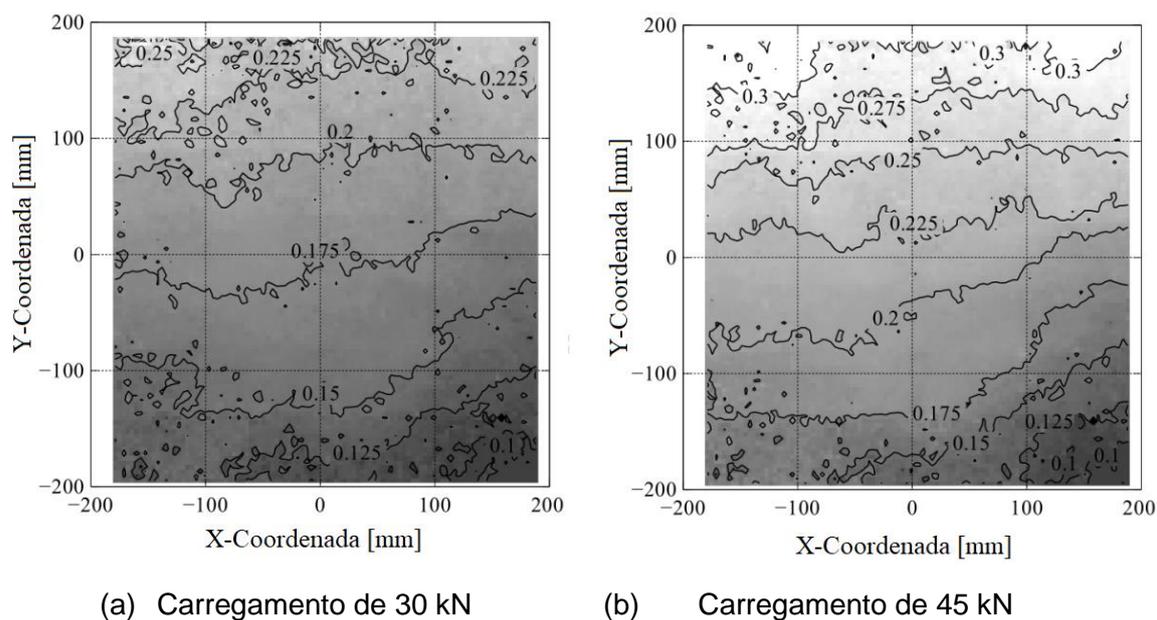
Material	f_c (N/mm ²)	E (N/mm ²)	f_{flex} (N/mm ²)
Tijolo	9,62 (0,227)	2570 (0,297)	3,65 (0,066)
Argamassa	3,0 (0,217)	920 (0,382)	0,92 (0,250)
Pares de tijolos	6,01 (0,0335)	2025 (0,332)	

*Coeficiente de variação está indicado entre parênteses

Fonte: Drougkas et al. (2020), tradução nossa

Os resultados dos deslocamentos verticais obtidos do método de correlação de imagem digital obtidos por Drougkas et al. (2020) de um painel carregado a uma força de 30 kN e 45 kN estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Deslocamentos verticais em mm obtidos após análise da correlação de imagem digital em 30 e 45 kN dos painéis de alvenaria sob compressão vertical.



Fonte: Adaptado de Drougkas et al. (2020)

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de Poisson dos painéis localizados na extremidade e na região central pelo método da correlação de imagem.

Tabela 6 – Resultados do coeficiente de Poisson pelo método da correlação de imagem digital

Painel	Coeficiente de Poisson	
	Central	Extremidade
V1	0,198	0,161
V2	0,137	0,174
Média vertical	0,168	0,168
H1	0,216	0,277
H2	0,223	0,785
Média horizontal	0,220	0,531

Fonte: Adaptado de Drougkas et al. (2020) tradução nossa

Os valores obtidos pelo método da correlação de imagem digital para os painéis carregados verticalmente foram iguais, porém, os valores dos coeficientes de Poisson na região de extremidade dos painéis carregados horizontalmente se

diferenciaram e indicaram que a medição externa é afetada pelo movimento lateral dos painéis sem restrição de translação horizontal. Contudo, o coeficiente de Poisson na região central apresentou resultados próximos e aceitáveis dos obtidos experimentalmente pelo LVDT. Por fim, os autores observaram que para escala macroscópica, a metodologia proposta para a obtenção dos resultados das propriedades mecânicas tanto experimentalmente quanto numericamente foram equiparáveis.

3.4 TRABALHOS DE ANÁLISE NUMÉRICA DE ALVENARIA

O uso de programas de elementos finitos tem ajudado pesquisadores na resolução de problemas que variam desde análise linear simples a simulações não lineares complexas, com objetivo principal de permitir a aplicação de vários cenários para a determinação de comportamentos realísticos. Dessa maneira, a simulação numérica permite associar a geometria e o material de cada elemento constituinte do modelo, bem como escolher o tipo de interação, aplicar carregamentos a uma taxa controlada, e gerar resultados em qualquer parte do modelo finito.

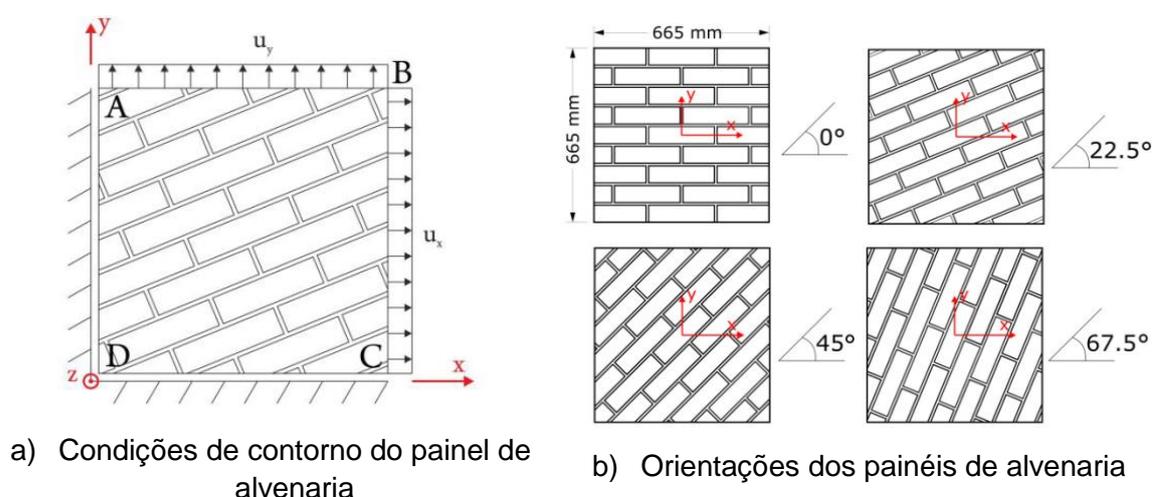
No âmbito dos estudos de blocos cerâmicos, nas últimas décadas, a atenção dos engenheiros está sendo dedicada a método de análise numérica de estruturas de alvenaria conforme observados em Lotfi e Shing (1994), Lourenço e Rots (1997), Berto et. al (2004), Milani, Lourenço e Tralli (2006), Milani (2010), Stravrids e Shing (2010), Kowalewski e Gajewski (2015), Abdulla, Cunningham e Gillie (2017), D' Altri et al. (2018) e Dauda, Iuorio e Lourenço (2020). Essa metodologia tem por base o desenvolvimento de modelos numéricos calibrados a partir de ensaios experimentais. O método dos elementos finitos (MEF) é uma das ferramentas poderosas para a modelagem de estruturas contínuas. Isto é realizado ao converter a estrutura em elementos finitos com propriedades mecânicas estimadas como, por exemplo, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, resistência à compressão e resistência à tração.

Existem duas categorias na abordagem do MEF para a modelagem de alvenaria denominada de homogênea ou heterogênea. A argamassa de assentamento e a unidade do bloco da alvenaria são tratadas isoladamente como materiais heterogêneos. Porém, alguns autores consideram a modelagem do conjunto de materiais inseridos para compor uma unidade de alvenaria, pela

aplicação das propriedades homogêneas. De acordo com Ahmad, Khan e Gupta (2014), embora modelos homogêneos são tradicionalmente utilizados para a modelagem de alvenaria, os modelos heterogêneos são mais representativos. A consideração da alvenaria como material homogêneo ou heterogêneo é uma escolha chave para a modelagem numérica. A análise numérica de macro e micromodelos da alvenaria é utilizada para prever e comparar os diferentes comportamentos que cada uma das metodologias pode ocorrer. Enquanto que a modelagem macro considera o material sendo homogêneo, ela é capaz de fornecer uma resposta aproximada para o design básico da alvenaria. De acordo com Shen, Moon e Yin (2008), Abdulla et al. (2017) e D' Altri et al. (2018), a abordagem do macro modelo considera a alvenaria como um compósito e é usada para estudar o comportamento geral da estrutura, porém, este modelo não é capaz de prever o comportamento local da montagem da alvenaria. Já a micro modelagem permitir prever o comportamento da alvenaria. Neste método, a unidade do bloco cerâmico, a argamassa de assentamento bem como a interação na interface pode traduzir um comportamento mais realístico.

Kowalewski e Gajewski (2015) modelaram numericamente quatro painéis quadrados de alvenaria medindo 665 mm × 665 mm, com direção da interface inclinada em relação ao eixo x iguais a: 0°; 22,5°; 45° e 67,5°, como mostrada na Figura 28.

Figura 28 – Proposta de modelagem numérica dos painéis de alvenaria



Fonte: Kowalewski e Gajewski (2015)

Em cada caso foi considerada nas condições de contorno que as arestas AD e CD possuíam deslocamentos nulos e, as arestas AB e BC foram submetidas a carregamentos de compressão e tração nas direções x e y. O objetivo principal do trabalho foi determinar a superfície limite para os ensaios de compressão/tração ao considerar as diferentes orientações das juntas da interface e, comparar com os resultados reais obtidos no trabalho de Page (1981). Os autores realizaram a micromodelagem numérica dos painéis no programa de elementos finitos Abaqus e aplicaram elementos coesivos para a discretização das juntas de argamassa. Para descrever o comportamento elástico dos elementos constituintes da alvenaria de tijolos, foi assumida a seguinte relação linear para materiais isotrópicos:

$$\sigma = \lambda \varepsilon I + 2\mu \varepsilon \quad (14)$$

Onde σ e ε são as tensões e deformações específicas de segunda ordem do tensor I. Os parâmetros λ e μ são obtidos pelas constantes do módulo elástico E e coeficiente de Poisson:

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1-2\nu) \cdot (1+\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \quad (15)$$

Quanto os modelos constitutivos da interface (elementos coesivos) entre o substrato cerâmico e a argamassa, os autores descrevem a interface como modelo elástico linear com relação de vetores de tensões interfacial $t = \sigma_n$, com n o vetor normal ao plano da interface e σ , o tensor de tensões fora do plano da interface e ε , o vetor das deformações da seguinte forma:

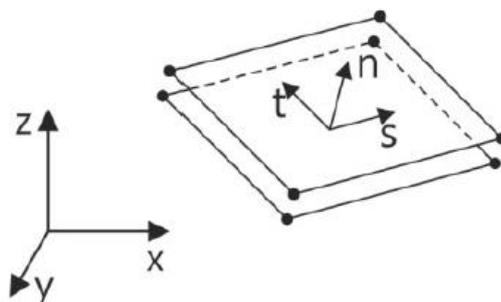
$$t \rightarrow \begin{pmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{sn} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{tn} & K_{ts} & K_{tt} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{pmatrix} \rightarrow K \varepsilon \quad (16)$$

K é o tensor de segunda ordem que descreve a rigidez interfacial e os parâmetros do vetor de deformação ε são obtidos por:

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}, \quad \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}, \quad \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0} \quad (17)$$

Onde δ_i é o deslocamento interfacial nas direções normal (n), tangencial (t) e perpendicular (s) ao vetor t, conforme apresenta a Figura 29.

Figura 29 – Sistema de coordenada local dos elementos coesivos



Fonte: Kowalewski e Gajewski (2015)

A solução numérica foi realizada utilizando o programa de elementos finitos Abaqus, cuja modelagem dos tijolos foi realizada utilizando o elemento finito de quatro nós CPS4R e para a argamassa aplicou-se o elemento coesivo COH2D4.

As propriedades mecânicas utilizadas para a alvenaria e para a interface estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades dos materiais para o tijolo e interface de argamassa

Tijolos		Interface				
E [N/mm ²]	ν	K_{nn} [N/mm ³]	K_{ss} [N/mm ³]	t_n [N/mm ²]	t_s [N/mm ²]	δ_{nn} [mm]
20000	0,15	2000	890	0,5	0,75	0,08

Fonte: Kowalewski e Gajewski (2015), tradução nossa

A simulação ocorreu em duas etapas de carregamento, a primeira etapa consistiu na aplicação de deslocamentos na direção x (u_x) da aresta BC, nos valores de -0,05 mm, -0,10 mm e -0,15 mm, e resultou em uma deformação uniaxial de compressão. No primeiro processo de análise todos os componentes do painel trabalharam dentro da faixa de elasticidade. Na segunda etapa foram aplicados deslocamentos na aresta superior do painel causando tensão e, conseqüentemente, a sua ruptura.

Para cada u_x aplicado, os autores somaram as forças reativas dos nós para calcular as tensões de compressão σ_{xx} . Por outro lado, a tensão σ_{yy} representou a média dos valores de tração e foi calculada pela soma das forças reativas dos nós na direção y dividido pela seção transversal inicial.

A Tabela 8 apresenta os resultados numéricos das tensões nas direções x e y, cujos valores em negrito são os valores médios das tensões σ_{xx} na direção x e σ_{yy} na direção y.

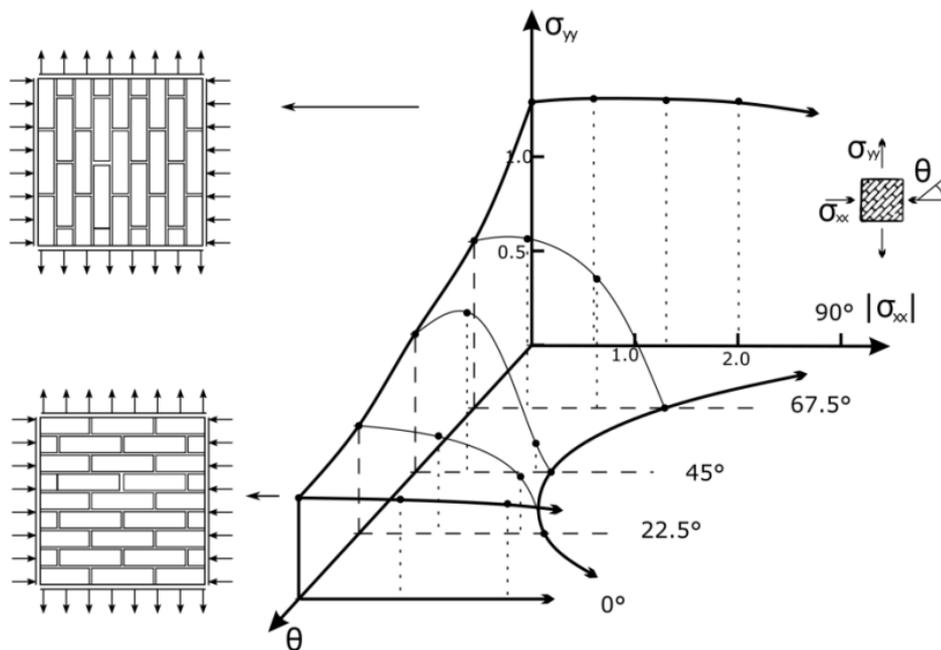
Tabela 8 – Resultados da simulação numérica de tensão biaxial

u_x [mm]	0°		$22,5^\circ$		45°		$67,5^\circ$		90°	
	σ_{xx} [N/mm ²]	σ_{yy} [N/mm ²]								
-0,00	0	0,485	0	0,515	0	0,659	0	0,794	0	1,178
-0,05	1,041	0,476	0,860	0,466	0,682	0,761	0,644	0,808	0,704	1,189
-0,10	2,082	0,455	1,698	0,272	1,314	0,137	1,288	0,616	1,408	1,187
-0,15	3,123	0,425	1,797	-	1,317	-	1,851	-	2,113	1,184

Fonte: Kowalewski e Gajewski (2015)

Os autores verificaram que para o carregamento de compressão aplicada na direção u_x , não ocorreu a ruptura dos painéis orientados a 0° ou 90° . A Figura 30 apresenta as superfícies de rupturas dos resultados numéricos apresentados na Tabela 8.

Figura 30 – Superfícies de ruptura para as tensões biaxiais da simulação numérica

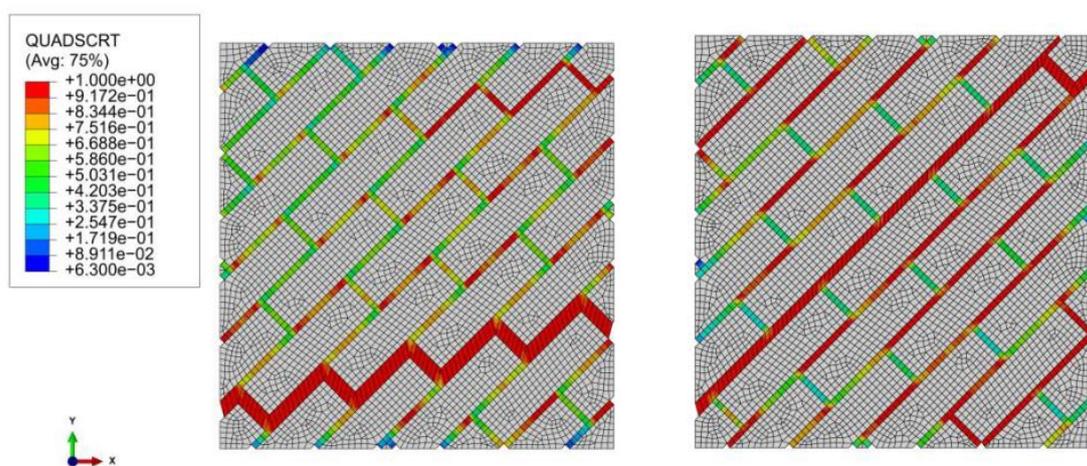


Fonte: Kowalewski e Gajewski (2015)

É possível observar graficamente (Figura 30), a dependência do plano de ruptura das superfícies dos painéis de alvenaria em função do ângulo e do carregamento aplicado.

A Figura 31 apresenta o modo de ruptura do painel orientado a 45° . A Figura 31a apresenta o modo de ruptura dos elementos coesivos de interface sem a aplicação do carregamento de compressão na direção x , ou seja, somente foi aplicado o carregamento de tração na direção u_y . A Figura 31b apresenta o modo de ruptura resultante dos elementos coesivos de interface com a aplicação do carregamento de compressão na direção u_x .

Figura 31 – Superfície de ruptura do painel de alvenaria orientado a 45° simulados numericamente



a) Modo de ruptura sem aplicação da compressão em u_x

b) Modo de ruptura após a aplicação de compressão em u_x

Fonte: Kowalewski e Gajewski (2015)

A comparação qualitativa entre os modelos experimentais e numéricos apresentou a possibilidade de aplicação dos modelos de materiais constitutivos do método de elementos finitos do Abaqus na avaliação do comportamento de alvenaria sob tensões biaxiais.

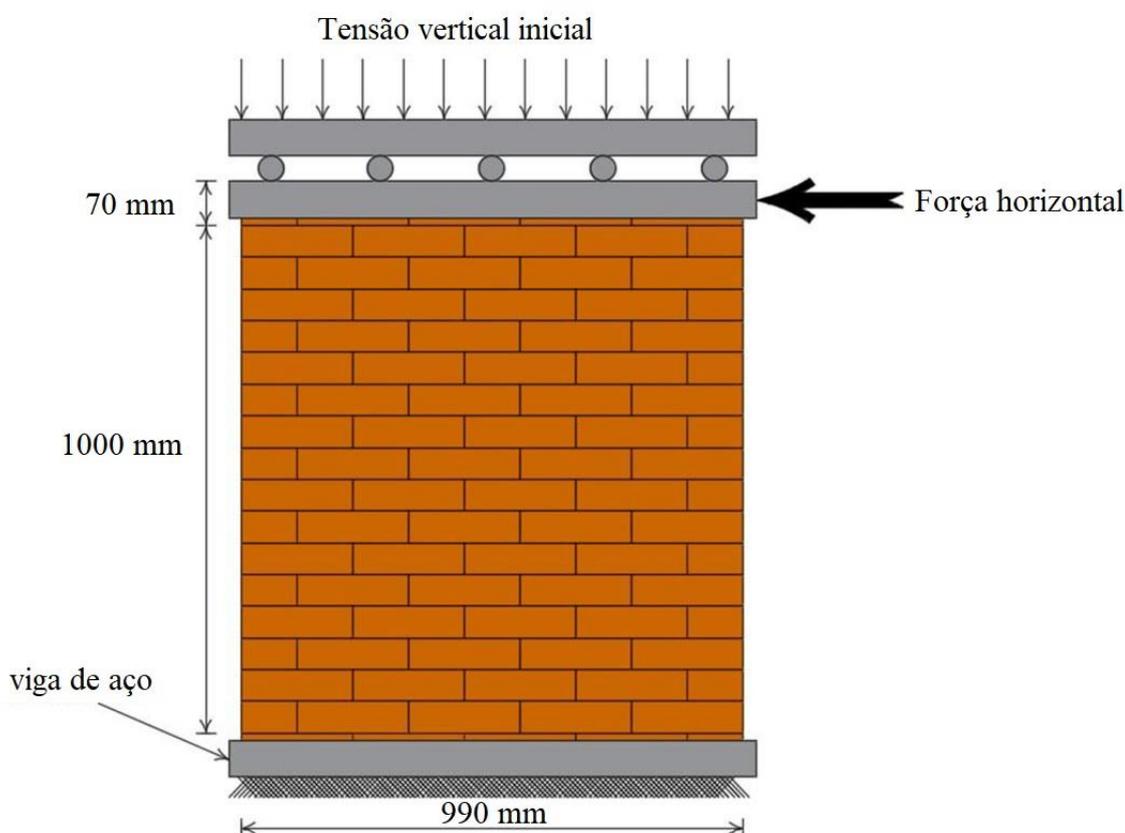
Abdulla, Cunningham e Gillie (2017) realizaram um micromodelo simplificado de paredes de alvenaria utilizando simulação numérica por meio do método de elementos finitos estendidos (XFEM) no programa Abaqus. Para isso, os autores realizaram três análises numéricas de parede de alvenaria, a fim de realizar comparação experimental dos resultados de ensaios obtidos por Raijmakers e Vermelthoort (1992). Os autores realizaram um estudo de malha a fim de determinar em qual delas apresentaram resultados coerentes e com menor custo computacional.

As etapas para a análise numérica consistiram em inserir carregamentos controlados e de forma incremental. O efeito da não linearidade geométrica foi

considerado na modelagem e o algoritmo de Newton-Raphson, responsável por resolver iterativamente as condições de equilíbrio, foi adotado para a solução numérica. Nesse sentido, os autores também inseriram nos modelos numéricos, o efeito de degradação ou deletério devido a perda de instabilidade numérica ocorrida nas juntas da argamassa dos blocos de alvenaria, bem como a adoção de um parâmetro de viscosidade como estabilizador de danos produzido na interface coesiva.

A modelagem numérica das paredes de alvenaria de blocos cerâmicos possuía as mesmas dimensões do estudo de Raijmakers e Vermeltoort (1992). As paredes ensaiadas eram de 990 mm de largura x 1000 mm de altura x 100 mm de espessura e foram construídas com 18 fiadas de tijolos maciços de 210 mm de comprimento x 52 mm de espessura x 100 mm de largura, conforme apresentada na Figura 32. A espessura da argamassa de assentamento foi de 10 mm moldada por cimento, cal e areia, respectivamente, nas proporções 1:2:9.

Figura 32 – Paredes de blocos cerâmicos submetidas a força horizontal, estudadas por Raijmakers e Vermeltoort (1992)



Fonte: Abdulla, Cunningham e Gillie (2017), tradução nossa

As propriedades elásticas mecânicas utilizadas para a alvenaria e para a ligação da argamassa pela interface estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades dos materiais para o tijolo e interface de argamassa

Tijolos			Argamassa					
E_u	ν	E_m	K_{nn}	K_{ss}	K_{tt}	t_n	t_s	δ_{nn}
[MPa]		[MPa]	[N/mm ³]	[N/mm ³]	[N/mm ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]
16700	0,15	1030	110	50	50	0,5	0,75	0,08

Fonte: Adaptado de Abdulla, Cunningham e Gillie (2017), tradução nossa

Sendo K_{nn} é a rigidez na direção normal dos elementos coesivos da interface obtidos pela relação do Módulo Elástico do Tijolo (E_u) e argamassa (E_m) em razão da espessura da argamassa na junta de ligação (h_m), ou seja:

$$K_{nn} = \frac{E_u E_m}{h_m (E_u - E_m)} \quad (18)$$

Já os elementos coesivos interfacial nas direções cisalhantes K_{ss} e K_{tt} são obtidos pela relação entre os módulos elásticos transversais do tijolo (G_u) e argamassa (G_m) em razão da espessura da argamassa na junta de ligação (h_m), dado por:

$$K_{ss} \text{ e } K_{tt} = \frac{G_u G_m}{h_m (G_u - G_m)} \quad (19)$$

Os autores utilizaram as seguintes propriedades não lineares para a interface, quanto à tensão normal máxima de tração $t_n^{máx}$, coesão c , coeficiente de atrito interfacial μ , apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades não lineares da interface

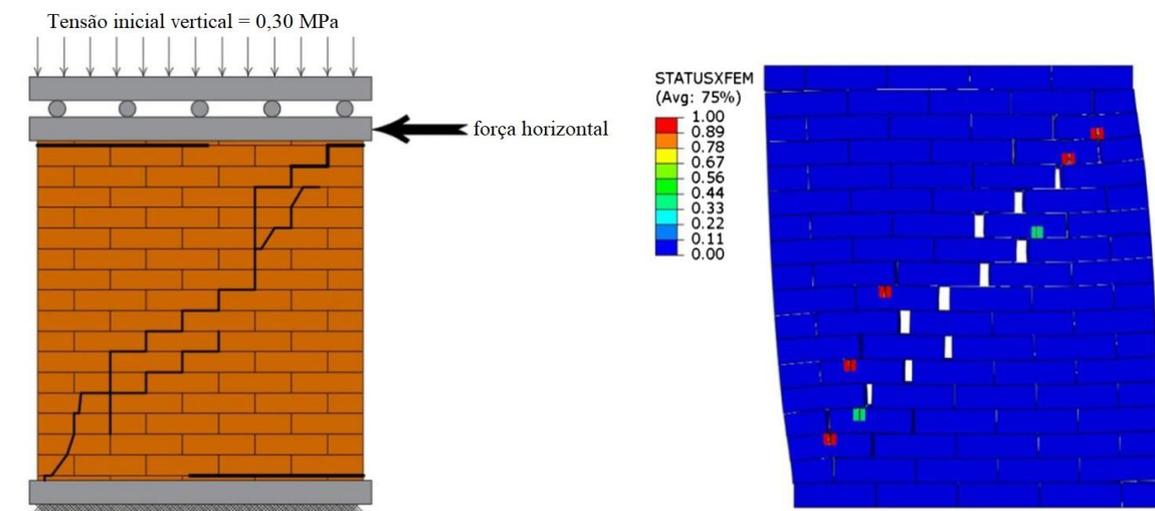
Tijolos		
Tração		Cisalhamento
$t_n^{máx}$ [MPa]	c [MPa]	μ
16700	0,224	0,75

Fonte: Adaptado de Abdulla, Cunningham e Gillie (2017), tradução nossa

Para a unidade do tijolo sob aplicação de carregamento de tração e de cisalhamento, os autores obtiveram as seguintes propriedades de resistência à tração igual a 2 MPa e de cisalhamento no valor de 2,8 MPa.

Os resultados numéricos apresentaram concordância com os resultados experimentais em termos de deslocamentos horizontais, além de modos de rupturas semelhantes. Por exemplo, os modelos numéricos dos painéis apresentaram modos de rupturas consistente com os experimentais (Figura 33) e, foram caracterizadas, por fissuras em sua região superior e inferior nos estágios iniciais de carregamento.

Figura 33 – Comparação do modo de ruptura do painel de alvenaria



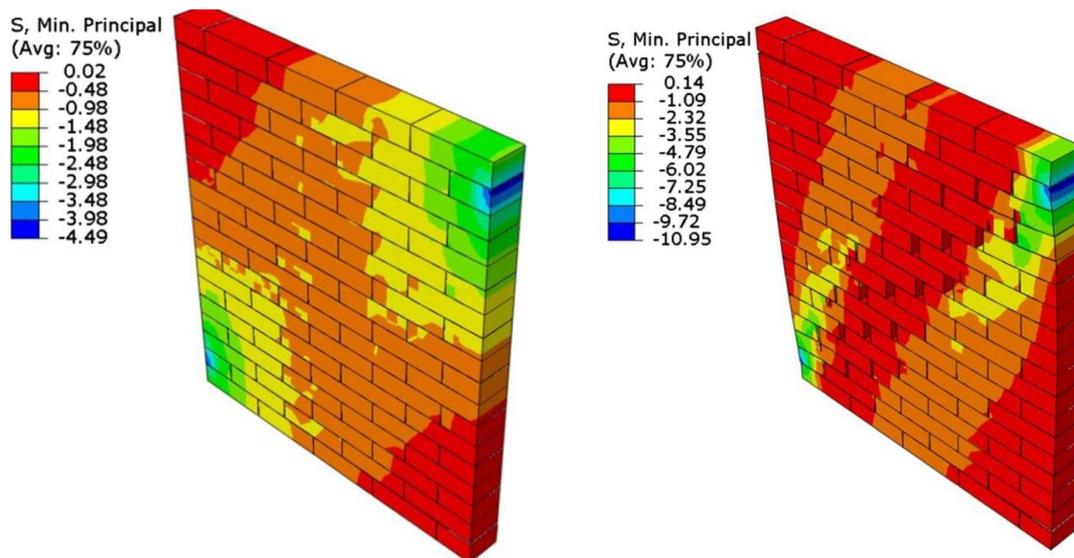
a) Padrão de ruptura do modelo experimental

b) Padrão de ruptura do modelo numérico (fator de escala = 20)

Fonte: Abdulla, Cunningham e Gillie (2017), tradução nossa

Estas fissuras progrediram de forma escalonada pela diagonal dos painéis e entre as unidades dos blocos de alvenaria até que os blocos sofressem esmagamento em sua região superior e inferior, conforme apresentada na Figura 34.

Figura 34 – Padrão de fissuras do painel de alvenaria com distribuição das tensões mínimas principais (N/mm²) sob tensão de compressão vertical inicial de 0,3 MPa



a) Painel com deslocamento de 1 mm em sua região superior

b) Painel com deslocamento de 4 mm em sua região superior (fator de escala = 20)

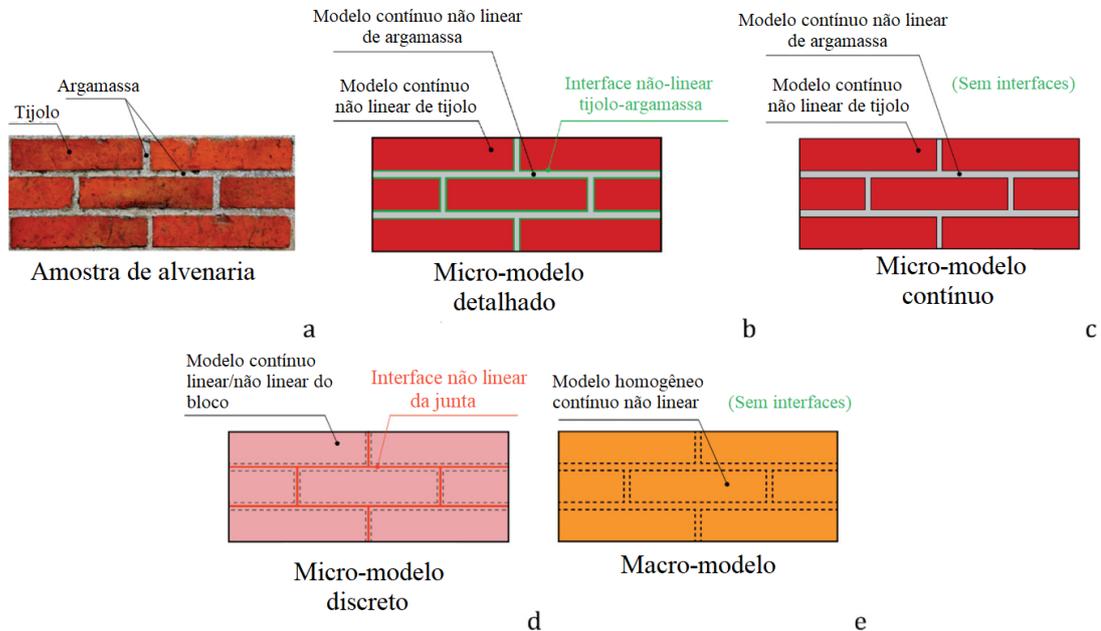
Fonte: Abdulla, Cunningham e Gillie (2017)

Os autores concluíram que o método de elementos finitos estendido (XFEM) utilizado com a micromodelagem numérica dos blocos cerâmicos e argamassas apresentaram resultados mecânicos próximos aos dos experimentais. A aplicação da abordagem de fissuração progressiva e o comportamento pós-ruptura, ao considerarem a não linearidade entre a unidade do bloco e a interface coesiva da junta de argamassa obedeceram a lei de separação na tração. A abordagem descrita pelos autores trouxe uma nova perspectiva na modelagem 3D de alvenaria sem que o usuário recorra a códigos numéricos. Além disso, o uso do XFEM aliado à micromodelagem permite apresentar as fissuras nos blocos de alvenaria sem a necessidade, durante a modelagem, de especificar trincas locais. O método de elementos finitos estendido pode ser uma alternativa na modelagem que utiliza procedimentos numéricos explícitos dinâmicos e que apresentam um custo computacional maior e são mais complexos de interpretar. A abordagem desenvolvida pelos autores possibilita a análise completa de estruturas de alvenaria sob combinações de cargas complexas.

D' Altri et al. (2018) analisaram numericamente a resposta mecânica de painéis de alvenaria de blocos cerâmicos a partir de um novo micro-modelo detalhado. O micromodelo detalhado é caracterizado por unidades texturizadas de um tijolo e camadas de argamassas representados por elementos finitos sólidos 3D e que obedecem às leis constitutivas de deformações plásticas. Existem várias

estratégias para a modelagem numérica na análise de estruturas de alvenarias de blocos cerâmicos, conforme apresenta a Figura 35.

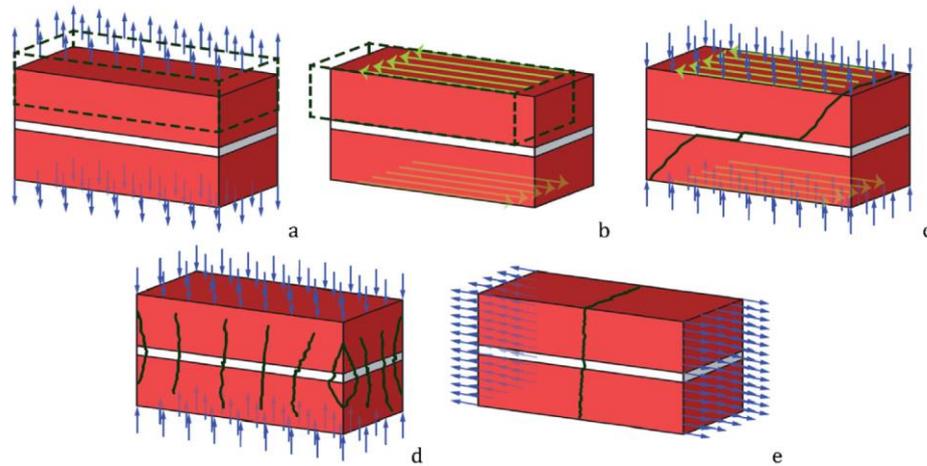
Figura 35 - Estratégias para a modelagem numérica na análise de estruturas de alvenarias de blocos cerâmicos



Fonte: D'Altri et al. (2018), tradução nossa

O modelo mais preciso para simular o comportamento mecânico deverá explicar os principais mecanismos de ruptura da alvenaria. Esses mecanismos de rupturas podem ocorrer na tração da interface tijolo-argamassa (Figura 36a), deslizamento devido o cisalhamento, caracterizado pela ruptura da ligação entre o tijolo e a argamassa (Figura 36b), fissuras diagonais (Figura 36c), esmagamento dos blocos (Figura 36d) e ruptura de tração no tijolo e argamassa (Figura 36e).

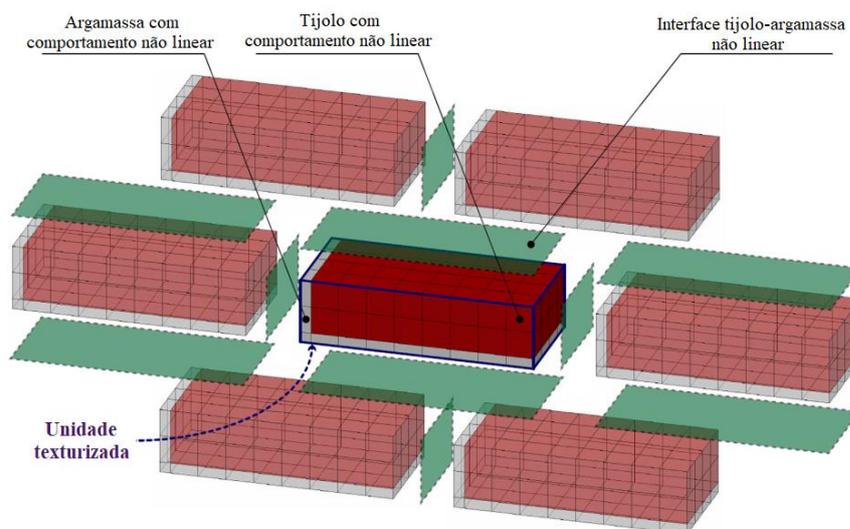
Figura 36 – Mecanismos de ruptura de alvenaria



Fonte: D' Altri et al. (2018)

Os autores implementaram a seguinte proposta para a micro-modelagem no software ABAQUS: os tijolos cerâmicos e a argamassa foram modelados por elementos finitos 3D de comportamento não linear e, a interface tijolo-argamassa foi descrita por uma superfície não linear com o valor de espessura igual a zero. A composição texturizada do modelo numérico é discretizada na Figura 37, a qual apresenta o tijolo cerâmico (elementos na cor vermelha), argamassa (elementos na cor cinza) e interface tijolo-argamassa (superfície na cor verde).

Figura 37 – Micro modelagem detalhada dos blocos cerâmicos



Fonte: D' Altri et al. (2018), tradução nossa

Os tijolos e a argamassa são caracterizados por apresentarem deformações plásticas não lineares sob regime de tração e compressão. Cada camada de argamassa está ligada continuamente a um tijolo e separada por uma interface. As propriedades mecânicas adotadas na simulação numérica estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas para modelagem numérica de alvenaria

Propriedades da argamassa		Propriedades da interface			
Módulo de Young [MPa]	2970	Comportamento à tração		Comportamento cisalhante	
Coefficiente de Poisson	0,15	f_t [MPa]	0,28	$\tan \phi$	1,01
		μ_k [mm]	0,20	c [MPa]	0,87
		ζ	4,38	δ_k [mm]	0,4
Propriedades do tijolo				ξ	1,1
Módulo de Young [MPa]	16700			μ	0,73
Coefficiente de Poisson	0,15				

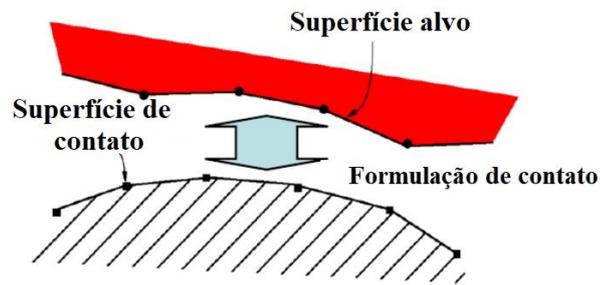
Fonte: D' Altri et al. (2018), tradução nossa

Nesse sentido, os autores modelaram numericamente duas paredes de bloco cerâmico com todas as arestas restritas a movimentação e estando sob a atuação biaxial de momentos fletores, a fim de composição idêntica às realizadas experimentalmente no trabalho de Chee Liang (1996).

Os autores concluíram que o comportamento da interface foi consistente entre os modelos experimentais e numéricos das amostras em escala reduzida de alvenarias. A partir dessa comparação foi demonstrado que a modelagem proposta permite a representação precisa do comportamento da alvenaria e, pode ajudar pesquisadores a otimizar as configurações experimentais ao prever o padrão de ruptura, fissuração, carga máxima e deslocamentos.

Quanto ao contato interfacial de materiais, dentre os vários programas de elementos finitos, o Abaqus descreve como as superfícies entram em contato uns com os outros entre uma superfície alvo e uma superfície de contato. Durante a simulação, os nós individuais que compõem o elemento finito da superfície escrava tentam fazer contato com o ponto associado mais próximo da superfície mestre. Dessa maneira, uma discretização da área de contato é realizada entre a superfície mestre e a superfície escrava a fim de que a análise superficial ocorra obedecendo à lei de contato, conforme apresentada na Figura 38.

Figura 38 – Definição da superfície mestre-escrava no Abaqus



Fonte: Adaptado de Abaqus (2011), tradução nossa

É importante saber que no caso da modelagem de deslizamento na ligação da interface, o modelo de elemento finito deve ser capaz de simular o processo de aderência e atrito interfacial. A modelagem da aderência e do atrito interfacial são amplamente utilizados na mecânica da fratura segundo Cerioni (2008) e Alfaro et al. (2010).

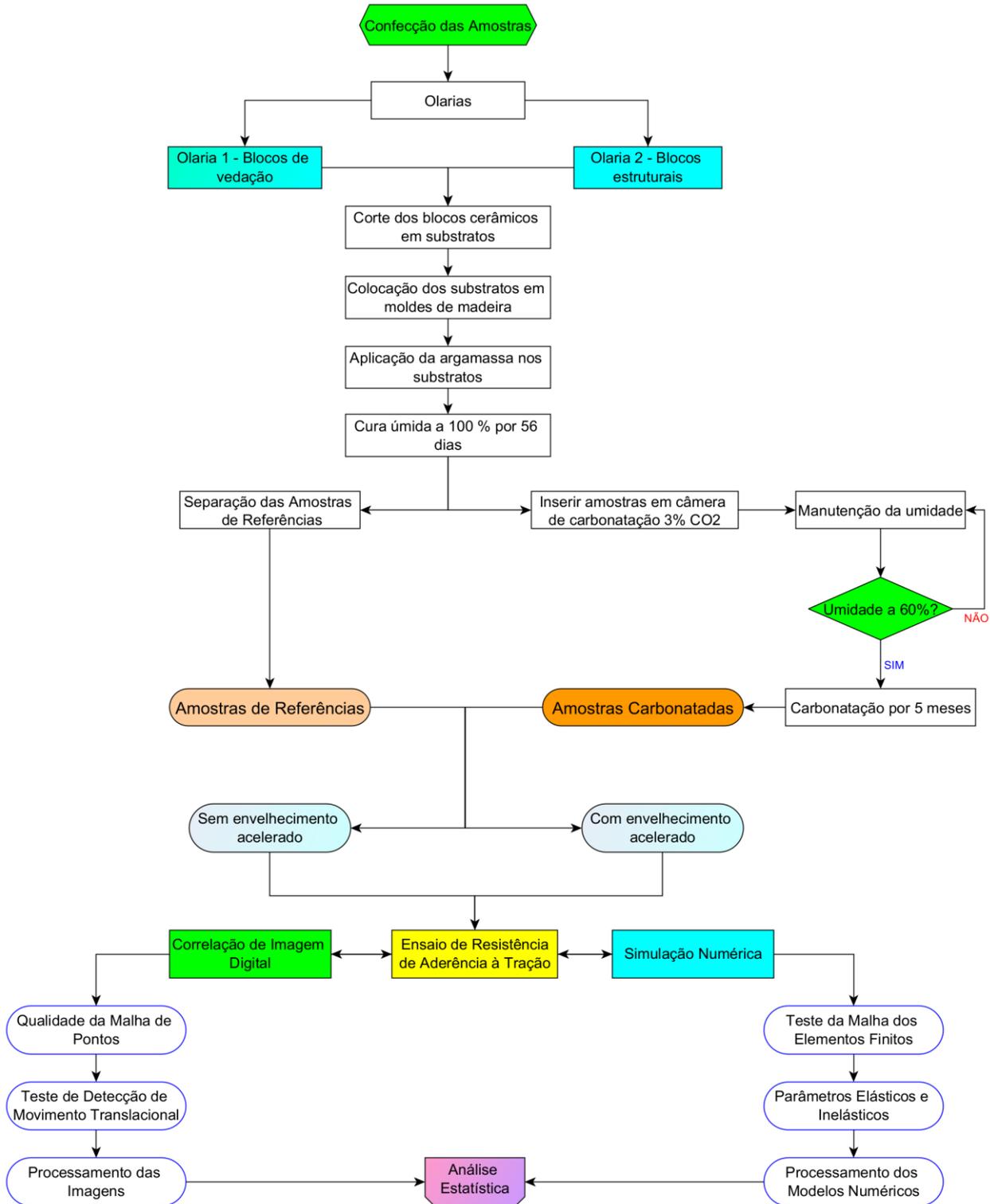
4 MATERIAIS E MÉTODO

O desenvolvimento deste estudo ocorreu em seis etapas:

- Produção das amostras de substratos cerâmicos revestidos por argamassas que posteriormente foram carbonatadas e submetidas a envelhecimento acelerado (Item 4.1);
- Determinação da resolução da imagem de captura CID e estimativa de erros (Item 4.2);
- Avaliação da qualidade da malha de distribuição de pontos na região de interesse (Item 4.3);
- Ensaio de resistência de aderência à tração com o uso da correlação de imagem digital (Item 4.4);
- Modelagem e análise numérica no programa computacional ABAQUS (Item 4.5).
- Análise estatística dos resultados obtidos por CID e de modelos numéricos (Item 4.6)

O processo de trabalho mencionados pode ser melhor compreendido pelo fluxograma apresentada na Figura 39.

Figura 39 - Fluxograma das etapas do estudo experimental



Fonte: Autor (2023)

As próximas seções descrevem o processo a ser realizados para o desenvolvimento deste estudo.

4.1 BLOCOS CERÂMICOS PARA A CONFECÇÃO DOS SUBSTRATOS

As amostras experimentais foram realizadas em conjunto com a estudante de mestrado Camila Werner Menegotto. As amostras foram divididas em 3 grupos com as seguintes nomenclaturas: referência (REF), carbonatadas (CARB) e carbonatado envelhecido (CARB E).

Foram utilizados para a moldagem dos substratos cerâmicos, exemplares de blocos cerâmicos de duas olarias diferentes estudados por Arnold (2021) do grupo de pesquisa GMAT, ambas de faces lisas conforme apresentada na Figura 40.

Os exemplares da olaria 1 são blocos de vedação e os exemplares da olaria 2 são blocos estruturais.

Figura 40 – Exemplares de blocos cerâmicos para confecção dos substratos



(a) Bloco de vedação – olaria 1



(b) Bloco estrutural – olaria 2

Fonte: Menegotto (2023)

Os exemplares foram cortados em suas faces lisas nas dimensões 50 mm x 50 mm x 15 mm para posterior aplicação da argamassa.

Ao todo foram moldadas 20 amostras para cada variável e olarias especificada nos objetivos: não carbonatadas e carbonatadas envelhecidas, totalizando 80 amostras, conforme resumo da Tabela 12.

Tabela 12 – Número de amostras confeccionadas

Olaria	Não Carbonatadas	Carbonatada envelhecida
1	20	20
2	20	20

Fonte: Autor (2023)

Foi necessária a realização da caracterização dos substratos cerâmicos, uma vez que os seus parâmetros físicos e mecânicos servirão de dados de entrada para a modelagem numérica. A Tabela 13 apresenta os resultados da caracterização dos substratos cerâmicos das olarias 1 e 2 utilizadas no ensaio de resistência de aderência à tração extraídos do trabalho de dissertação de Menegotto (2023).

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de caracterização dos blocos cerâmicos da Olaria 1 e Olaria 2

Ensaio	Resultado	Desvio	Resultado	Desvio
		Padrão		Padrão
	Olaria 1		Olaria 2	
Absorção de Água Total (%)	17,72	1,17	11,37	0,99
Absorção de Água Inicial (g/cm ²) / min	1,67	0,11	15,32	1,41
Área Bruta (cm ²)	144,97	1,9	839,43	5,68
Área Líquida (cm ²)	2416,67	40,01	2731,5	24,09
Resistência à Compressão (MPa)	4,65	1,29	7,1	0,6
Resistência à Tração Superficial (MPa)	0,23	0,03	0,91	0,14

Fonte: Adaptado de Menegotto (2023)

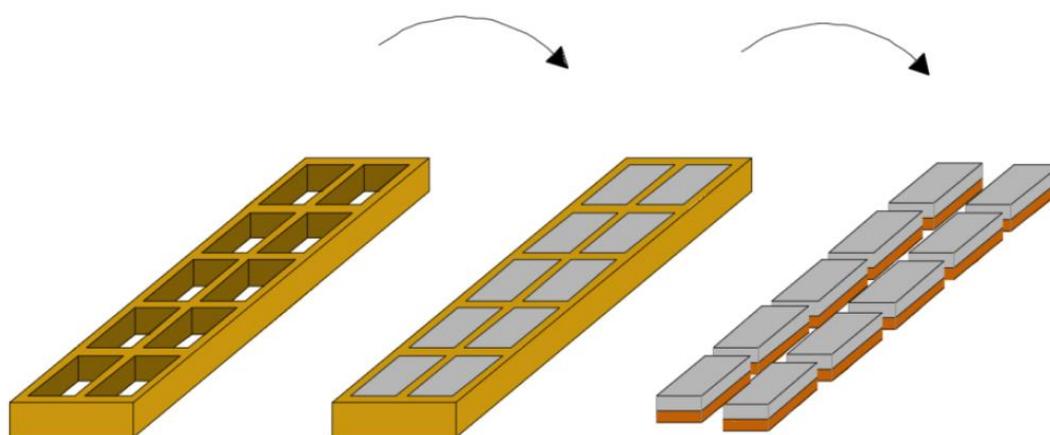
Conforme Menegotto (2023), tanto os blocos da olaria 1, como os blocos da olaria 2 estão coerentes com os valores de ensaios normativos da ABNT NBR 13528-3:2019 e NBR 15270-2:2017 quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, exceto o valor de resistência à compressão da olaria 1 que ficou abaixo da classe de resistência à compressão do bloco de 8 MPa. Porém, o resultado de resistência à compressão da olaria 1 não influenciará na avaliação da resistência de aderência interfacial argamassa-substrato pela correlação de imagem digital haja visto que o valor determinado ainda é elevado, superando o esforço de tração previsto para o ensaio.

4.1.1 Argamassa de revestimento nos substratos cerâmicos

A dosagem das argamassas foi determinada por meio de testes iniciais até alcançar uma relação água cimento a/c ideal para obter um espalhamento de 260 ± 10 mm. No trabalho de Menegotto (2023) foram testados dois traços, sendo 1:1:4 e 1:1:6, relação a/ac 0,80 e identificado o traço de maior probabilidade de ruptura da interface sendo, o traço 1:1:4 escolhido para confecção das amostras.

A argamassa de revestimento aplicada nos substratos cerâmicos foi colocada em um molde de madeira, aplicada por meio de queda livre de uma altura de 1 m. O molde de dimensões $60 \times 80 \times 40$ mm comporta a moldagem de dez peças cerâmicas, conforme apresentada na Figura 41.

Figura 41 – Moldagem das amostras aplicadas por Menegotto (2023)



Fonte: Menegotto (2023)

Após a aplicação da argamassa, foi realizado o nivelamento no topo das faces para regularização das superfícies e retirada do excesso de argamassa para que fique com espessura de 2 cm, conforme descreve a ABNT NBR 13749:2013. As amostras foram desenformadas após 48 horas da aplicação da argamassa e levada ao processo de cura por 56 dias em câmara úmida com umidade relativa de 100 %.

A Tabela 14 apresenta os resultados da caracterização da argamassa no estado fresco com traço unitário 1:1:4 e a Tabela 15 refere-se a caracterização da argamassa no estado endurecido ambas extraídas do trabalho de dissertação de Menegotto (2023), caracterizados conforme a ABNT NBR 9778:2009 e que serão dados de entrada para a caracterização do material na modelagem numérica.

Tabela 14 – Resultado de caracterização da argamassa no estado fresco

Ensaio	Resultado	Desvio Padrão
Índice de Consistência (mm)	256,00	1,53
Densidade de Massa (g/cm ³)	2012,59	10,48
Teor de Ar Incorporado (%)	9,00	0,15
Retenção de Água (%)	97,32	0,6

Fonte: Adaptado de Menegotto (2023)

Tabela 15 – Resultado de caracterização da argamassa no estado endurecido

Ensaio	Referência	Carbonatada
Absorção de Água Total (%) (mm)	16,97 (0,15)	14,84 (0,28)
Índice de Vazios (%)	29,49 (0,24)	26,91 (0,39)
Coefficiente de Capilaridade (g/cm ² · h ^{1/2})	0,51 (0,08)	0,94 (0,07)
Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)	10,17 (0,42)	10,91 (0,29)
Densidade de Massa (kg/cm ³)	1711,81 (11,75)	1780,89 (2,95)
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	2,89 (0,11)	2,99 (0,53)
Resistência à Compressão (MPa)	5,65 (1,01)	6,54 (0,49)

Fonte: Adaptado de Menegotto (2023)

4.1.2 Processo de Carbonatação

As amostras, após o processo de cura de 56 dias, tiveram a sua umidade interna controlada até atingir 60 % a fim de simular a umidade crítica propícia para o processo de carbonatação. Após esse processo, conforme consta no estudo de Menegotto (2023), as amostras foram inseridas na câmara de carbonatação com concentração de 3% de CO₂, por um período de aproximadamente 5 meses. A manutenção da umidade de 60 %, foi feita com uso de brometo de sódio e a identificação da profundidade de carbonatação por meio da fenolftaleína. Nesta pesquisa, serão avaliadas pela correlação de imagem digital as deformações, fissuras e tensões das amostras carbonatadas e envelhecidas e não carbonatadas de Menegotto (2023).

4.1.3 Processo de Envelhecimento Acelerado aplicado nas Argamassas de revestimentos

Para o processo de envelhecimento acelerado foram utilizadas caixas térmicas de 50 x 40 x 140 cm contendo lâmpadas internas e papel alumínio para a retenção de calor. No estudo de Menegotto (2023), as amostras foram aquecidas por uma hora a uma taxa de 80°C/min com variação de 80^o±5^oC e, em seguida, foram resfriadas por meio de aspersão de água a 20°C, a fim de produzir tensões internas provenientes do choque térmico.

A ideia desta pesquisa é avaliar, por meio do CID, as deformações e tensões nas seguintes etapas: antes da submissão do processo de envelhecimento acelerado, no caso, amostras de referências e, por fim, após a carbonatação seguida de 20 ciclos de envelhecimento, sendo um ciclo por dia durante 20 dias.

4.2 DETERMINAÇÃO DA RESOLUÇÃO DA CÂMERA UTILIZADA POR CID

A escolha da resolução da imagem na metodologia CID é de fundamental importância a fim de minimizar erros numéricos gerados nas análises das amostras. O processo de cálculo a seguir, permite estimar a resolução adequada para a realização do ensaio.

A largura do bloco (b) e a sua altura (h) valem, respectivamente, 50 mm x 35 mm, sendo 20 mm da argamassa (e_a) e 15 mm do substrato cerâmico.

Aplicando como carga de ruptura o valor de uma das amostras do ensaio a tração P = 180 kgf e o módulo elástico da argamassa (E_a), de acordo com a literatura em torno de 4 GPa. A resistência à tração f_{tk} é igual a:

$$f_{tk} = \frac{P}{b \cdot b} \rightarrow f_{tk} = \frac{1800 \cdot [N]}{50 \cdot 50 \cdot [mm^2]} = 0,72 \text{ MPa.}$$

A variação máxima de comprimento da argamassa ΔL_a na direção vertical é obtido por:

$$\Delta L_a = \frac{f_{tk} \cdot e_a}{E_a} \rightarrow \Delta L_a = \frac{0,72 \cdot \left[\frac{N}{mm^2} \right] \cdot 20 [mm]}{4000 \cdot \left[\frac{N}{mm^2} \right]}$$

$$\Delta L_a = 0,0036 \cdot mm$$

Como a deformação específica ε é a relação da resistência pelo módulo de elasticidade, no caso da argamassa tem-se:

$$\varepsilon = \frac{f_{tk}}{E_a} = \frac{0,72 \cdot [MPa]}{4000 \cdot [MPa]} \rightarrow \varepsilon = 1,8 \times 10^{-4} \text{ mm/mm}$$

Para a captura das imagens foi adotada uma câmera fotográfica com sensor de imagem de elevada resolução, de modo a se compatibilizar a resolução necessária com a pequena espessura do revestimento que foi aplicado sobre o substrato cerâmico, na ordem de 20mm. Considerando a resolução da imagem dada 4640 x 6960 pixels, na direção da altura do ensaio de tração para uma área de interesse de argamassa de 20 mm x 20 mm, o erro é de:

$$erro = \frac{20 \cdot mm}{6960 \cdot pixels} = 2,873 \times 10^{-3} \text{ mm / pixels}$$

O erro calculado é menor que a variação máxima de comprimento da argamassa ΔL_a na direção vertical.

Assim, para a obtenção da imagem de 20 mm de altura, a distância focal da câmera ao objeto deve ser o menor possível para enquadramento sem que ocorra perda de qualidade da imagem por distorção da lente. Outro ponto levado em consideração consiste na intensidade de iluminação que é direcionada à amostra, durante o ensaio, uma vez que, regiões de sombras farão com que os deslocamentos medidos pelo programa de correlação de imagem digital sejam distorcidos e divirjam do real. No caso específico, após a avaliação de diversos sistemas de iluminação, foi definida a utilização de 4 perfis led de cor branca, de alta intensidade, posicionados próximos da amostra.

4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MALHA DE DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS NA REGIÃO DE INTERESSE DA ARGAMASSA

As amostras confeccionadas no item 4.1 foram avaliadas pelo método de correlação de imagem digital (CID) e que sugeriu um estudo de padrão de pinturas para definição do melhor padrão de pontos distribuídos na região de interesse da argamassa. Uma vez que, a dificuldade de avaliar a qualidade da malha de pontos consiste em desenvolver uma técnica de pintura que melhor se adeque ao tamanho da amostra deste estudo. Dessa maneira, foram testados padrões de pontos feitos

com esponja e por uma caneta de microagulhamento (Figura 42) com tinta de spray e tinta de carimbo.

Figura 42 – Caneta de microagulhamento



As análises da qualidade da malha de pontos foram realizadas pelo software GOM Correlate Pro versão de teste. Esse programa permite a análise de dados de medição de imagens captadas por fotos ou vídeos além de analisar deformações, deslocamentos bem como a qualidade dos pontos pintados na área de interesse.

4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO COM USO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

O ensaio de aderência à tração ocorreu seguindo a ABNT NBR 13528-3:2019 pela aplicação de carga de uma máquina Universal, com célula de carga de 250 kN e velocidade de aplicação da carga de 0,08 mm/s (Figura 43) e foram aplicadas nas amostras confeccionadas descritas no Item 4.1 e com o padrão de pintura definido no Item 4.3 desta tese para a avaliação das amostras por correlação de imagem digital.

Nas amostras foram colocadas pastilhas metálicas em sua extremidade superior e inferior da amostra, fixadas por meio de cola a fim de melhor distribuição das tensões superficiais e restrição à rotação da amostra.

Figura 43 – Montagem do ensaio de resistência de aderência à tração



Fonte: Menegotto (2023)

Para rastrear os deslocamentos de pixels entre as imagens adquiridas, foram estabelecidas áreas exclusivas conhecidas como subconjuntos no estado indeformado da região de interesse. A região de interesse foi revestida de branco contendo pontos na cor preta a fim de minimizar o ruído da correlação do subconjunto, ou seja, impedindo a interferência de outras cores que possam comprometer o resultado final. Os pontos pintados na região de interesse seguiram o estudo definido no item 4.3 desta tese.

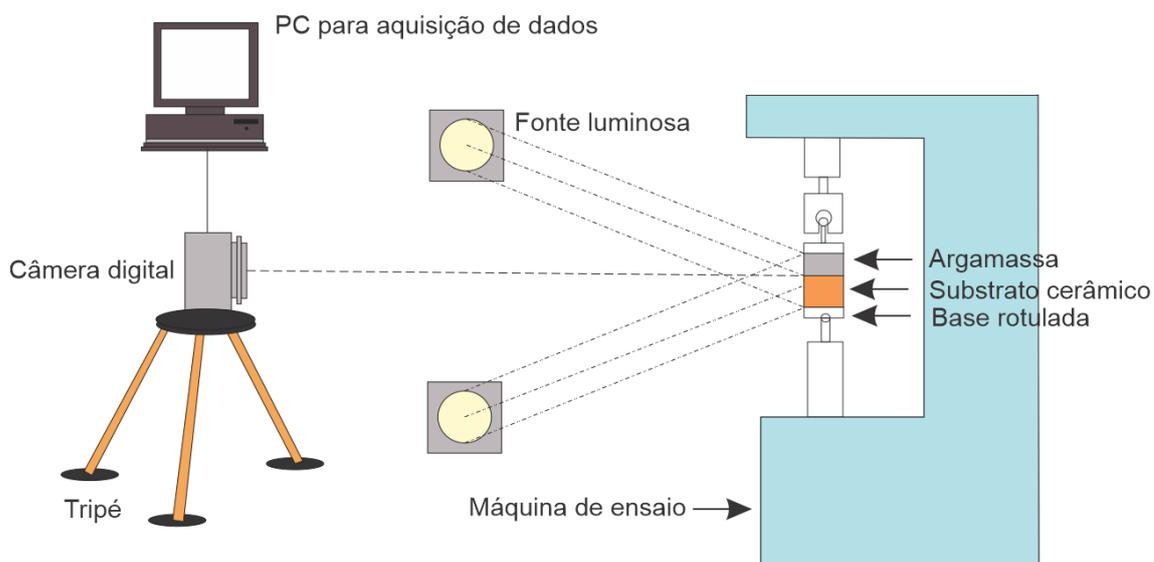
Para atender aos objetivos específicos quanto à resistência de aderência à tração dos substratos da interface argamassa e blocos cerâmicos por meio de correlação de imagem digital (CID), à medida em que a prensa se movimenta na direção vertical tracionando a argamassa do substrato cerâmico, concomitantemente, um aparato de câmeras e iluminação estarão direcionados aos modelos dos blocos cerâmicos para a obtenção de imagens para avaliação CID, e obter a evolução dos deslocamentos dos materiais nas direções x e y, bem como as suas correspondentes deformações específicas.

Para a escolha da qualidade das imagens, foram estimados erros de resolução e distância focal da câmera à amostra, conforme descrito no item 4.3.

Assim, A câmera utilizada para a captura das imagens estáticas para o ensaio CID foi a Canon EF-M com lente de 28 mm F/3.5 Macro, ISO 800 e velocidade de abertura na captura de imagem de 1/250 gerando resolução de 4640 x 6960 pixels. Esta configuração foi definida após um extenso período de testes com diversas câmeras, lentes e especificações de regulagem. A distância da câmera às amostras foi de 3 cm para enquadramento de uma região de 20 x 20 mm.

A Figura 44 descreve o processo de ensaio da correlação de imagem digital.

Figura 44 – Esquema para o ensaio de correlação de imagem digital



Fonte: Autor (2023)

Primeiramente, a câmera é fixada em um tripé a fim de evitar que as vibrações do ambiente interfiram na captura das imagens e é direcionada ao bloco cerâmico. O acionamento da máquina é realizado por controle remoto, de modo a evitar vibrações durante a aquisição da imagem. Foram posicionados no entorno do bloco cerâmico 4 fitas de Led na cor branca e irradiação constante, a fim de minimizar erros de capturas de imagens pela influência do ambiente.

Em seguida, o tempo computado pela máquina de ensaio foi sincronizado com o tempo da câmera para que o processamento de imagem corresponda com o ensaio. Após o acionamento do controle remoto, a câmera realizou a captura de imagens a cada 3 segundos até a ruptura da amostra.

A Figura 45 apresenta o cenário de aquisição de imagens a partir do ensaio de resistência de aderência à tração.

Figura 45 – Cenário de aquisição de imagens para o ensaio de resistência de aderência à tração



Fonte: Autor (2023)

Por fim, o programa computacional NCorr foi utilizado para a obtenção dos mapas de contornos dos deslocamentos e deformações específicas. Vale salientar que os ensaios foram realizados em conjunto com a Dissertação de Mestrado de Menegotto (2023) do grupo de pesquisa GMAT da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

4.4.1 Verificação do Erro e da Precisão da Detecção de Movimento no Software Ncorr

Para a medição assertiva quanto à precisão de detecção de movimentação dos pontos da área de interesse medidas pelo Ncorr foram realizados 2 testes:

- Teste do erro das deformações específicas: consistiu na análise do quanto de erro a captura de imagem pela câmera fornece ao capturar imagens estáticas e sequenciais da área de interesse da amostra estando a 30 mm de distância em função do número de pixels da câmera;

A ideia foi avaliar qual o deslocamento mensurado pelo programa NCorr estando a amostra parada para identificar erros de captura de imagem e o quanto alteraria no valor do deslocamento real.

- Teste de movimento de corpo rígido: Foi testado a precisão que o software detecta em um movimento translacional de corpo rígido.

Este teste consistiu em inserir a amostra em uma superfície lisa e arrastá-la na direção horizontal até alcançar os valores de 1 mm e 5 mm demarcado por um paquímetro e comparar os valores reais com os obtidos do programa NCorr.

4.4.2 Sincronização das imagens capturadas para o ensaio de resistência de aderência à tração com a correlação de imagem digital

Foi construída uma tabela para a sincronização das imagens capturadas pela câmera digital. Essa tabela foi aplicada para todos os ensaios utilizados no desenvolvimento deste estudo o que permitiu a construção da curva tensão x deformação específica.

Primeiramente, para cada ensaio, foram identificados o nome do arquivo contido na memória fotográfica da câmera digital. A partir da gravação de cada ensaio foi contabilizado o total de cliques que a câmera digital realizou por segundo até a ruptura a fim de se obter a numeração da imagem inicial e final bem como o quantitativo de fotos. Foi marcada, a partir da gravação em vídeo o tempo em que ocorreu o primeiro clique da câmera, coluna "Início Click (seg)", tempo na ruptura e o tempo em que houve a última imagem capturada, conforme apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Tabela para o pré-processamento da imagem: Total de fotos e duração do ensaio de resistência de aderência à tração para amostra REF

Data	SIGLA	Nº Amostra	Foto Identificação	IMG Inicial	IMG Final	Fotos	Início Click (seg)	Tempo na Ruptura (seg)	Final Click (seg)
11/01/2023	REF	167	IMG9902	9910	9968	59	5	100	120
		168	-	1	19	19	0	53	53
		169	IMG55	56	121	66	4	106	116
		170	IMG122	123	149	27	7	56	59
		171	IMG151	152	211	60	5	107	107

Fonte: Autor (2023)

A partir do tempo total de ensaio, obtida na coluna “Final Click (seg)” computou-se a duração entre cliques da câmera somando a coluna “Início Click (seg)” com a coluna “Final Click (seg)”. O atraso na captura de imagens entre um frame e outro foi computado na coluna “Delay (seg) – Tempo por foto”, conforme apresentada na Tabela 17. O tempo de ensaio na ruptura em segundos foi calculado subtraindo a coluna “Tempo na Ruptura (seg)” da coluna “Início Click (seg)” da Tabela 16. O total de “Fotos excedentes a excluir” é obtida da divisão da coluna “Tempo excedente pós ruptura (seg)” pela coluna “Delay (seg) Tempo por foto”. Assim a quantidade de fotos efetivas é a diferença da coluna “Fotos” da Tabela 16 e da coluna “Fotos excedentes a excluir” apresentada na Tabela 17. Por fim, o passo de carregamento por frame foi obtido da relação da carga de ruptura da máquina de ensaio e do total de imagens processadas por correlação de imagem digital.

Tabela 17 - Tabela para o pré-processamento da imagem: Cálculo do passo de carga no ensaio de resistência de aderência à tração

Data	SIGLA	Nº Amostra	Delay (seg) - Tempo por foto	Tempo de Ensaio na Ruptura (seg)	Tempo excedente pós ruptura(seg)	Fotos excedentes a excluir	Qtde de Fotos Efetiva	Frequência de Frames	P (kgf)	P / frame (kg)
11/01/2023	REF	167	1.95	95	20	10	49	5	114.442	10.404
		168	2.79	53	0	0	19	2	112.400	10.218
		169	1.70	102	10	6	60	5	113.420	10.311
		170	1.93	49	3	2	25	2	42.082	3.826
		171	1.70	102	0	0	60	5	172.023	15.638

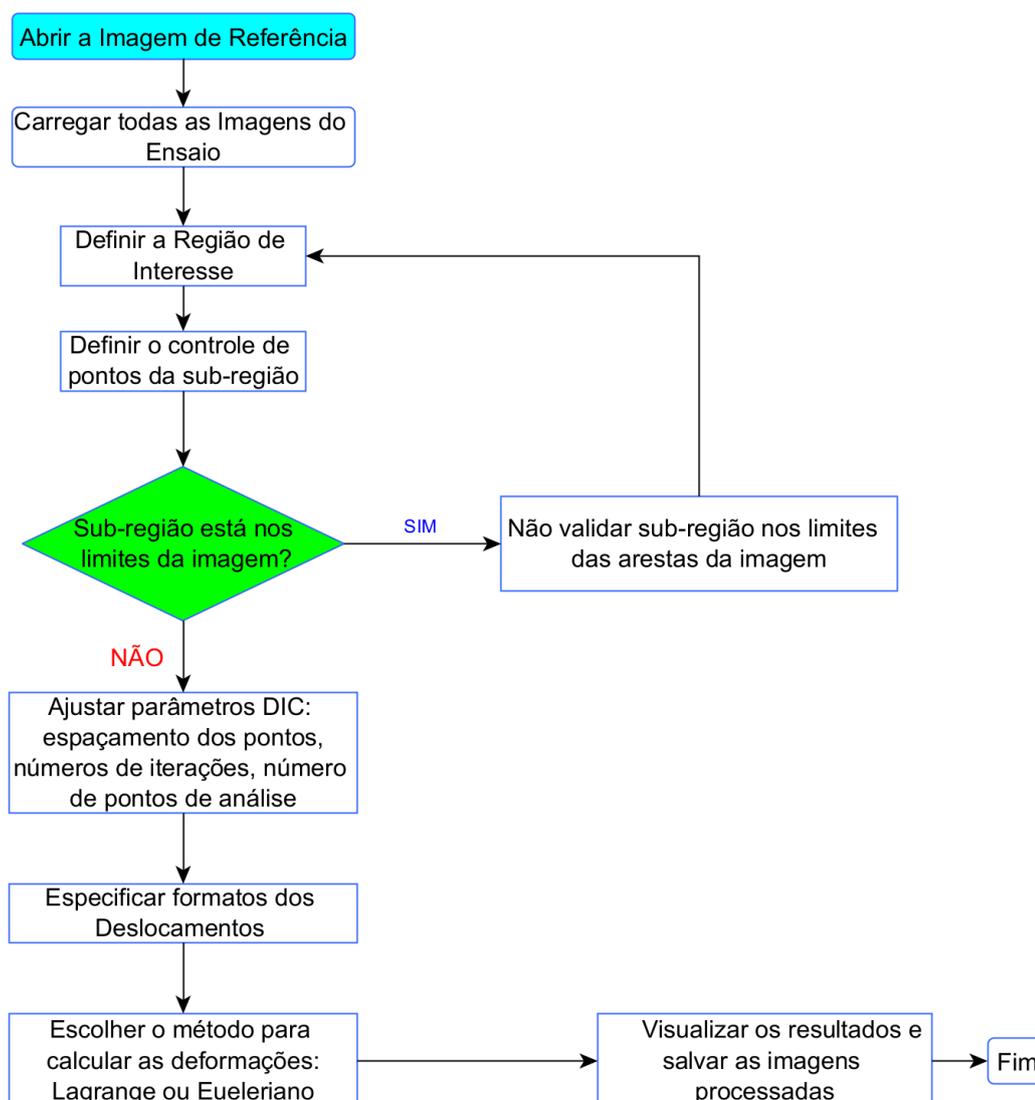
Fonte: Autor (2023)

A curva tensão x deformação específica foi construída correlacionando cada carga por frame da amostra pela área de atuação do carregamento e da deformação específica obtida do programa NCorr.

4.4.3 Processamento das imagens tratadas no programa de correlação de imagem digital

A ferramenta computacional Ncorr foi utilizada para a obtenção dos mapas de contornos dos deslocamentos e deformações específicas da interface substrato cerâmico-argamassa. Essa ferramenta foi escrita por meio de algoritmos em C++ e implementada no MATLAB. O processamento de correlação de imagem na ferramenta computacional Ncorr obedece aos seguintes passos apresentadas na Figura 46:

Figura 46 – Fluxograma para aplicação do método de correlação de imagem digital



Fonte: Autor (2023)

Vale lembrar que essa ferramenta foi validada através de diversos estudos experimentais como descritos nos trabalhos de Blaber, Adair e Antoniou (2015), Kumar, Aravind e Hossiney (2019), Teijón-López-Zuazo et al. (2021) e Moreno-Mateo, Vasco-Olmo e Díaz (2021).

4.5 MODELAGEM NUMÉRICA DOS BLOCOS CERÂMICOS REVESTIDOS COM ARGAMASSA

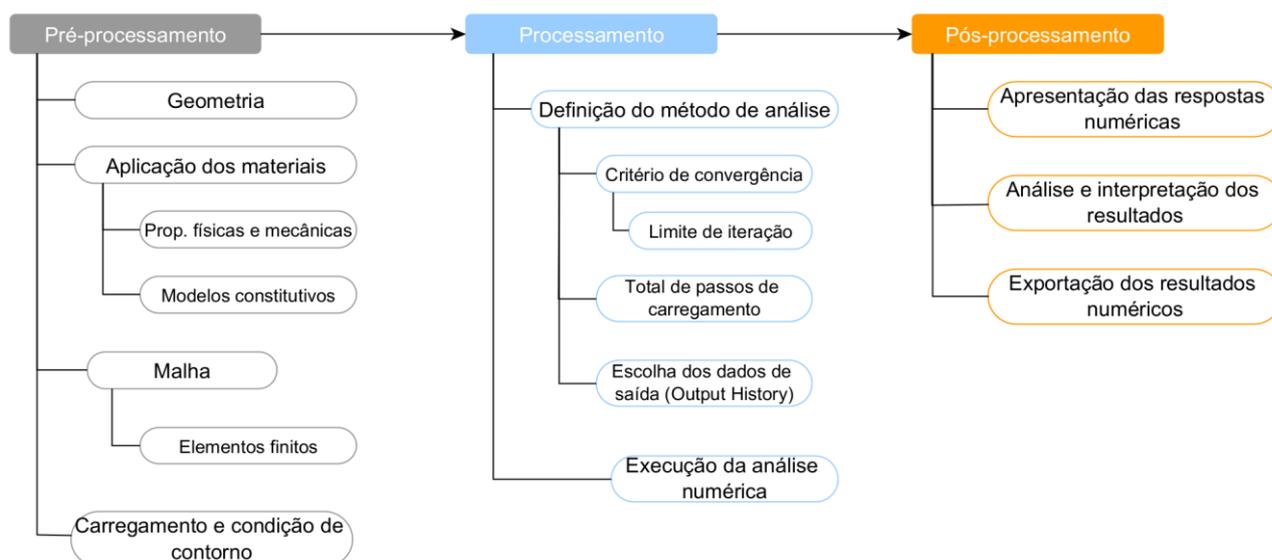
Esta seção descreve os parâmetros e estratégias adotadas na modelagem numérica, bem como:

- propriedades mecânicas da argamassa de do bloco cerâmico;
- interface de ligação substrato-argamassa;
- elemento finito a ser utilizado na modelagem;
- estudo de malha;
- estudo da viscosidade na interface numérica.

A modelagem numérica foi realizada no programa de elementos finitos Abaqus. Este programa foi escolhido devido à possibilidade de se utilizar modelos constitutivos como o Drucker-Prager e *Concrete Damage Plasticity*, os quais apresentaram resultados satisfatórios à respeito do comportamento mecânico de alvenaria de blocos cerâmicos como reportado nos trabalhos de Kowalewski e Gajewski (2015); Algoji et al. (2017); Zhao, Zhu e Shao (2018); Salsavilca et al. (2020) e Dauda, luorio e Lourenço (2020).

Para a realização da modelagem numérica computacional, de forma geral, são executadas as seguintes etapas apresentadas na Figura 47.

Figura 47 – Etapas para a execução da simulação numérica



Fonte: Autor (2023)

4.5.1 Limitação dos modelos numéricos

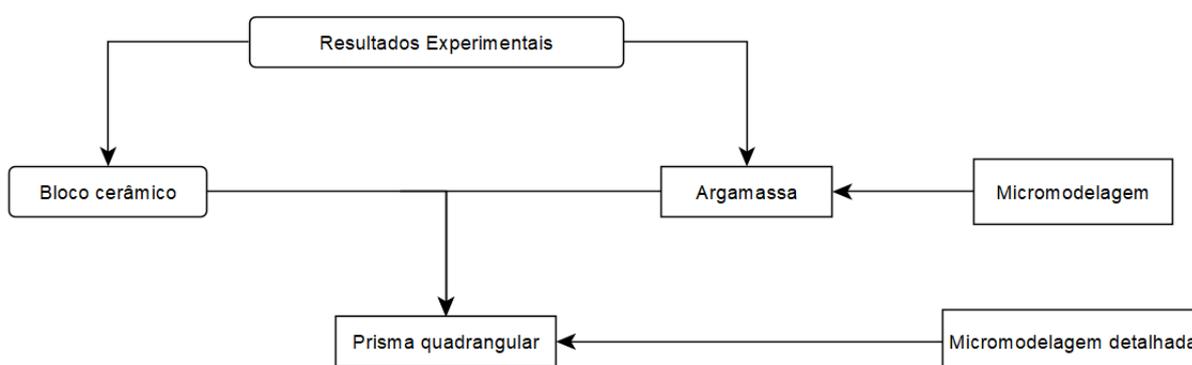
A modelagem de elementos sólidos por elementos finitos descreve uma tentativa de obter valores e comportamentos numéricos próximos aos dos ensaios experimentais. Nesse sentido, é necessária a adoção de uma série de parâmetros quanto às especificações dos materiais envolvidos, tais como valores determinísticos ou probabilísticos capazes de reproduzir o comportamento experimental observado. Este estudo leva em conta a adoção de valores determinísticos nas especificações das propriedades dos materiais, ou seja, são tomados valores médios de resultados experimentais não observando à sua variabilidade a fim de obter um padrão comportamental similar aos observados experimentalmente.

4.5.2 Estratégia de modelagem numérica dos blocos cerâmicos, da argamassa e da interface substrato cerâmico - argamassa

A modelagem numérica dos blocos cerâmicos submetidos ao ensaio de resistência de aderência à tração ocorreu pela micromodelagem, cujas dimensões foram as mesmas utilizadas experimentalmente. O bloco cerâmico e a argamassa possuem geometria de um prisma quadrangular, sendo a argamassa e o conjunto

substrato cerâmico e interface discretizada por parâmetros inelásticos na micromodelagem. A simulação obedeceu a seguinte estratégia de modelagem apresentada na Figura 48.

Figura 48 – Estratégia para a modelagem do bloco cerâmico para simulação de resistência de aderência à tração

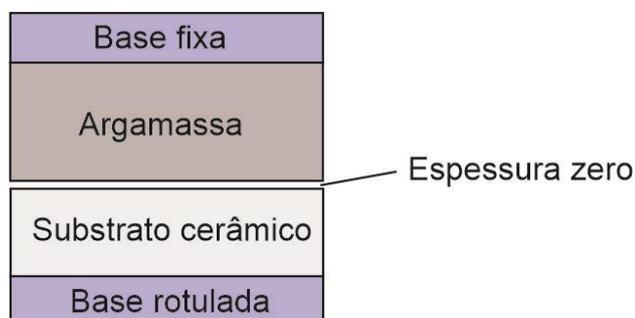


Fonte: Autor (2023)

A fim de caracterizar a aderência na análise numérica foram criados elementos tridimensionais no programa de elementos finitos Abaqus.

Em um primeiro momento, o bloco cerâmico e a argamassa foram modelados por elementos finitos 3D de comportamento não linear e, a interface substrato cerâmico-argamassa foi descrita por uma superfície não linear com o valor de espessura igual a zero, caracterizada pela micromodelagem contínua, conforme apresentada na Figura 49.

Figura 49 – Elementos de ligação da interface de espessura zero

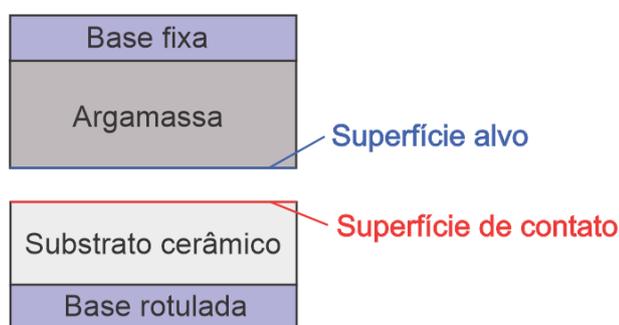


Fonte: Autor (2023)

Em um segundo momento, a interface do substrato cerâmico e da argamassa ocorreu através da simulação contato-base, na qual, conforme o manual Abaqus

(2011), devem ser utilizadas superfícies alvo e de contato para discretizar o comportamento da interface, ou seja, é nessa região que são solicitados parâmetros elásticos interfaciais tais como a rigidez interfacial normal K_n e rigidez cisalhante K_s , bem como parâmetros inelásticos da coesão e ângulo de atrito da interface, caracterizando-a em micromodelagem detalhada conforme apresenta a Figura 50. A superfície alvo, definida neste estudo pela argamassa, é aquela cujo material apresenta rigidez superior do que a superfície de contato, neste caso representado pelo substrato cerâmico.

Figura 50 – Esquema da simulação de interação de contato entre os materiais utilizada na modelagem numérica



Fonte: Autor (2023)

4.5.3 Interface de ligação numérica substrato-argamassa

O elemento finito da interface é conectado a outro através de um conjunto de pontos de contato. Esses pontos de contatos são criados no perímetro do elemento finito e, em uma zona interfacial. Na direção normal, o comportamento mecânico de ligação da argamassa obedece a seguinte equação:

$$\Delta\sigma_n = -K_n \cdot \Delta u_n \quad (20)$$

Onde: K_n é a rigidez normal de contato; $\Delta\sigma_n$ é a tensão normal e Δu_n é o deslocamento normal.

Da mesma maneira, o comportamento mecânico da argamassa de ligação na direção cisalhante é controlada por uma rigidez de cisalhamento K_s , cuja tensão cisalhante é calculada por:

$$\Delta\tau_s = -K_s \cdot \Delta u_s \quad (21)$$

Onde: $\Delta\tau_s$ é a tensão de cisalhamento e Δu_s é o deslocamento de cisalhamento.

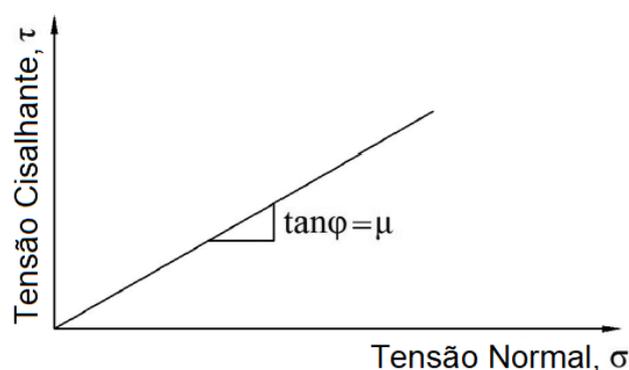
Essas tensões são calculadas ao longo dos pontos de contato e são submetidos ao critério de ruptura de Mohr-Coulomb, responsável em limitar as tensões cisalhantes na interface.

Os seguintes parâmetros são utilizados para definir o comportamento mecânico de contato: rigidez normal (K_n), rigidez cisalhante (K_s), ângulo de atrito (ϕ), coesão interfacial (c), ângulo de dilatação (ψ) e resistência à tração (R_t). Por exemplo, se σ_n for maior que a resistência à tração então ocorrerá ruptura entre os materiais. Para o cisalhamento, o deslizamento interfacial ocorre quando a tensão cisalhante (τ_s) atinge um valor máximo crítico $\tau_{m\acute{a}x}$ definido por:

$$|\tau_s| \geq c + \sigma_n \cdot \tan(\phi) = \tau_{m\acute{a}x} \quad (22)$$

Sendo o ângulo de atrito (ϕ), obtido pela tangente do ângulo formado pela relação da tensão cisalhante (τ_s) e tensão normal (σ_n), conforme apresenta a Figura 51.

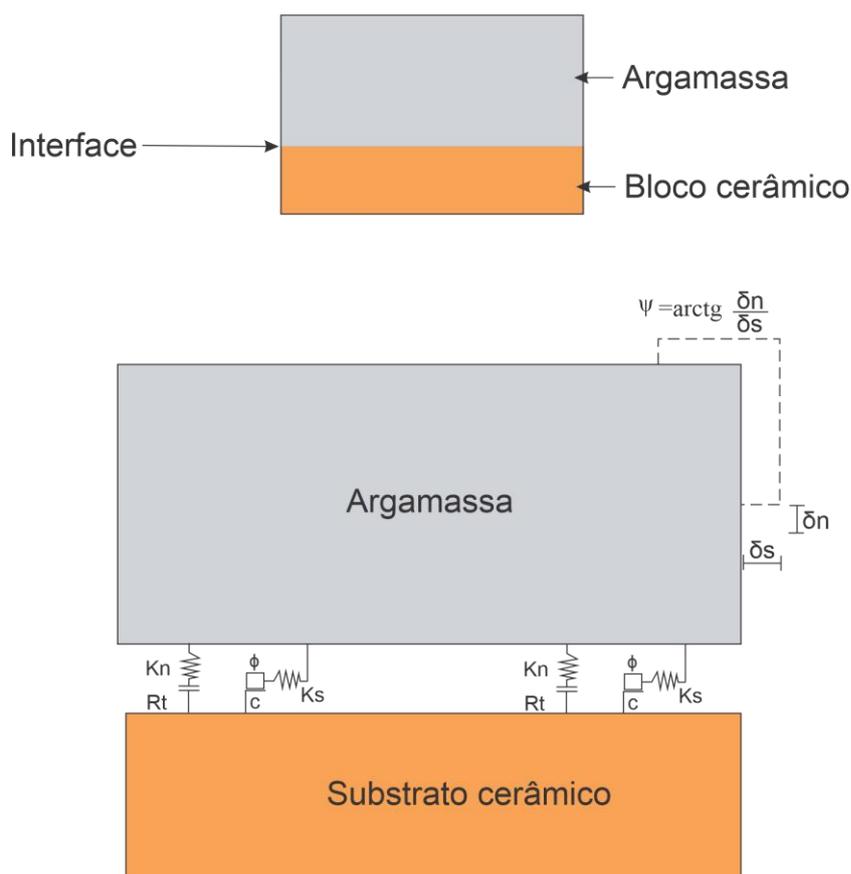
Figura 51 – Critério de falha Mohr-Coulomb para obtenção do ângulo de atrito interfacial



Fonte: Hossain, Totoev e Masia (2016)

Em resumo, na presente proposta de estudo, o modelo da interface de ligação e suas propriedades são correlacionados no processo de interação numérica e obedece o esquema da Figura 52.

Figura 52 – Esquema de interação numérica na interface substrato-argamassa



Fonte: Autor (2023)

Nesse sentido, esta tese analisou dois estudos de sensibilidade interfacial da modelagem numérica. O primeiro estudo de sensibilidade refere-se aos parâmetros inelásticos da argamassa na interface tais como coeficiente de viscosidade e ângulo de dilatação (ψ).

O segundo estudo de sensibilidade refere-se aos parâmetros elásticos da interface tais como rigidez normal (K_n) e rigidez ao cisalhamento (K_s).

Esses parâmetros estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros numéricos para estudo de sensibilidade interfacial

Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidade
Parâmetros Elásticos			
Densidade	d	1780 ^a	kg/m ³
Módulo elástico longitudinal	E	Média do CID	MPa
Coeficiente de Poisson	ν	Média do CID	-
Parâmetros interfaciais			

Rigidez normal	Kn	50-90	GPa/m
Rigidez cisalhante	Ks	30-70	GPa/m
Parâmetros Inelásticos			
Coficiente de Viscosidade	Visc	0,1-0,002 ^b	-
Resistência de aderência à tração	Rt	VAR. DE 0,10	MPa
Ângulo de dilatação	ψ	30 ^c	Graus

Fonte: Autor (2023)

^a Extraído da caracterização da argamassa do estudo de Menegotto (2023);

^b Parâmetros adotados do trabalho de Bhosale e Desai (2019);

^c Obtido do estudo de Dauda, Iuorio e Lourenço (2020).

Os parâmetros inelásticos obedecerão a seguinte ordem de simulação:

- O coeficiente de viscosidade irá variar em 0,1; 0,01; 0,001 e 0,002, mantendo constante o ângulo de dilatação e a resistência à tração;
- A resistência de aderência à tração irá variar de 0,10 MPa aos valores alcançados do ensaio experimental, mantendo constante o ângulo de dilatação e o coeficiente de viscosidade.

Em resumo, a Tabela 19 especifica o total de simulação para cada influência dos parâmetros materiais.

Tabela 19 – Estudo de sensibilidade dos parâmetros inelásticos da interface

Ângulo de dilatação (ϕ)	Coficiente de Viscosidade	Resistência de aderência à tração (Rt)	Total de simulações numéricas
30	0,1	0,10; 0,20; 0,30; 0,40	4
30	0,01	0,10; 0,20; 0,30; 0,40	4
30	0,001	0,10; 0,20; 0,30; 0,40	4
30	0,002	0,10; 0,20; 0,30; 0,40	4

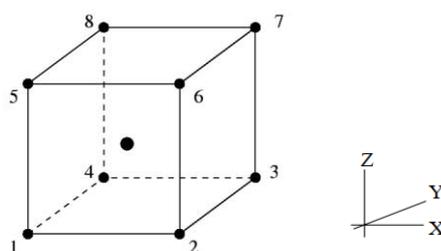
Fonte: Autor (2023)

Quanto aos parâmetros elásticos, em cada um dos experimentos computacionais, o valor da rigidez normal (Kn) e cisalhante (Ks) foram introduzidos em incrementos de 5 GPa/m. Foram computados graficamente a resposta do carregamento representativo contra os deslocamentos dos modelos numéricos. Em todos os casos, para avaliação dos parâmetros elásticos (segundo estudo), os parâmetros do ângulo de dilatação, coeficiente de viscosidade e resistência de aderência à tração (Rt) foram escolhidos com base nas respostas mais significativas obtidos do ensaio experimental.

4.5.4 Elemento finito utilizado na modelagem numérica

O programa Abaqus possui uma extensa biblioteca de elementos finitos e que permite a resolução de diferentes problemas práticos. A sua escolha deve contemplar: a família a qual o elemento pertence, graus de liberdade e número de nós. Dessa maneira, neste estudo foi aplicado para o bloco cerâmico e para a argamassa o elemento finito sólido C3D8R. De acordo com o manual Abaqus (2010), o elemento finito tridimensional C3D8R apresenta oito nós, com três graus de liberdade por nó em relação às translações nas direções das coordenadas globais dos eixos x, y e z, cujos nós são numerados no sentido anti-horário e possui um ponto de integração interior (Figura 53).

Figura 53 – Elemento finito C3D8R



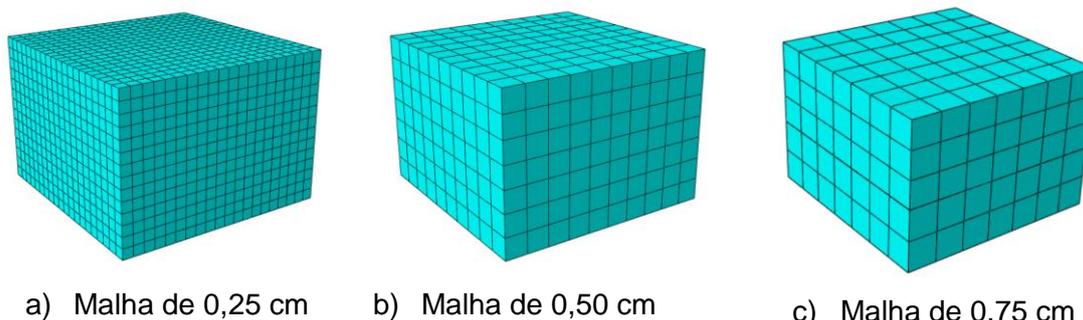
Fonte: Abaqus (2010)

4.5.5 Teste de malha do modelo numérico

O algoritmo analisado pelo Abaqus permite definir uma estratégia de malha gerando um tamanho pré-especificado durante a modelagem. Neste estudo foram computados uma malha estruturada, uma vez que resulta em malhas uniformes e de formas regulares. O substrato cerâmico possui as dimensões de 5 cm x 5 cm x 1,5 cm e a argamassa 5 cm x 5 cm x 2,0 cm seguindo as dimensões das amostras experimentais.

O tamanho da malha foi escolhido com base em um estudo de sensibilidade de malha, tempo computacional e convergência. Para isso, foram realizadas três análises numéricas de malha de elemento finito composto por 0,25 cm; 0,50 cm e 0,75 cm o que resultarão, respectivamente, em 20 x 20 x 14 elementos (Figura 54a); 10 x 10 x 7 elementos (Figura 54b) e 7 x 7 x 5 elementos (Figura 54c).

Figura 54 – Estudo de malha de elementos finitos aplicada na amostra do substrato cerâmico e argamassa



a) Malha de 0,25 cm

b) Malha de 0,50 cm

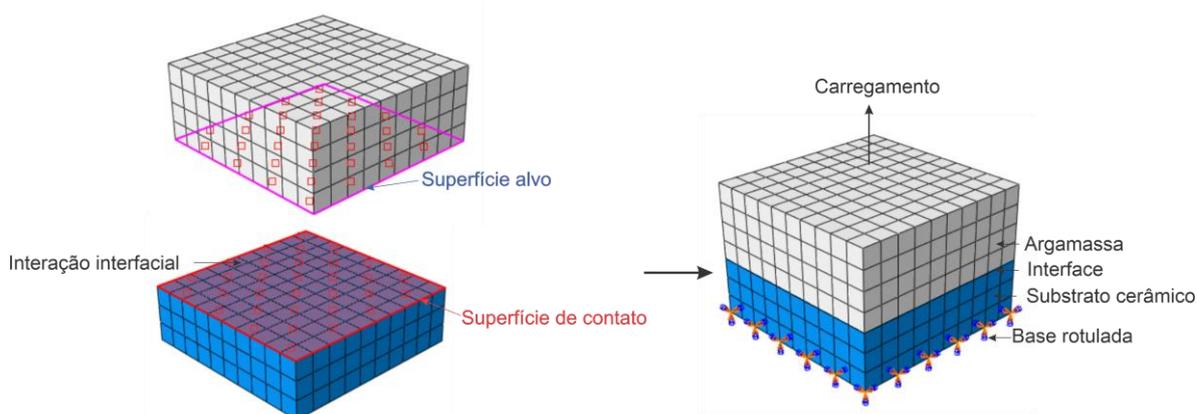
c) Malha de 0,75 cm

Fonte: Autor (2023)

4.5.6 Teste do comportamento da viscosidade do elemento finito C3D8R

Foram realizadas análises do parâmetro de viscosidade na interface substrato-argamassa a fim de verificar a influência quanto à translação horizontal dos nós dos elementos finitos C3D8R e tempo computacional para a convergência numérica. Conforme a documentação teórica Abaqus (2011), a região de interface de ligação (Figura 55) pode apresentar um comportamento de “amolecimento” e degradação de rigidez o que leva a dificuldade de convergência numérica.

Figura 55 - Interação surface-to-surface entre substrato cerâmico e argamassa



Fonte: Autor (2023)

Para contornar dificuldades de convergência faz-se necessária a utilização de uma regularização visco plástica das equações constitutivas e permite que a rigidez tangente se torne positiva para incrementos de tempos pequenos. Por padrão, o programa adota o valor zero de modo que essa regularização visco plástica não seja realizada, uma vez que a sua alteração pode elevar o tempo computacional. Em contrapartida, a convergência numérica pode levar a resultados incoerentes. Nesse

sentido, a partir da escolha da malha definida no item anterior foram simulados os coeficientes de viscosidade iguais a: 0,1; 0,01, 0,001 e 0,002. O valor adotado nos modelos numéricos ocorreu após a análise das tensões, convergência e translação.

4.6 Análise Estatística dos Resultados Obtidos por CID e Modelos Numéricos

Os resultados obtidos por correlação de imagem digital (CID) foram avaliados estatisticamente pela análise de variância (ANOVA) para as seguintes variáveis respostas: tensões normais no plano dos substratos cerâmicos, deslocamentos interfaciais e deformações.

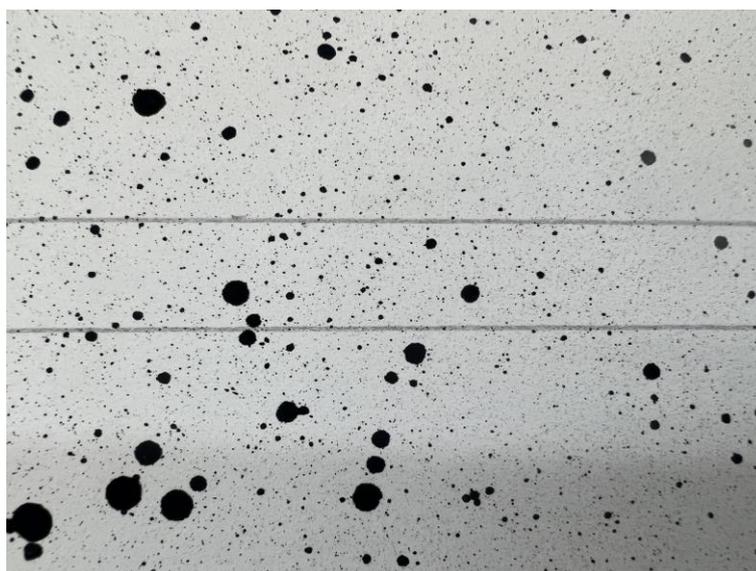
Para os resultados obtidos da simulação numérica computacional, foi conduzida a análise de variância (ANOVA) comparando os resultados experimentais e da correlação de imagem digital com os resultados numéricos a fim de apresentar a importância relativa de cada parâmetro da interface e suas interações com as saídas dos resultados de deslocamentos e resistência de aderência à tração de ambos métodos avaliativos. Também foi realizado o teste de Tukey, com intervalo de confiança de 95%, para comparar diretamente e de forma individual se a diferença entre as médias de cada tipo de amostra é diferente para um mesmo tipo de olaria e entre as olarias.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

5.1 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MALHA DE AMOSTRAS CARBONATADAS COM ENVELHECIMENTO ACELERADO E SEM ENVELHECIMENTO ACELERADO

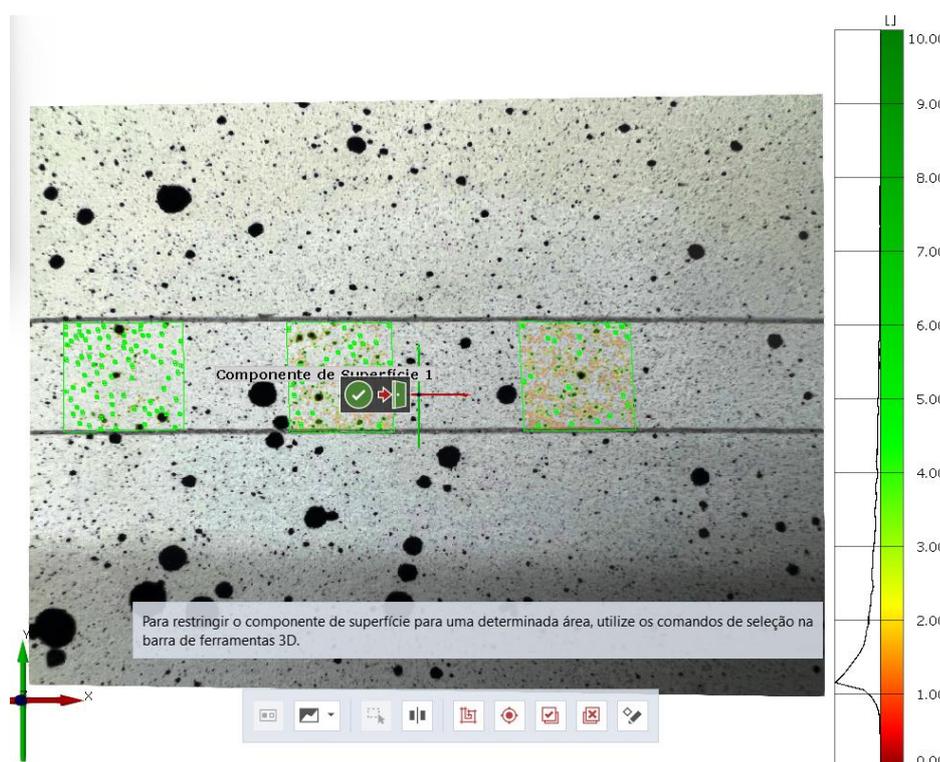
A qualidade da malha das pintura que formam a malha da área de interesse realizadas no software GOM Correlate Pro versão de teste indicaram que os pontos feitos com spray deviam ser descartados, uma vez que, a sua pintura gerou pontos aleatórios e espaçados (Figura 56), além de pontos de maiores dimensões que colaboram na baixa qualidade do padrão da malha de pontos (Figura 57).

Figura 56 – Avaliação de padrão de pontos utilizando tinta de Spray



Fonte: Autor (2023)

Figura 57 – Resultado da análise em 3 regiões distintas utilizando tinta de Spray.

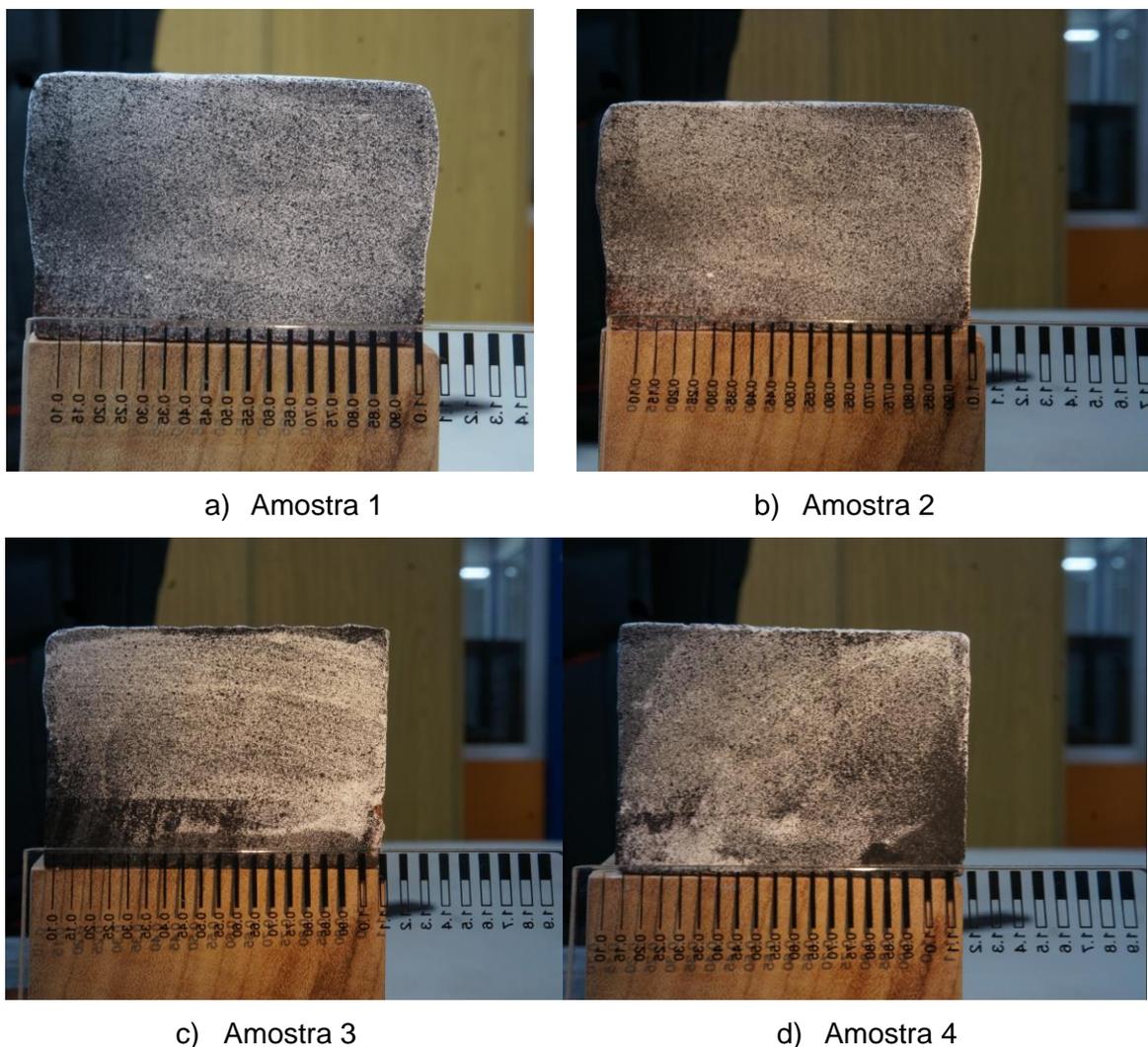


Fonte: Autor (2023)

Por exemplo, a Figura 57 apresenta a análise de uma das amostras testadas. Nessa amostra procurou-se delimitar 3 subconjuntos de pintura, uma a esquerda, outra central e por fim à direita. Esses 3 subconjuntos apresentaram má qualidade de distribuição de pontos, tendo o pico do histograma da escala de cores entre 1 a 2 de um total de 10.

A partir de então, optou-se em alterar a metodologia de pintura das amostras com a utilização de tinta de carimbo e esponja para compor diferentes padrões de densidade de pontos na região da argamassa conforme apresenta a Figura 58.

Figura 58 – Padrão de pinturas realizadas com esponja com diferentes densidades de pontos

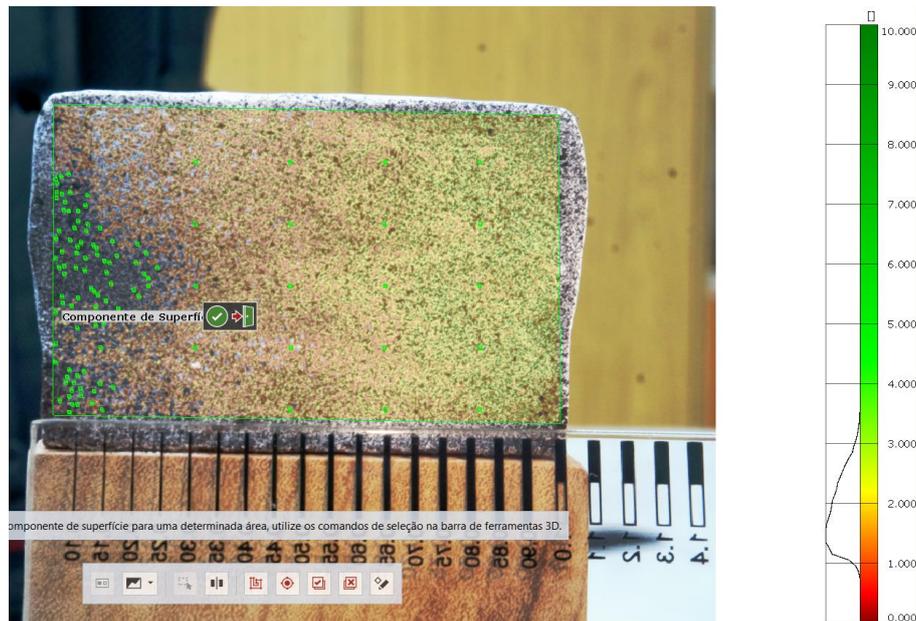


Fonte: Autor (2023)

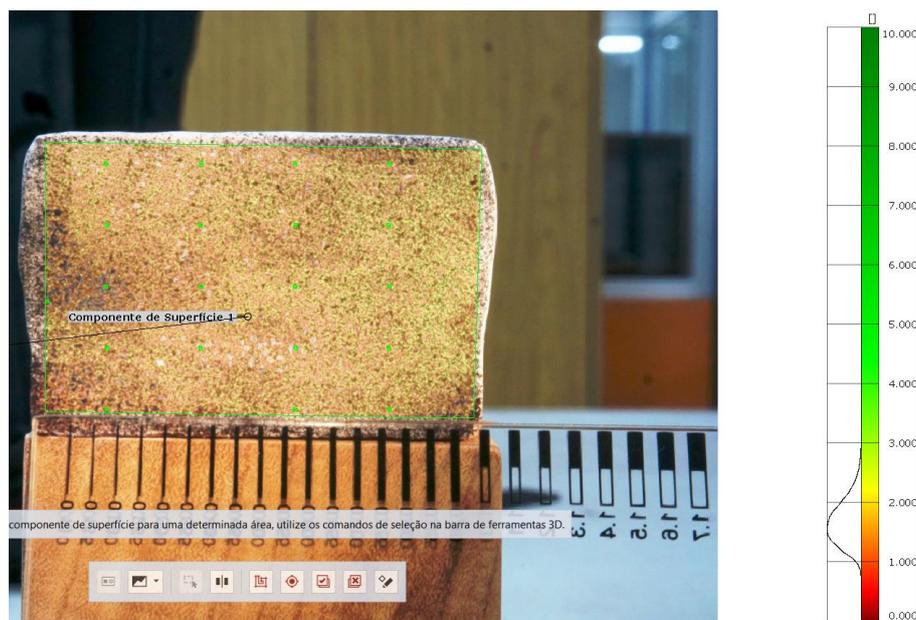
O padrão de pintura realizado pela esponja mostrou ser melhor distribuído quando comparado com a tinta de spray, obtendo do histograma da escala de cores valores entre 2 a 4 de um total de 10, conforme apresenta a

Figura 59.

Figura 59 – Resultado da análise do padrão de pontos feitos com tinta de carimbo e esponja



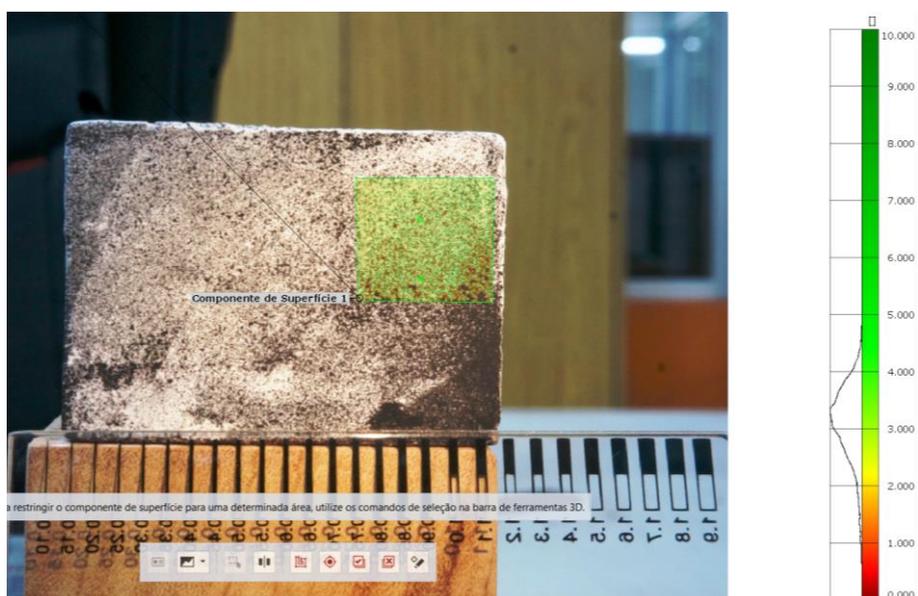
a) Qualidade do padrão de pontos da amostra 1



b) Qualidade do padrão de pontos da amostra 2



c) Qualidade do padrão de pontos da amostra 3



d) Qualidade do padrão de pontos da amostra 4

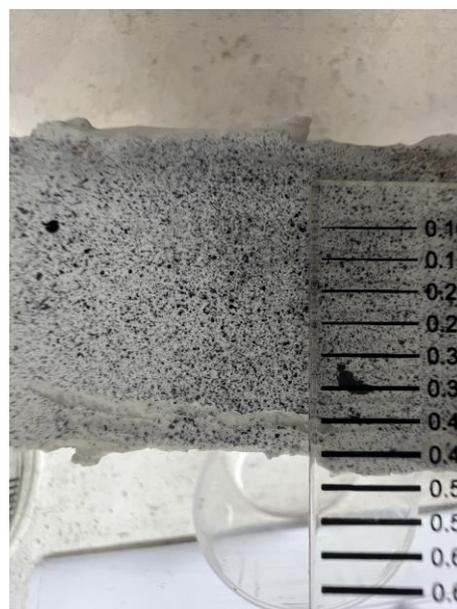
Fonte: Autor (2023)

A Figura 60 apresenta as amostras utilizadas para o teste da qualidade da malha de pontos utilizando a caneta de microagulhamento e diferentes densidades de pontos.

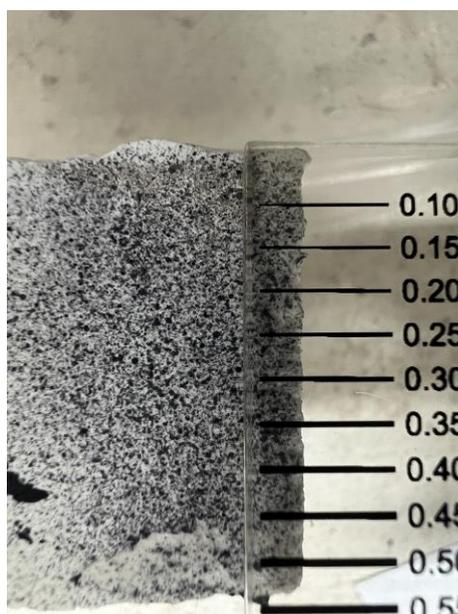
Figura 60 – Padrão de pinturas realizadas com caneta de microagulhamento e diferentes densidades de pontos



a) Amostra 1



b) Amostra 2

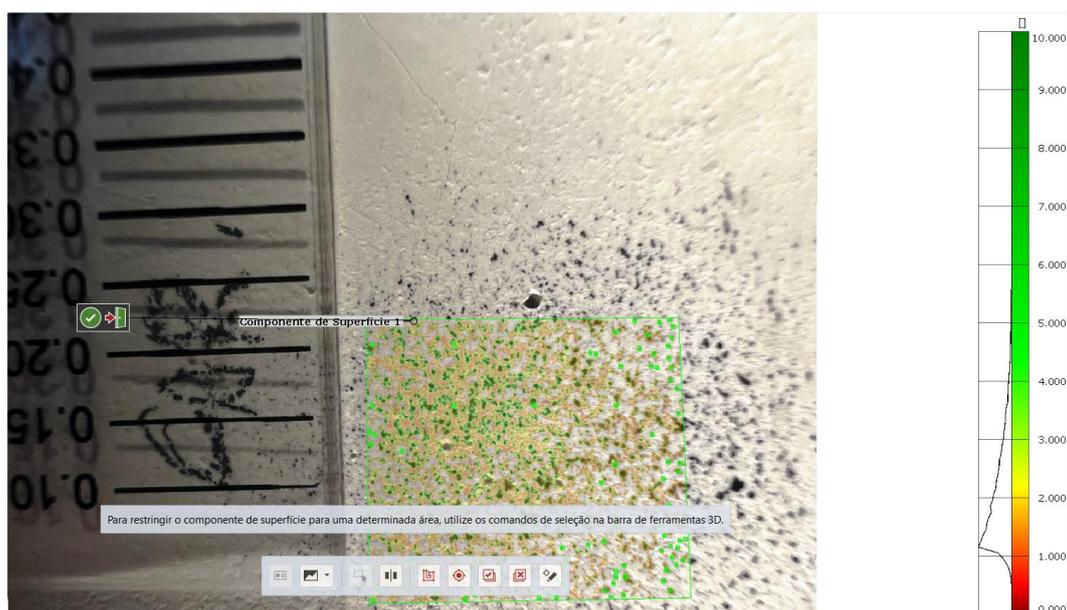


c) Amostra 3

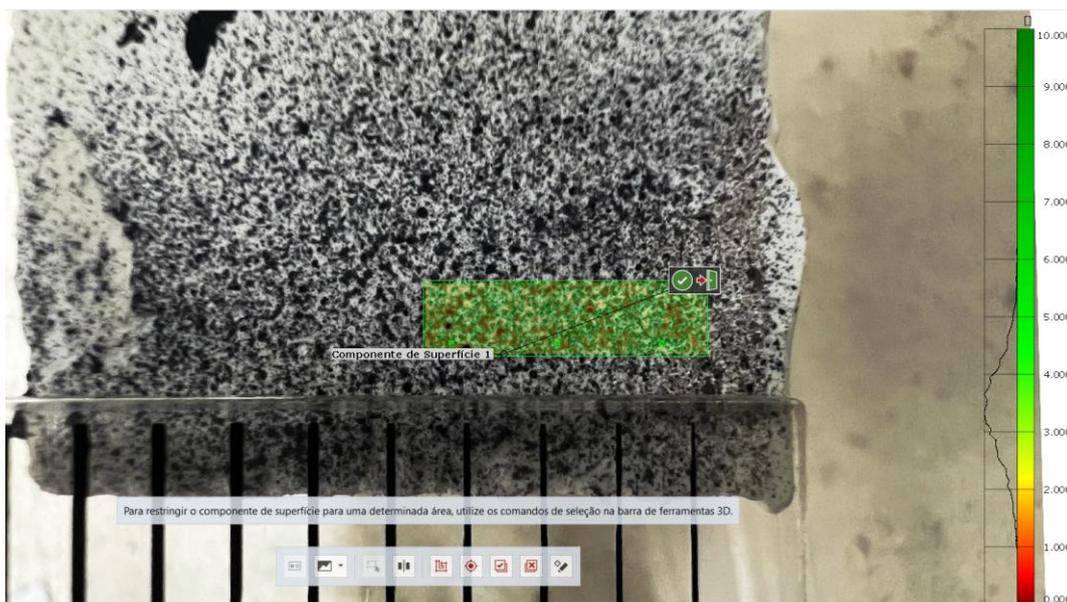
Fonte: Autor (2023)

O padrão de pintura realizada pela caneta de microagulhamento apresentou melhores resultados da qualidade da malha de pontos em relação aos testes anteriores, com histograma da escala de cores estando entre 3 a 5 de um total de 10, conforme apresenta a Figura 61.

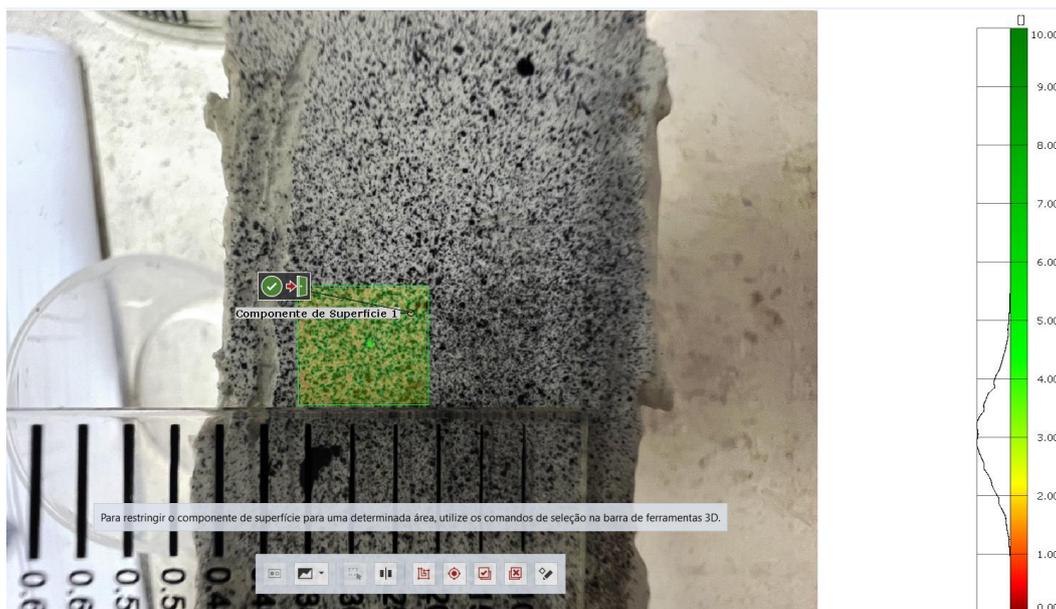
Figura 61 – Resultado da análise do padrão de pontos feitos com tinta de carimbo e caneta de microagulhamento



a) Qualidade do padrão de pontos da amostra 1



b) Qualidade do padrão de pontos da amostra 2



c) Qualidade do padrão de pontos da amostra 3

Fonte: Autor (2023)

Vale observar, tendo em vista o tamanho da amostra e o enquadramento da câmera para captura de imagens em uma área de interesse de 20 mm, há a necessidade de se obter pontos extremamente pequenos, menores que 0,1 mm para uma qualidade máxima, conforme pode ser verificado pela resolução analítica a seguir.

O padrão de pintura para o ensaio de correlação de imagem digital, conforme a literatura técnica deve possuir distribuição de pontos entre 10 pixels, 20 pixels e 30 pixels. Considerando pontos de até 30 pixels e resolução da imagem de 4640 pixels na horizontal e 6960 pixels na vertical para o enquadramento de uma área de interesse de 20 × 20 mm, os valores médios de densidade ζ na direção horizontal e vertical valem:

$$\zeta_{horiz.} = \frac{20}{4640} \rightarrow \zeta_{horiz.} = 0,0043 \left[\frac{mm}{pixels} \right] \quad (\text{direção horizontal})$$

$$\zeta_{vert.} = \frac{20}{6960} \rightarrow \zeta_{vert.} = 0,0029 \left[\frac{mm}{pixels} \right] \quad (\text{direção vertical})$$

Assim, o maior ponto que o subconjunto deve apresentar, considerando a sua distribuição na vertical, no mesmo sentido do carregamento do ensaio de resistência de aderência à tração é igual a:

$$\xi_{vertical} = 30[pixels] \times \zeta_{vert.} \rightarrow \xi_{vertical} = 30[pixels] \times 0,0029 \left[\frac{mm}{pixels} \right]$$

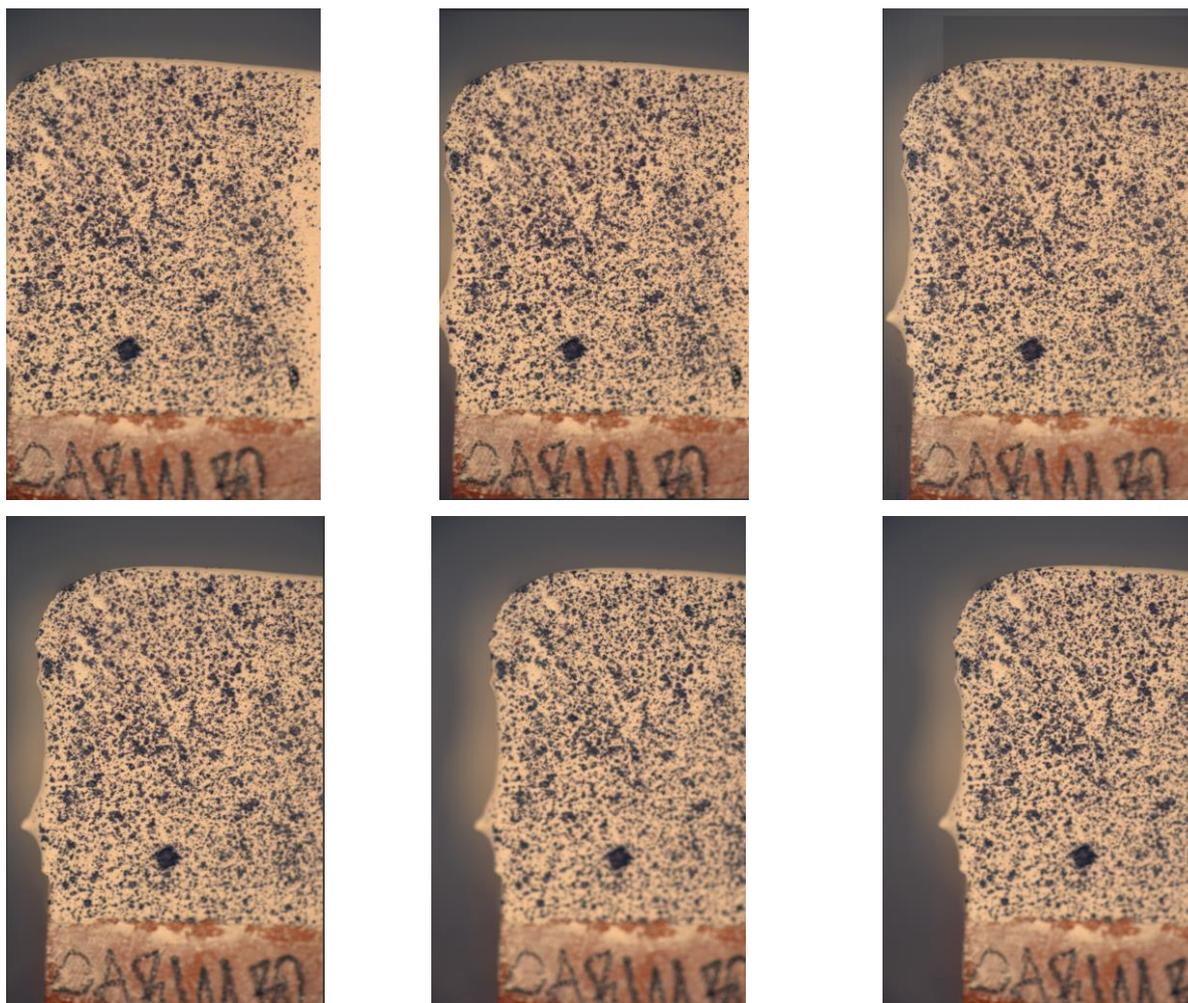
$\xi_{vertical} = 0,087$ milímetros.

Observa-se que para essa dimensão, os testes de pinturas foram primordiais para se ter um norteador do tipo de subconjunto de malha a serem elaborados para os ensaios de resistência de aderência à tração. Por fim, conforme as análises do sistema de pintura apresentado, a técnica de microagulhamento foi a que teve melhor resultado quanto à qualidade de pontos padrão sendo esta utilizada em todas as demais amostras para a aplicação da correlação de imagem digital.

5.2 AVALIAÇÃO DA DETECÇÃO DE MOVIMENTO PELO NCORR

Para a constatação da detecção de movimento do NCorr uma amostra foi submetida a uma translação por aproximadamente 5 mm apresentada nas imagens sequenciais a seguir da Figura 62.

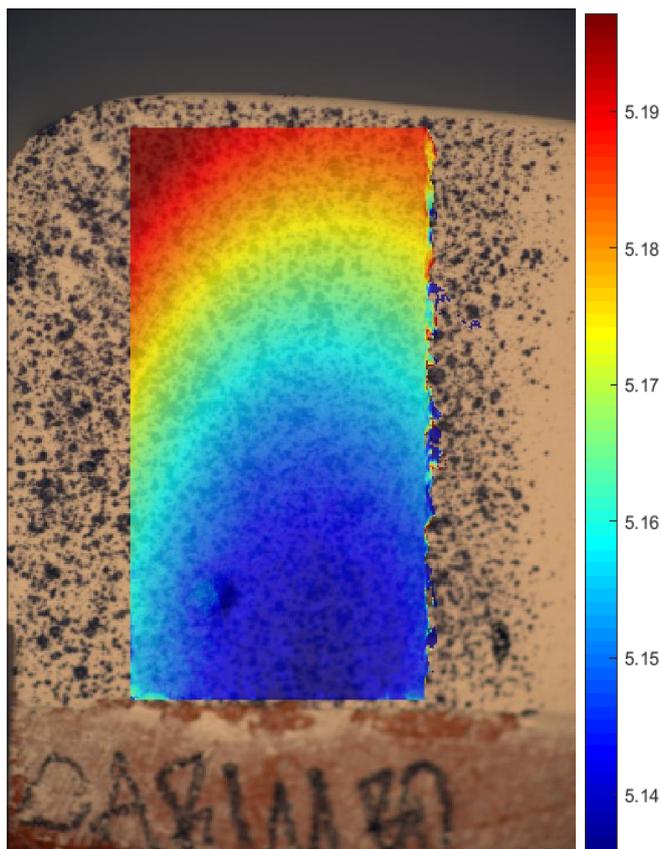
Figura 62 – Teste de Movimento no valor de 5 mm



Fonte: Autor (2023)

Os resultados encontrados para a medição do movimento de corpo rígido do NCorr tiveram uma variação entre 5,14 mm (cor azul) a 5,19 mm (cor vermelha), conforme apresentada na Figura 63, o que indica resultado satisfatório, cuja variação pode ter ocorrido devido a uma possível distorção angular durante a movimentação translacional da amostra.

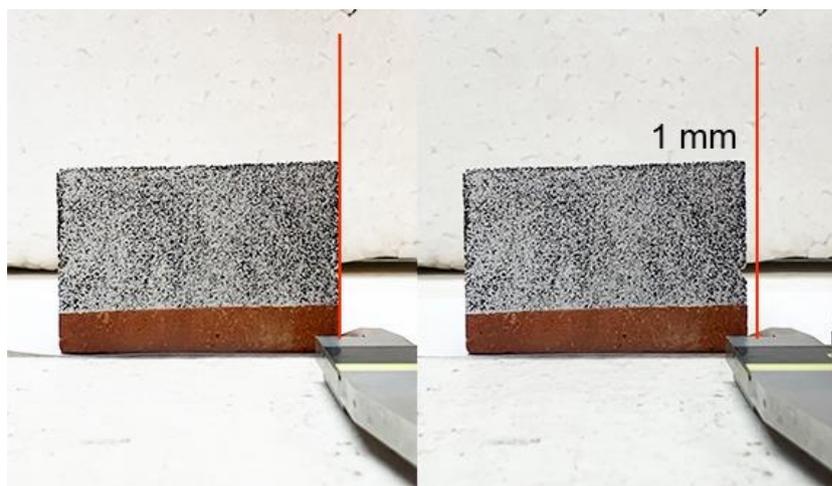
Figura 63 – Resultado de detecção de movimento translacional de 5 mm no NCorr



Fonte: Autor (2023)

Nesse sentido também foi realizado teste de movimento com a câmera mais afastada da amostra, a fim de verificação da precisão do programa NCorr. A Figura 64 apresenta a translação de 1 mm de um corpo de prova.

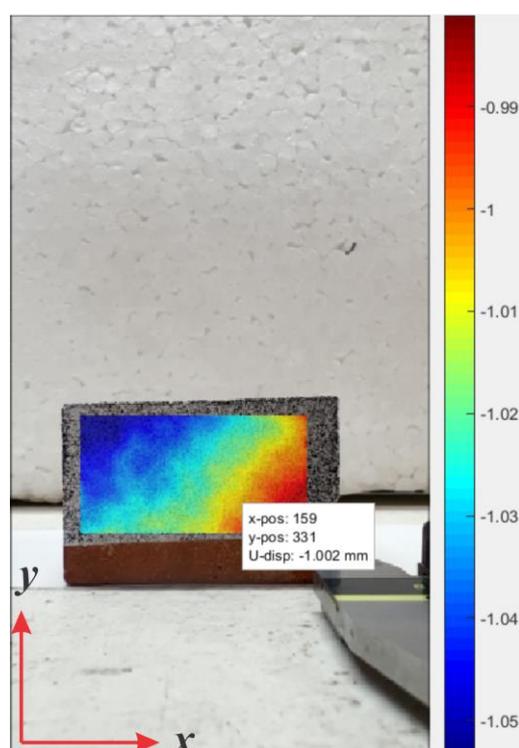
Figura 64 – Movimento translacional de 1 mm da amostra



Fonte: Autor (2023)

O resultado obtido quanto à detecção do movimento de 1 mm apresentou uma variação entre 0,99 mm a 1,05 mm. O sinal negativo indica que a translação ocorreu para a esquerda no sentido contrário ao eixo x, conforme apresentada na Figura 65.

Figura 65 – Resultado de detecção de movimento translacional de 1 mm



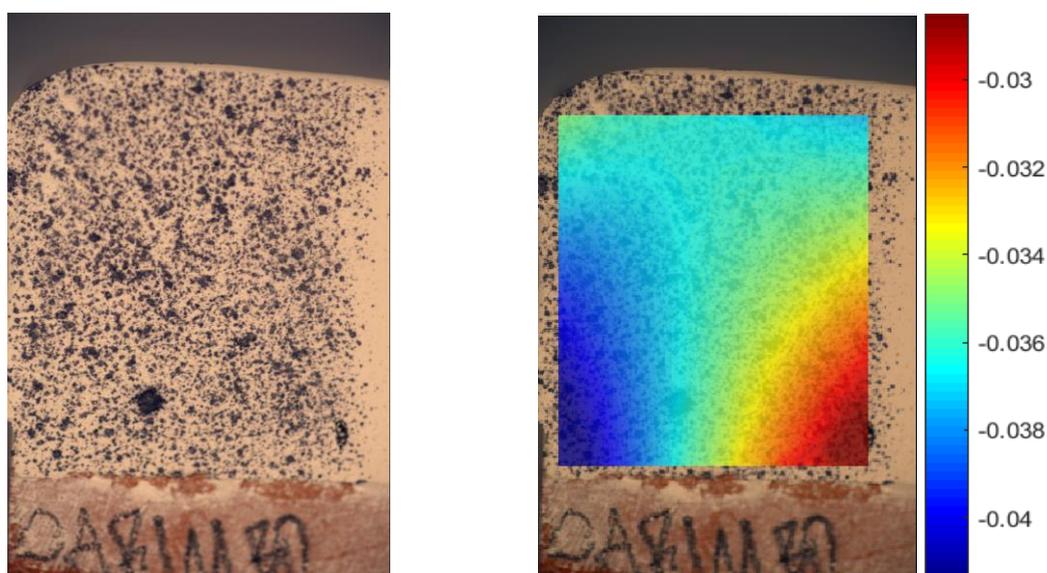
Fonte: Autor (2023)

Conforme apresentada na Figura 65, ao escolher um ponto dentro da região de interesse da amostra, o NCorr indicou movimento translacional no valor de -1,002 mm. A literatura técnica estima um erro aceitável entre o valor real e o obtido numericamente de $\pm 5\%$. Isto significa que a diferença entre o valor obtido pelo CID e o real foi de 0,2 % e indicou confiabilidade da ferramenta computacional na detecção de movimento.

5.3 AVALIAÇÃO DO ERRO DE LEITURA DE CAPTURA DE IMAGEM

Para verificar uma possível distorção da lente da câmera foram realizados diversos testes ao capturar imagens estáticas da amostra e submetê-la à correlação de imagem digital. A Figura 66a apresenta a amostra fotografada de forma sequencial nove vezes na mesma posição para a mesma configuração de câmera e 4924 x 6960 pixels de resolução. Os valores encontrados para medição da distorção da lente da câmera quanto ao deslocamento vertical processadas estão apresentados na Figura 66b.

Figura 66 – Resultado de detecção de movimento por erro de leitura na captura de imagem estática



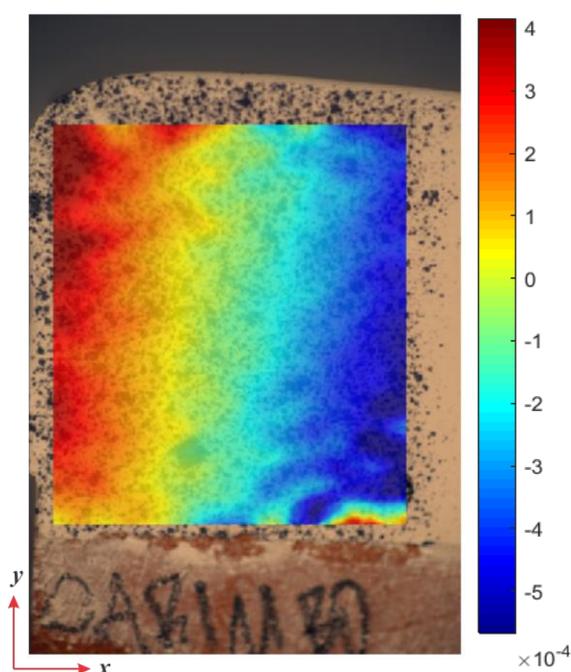
a) Amostra avaliada para estudo do erro de captura de imagem b) Deslocamentos verticais da amostra

Fonte: Autor (2023)

Mesmo a amostra estando em repouso, a correlação de imagem digital apontou deslocamentos na direção vertical entre as capturas das imagens, indicando distorção da lente da câmera.

A Figura 67 apresenta os resultados obtidos para a deformação específica na direção vertical E_{yy} .

Figura 67 – Resultado da deformação específica E_{yy} avaliados por erro de leitura na captura de imagem estática



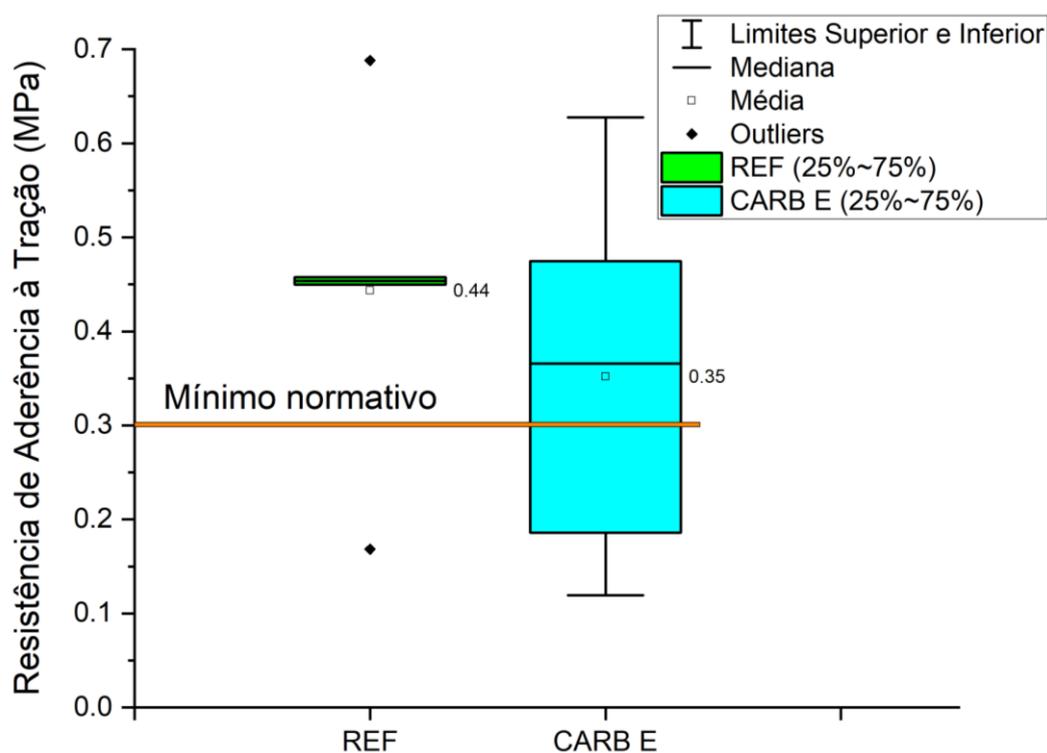
Fonte: Autor (2023)

Os resultados indicaram no teste estático uma variação na ordem de 10^{-4} mm/mm. Este parâmetro foi considerado nos ensaios de resistência à tração e compressão apresentadas nos próximos itens.

5.4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

A Figura 68 apresenta os resultados da resistência de aderência à tração avaliados nas amostras carbonatadas envelhecidas CARB E e amostras não carbonatadas, chamadas de referência REF do substrato cerâmico da olaria 1.

Figura 68 – Resistência de aderência à tração das amostras REF e CARB E da olaria 1



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 20 apresenta os resultados estatísticos de resistência de aderência à tração das amostras da olaria 1.

Tabela 20 – Resultados estatística de resistência de aderência à tração da olaria 1

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
REF	0,4435	0,1843	41,56	0,1683	0,3090	0,4537	0,5729	0,6881
CARB E	0,3520	0,1620	46,04	0,1192	0,1861	0,3656	0,4747	0,6275

Fonte: Autor (2023)

Os valores médios para a resistência de aderência à tração das amostras REF e CARB E foram, respectivamente, iguais a 0,44 MPa e 0,35 MPa com coeficiente de variação iguais a 41,56 % e 46,04 %. Ambos coeficientes de variação estão elevados, apesar das médias para a resistência de aderência à tração serem superiores aos valores mínimos de projeto especificada na tabela 2 da ABNT NBR 13749:2013. Este fator pode ter sido provocado pelos materiais empregados, preparo das amostras, condições de cura e também pela grande variabilidade deste tipo de ensaio. Nota-se que para o mesmo tipo de substrato, as amostras de

referência tiveram média superior às amostras que sofreram a degradação pelo ciclo de molhagem e choque térmico durante o processo de envelhecimento acelerado, estando associada a maior suscetibilidade às falhas de acordo com a literatura técnica.

Na verificação da ANOVA com nível de significância (α) de 5 % nas amostras REF e CARB E da olaria 1, observou-se que não houve influência significativa entre os valores das resistências de aderência à tração apresentada na Tabela 21.

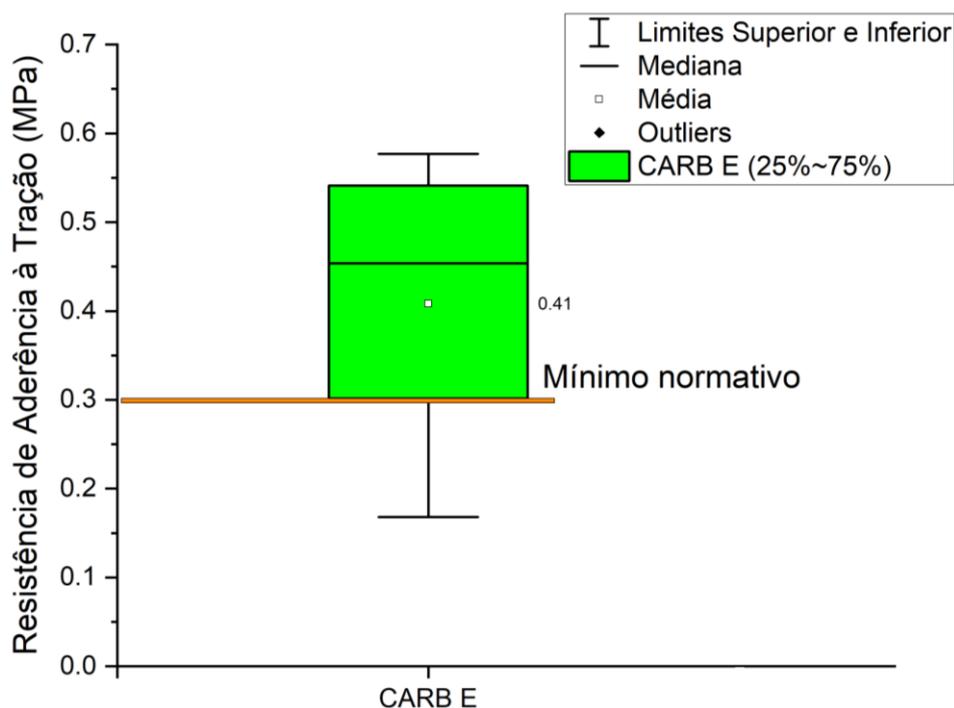
Tabela 21 – Resultados da ANOVA da resistência de aderência à tração das amostras REF x CARB E da olaria 1

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Valor F	Valor-p	Valor-p $\leq \alpha$
REF	0,443	0,184	1,01	0,331	Não
CARB E	0,352	0,162			

Fonte: Autor (2023)

A Figura 69 apresenta os valores de resistência de aderência à tração da olaria 2 para as amostras carbonatadas e submetida ao envelhecimento acelerado CARB E.

Figura 69 – Resistência de aderência à tração das amostras CARB E da olaria 2



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 22 apresenta os resultados estatísticos de resistência de aderência à tração das amostras CARB E da olaria 2.

Tabela 22 – Resultados estatística de resistência de aderência à tração da olaria 2

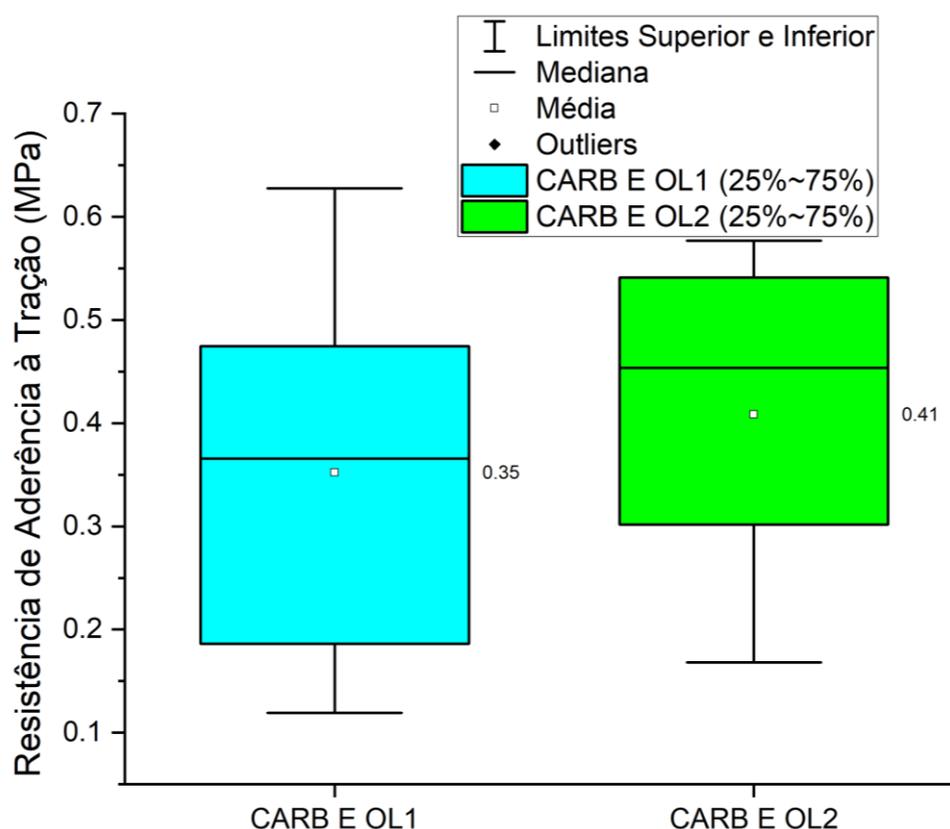
Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
CARB E	0,410	0,1712	41,92	0,1681	0,2349	0,4538	0,5590	0,5768

Fonte: Autor (2023)

Os valores médios para a resistência de aderência à tração das amostras CARB E foram iguais a 0,41 MPa com coeficiente de variação igual a 41,92 %. Apesar do coeficiente de variação está elevado, as amostras CARB E da olaria 2 apresentaram valores maiores que o mínimo de projeto da ABNT NBR 13749:2013.

A Figura 70 apresenta os valores de resistência de aderência à tração das amostras carbonatadas e que foram submetidas ao envelhecimento acelerado CARB E das olarias 1 e 2.

Figura 70 – Resistência de aderência à tração das amostras CARB E da olaria 1 e olaria 2



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 23 apresenta os resultados estatísticos de resistência de aderência à tração das amostras CARB E das olarias 1 e 2.

Tabela 23 – Resultados estatística de resistência de aderência à tração das amostras CARB E olaria 1 x olaria 2

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
CARB E OL1	0,352	0,1620	46,04	0,1192	0,1861	0,3656	0,4747	0,6275
CARB E OL2	0,410	0,1712	41,92	0,1681	0,2349	0,4538	0,5590	0,5768

Fonte: Autor (2023)

Os valores médios para a resistência de aderência à tração das amostras CARB E da olaria 1 e CARB E da olaria 2 foram, respectivamente, iguais a 0,35 MPa e 0,41 MPa com desvio padrão iguais a 0,162 MPa e 0,171 MPa. Ambos resultados superaram os valores mínimos de projeto da ABNT NBR 13749:2013. A resistência de aderência à tração para as amostras CARB E da olaria 2 foi superior em 17,1 % em relação a olaria 1 e indicou melhor adequação entre a rugosidade deste substrato cerâmico e as propriedades reológicas da argamassa fresca, apesar da elevada variabilidade de fatores intervenientes na resposta mecânica da argamassa endurecida ao realizar este tipo de ensaio.

Ao analisar a ANOVA com nível de significância (α) de 5 % nas amostras CARB E das olarias 1 e 2, observou-se que não houve diferença estatisticamente significativa entre os valores das resistências de aderência à tração, conforme apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados da ANOVA da resistência de aderência à tração das amostras CARB E olaria 1 x olaria 2

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Valor F	Valor-p	Valor-p $\leq \alpha$
CARB E OL1	0,352	0,162	0,40	0,536	Não
CARB E OL2	0,410	0,171			

Fonte: Autor (2023)

A Tabela 25 apresenta um resumo dos resultados de resistência de aderência à tração dos ensaios experimentais.

Tabela 25 – Resultados dos ensaios experimentais de resistência de aderência à tração

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão
REF OL1	0,443	0,184
CARB E OL1	0,352	0,162
CARB E OL2	0,410	0,171

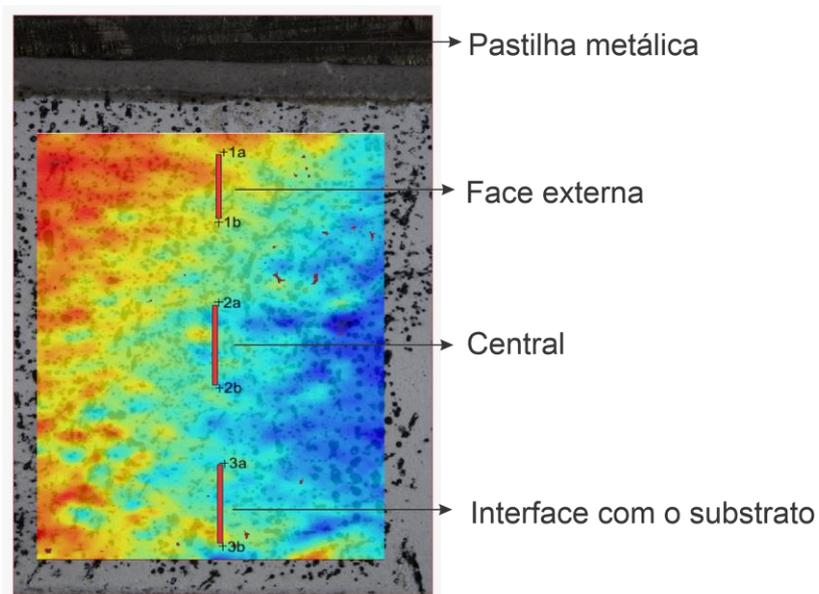
Fonte: Autor (2023)

5.5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE POR CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

Os resultados dos módulos elásticos foram avaliados nas amostras carbonatadas envelhecidas CARB E e amostras não carbonatadas, chamadas de referência REF para as olarias 1 e 2 compondo dois substratos cerâmicos distintos. Para a construção da curva do módulo elástico foram desprezados os carregamentos iniciais referentes à acomodação da prensa nos estágios iniciais do ensaio. Em seguida foram calculadas às tensões normais referente ao ensaio de aderência à tração até alcançar a carga correspondente a 50 % do valor de ruptura.

Os valores dos módulos elásticos foram obtidos a partir da declividade da reta resultante da regressão linear dos pontos da curva da relação tensão x deformação específica na direção do carregamento (direção vertical), apresentados no item 5.4 deste estudo. Durante o processamento da correlação de imagem digital foram coletadas as deformações específicas em três regiões distintas denominadas de face externa, central e interface, conforme apresentada na Figura 71, além de um extensômetro que cobre toda a amostra. A ideia é verificar de que maneira a deformação específica sofre influência estando próximo do ponto de aplicação do carregamento (região onde foram coladas as pastilhas metálicas), região central e próxima à interface de ligação da argamassa com o substrato cerâmico.

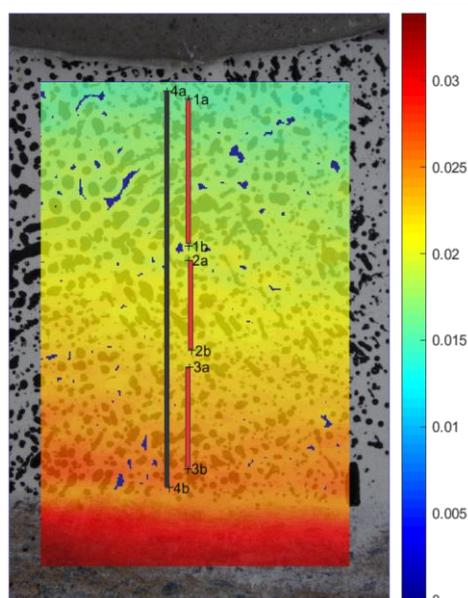
Figura 71 – Identificação dos extensômetros virtuais pela correlação de imagem digital



Fonte: Autor (2023)

A Figura 72 apresenta um exemplo de uma das amostras processadas no NCorr bem como as regiões de extensometria correspondente à face externa (1a-1b), central (2a-2b), interface (3a-3b) e toda a amostra (4a-4b).

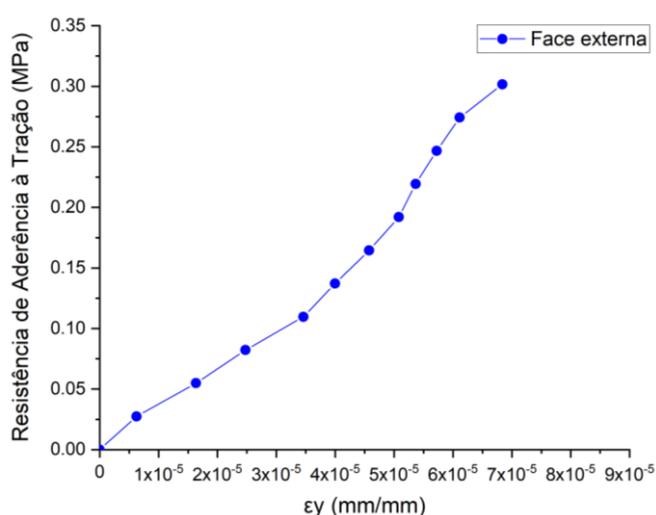
Figura 72 – Correlação de imagem digital processadas no NCorr



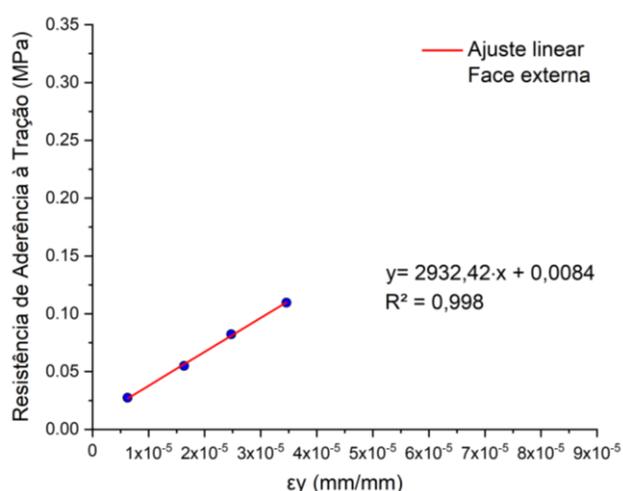
Fonte: Autor (2023)

A Figura 73 apresenta as respectivas curvas de resistências de aderência à tração da amostra da figura anterior obtida por correlação de imagem digital correspondente à face externa (Figura 73a, b), região central (Figura 73c, d), região próxima à interface (Figura 73e, f) e de toda a amostra (Figura 73g, h), bem como a reta de regressão linear para a obtenção do módulo elástico considerando até 50 % do valor da ruptura de resistência de aderência à tração.

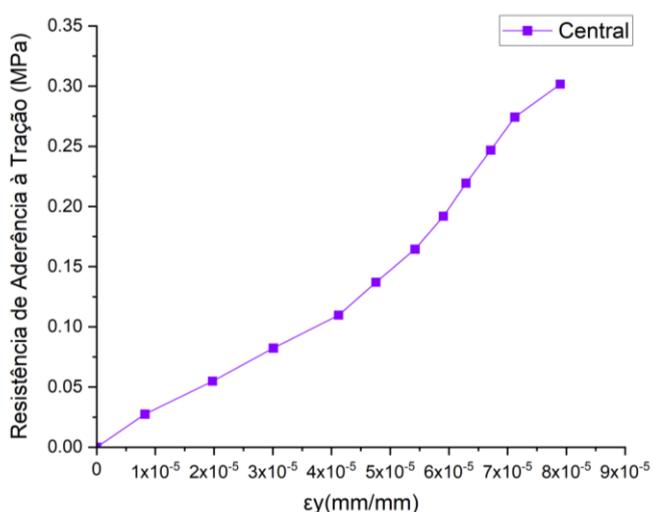
Figura 73 – Curva resistência à tração x deformação específica obtidos por correlação de imagem digital



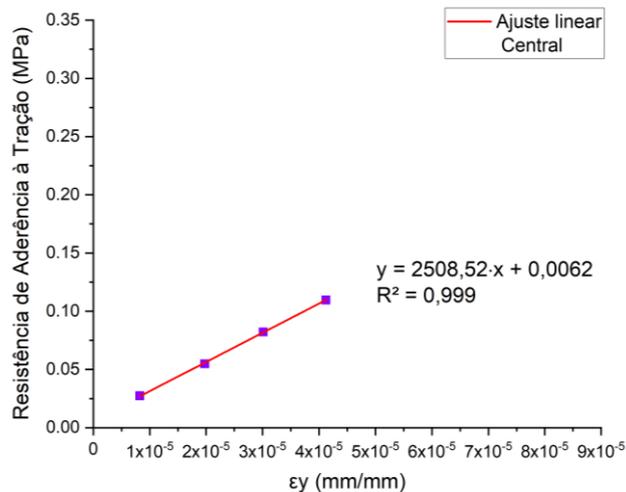
a) Face externa



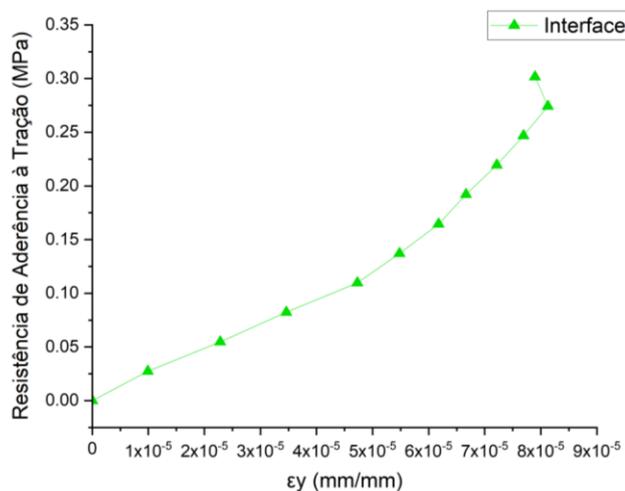
b) Ajuste linear da curva tensão x deformação específica da face externa



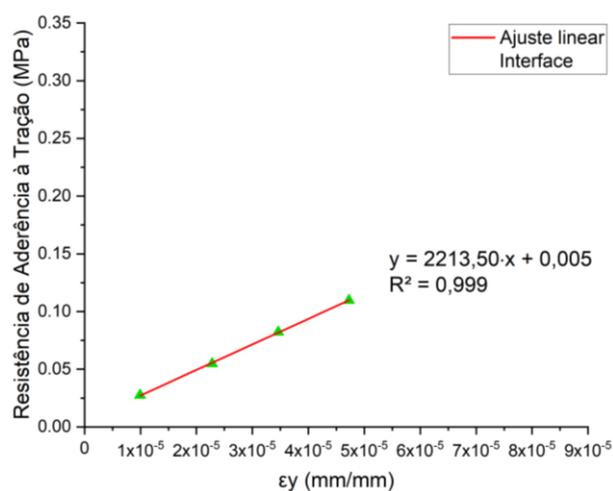
c) Região central



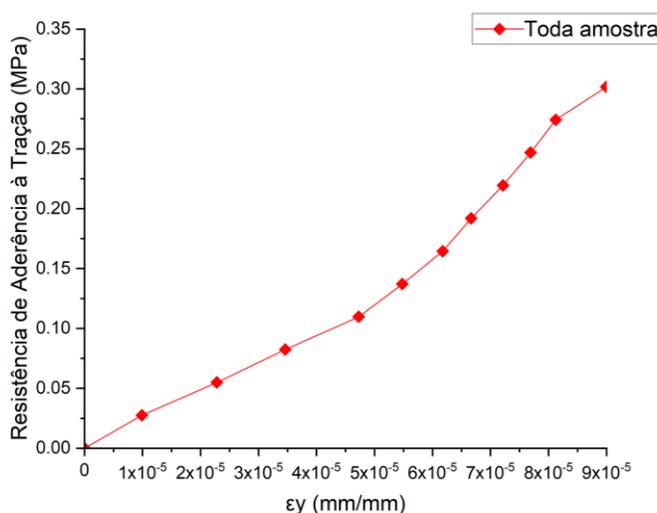
d) Ajuste linear da curva tensão x deformação específica da região central



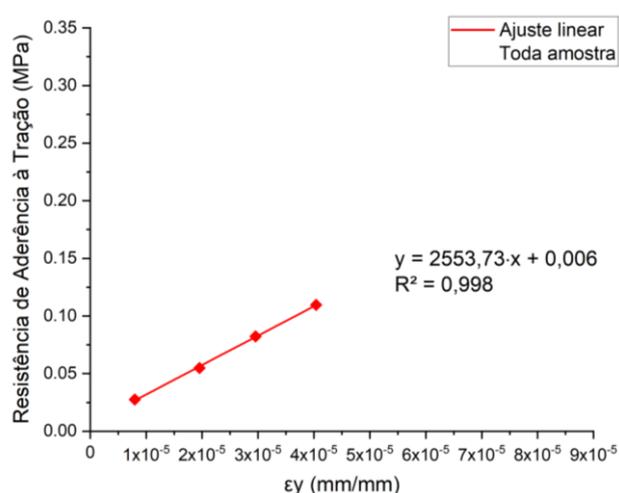
e) Região próxima à interface



f) Ajuste linear da curva tensão x deformação específica da região próxima à interface



g) Toda a amostra

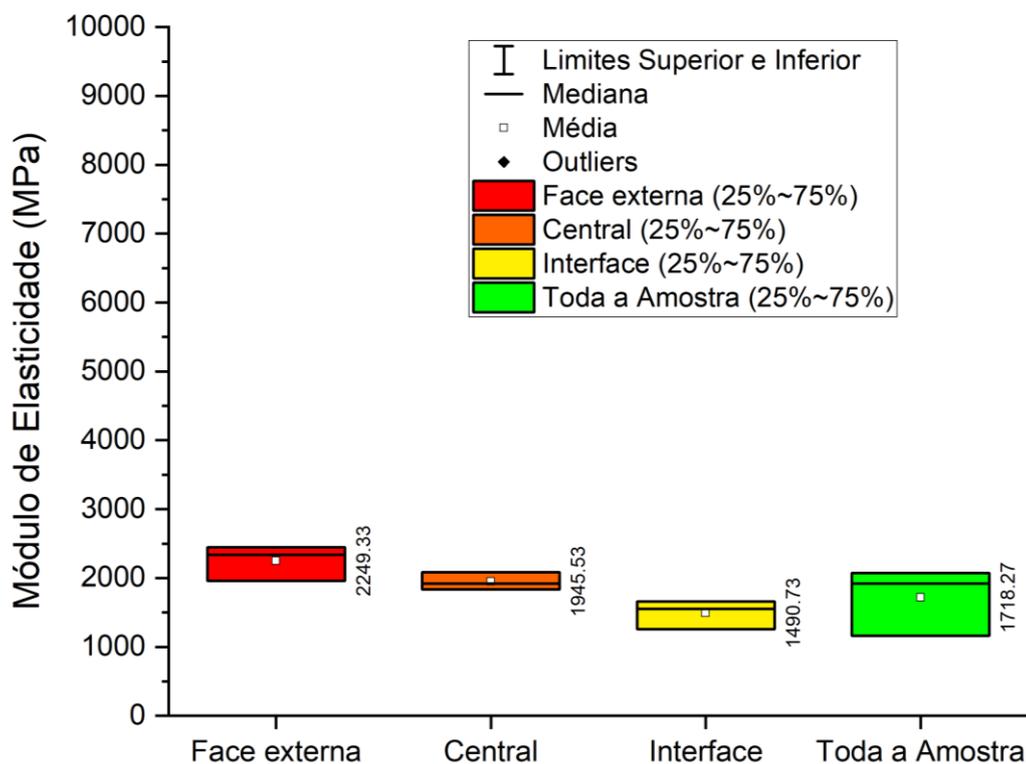


h) Ajuste linear da curva tensão x deformação específica da região próxima à interface

A partir da declividade da reta obtida dos ajustes lineares das regiões da amostra obtém-se os módulos elásticos. Essa metodologia de construção gráfica foi realizada em todas as amostras da correlação de imagem digital para as amostras REF e CARB E das olarias 1 e 2 cujos resultados dos módulos elásticos são apresentados a seguir.

A Figura 74 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade das amostras REF da olaria 1.

Figura 74 – Módulo de Elasticidade das amostras REF – olaria 1



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 26 apresenta os resultados estatísticos das amostras REF da olaria 1.

Tabela 26 – Análise estatística do módulo elástico das amostras REF – olaria 1

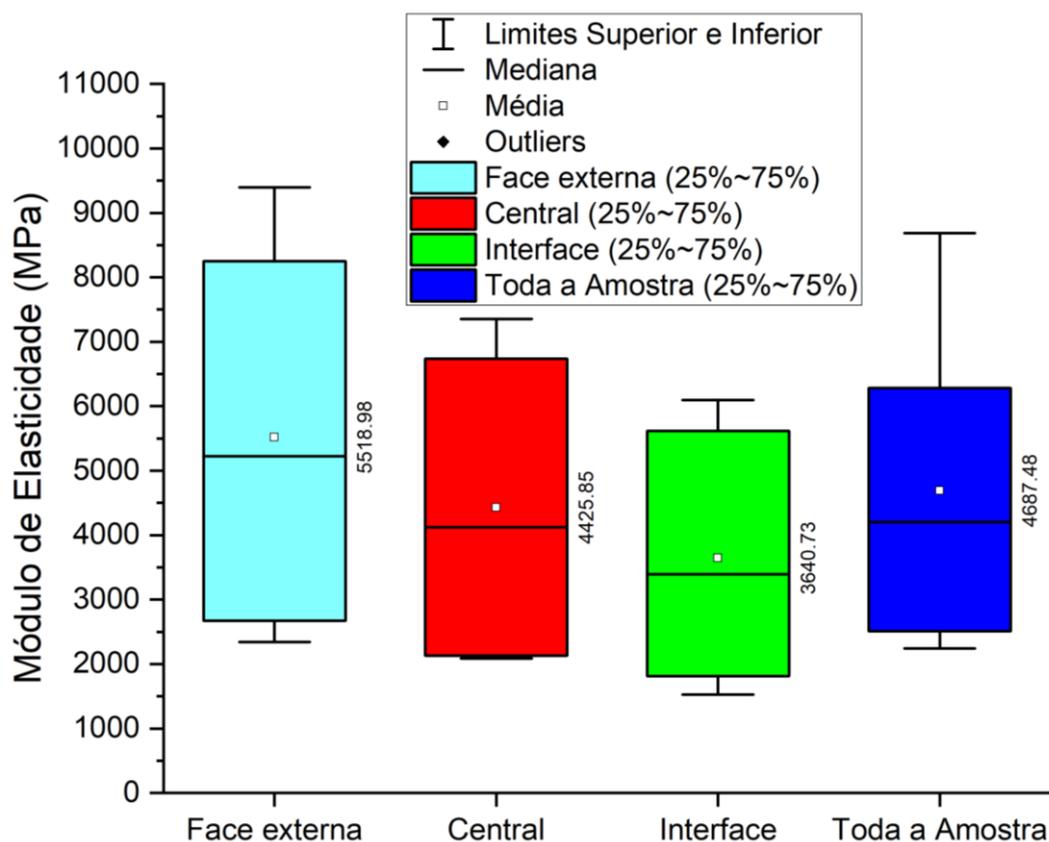
Região	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Face Externa	2249	258	11,46	1958	1958	2341	2449	2449
Central	1945,5	124,7	6,41	1836,2	1836,2	1919,1	2081,3	2081,3
Interface	1491	206	13,83	1261	1261	1553	1659	1659
Toda a Amostra	1718	487	28,34	1163	1163	1920	2072	2072

Fonte: Autor (2023)

Observa-se que os maiores valores dos módulos elásticos ocorreram na região da face externa da argamassa, próximo à região da pastilha das amostras REF no valor médio de 2249 MPa e sofreu redução ao aproximar da região da interface com média de 1491 MPa.

A Figura 75 apresenta os módulos de elasticidades das regiões das amostras carbonatadas com envelhecimento acelerado da olaria 1.

Figura 75 – Módulo de Elasticidade para as amostras CARB E da olaria 1



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 27 apresenta os resultados estatísticos das amostras CARB E da olaria 1.

Tabela 27 – Análise estatística do módulo elástico para as amostras CARB E – olaria 1

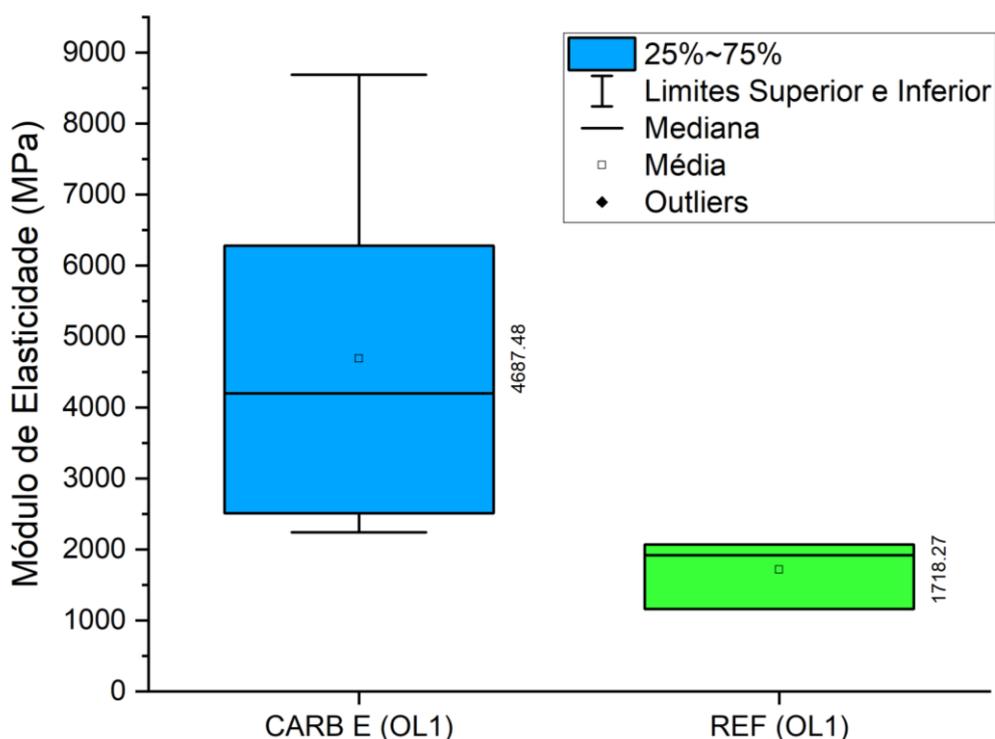
Região	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Face Externa	5519	2907	52,67	2343	2590	5227	8536	9395
Central	4426	2242	50,65	2088	2118	4122	6893	7355
Interface	3641	1893	52,00	1529	1741	3397	5735	6096
Toda a Amostra	4687	2446	52,18	2241	2444	4201	6883	8688

Fonte: Autor (2023)

Observa-se que os maiores valores dos módulos elásticos ocorreram na região da Face externa da argamassa, próximo à região da pastilha das amostras CARB E no valor médio de 5519 MPa e sofreu redução ao aproximar da região da interface com média de 3641 MPa.

A Figura 76 apresenta os módulos de elasticidades das regiões das amostras carbonatadas com envelhecimento acelerado CARB E e REF da olaria 1 para o extensômetro da correlação digital de imagem de toda a amostra.

Figura 76 – Módulo de Elasticidade da amostra CARB E x REF da olaria 1 de toda a amostra



Fonte: Autor (2023)

Observa-se que a amostra CARB E teve o maior valor do módulo elástico igual a 4687,48 MPa quando comparado com a amostra REF de 1718,27 MPa, e que houve um aumento no coeficiente de variação do ensaio. Estima-se que o processo de carbonatação foi o responsável pelo acréscimo do módulo de elasticidade observado nestas amostras e que o aumento do coeficiente de variação é decorrente dos danos microestruturais gerados quando a amostra foi submetida aos choques térmicos durante o processo de envelhecimento acelerado.

Ao realizar a ANOVA com nível de significância (α) de 5 % nas amostras CARB E e REF da olaria 1, observou-se que não houve influência significativa entre os valores dos módulos elásticos da face externa, central, interface e toda a amostra para a mesma olaria, conforme apresentada na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados da ANOVA dos módulos elásticos das amostras CARB E x REF – olaria 1

Região	Média (MPa)		Desvio Padrão		Análise de Variância		
	CARB E	REF	CARB E	REF	Valor F	Valor-p	Valor-p $\leq \alpha$
Face Externa	5519	2249	2907	258	3,53	0,102	Não
Central	4426	1945,5	2242	124,7	3,42	0,107	Não
Interface	3641	1491	1893	206	3,59	0,100	Não
Toda a Amostra	4687	1718	2446	487	4,06	0,084	Não

Fonte: Autor (2023)

Os valores médios dos módulos de elasticidade das amostras REF alcançaram 40,75 % do valor total da face externa das amostras CARB E, 43,95 % na região central, 40,95 % na região de interface com o substrato e 36,65 % em toda a amostra indicando um acréscimo no módulo elástico e nos coeficientes de variação nas amostras CARB E.

Ao realizar os testes simultâneos de Tukey (Tabela 29) para verificação da diferença das médias entre as amostras REF e CARB E e de mesma região de análise, verificou-se que todos os pares de médias incluem zero. Estes resultados indicaram para o intervalo de confiança (IC) de 95 % que as diferenças entre os módulos elásticos analisados comparativamente para as faces externas, região central e interface não foram estatisticamente significativas.

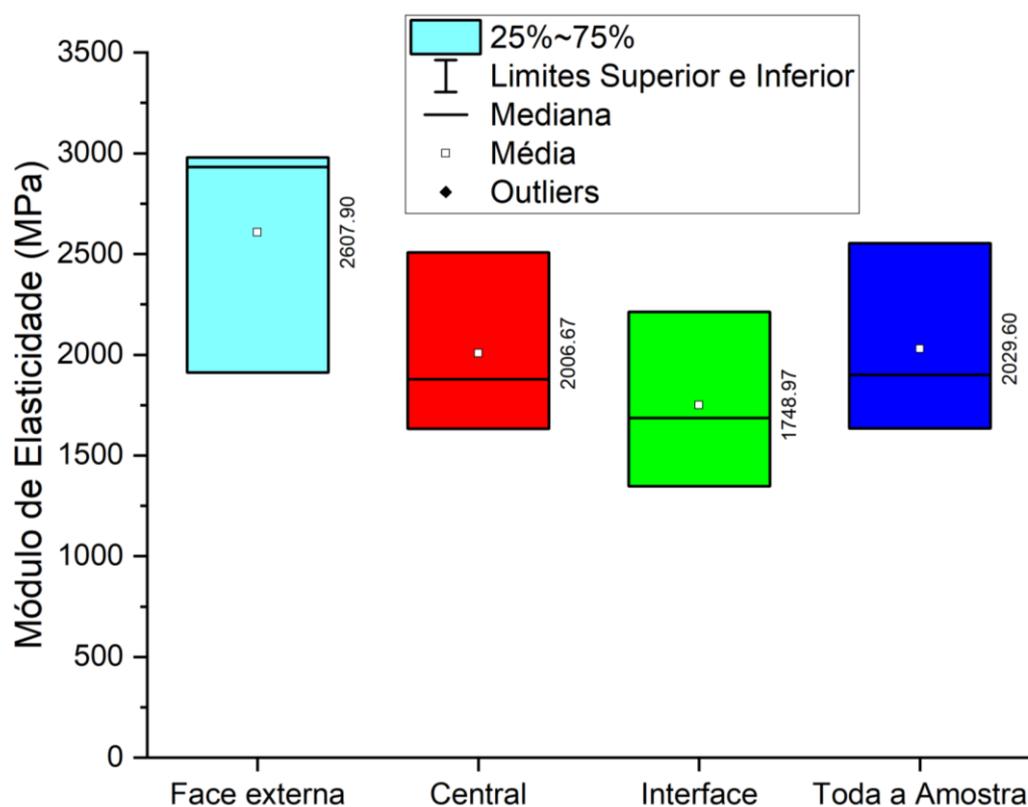
Tabela 29 - Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias do Módulo Elástico REF x CARB E da olaria 1

Níveis	Diferença de Médias (MPa)	IC de 95 %	Valor-T	Valor-P ajustado
REF x CARB E – Face Externa	-3270	(-7980; 1441)	-2,27	0,343
REF x CARB E – Central	-2708	(-7418; 2003)	-1,88	0,574
REF x CARB E – Interface	-2150	(-6861; 2561)	-1,49	0,804
REF x CARB E – Toda a Amostra	-2969	(-7680; 1741)	-2,06	0,461

Fonte: Autor (2023)

A Figura 77 apresenta os módulos de elasticidades das regiões das amostras carbonatadas com envelhecimento acelerado da olaria 2.

Figura 77 – Módulo de Elasticidade para as amostras CARB E da olaria 2



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 30 apresenta os resultados estatísticos das amostras CARB E da olaria 2.

Tabela 30 – Análise estatística do módulo elástico para as amostras CARB E – olaria 2

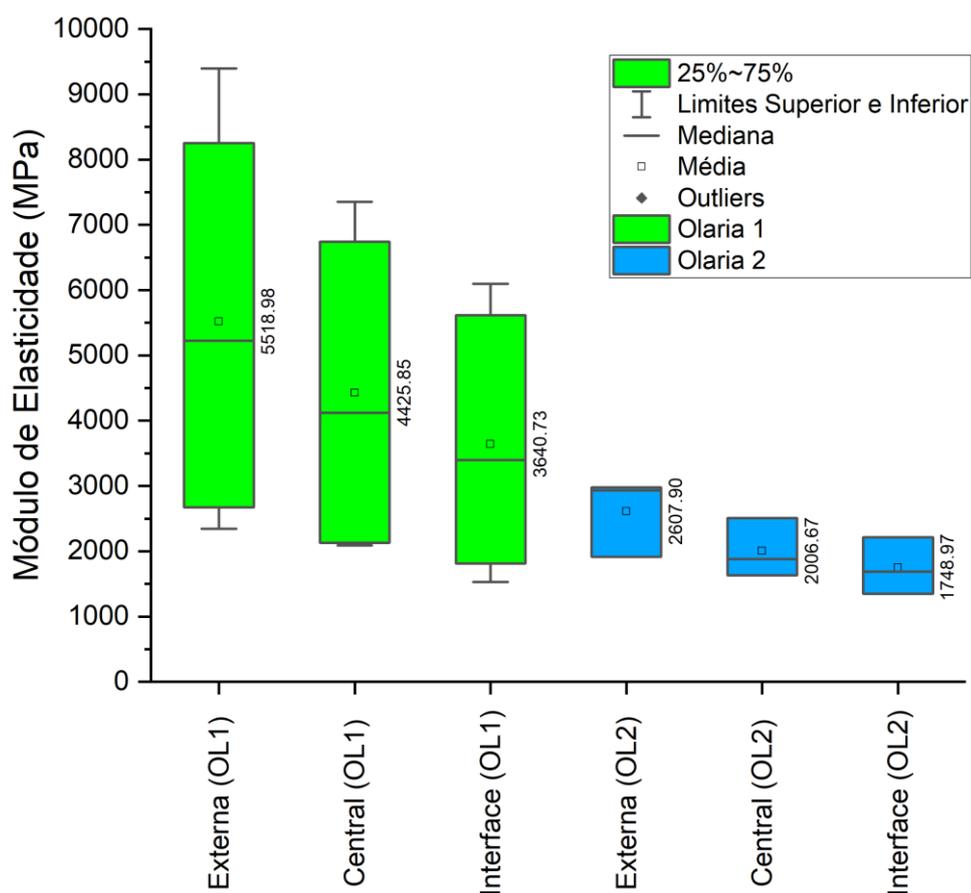
Região	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Face externa	2608	603	23,10	1913	1913	2932	2979	2979
Central	2007	452	22,50	1633	1633	1878	2509	2509
Interface	1749	436	24,95	1348	1348	1686	2214	2214
Toda a Amostra	2030	473	23,30	1635	1635	1900	2554	2554

Fonte: Autor (2023)

Nas amostras CARB E da olaria 2, os maiores valores dos módulos elásticos ocorreram na região da Face externa da argamassa, próximo à região da pastilha das amostras REF no valor médio de 2608 MPa e sofreu redução ao aproximar da região da interface com média de 1749 MPa.

A Figura 78 apresenta os módulos de elasticidades das regiões das amostras carbonatadas com envelhecimento acelerado aplicados nos substratos cerâmicos da olaria 1 e olaria 2.

Figura 78 – Módulo de Elasticidade para as amostras CARB E olaria 1 e olaria 2



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 31 apresenta os resultados da ANOVA com nível de significância (α) de 5 % nas amostras CARB E para os substratos da olaria 1 e olaria 2. Foi verificado que não houve significância entre os valores dos módulos elásticos da face externa, central, interface e toda a amostra para a mesma olaria.

Tabela 31 – Resultados da ANOVA dos módulos elásticos das amostras CARB E olaria 1 x olaria 2

Região	Média (MPa)		Desvio Padrão		Análise de Variância		
	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 1	Olaria 2	Valor F	Valor-p	Valor-p $\leq \alpha$
Face Externa	5519	2608	2907	603	2,76	0,141	Não
Central	4426	2007	2242	452	3,21	0,116	Não
Interface	3641	1749	1893	436	2,74	0,142	Não
Toda a Amostra	4687	2030	2446	473	3,26	0,114	Não

Fonte: Autor (2023)

Os valores médios dos módulos de elasticidade das amostras CARB E da olaria 2 alcançaram 47,25 % do valor total da face externa das amostras CARB E da olaria 1, 45,34 % na região central, 48,03 % na região de interface com o substrato e 43,31 % em toda a amostra. Estes resultados indicaram maiores módulos elásticos na amostra CARB E com argamassa de revestimento aplicado nos substratos cerâmicos da olaria 1.

Ao realizar os testes simultâneos de Tukey (Tabela 33) para verificação da diferença das médias entre as olarias da CARB E e de mesma região de análise, verificou-se que todos os pares de médias incluem zero. Estes resultados indicaram para o intervalo de confiança (IC) de 95 % que as diferenças entre os módulos elásticos CARB E analisados comparativamente para as faces externas, região central e interface não foram estatisticamente significativos.

Tabela 32 - Testes simultâneos de Tukey para as diferenças de médias do módulo elástico CARB E da olaria 1 x olaria 2

Níveis	Diferença de Médias (MPa)	IC de 95 %	Valor-T	Valor-P ajustado
OL1 x OL2 – Face Externa	-2911	(-7054; 1232)	-1,66	0,141
OL1 x OL2 – Central	-2419	(-5613; 774)	-1,79	0,116
OL1 x OL2 – Interface	-1892	(-4595; 812)	-1,65	0,142

Fonte: Autor (2023)

Todas as amostras apresentaram padrão comportamental semelhantes com maiores valores dos módulos elásticos próximos a região da pastilha colada e menores módulos em direção à interface. Uma hipótese a ser considerada é que na

região onde as pastilhas foram coladas ofereçam maior restrição de movimentação translacional e rotacional quando comparada com a região próxima à interface, cuja a resistência de aderência é inferior à resistência a tração observada nas demais regiões do revestimento.

As amostras submetidas à carbonatação com envelhecimento acelerado e as amostras de referência não apresentaram diferenças nos valores de módulos elásticos obtidos por correlação de imagem digital. Como já relatado, deve ser considerado a variabilidade do ensaio decorrido do processo de carbonatação, que por gerar produtos mais resistentes e diminuir o tamanho dos poros resulta em acréscimo do módulo de elasticidade. Entretanto, os valores de módulo de elasticidade calculados estão em conformidade com a literatura técnica presente nos trabalhos de Matos Silva, Flores-Colen e Gaspar (2013), Abdulla, Cunningham e Gillie (2017), D' Altri et al. (2018), Drougkas (2020).

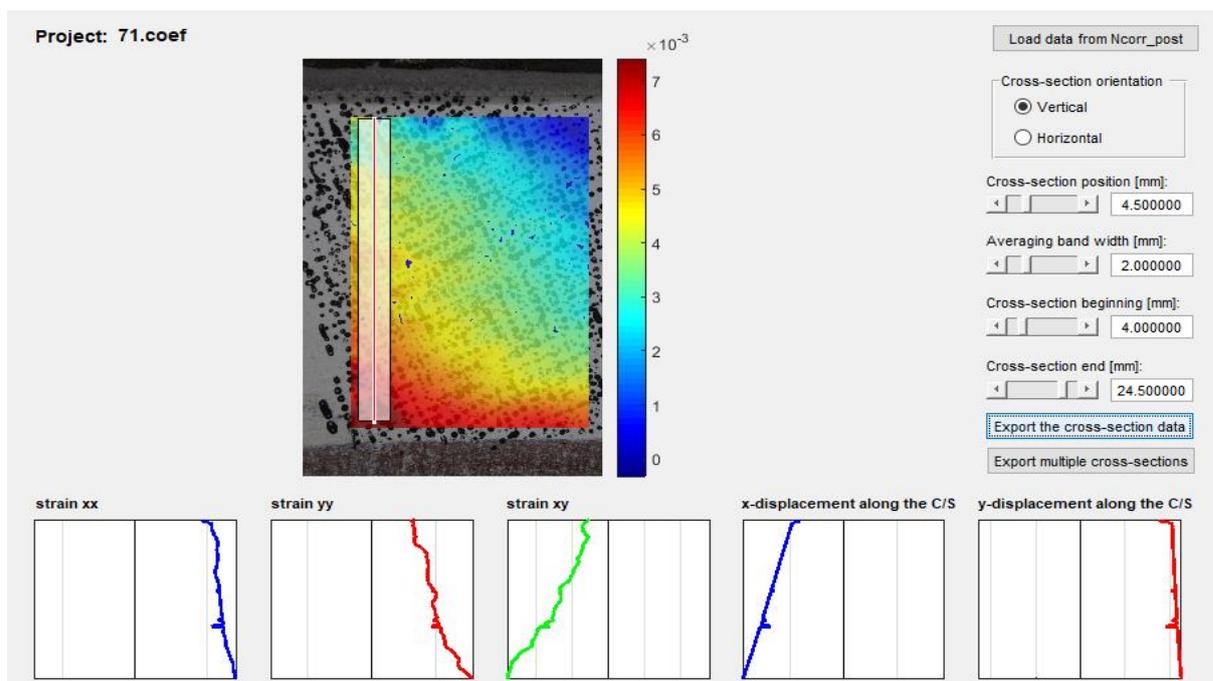
5.6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DO COEFICIENTE DE POISSON POR CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

Esta seção busca melhorar o conhecimento a respeito do coeficiente de Poisson, uma propriedade importante no âmbito das deformações e analisar a respeito da sua influência em toda a região da amostra. O coeficiente de Poisson foi calculado a partir dos resultados da correlação de imagem digital.

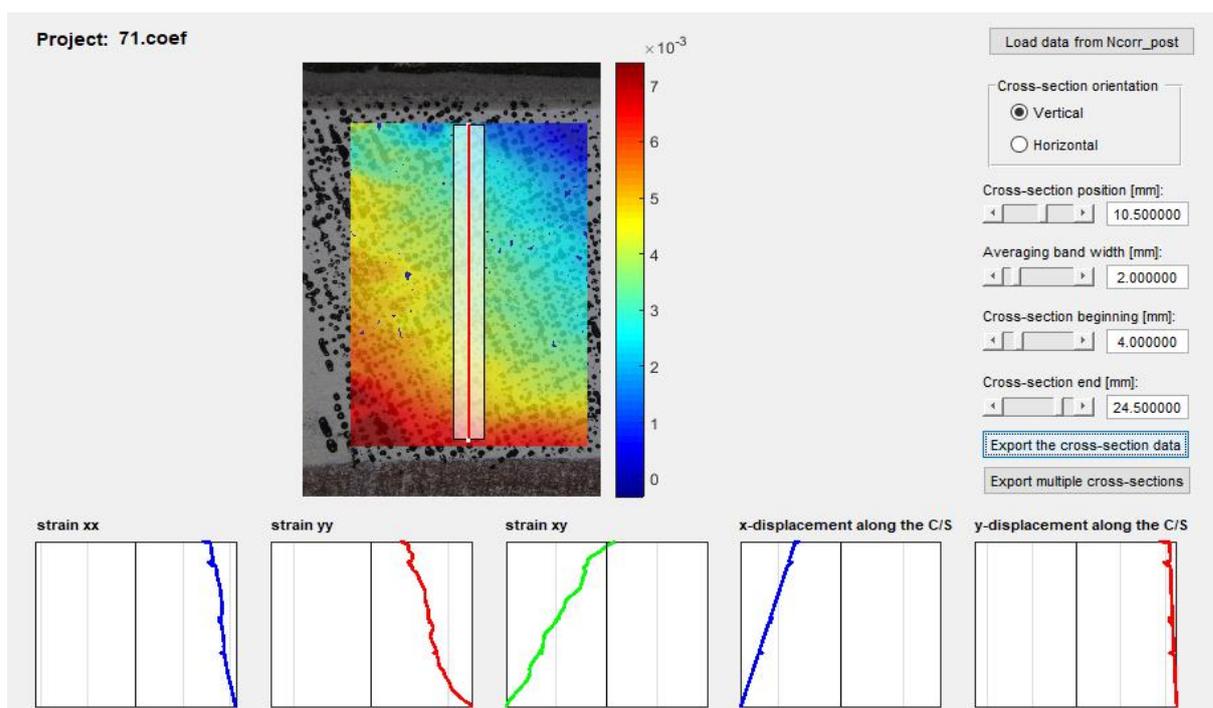
Os resultados dos coeficientes de Poisson foram avaliados nas amostras não carbonatadas REF e carbonatadas envelhecidas CARB E para as olarias 1 e 2 compondo dois substratos cerâmicos distintos. Para a aquisição das deformações específicas utilizou-se uma extensão “*open source*” denominado de NCorr Post CSTool que é um aplicativo de pós-processamento para a aquisição de deformações ao longo de qualquer seção transversal.

A Figura 79 apresenta a tela gráfica do programa aplicada em uma amostra CARB E deste estudo.

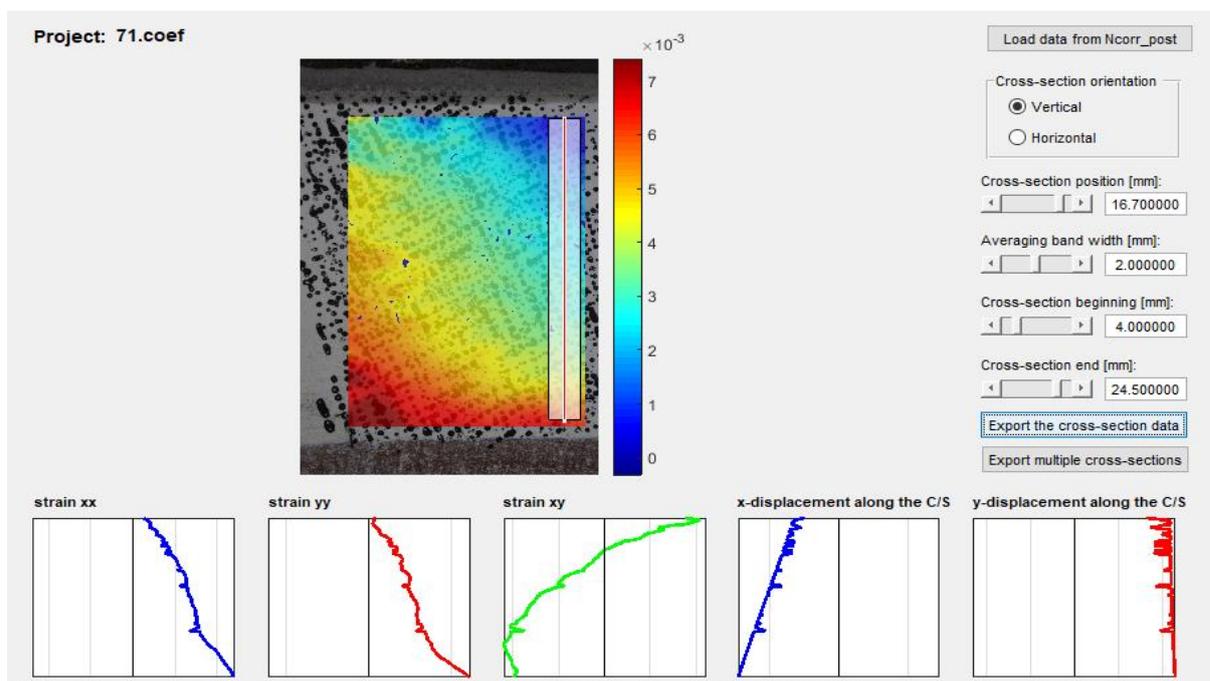
Figura 79 - Tela gráfica de aquisição de dados para cálculo do coeficiente de Poisson



a) Medições à esquerda da amostra



b) Medições na região central

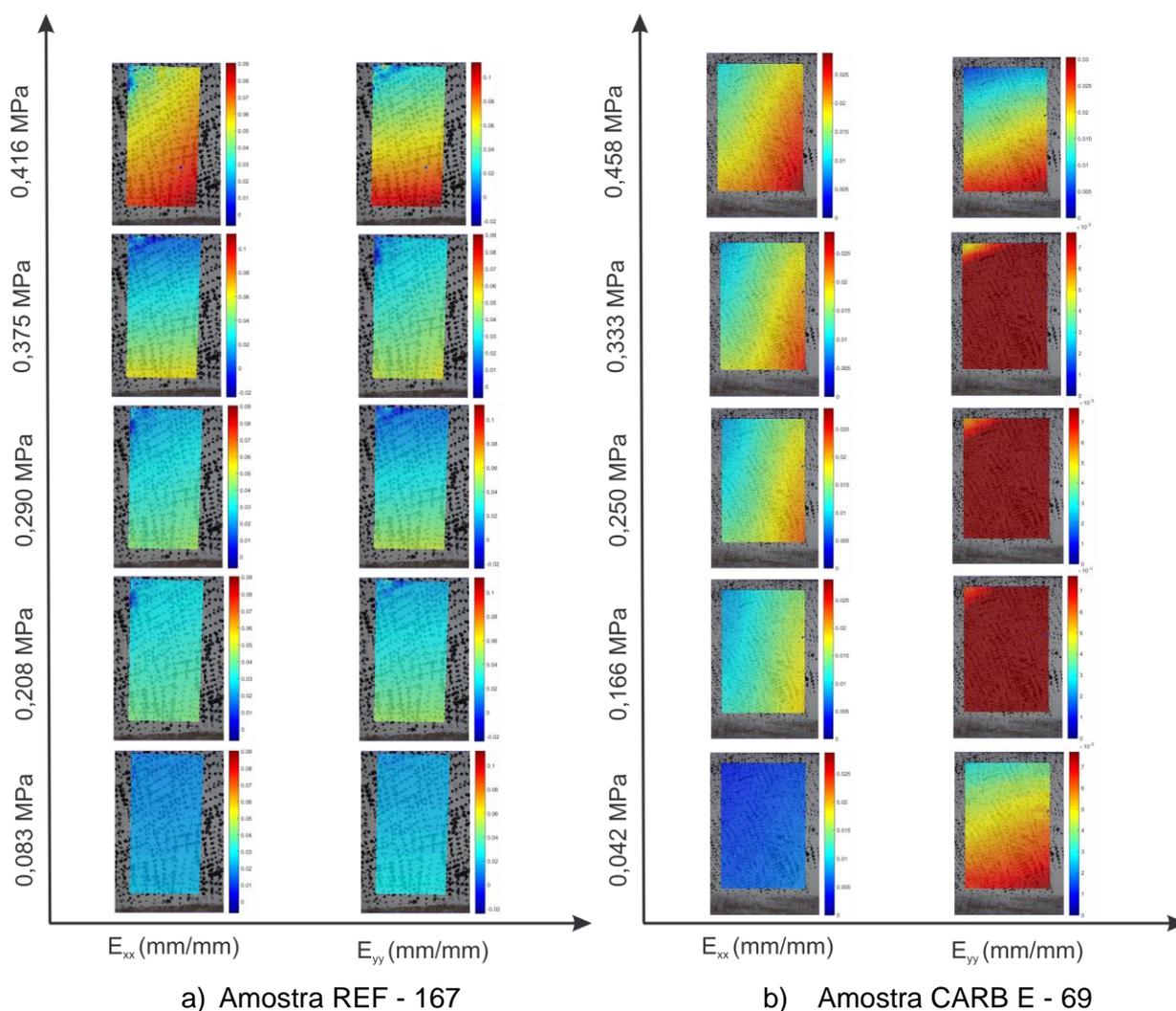


c) Medições à direita da amostra

Fonte: Autor (2023)

Procurou-se extrair os dados das amostras em 3 posições distintas na vertical e dentro da área de interesse após o processamento da correlação de imagem digital sendo: uma a esquerda (Figura 79a), outra na região central (Figura 79b) e por fim à direita (Figura 79c). Cada uma dessas posições resultou em uma nuvem de pontos correspondendo à coordenada do ponto medido em relação a um eixo de referência x e y e, o seu respectivo valor de deformações específicas na direção horizontal E_{xx} e na direção vertical E_{yy} , o que permitiu a determinação dos valores médios na face externa, região central e região de interface. A Figura 80 apresenta a evolução das deformações específicas Lagrangian-Green da correlação de imagem digital de uma amostra REF (Figura 80 a) e CARB E (Figura 80 b) a partir da tensão de aderência à tração (MPa) do ensaio experimental nas direções transversal e longitudinal para o cálculo do coeficiente de Poisson.

Figura 80 – Evolução das deformações específicas da correlação de imagem digital para o cálculo do coeficiente de Poisson

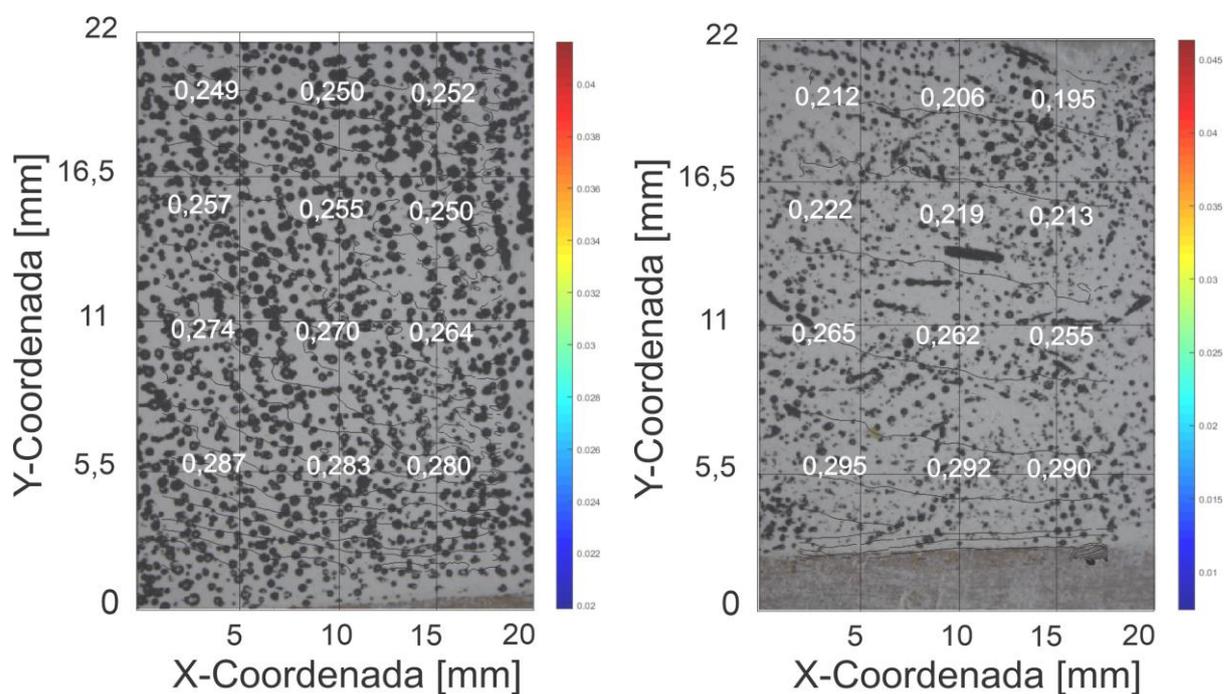


Fonte: Autor (2023)

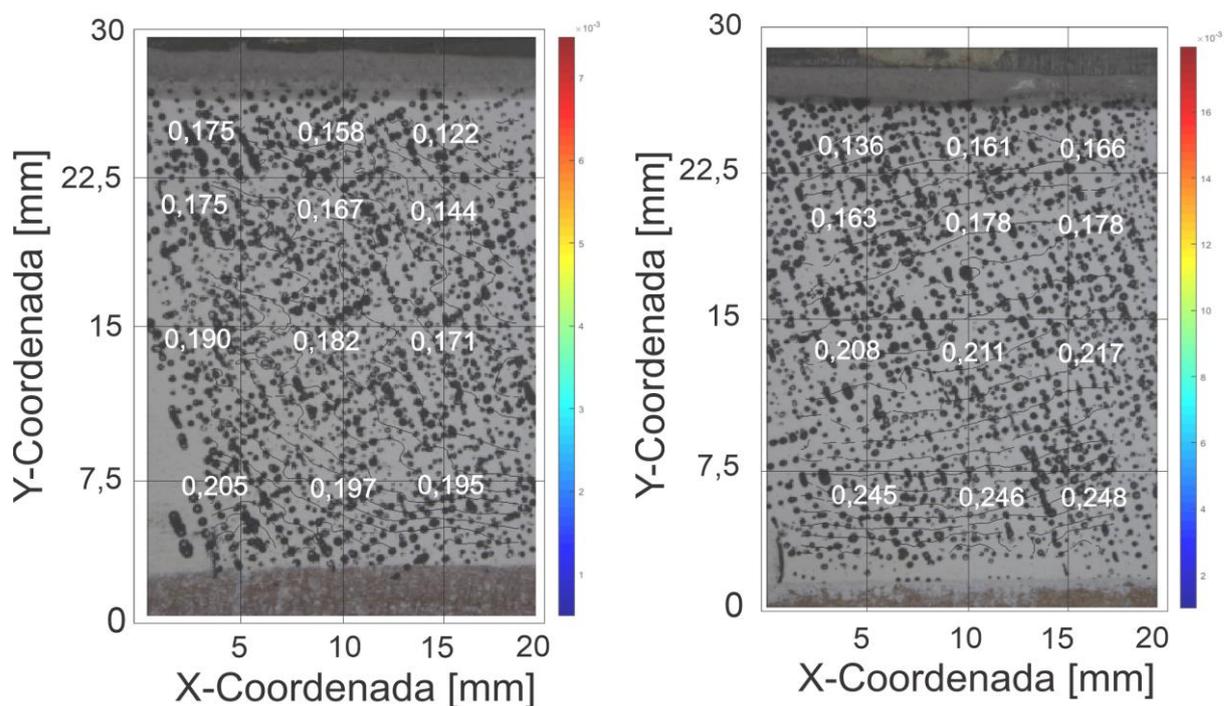
Os resultados de processamento da correlação de imagem digital de todas as amostras experimentais CARB E encontram-se no Apêndice A e das amostras REF no Apêndice B.

A Figura 81 apresenta um exemplo dos resultados do coeficiente de Poisson calculados em duas amostras REF (Figura 81a) e duas amostras CARB E (Figura 81b) ambas da olaria 1.

Figura 81 – Resultados do coeficiente de Poisson



a) Resultados do coeficiente de Poisson obtidos nas amostras REF – Olaria 1

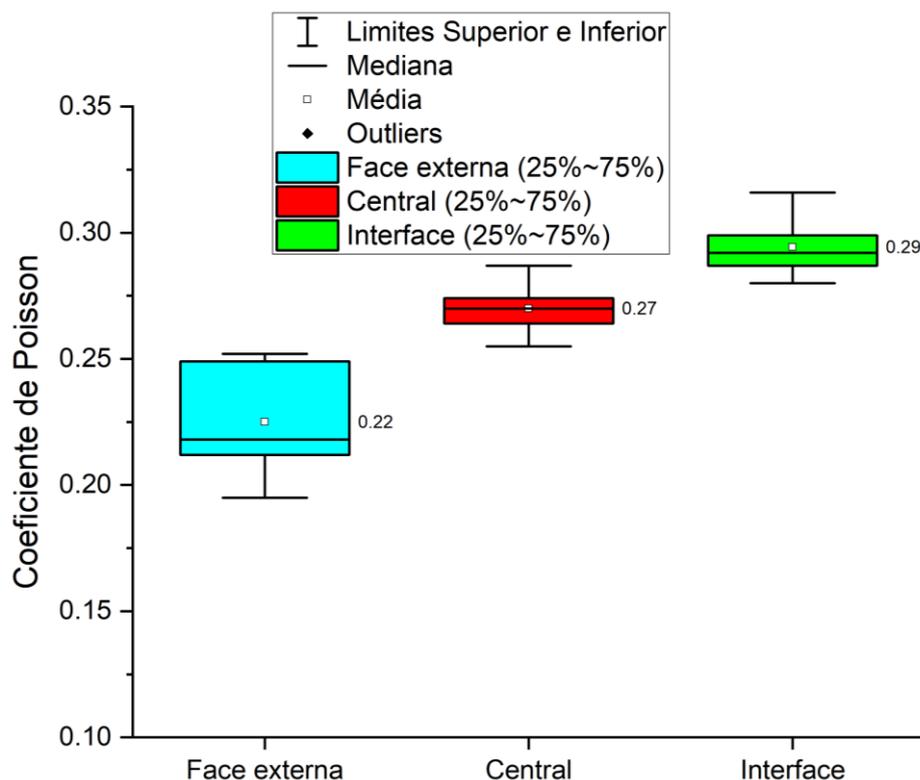


b) Resultados do coeficiente de Poisson obtidos nas amostras CARB E – Olaria 1

Fonte: Autor (2023)

A Figura 82 apresenta os resultados dos coeficientes de Poisson das amostras REF da olaria 1.

Figura 82 – Coeficientes de Poisson das amostras REF – olaria 1



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 33 apresenta os resultados estatísticos do coeficiente de Poisson das amostras REF da olaria 1.

Tabela 33 – Análise estatística para os coeficientes de Poisson das amostras REF – olaria 1

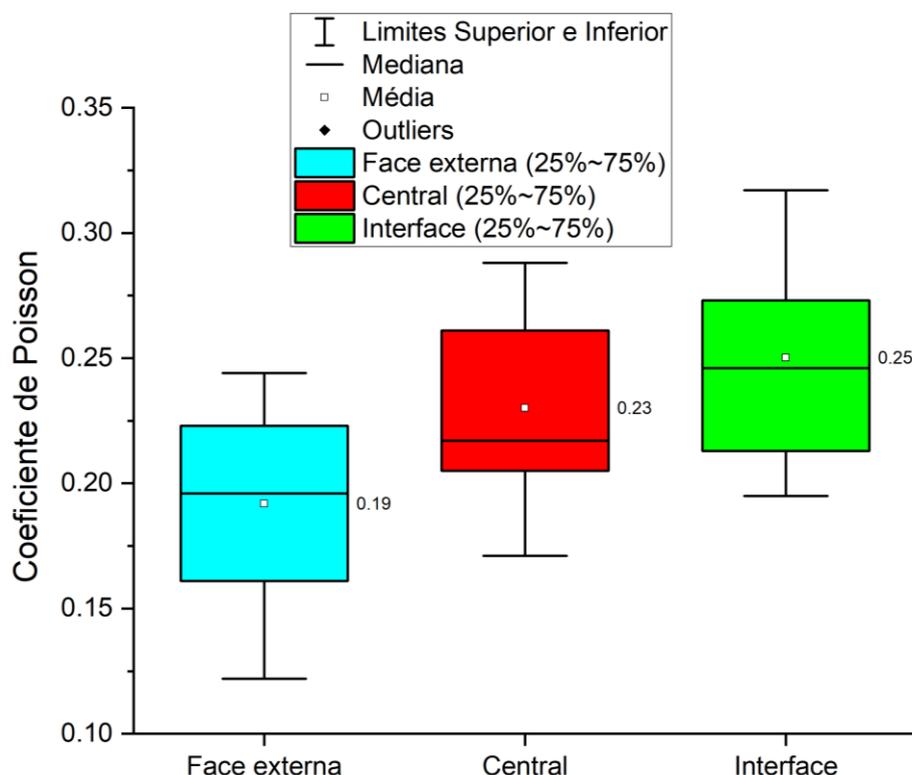
Região	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Face externa	0,225	0,0208	9,26	0,195	0,209	0,218	0,249	0,252
Central	0,270	0,0097	3,62	0,255	0,263	0,270	0,277	0,287
Interface	0,294	0,0114	3,87	0,280	0,285	0,292	0,302	0,316

Fonte: Autor (2023)

Observa-se que os maiores valores dos coeficientes de Poisson das amostras REF da olaria 1 ocorreram na região da interface bloco-argamassa no valor médio de 0,294. Este resultado indica que essa região está passível de maiores deformações específicas antes da sua ruptura. Este valor é 30,66 % maior em relação ao coeficiente de Poisson na face externa e 8,88 % superior em relação à região central da amostra.

A Figura 83 apresenta os resultados dos coeficientes de Poisson das regiões das amostras carbonatadas com envelhecimento acelerado da olaria 1.

Figura 83 – Coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 1



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 34 apresenta os resultados estatísticos do coeficiente de Poisson das amostras CARB E da olaria 1.

Tabela 34 – Análise estatística para os coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 1

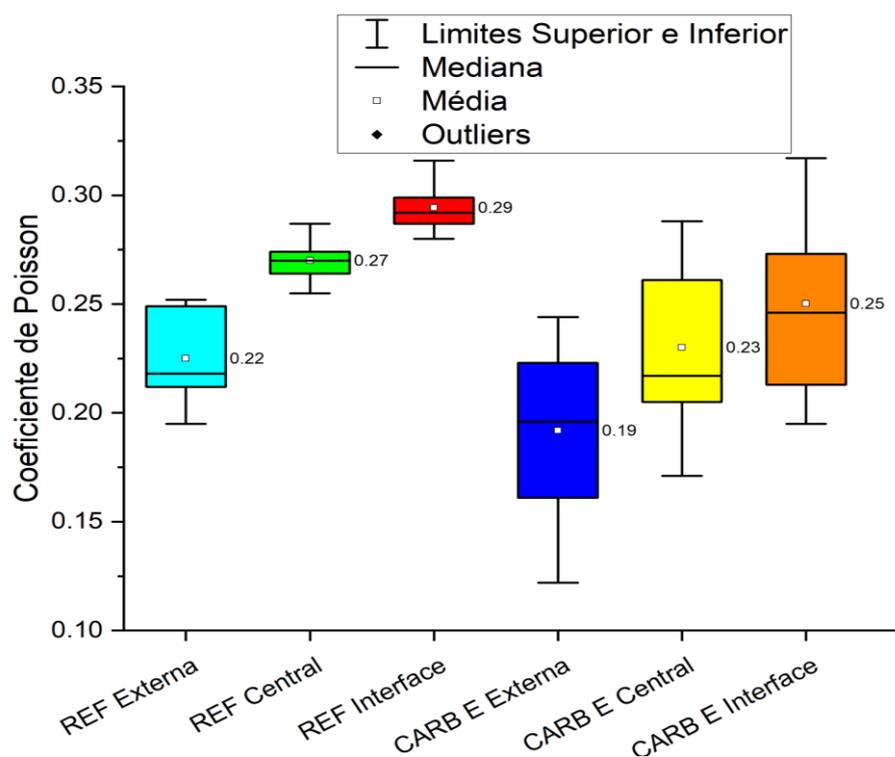
Região	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Face externa	0,191	0,0381	19,88	0,122	0,161	0,196	0,223	0,244
Central	0,230	0,0393	17,09	0,171	0,205	0,217	0,261	0,288
Interface	0,250	0,0425	16,98	0,195	0,213	0,246	0,273	0,317

Fonte: Autor (2023)

Os maiores valores dos coeficientes de Poisson das amostras CARB E da olaria 1 ocorreram na região da interface bloco-argamassa no valor médio de 0,250. Da mesma forma que ocorreu nas amostras REF, os resultados indicam que a região interfacial das amostras CARB E está passível de maiores deformações específicas antes da sua ruptura. Este valor é 30,89 % maior em relação ao coeficiente de Poisson na face externa e 8,69 % superior em relação à região central da amostra.

A Figura 84 apresenta uma comparação dos resultados dos coeficientes de Poisson das regiões das amostras CARB E e REF da olaria 1.

Figura 84 – Coeficientes de Poisson das amostras REF x CARB E – olaria 1



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 35 apresenta os resultados da ANOVA com nível de significância (α) de 5 % nas amostras REF x CARB E para os substratos da olaria 1. Foi verificado que houve significância entre os valores dos coeficientes de Poisson entre as amostras.

Tabela 35 – Resultados da ANOVA dos coeficientes de Poisson das amostras REF x CARB E da olaria 1

Região	Média		Desvio Padrão		Análise de Variância		
	REF	CARB E	REF	CARB E	Valor F	Valor-p	Valor-p $\leq \alpha$
Face Externa	0,225	0,191	0,02084	0,03814	5,72	0,026	Sim
Central	0,270	0,230	0,0097	0,0393	8,80	0,007	Sim
Interface	0,294	0,250	0,0114	0,0425	9,11	0,006	Sim

Fonte: Autor (2023)

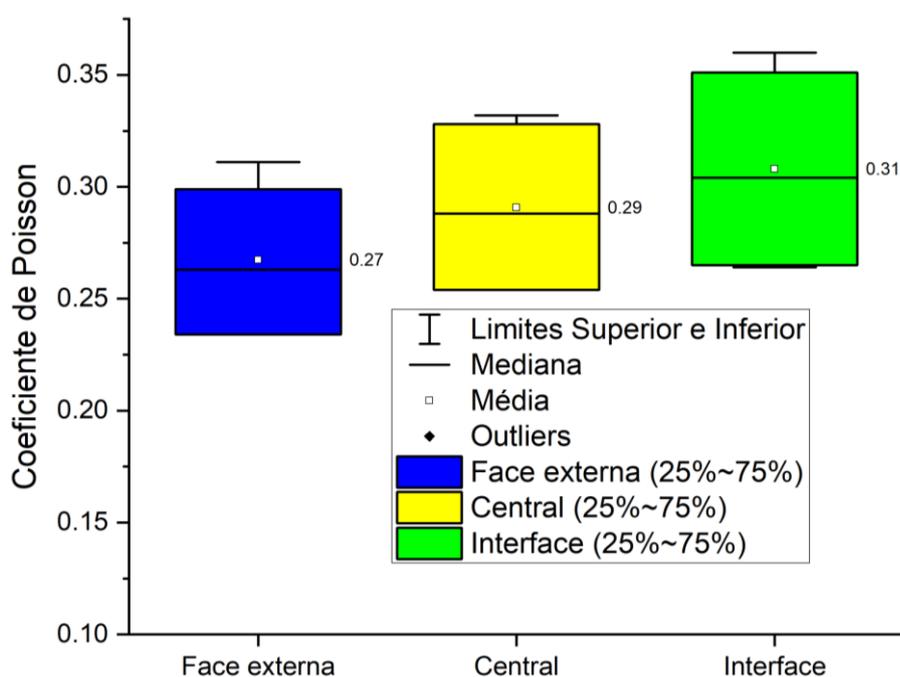
Verifica-se um padrão comportamental mecânico tanto para as amostras REF como para as CARB E semelhantes, cujos menores valores de Poisson ocorreram na região da face externa da amostra e os maiores na região de interface bloco-argamassa.

Ao comparar os valores médios dos coeficientes de Poisson, as amostras REF tiveram os maiores resultados, as quais a região da face externa foi superior em 17,80 %, a região central superou 17,39 % e as da interface bloco-argamassa foi superior em 17,6 % quando comparadas com as amostras CARB E.

Estes resultados são indicativos da influência da degradação ocorrida nas amostras CARB E, que alterou suas propriedades elásticas com maior intensidade na região próxima à superfície externa que estava exposta a intempérie. Soma-se a isto a menor porosidade existente na região da argamassa mais próxima à interface com a cerâmica, onde, em função da perda de água para o substrato durante o estado fresco, há uma tendência a diminuição da relação água/cimento.

A Figura 85 apresenta os resultados dos coeficientes de Poisson das regiões das amostras carbonatadas com envelhecimento acelerado da olaria 2.

Figura 85 – Coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 2



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 36 apresenta os resultados estatísticos do coeficiente de Poisson das amostras CARB E da olaria 2.

Tabela 36 – Análise estatística para os coeficientes de Poisson das amostras CARB

E – olaria 2

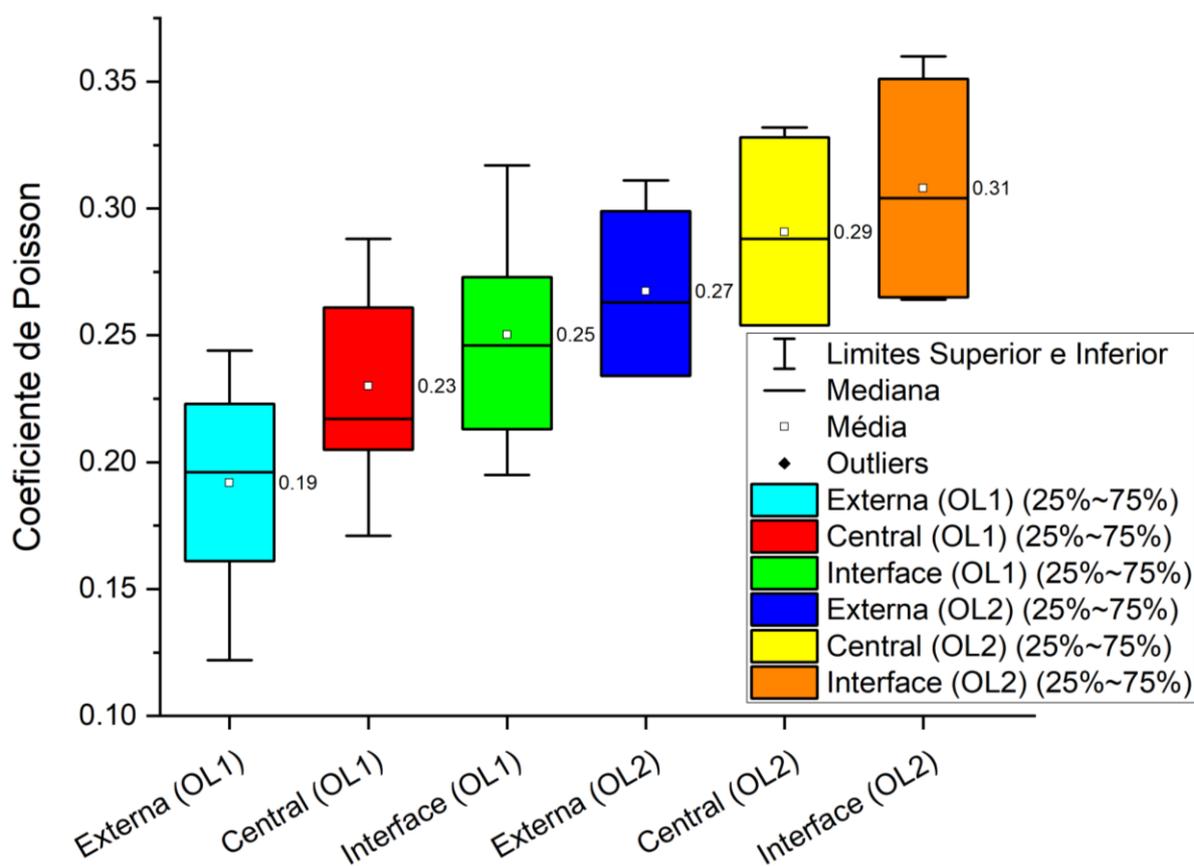
Região	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Face externa	0,267	0,0361	13,51	0,234	0,234	0,263	0,302	0,311
Central	0,290	0,0396	13,63	0,254	0,254	0,288	0,329	0,332
Interface	0,308	0,0475	15,41	0,264	0,264	0,304	0,353	0,360

Fonte: Autor (2023)

Os maiores valores dos coeficientes de Poisson das amostras CARB E da olaria 2 ocorreram na região da interface bloco-argamassa no valor médio de 0,308. Este resultado indica maiores deformações específicas na região de ligação da interface bloco-argamassa em relação às demais regiões. Este valor é 15,36 % maior em relação ao coeficiente de Poisson na face externa e 6,20 % superior em relação à região central da amostra.

A Figura 86 apresenta uma comparação dos resultados dos coeficientes de Poisson das regiões das amostras CARB E da olaria 1 e olaria 2.

Figura 86 – Coeficientes de Poisson das amostras CARB E – olaria 1 x olaria 2



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 37 apresenta os resultados da ANOVA com nível de significância (α) de 5 % nas amostras CARB E olaria 1 x olaria 2. Foi verificado que houve significância entre os valores dos coeficientes de Poisson entre as amostras.

Tabela 37 – Resultados da ANOVA dos coeficientes de Poisson das amostras CARB E olaria 1 x olaria 2

Região	Média		Desvio Padrão		Análise de Variância		
	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 1	Olaria 2	Valor F	Valor-p	Valor-p $\leq \alpha$
Face Externa	0,191	0,267	0,0381	0,0361	17,28	0,001	Sim
Central	0,230	0,290	0,0393	0,0396	10,14	0,005	Sim
Interface	0,250	0,308	0,0425	0,0475	7,45	0,013	Sim

Fonte: Autor (2023)

Assim como ocorreram na análise das demais amostras houve um padrão comportamental mecânico semelhante, cujos menores valores de Poisson ocorreram na região da face externa da amostra e os maiores na região de interface bloco-argamassa. Ao comparar os valores médios dos coeficientes de Poisson, as amostras da olaria 2 tiveram os maiores resultados, as quais a região da face externa foi superior em 39,79 %, a região central superou 26,08 % e as da interface bloco-argamassa foi superior em em 23,20 % quando comparadas com as amostras da olaria 1. Estes resultados são indicativos da influência do efeito de degradação proveniente das amostras, cuja restrição de movimentação é menor em direção à interface quando comparada com a face externa. Esta liberdade de movimentação interfacial ficou mais evidenciada nas amostras CARB E da olaria 2 quando comparada com os da olaria 1.

A Tabela 38 apresenta os valores médios da nuvem de pontos da correlação de imagem digital medidos no lado esquerdo, central e direito ao longo das amostras REF, CARB E olaria 1 e olaria 2.

Tabela 38 – Coeficientes de Poisson na análise lateral e central das amostras

Região	Média			Desvio Padrão		
	Lado Esquerdo	Central	Lado Direito	Lado Esquerdo	Central	Lado Direito
REF – OL1	0,269	0,265	0,259	0,0215	0,0199	0,0212
CARB E – OL 1	0,227	0,226	0,222	0,0430	0,0435	0,0467
CARB E – OL 2	0,273	0,270	0,266	0,0305	0,0272	0,0236

Fonte: Autor (2023)

De acordo com os resultados da Tabela 38, observa-se uma redução do coeficiente de Poisson em todas as amostras, no sentido do lado esquerdo para o lado direito. Isto indica, por alguma razão, que o posicionamento das amostras durante a execução do ensaio de resistência de aderência à tração pode ter sofrido uma leve inclinação. Por exemplo, ao comparar todas as amostras REF – OL 1, CARBE E – OL 1 e CARB E – OL 2, o lado esquerdo foi superior, respectivamente, em 3,86 %; 2,25 % e 2,63 % em relação aos valores dos coeficientes de Poisson do lado direito.

Apesar dos resultados obtidos para os coeficientes de Poisson indicarem uma elevada variabilidade de fatores interveniente na resposta mecânica ao realizar este tipo de ensaio, os seus valores médios calculados a partir da correlação de imagem digital em blocos cerâmicos e argamassa de revestimentos foram coerentes aos encontrados experimentalmente por Mohamad, Lourenço e Roman (2007), Mohamad et al. (2018) e Drougkas et al. (2020).

A Tabela 39 apresenta um resumo dos resultados dos coeficientes de Poisson obtidos a partir dos ensaios de resistência de aderência à tração e da correlação de imagem digital.

Tabela 39 – Resumo dos resultados dos coeficientes de Poisson das amostras REF, CARB e CARB E das olarias 1 e 2

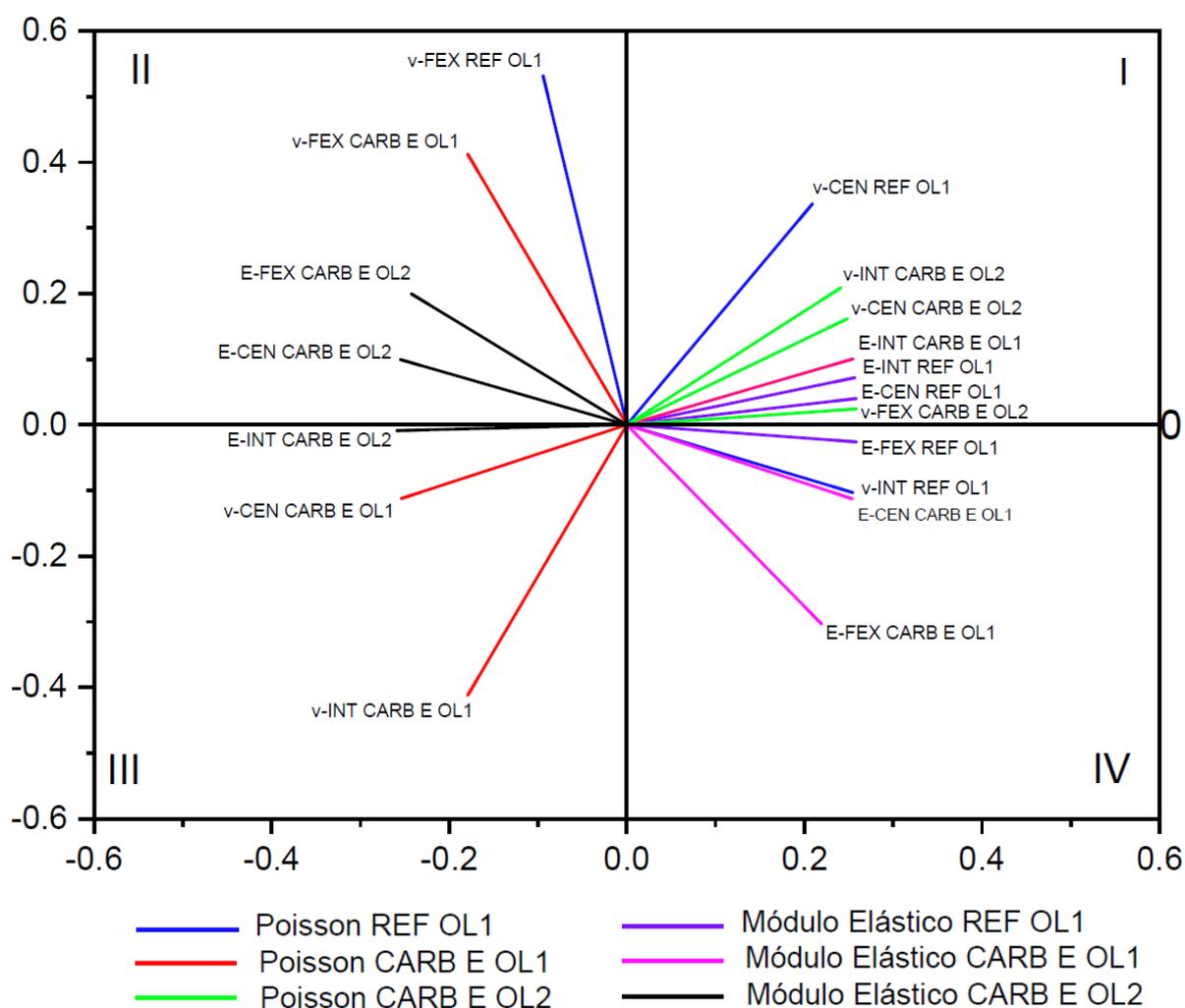
Região	Média			Desvio Padrão		
	Face externa	Central	Interface	Face externa	Central	Interface
REF – OL1	0,225	0,270	0,294	0,0208	0,0097	0,0114
CARB E – OL 1	0,191	0,230	0,250	0,0381	0,0393	0,0425
CARB E – OL 2	0,267	0,290	0,308	0,0361	0,0396	0,0475

Fonte: Autor (2023)

Por fim a análise estatística PCA (Figura 87) mostrou os autovetores com maiores dispersões em relação aos coeficientes de Poisson e Módulo de Elasticidade, em que a análise do coeficiente de Poisson indica a tendência de crescimento dos coeficientes de Poisson das amostras CARB E OL2, localizadas no quadrante I indo do menor para o maior da região da face externa v-FEX CARB E OL2 em direção aos maiores valores na interface v-INT CARB E OL2. Já os módulos elásticos das mesmas amostras tiveram direções opostas e indicaram tendência de crescimento dos módulos de elasticidade na direção da interface E-INT

CARB E OL2, localizada no quadrante III em direção aos maiores valores dos módulos elásticos em direção à região da face central E-CEN CARB E OL2 e região da face externa E-FEX CARB E OL2, localizadas no quadrante II. Já as amostras REF OL1 e CARB E OL1 indicaram tendência decrescente para os coeficientes de Poisson no quadrante III e módulos elásticos no quadrante IV. Indicando que os valores dos módulos elásticos foram menores para as amostras REF OL 1 e CARB E OL1 quando comparados com as amostras CARB E OL2.

Figura 87 – Análise estatística PCA Coeficiente de Poisson x Módulo Elástico



Fonte: Autor (2023)

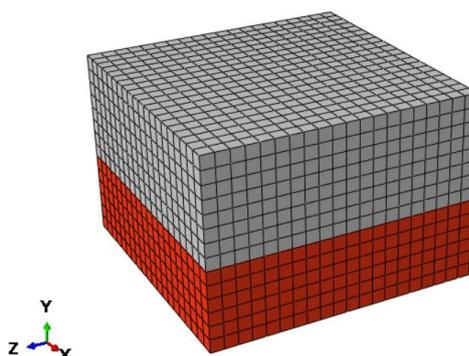
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA

6.1 AVALIAÇÃO DA MALHA DO MODELO NUMÉRICO

Esta seção avalia a influência de três tipos de tamanho de malhas aplicadas no modelo numérico. A ideia é observar se o refinamento da malha, para o objeto de estudo, influencia nos resultados de tensão de aderência à tração e deformação específica. A seguir apresentam-se os modelos numéricos de malha de 0,25 cm de aresta com 5600 elementos finitos, 0,50 cm de aresta com 700 elementos finitos e 0,75 cm de aresta com 245 elementos finitos.

A Figura 88 apresenta o modelo numérico composto de malha de elemento finito de 0,25 cm, resultando em $20 \times 20 \times 14$ elementos.

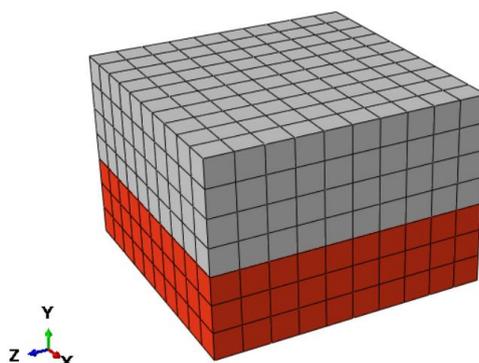
Figura 88 – Estudo de Malha com elemento finito de 0,25 cm



Fonte: Autor (2023)

A Figura 89 apresenta o modelo numérico composto de malha de elemento finito de 0,5 cm, resultando em $10 \times 10 \times 7$ elementos.

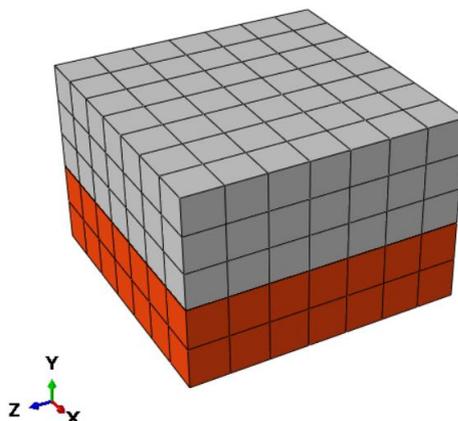
Figura 89 – Estudo de Malha com elemento finito de 0,5 cm



Fonte: Autor (2023)

A Figura 90 apresenta o modelo numérico composto de malha de elemento finito de 0,75 cm, resultando em $7 \times 7 \times 5$ elementos.

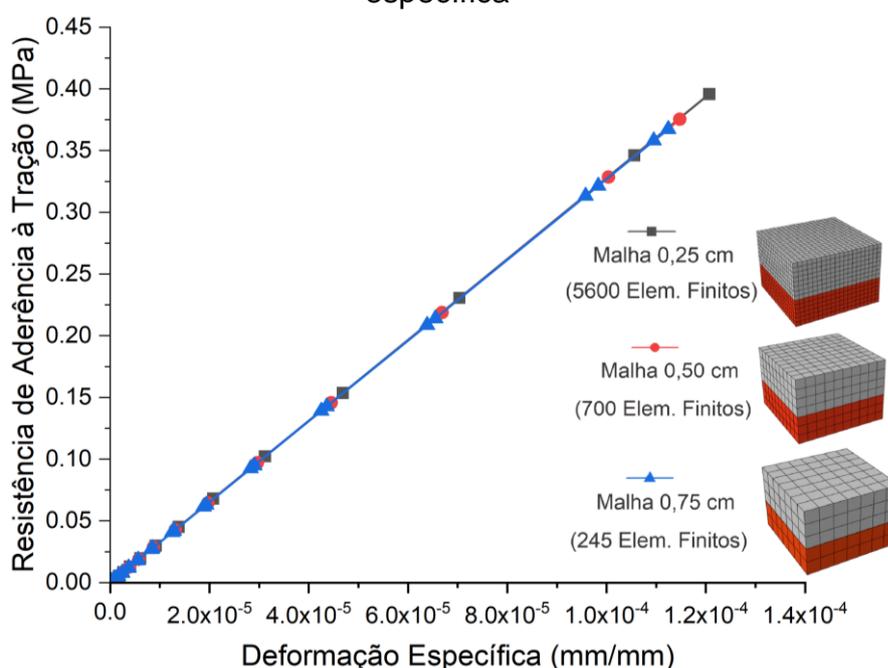
Figura 90 – Estudo de Malha com elemento finito de 0,75 cm



Fonte: Autor (2023)

Os resultados da simulação numérica do estudo do tamanho da malha estão apresentados na Figura 91. Pode-se observar que independentemente do tamanho da malha, houve sobreposição das curvas tensão normal de aderência à tração e deformação específica e indicou que o refinamento da malha, neste estudo, não gerou influência nos resultados de resistência de aderência à tração e deformação específica.

Figura 91 - Estudo da influência da malha nos resultados de tensão e deformação específica



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 40 apresenta o tempo computacional necessário nas simulações para cada refinamento da malha dos modelos numéricos.

Tabela 40 – Tempo computacional requerido para conduzir as análises

Simulação	Tempo requerido ^a (hr:min:seg)	% em relação ao modelo de malha de 0,25 cm
Malha de 0,25 cm	00:05:38	-
Malha de 0,50 cm	00:01:38	28,9 %
Malha de 0,75 cm	00:01:06	19,5 %

^a Utilizando notebook com processador Intel®Core™ i7 - 8550U CPU @ 2.0 GHz e 8 GB RAM

Fonte: Autor (2023)

O tempo computacional requerido nos modelos numéricos de malha 0,50 cm e 0,75 cm de aresta de elementos finitos representaram 28,9 % e 19,5 % do necessário para simular o mesmo modelo de malha de 0,25 cm sem apresentar diferenças significativas nas respostas numéricas. Apesar da complexidade do processo iterativo durante a simulação, observa-se que o tempo necessário para o modelo proposto é aceitável em função da sua dimensão. Assim, optou-se pela escolha da malha intermediária de 0,5 cm de aresta de elementos finitos para a realização das avaliações dos modelos numéricos.

6.2 AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE INTERFACIAL DO COEFICIENTE DE VISCOSIDADE

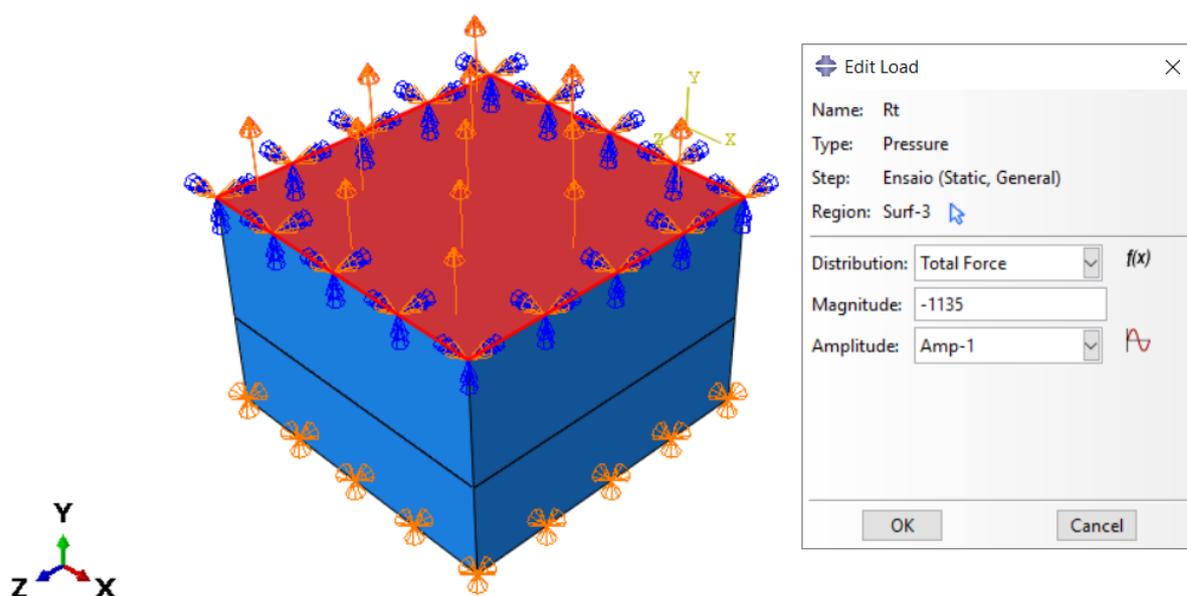
A Tabela 41 mostra os resultados da simulação numérica ao variar o coeficiente de viscosidade nos valores 0,1; 0,01; 0,001 e 0,002, mantendo constante o ângulo de dilatação $\psi = 0,30$. A aplicação do carregamento à tração foi realizada em passos de carga com o tamanho da malha, definido na seção anterior, no valor de 0,5 cm de aresta. Neste exemplo foi inserido o carregamento de 1135 N correspondente a uma das amostras experimentais REF da olaria 1, aplicada na face superior do modelo numérico conforme apresenta a Figura 92.

Tabela 41 – Análise das tensões \times coeficiente de viscosidade para estudos de sensibilidade interfacial

Passos de carga	Visc 0,1 σ_y (MPa)	Visc 0,01 σ_y (MPa)	Visc 0,001 σ_y (MPa)	Visc 0,002 σ_y (MPa)
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
2	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
3	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
4	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024
5	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039
6	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060
7	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092
8	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141
9	0,0214	0,0214	0,0214	0,0214
10	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323
11	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486
12	0,0731	0,0731	0,0731	0,0731
13	0,1099	0,1099	0,1101	0,1100
14	0,1651	0,1652	0,1654	0,1662
15	0,2479	0,2488	0,2213	0,2366
16	0,3722	0,3751	0,3285	0,3292
17	0,4255	0,4019	0,3755	0,3755

Fonte: Autor (2023)

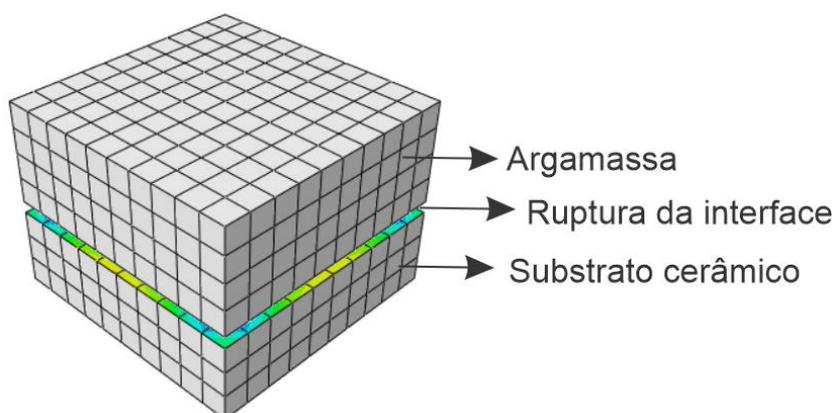
Figura 92 – Aplicação do carregamento no modelo numérico para avaliação do coeficiente de viscosidade



Fonte: Autor (2023)

Observa-se que até o passo 12, o comportamento interfacial das quatro simulações numéricas mostrou respostas mecânicas idênticas. A partir do passo 13, os valores da resistência de aderência à tração começaram a se diferenciar entre os modelos até alcançar a ruptura de ligação interfacial entre o substrato cerâmico e a argamassa (Figura 93).

Figura 93 – Ruptura interfacial da simulação numérica



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 42 apresenta que os valores máximos de tensões na direção vertical ocorreram para o modelo numérico com coeficiente de viscosidade no valor de 0,1 e que não houve variação das tensões para os modelos numéricos com coeficientes de viscosidade iguais a 0,001 e 0,002.

Tabela 42 – Análise estatística do estudo de sensibilidade interfacial do coeficiente de viscosidade

Variável	Média	Desvio Padrão	Coef. Var	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Vis 0,1	0,0852	0,1326	155,61	0	0,0022	0,0177	0,1237	0,4255
Vis 0,01	0,0841	0,1296	154,03	0	0,0022	0,0177	0,1238	0,4019
Vis 0,001	0,0786	0,1178	149,86	0	0,0022	0,0177	0,1239	0,3755
Vis 0,002	0,0795	0,1190	149,70	0	0,0022	0,0177	0,1240	0,3755

Fonte: Autor (2023)

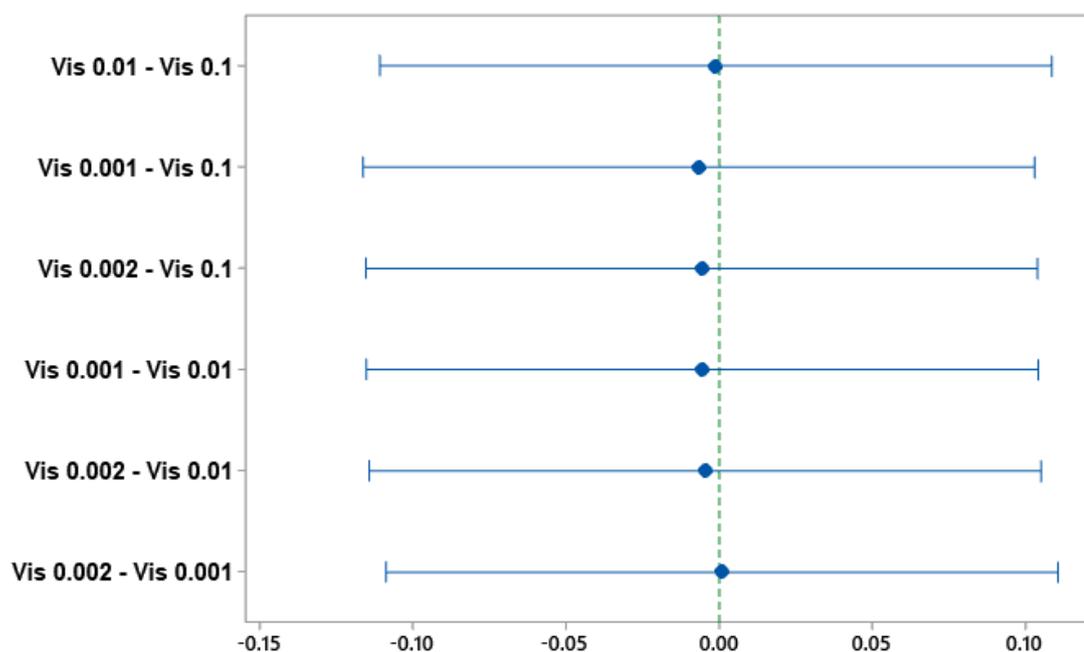
Ao realizar um comparativo entre os modelos numéricos com nível de confiança de 95 %, observa-se que a menor diferença em relação à média das tensões de resistência de aderência à tração ocorre para os modelos numéricos com coeficiente de viscosidade entre 0,001 e 0,002, conforme apresenta a Tabela 43 e Figura 94.

Tabela 43 – Teste simultâneo para as diferenças de médias

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	IC de 95%
Visc 0,01 - Visc 0,1	-0,0011	(-0,1106; 0,1084)
Visc 0,001 - Visc 0,1	-0,0067	(-0,1162; 0,1029)
Visc 0,002 - Visc 0,1	-0,0057	(-0,1153; 0,1038)
Visc 0,001 - Visc 0,01	-0,0056	(-0,1151; 0,1040)
Visc 0,002 - Visc 0,01	-0,0046	(-0,1142; 0,1049)
Visc 0,002 - Visc 0,001	0,0009	(-0,1086; 0,1105)

Fonte: Autor (2023)

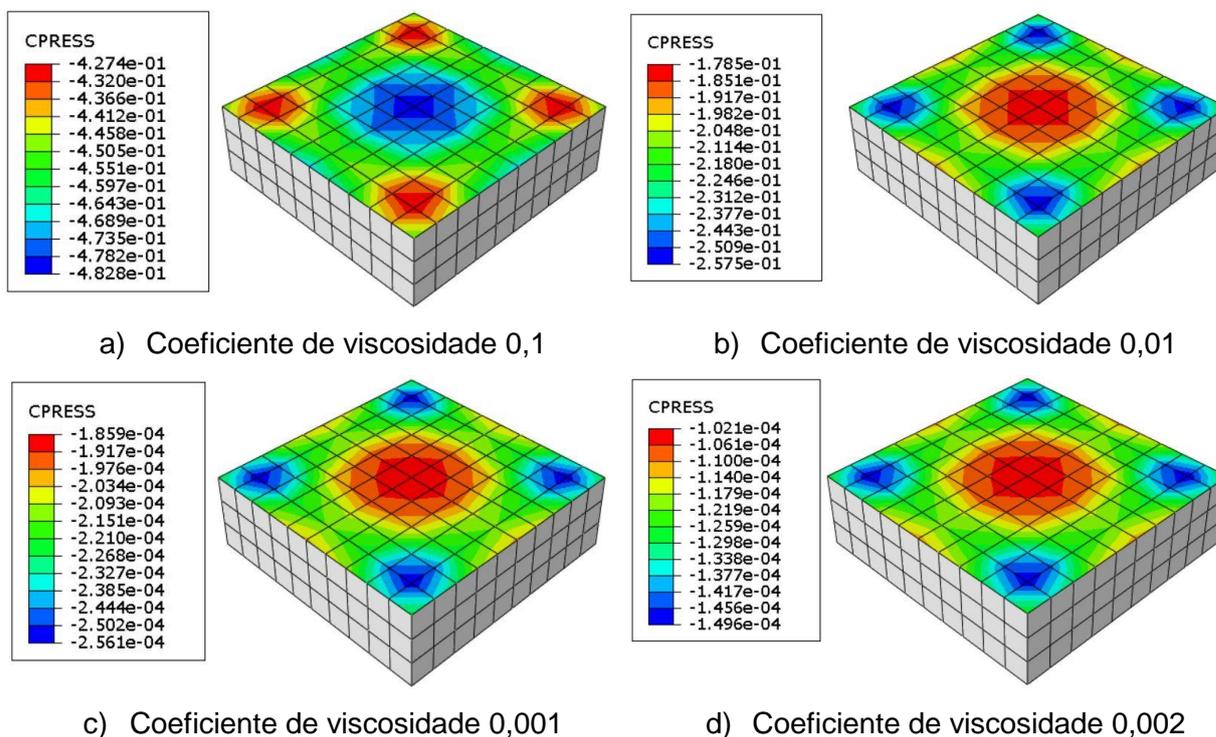
Figura 94 – Diferença de médias entre os modelos numéricos no estudo de sensibilidade interfacial



Fonte: Autor (2023)

A Figura 95 apresenta a pressão de contato (MPa) existente na interface de ligação entre o substrato cerâmico e a argamassa de revestimento no momento da ruptura para os coeficientes de viscosidades iguais a 0,1 (Figura 95a); 0,01 (Figura 95b); 0,001 (Figura 95c) e 0,002 (Figura 95d).

Figura 95 – Pressão de contato interfacial ao variar o coeficiente de viscosidade

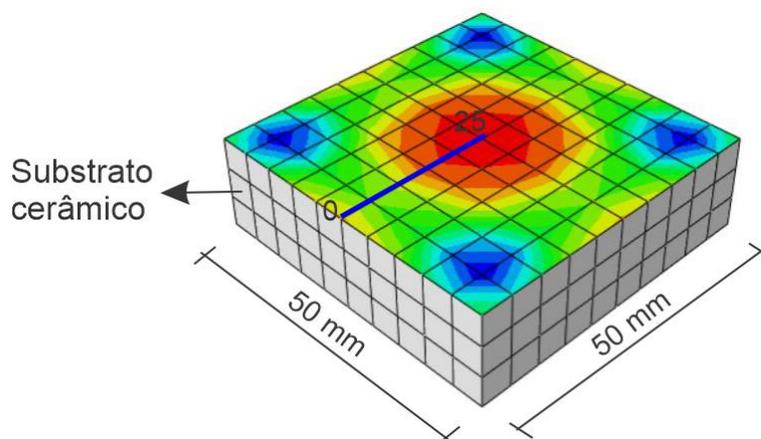


Fonte: Autor (2023)

Observa-se que no momento da ruptura, ainda existem tensões de contato, sendo maiores nos modelos numéricos de coeficientes de viscosidades 0,1 e 0,01 com valores na região central da interface, respectivamente, iguais a 0,482 MPa e 0,178 MPa. Estes valores mostram incompatibilidade do comportamento físico real, uma vez que, no momento da ruptura deveriam ser próximos de zero indicando ruptura da ligação interfacial sem resistir a um carregamento adicional. Contudo, ao observar os resultados da pressão de contato nos modelos numéricos de coeficientes de viscosidades 0,001 e 0,002, os valores na região central mostraram-se realístico, respectivamente, iguais a 0,0001859 MPa e 0,0001021 MPa.

Buscou-se também avaliar, a partir da extremidade da aresta interfacial do modelo numérico de coordenada 0 em direção a região central da interface distante 25 mm (Figura 96), o comportamento interfacial da resistência de aderência à tração no momento da ruptura para os coeficientes de viscosidades iguais a 0,1; 0,01; 0,001 e 0,002.

Figura 96 – Local de medição da resistência de aderência à tração interfacial ao variar o coeficiente de viscosidade.

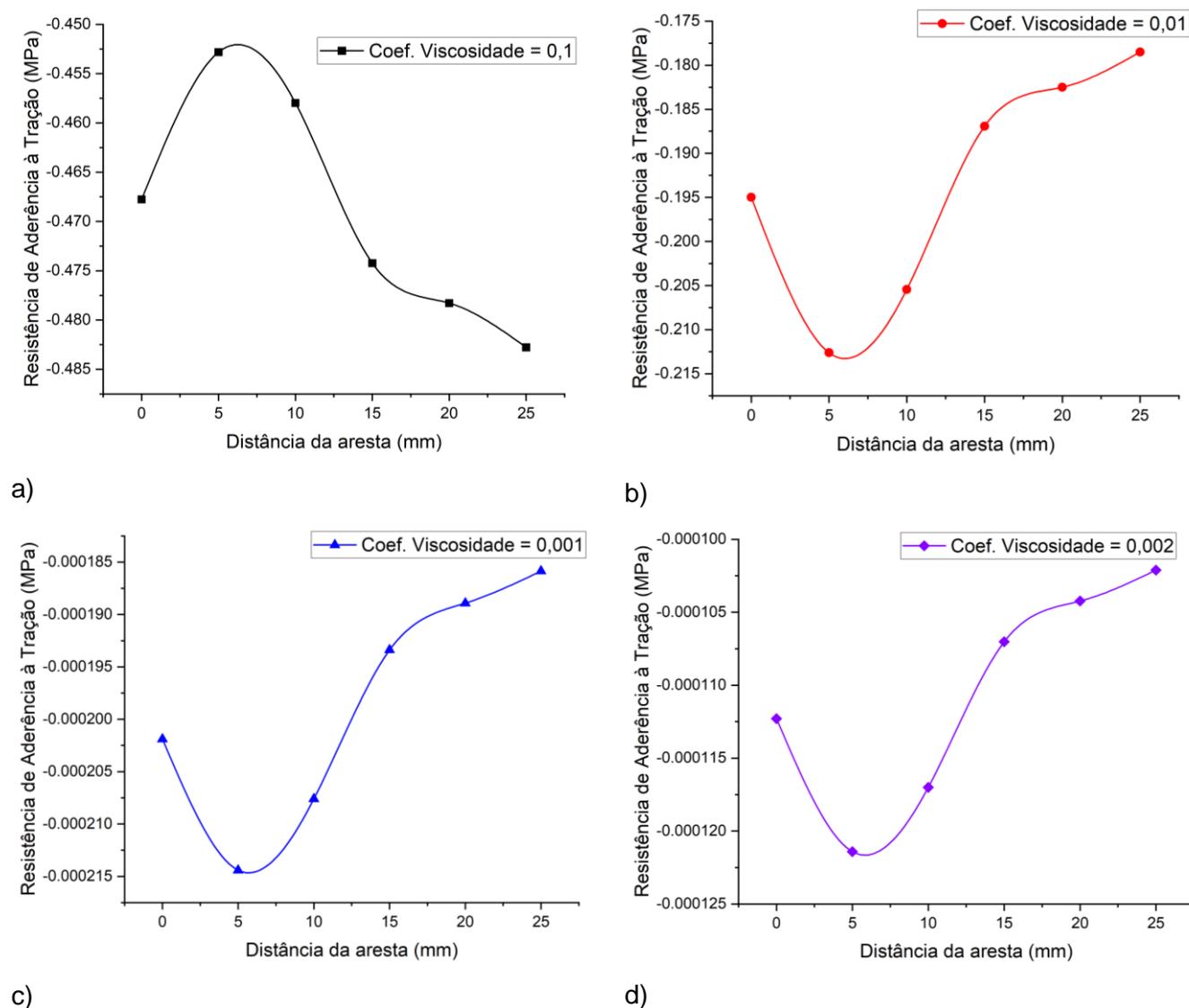


Fonte: Autor (2023)

De acordo com a Figura 97, em todas as simulações ocorreu um pico de tensão na coordenada 5 mm distante da aresta, a partir desse ponto, o modelo numérico de coeficiente de viscosidade 0,1 (Figura 97a) foi o único dos modelos que aumentou a sua resistência de aderência à tração partindo de 0,452 MPa para 0,482 MPa. A simulação do modelo numérico de coeficiente de viscosidade 0,01 (Figura 97b) reduziu a sua resistência de aderência à tração de 0,212 MPa para 0,178 MPa. Tanto os modelos numéricos com viscosidade 0,1 e 0,01 não apresentaram resultados coerentes com o que ocorreria fisicamente, já que ambos ainda possuíam resistência de aderência à tração maiores que zero.

Na simulações de coeficiente de viscosidade 0,001 (Figura 97c) e 0,002 (Figura 97d) a resistência de aderência à tração aproximou-se de zero em direção à região central interfacial distante 25 mm da aresta. Os resultados dos modelos numéricos de coeficiente de viscosidade iguais a 0,001 e 0,002 estão compatíveis, uma vez que se espera que haja pouco ou nenhuma resistência de aderência à tração no momento da ruptura.

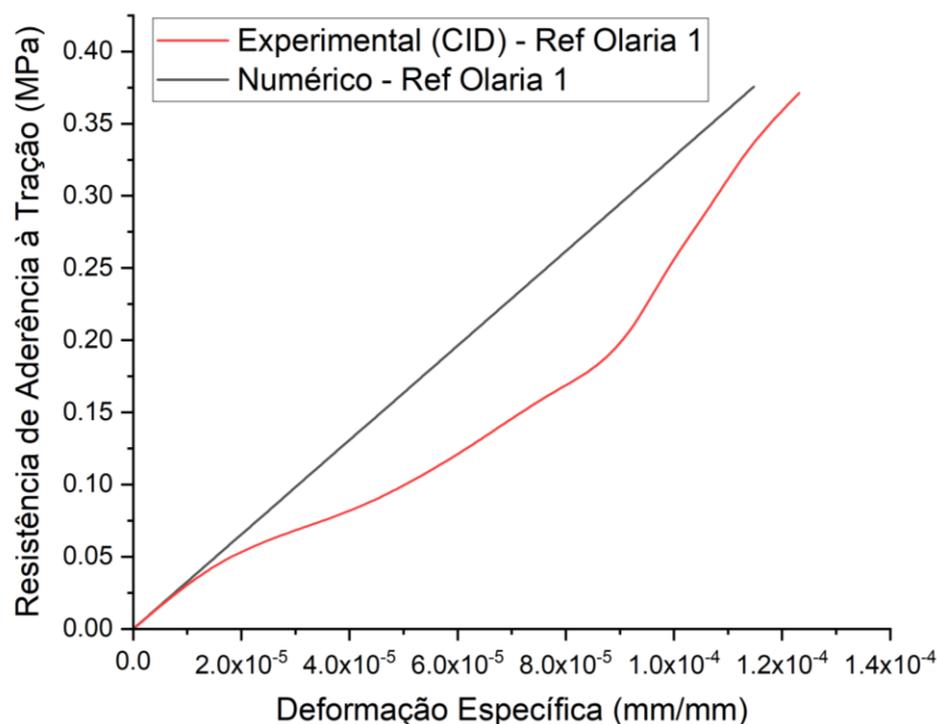
Figura 97 – Resistência de aderência à tração no momento da ruptura ao variar o coeficiente de viscosidade



Fonte: Autor (2023)

Por fim, observa-se na Figura 98, que os resultados e comportamento mecânico foram próximos ao realizar uma simulação numérica com coeficiente de viscosidade igual a 0,001 entre os obtidos experimentalmente da correlação de imagem digital (CID) e de uma das amostras de referências (REF). Dessa maneira, todas as simulações numéricas subsequentes foram utilizadas o coeficiente de viscosidade igual a 0,001 estando de acordo com os trabalhos de Bhosale e Desai (2019) e Dauda, Iuorio e Lourenço (2020).

Figura 98 – Estudo do coeficiente de viscosidade - Experimental x Numérico



Fonte: Autor (2023)

Os resultados gráficos da resistência de aderência à tração entre as amostras experimentais e os modelos numéricos encontram-se no Apêndice C.

6.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As propriedades mecânicas de resistência de aderência à tração (R_t) e módulos de elasticidade E utilizadas na simulação numérica, correspondentes aos ensaios experimentais das amostras REF, CARB E OL1 e CARB E OL2, estão apresentadas, respectivamente, pelas Tabela 44, Tabela 45 e Tabela 46.

Tabela 44 – Resultados R_t e módulo de elasticidade E dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras REF

		Amostra	167	169	170	171
REF		R_t (MPa)	0,458	0,454	0,168	0,688
	E (MPa)	Face externa	2719	3946,9	2306	3068
		Central	2197	3818,1	1936,1	5598,2
		Inferior	1596	2847,2	1486,6	4188,6

Fonte: Autor (2023)

Tabela 45 – Resultados Rt e módulo de elasticidade E dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras CARB E OL1

CARB E OL1	Amostra	67	70	71	72	74	78	79
		Rt (MPa)	0,271	0,475	0,380	0,177	0,627	0,276
E (MPa)	Face							
	externa	6347,6	2761	8421,5	6273,4	7793,7	2953,9	2501,8
	Central	4488,7	5628,3	6809,4	5571,5	6054,2	2896,2	2280
	Inferior	4167,1	4913,8	5763,3	4906,5	4927,6	2370,8	1666,6

Fonte: Autor (2023)

Tabela 46 – Resultados Rt e módulo de elasticidade E dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras CARB E OL2

CARB E OL2	Amostra	143	153	155	158
		Rt (MPa)	0,541	0,454	0,302
E (MPa)	Face				
	externa	2816	6231,8	4429,5	3004
	Central	2415,8	4686,4	3848,5	7734
	Inferior	1975,2	3735,4	3396,2	6049

Fonte: Autor (2023)

Os coeficientes de Poisson mensurados na região da face externa, central e inferior obtidos dos ensaios experimentais das amostras REF estão apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 – Resultados do coeficiente de Poisson dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras REF

REF	Poisson Face externa	Poisson central	Poisson interface
169	0,226	0,287	0,316
	0,218	0,28	0,299
	0,217	0,273	0,306
MÉDIA	0,220	0,280	0,307
170	0,249	0,274	0,287
	0,25	0,27	0,283
	0,252	0,264	0,28
MÉDIA	0,250	0,269	0,283
171	0,212	0,265	0,295
	0,206	0,262	0,292
	0,195	0,255	0,29
MÉDIA	0,204	0,261	0,292

Fonte: Autor (2023)

Os coeficientes de Poisson das amostras CARB E OL1 estão apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 – Resultados do coeficiente de Poisson dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras CARB E OL1

CARB E OL1	Poisson Face externa	Poisson central	Poisson interface
71	0,175	0,19	0,205
	0,158	0,182	0,197
	0,122	0,171	0,195
MÉDIA	0,152	0,181	0,199
72	0,201	0,217	0,227
	0,196	0,213	0,213
	0,188	0,205	0,216
MÉDIA	0,195	0,212	0,219
74	0,136	0,208	0,245
	0,161	0,211	0,246
	0,166	0,217	0,248
MÉDIA	0,154	0,212	0,246
78	0,21	0,257	0,272
	0,221	0,259	0,273
	0,223	0,261	0,269
MÉDIA	0,218	0,259	0,271
79	0,244	0,288	0,317
	0,244	0,287	0,316
	0,232	0,285	0,314
MÉDIA	0,240	0,287	0,316

Fonte: Autor (2023)

Os coeficientes de Poisson das amostras CARB E OL2 estão apresentadas na Tabela 49.

Tabela 49 – Resultados do coeficiente de Poisson dos ensaios experimentais e da correlação de imagem digital das amostras CARB E OL2

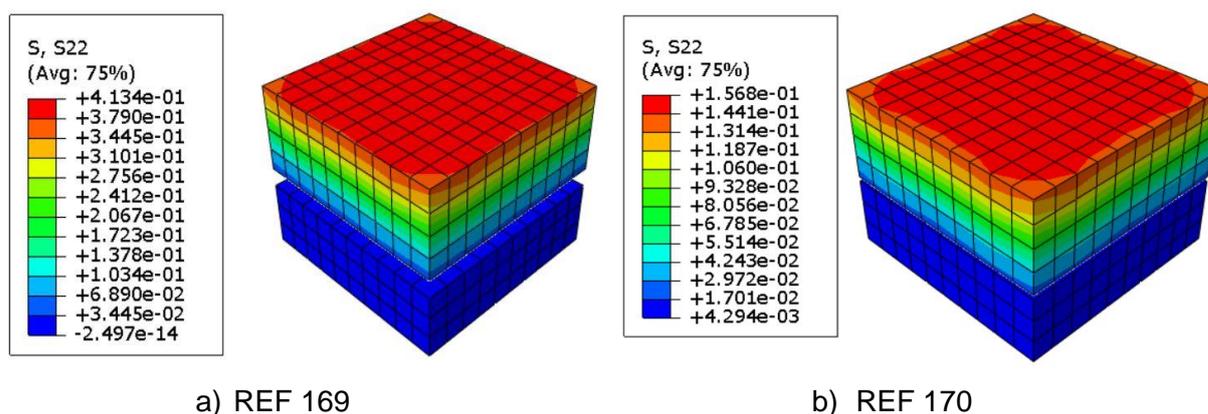
CARB E OL2	Poisson Face externa	Poisson central	Poisson Interface
143	0,311	0,332	0,342
	0,299	0,328	0,36
	0,289	0,32	0,351
MÉDIA	0,300	0,327	0,351

155	0,234	0,256	0,266
	0,237	0,254	0,265
	0,234	0,254	0,264
MÉDIA	0,235	0,255	0,265

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 99 estão apresentados os valores das tensões obtidos da modelagem numérica das amostras REF 169 (Figura 99 a) e REF170 (Figura 99 b). É possível observar que as tensões são ligeiramente superiores para a amostra REF 169 que apresentou maior resistência de aderência à tração. Entretanto, a distribuição das tensões ocorreu de forma semelhante em ambos os casos, apresentando maiores tensões de tração na face externa (região em vermelho) e menores tensões na direção da interface (região azul).

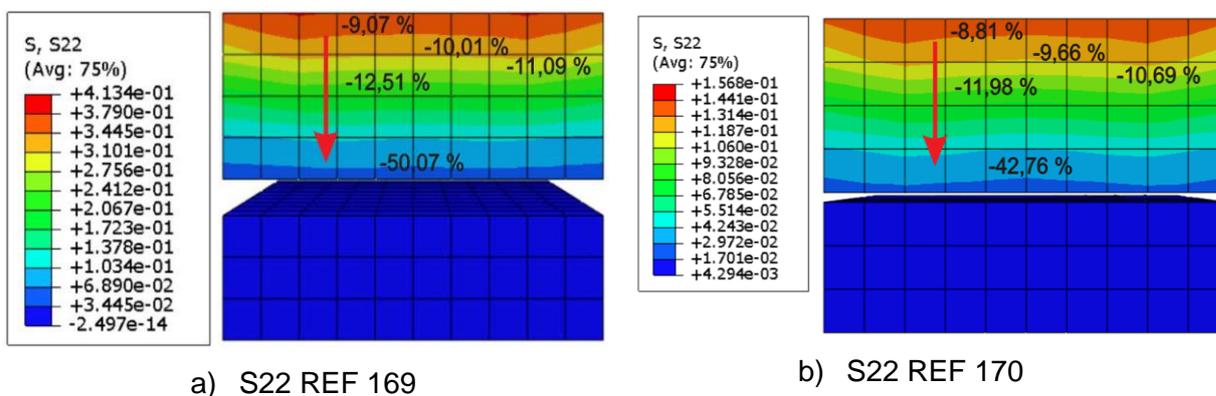
Figura 99 – Distribuição das tensões na direção vertical do modelo numérico REF169 e REF170



Fonte: Autor (2023)

Ao observar o encaminhamento das tensões partindo da face externa em direção a zona interfacial, a percentagem de redução da distribuição das tensões ao longo da argamassa não ocorreu de forma proporcional entre as duas amostras. Observa-se que a diferença percentual das tensões de tração na direção vertical na argamassa foi menor em sua face externa e se tornaram cada vez maiores na direção da região de ligação da interface, conforme apresentada na Figura 100. Na face externa a diferença entre uma camada e outra foi de 9,07 % para a amostra REF 169 e de 8,81 % na amostra REF 170. Entretanto, próximo à interface, a redução percentual foi maior com 50,07 % na amostra REF 169 e de 42,76 % na REF 170.

Figura 100 – Porcentagem de tensões entre camadas distribuídas na direção vertical (S22) dos modelos numéricos REF169 e REF170

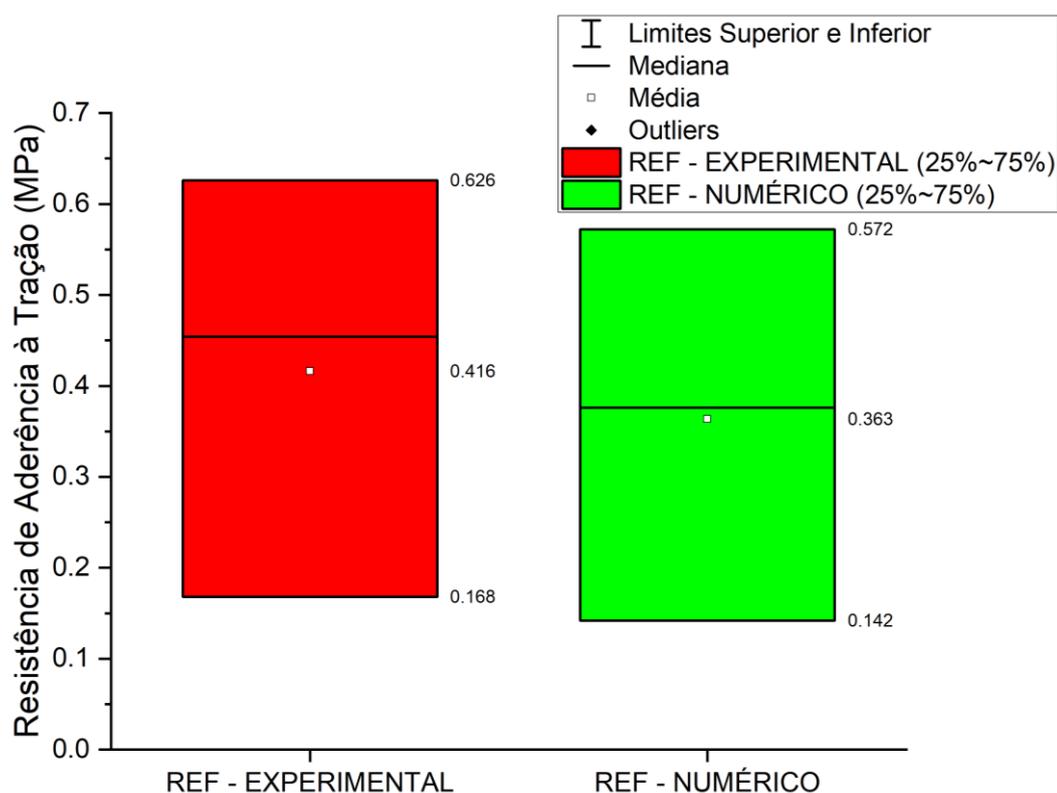


Fonte: Autor (2023)

A Figura 101 apresenta os resultados da resistência de aderência à tração das amostras REF entre os modelos experimentais obtidos da correlação de imagem digital e pela simulação numérica da olaria 1.

O valor médio para a resistência de aderência à tração dos modelos numéricos foi igual a 0,363 MPa e dos modelos experimentais foi de 0,416 MPa.

Figura 101 – Resistência de aderência à tração Experimental x Numérico – REF



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 50 apresenta os resultados estatísticos de resistência de aderência à tração das amostras da olaria 1.

Tabela 50 – Resultado estatístico de resistência de aderência à tração REF experimental x numérico

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
REF – Experimental	0,416	0,231	55,61	0,168	0,168	0,454	0,626	0,626
REF – Numérico	0,363	0,215	59,25	0,142	0,142	0,376	0,572	0,572

Fonte: Autor (2023)

Verificou-se que houve um comportamento semelhante entre os resultados experimentais e numéricos, com coeficiente de variação, respectivamente iguais a 55,61 % e 59,25 %. Os valores de resistência de aderência à tração foram comparados pelo teste estatístico t pareado, em um nível de confiança de 95 %, conforme apresentada na Tabela 51.

Tabela 51 – Resultados do Teste t pareado aplicada nas amostras REF experimental x numérico

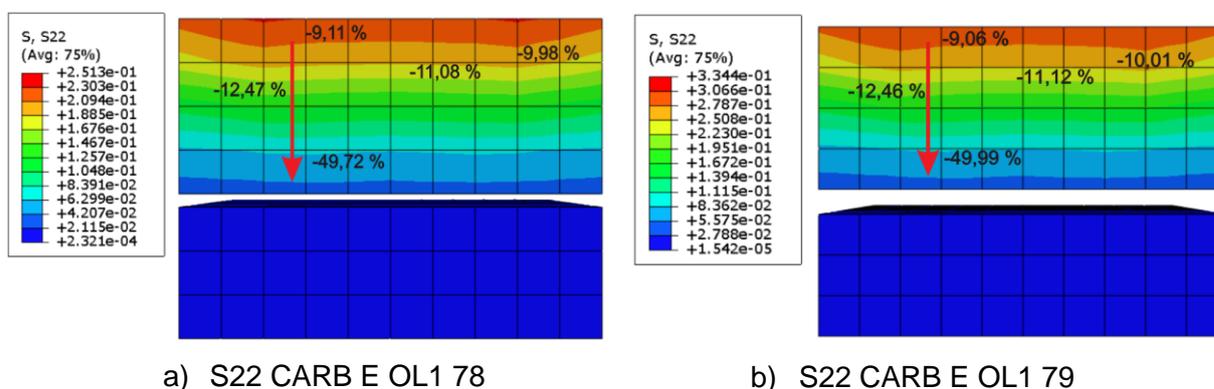
Estimativa da diferença pareada			Teste	
Média (MPa)	Desvio Padrão	IC de 95 % da diferença μ	Valor-T	Valor-p
0,0527	0,0260	(-0,0120;0,1173)	3,51	0,073

Fonte: Autor (2023)

Nesses resultados, a estimativa da diferença da resistência de aderência à tração média é de 0,0527 MPa. O intervalo de confiança (IC) de 95 % indicou que a diferença média dos valores de resistência de aderência à tração está entre -0,012 e 0,1173. Porém, o valor-p é 0,073 e indica que a hipótese nula deve ser aceita, uma vez que não existe diferença entre as médias dos resultados experimentais e numéricos para a amostra REF.

A Figura 102 apresenta as diferenças percentuais da distribuição de tensões de resistência de aderência à tração da face externa em direção a zona de interface da simulação numérica CARB E OL1 78 e 79. Na face externa (região laranja) a diferença entre uma camada e outra foi de 9,11 % para a CARB E OL1 78 e de 9,06 % na CARB E OL1 79. Na região próxima à interface (região em azul), a redução de tensões foi de 49,72 % na CARB E OL1 78 e de 49,99 % na CARB E OL1 79 e indicou perda de aderência à tração em relação ao substrato, o que contribuiu significativamente na redução das distribuições de tensões nessa região.

Figura 102 – Porcentagem de tensões entre camadas distribuídas na direção vertical (S22) dos modelos numéricos CARB E OL1 78 e 79

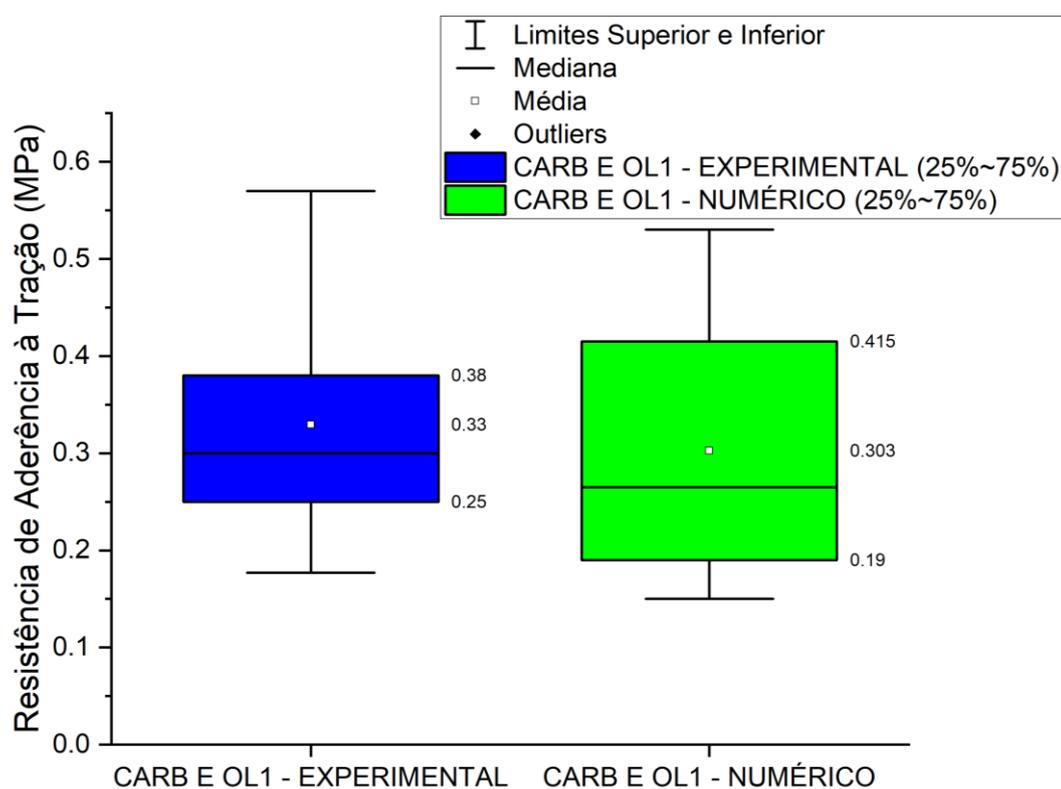


Fonte: Autor (2023)

A Figura 103 apresenta os resultados da resistência de aderência à tração das amostras CARB E entre os modelos experimentais obtidos da correlação de imagem digital e pela simulação numérica da olaria 1.

O valor médio para a resistência de aderência à tração dos modelos numéricos foi igual a 0,303 MPa e dos modelos experimentais foi de 0,33 MPa.

Figura 103 – Resistência de aderência à tração Experimental x Numérico – CARB E OL1



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 52 apresenta os resultados estatísticos de resistência de aderência à tração das amostras CARB E da olaria 1.

Tabela 52 – Resultado estatístico de resistência de aderência à tração CARB E OL1 experimental x numérico

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
CARB E OL 1 – Experimental	0,329	0,136	41,50	0,177	0,231	0,300	0,427	0,570
CARB E OL 1 – Numérico	0,302	0,163	54,08	0,150	0,170	0,265	0,472	0,530

Fonte: Autor (2023)

Verificou-se que a média dos resultados experimentais e numéricos foram próximos indicando confiabilidade nas variáveis introduzidas durante a simulação numérica a partir dos resultados obtidos experimentalmente. Os valores de resistência de aderência à tração para as amostras CARB E OL1 foram comparados pelo teste estatístico t pareado, em um nível de confiança de 95 % apresentada na Tabela 53.

Tabela 53 – Resultados do Teste t pareado aplicada nas amostras CARB E OL1 experimental x numérico

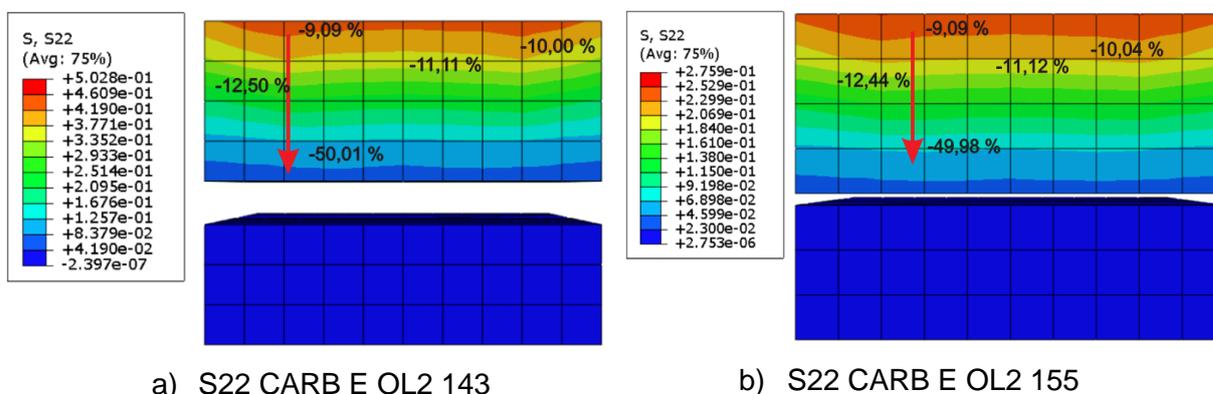
Estimativa da diferença pareada			Teste	
Média (MPa)	Desvio Padrão	IC de 95 % da diferença μ	Valor-T	Valor-p
-0,01950	0,01642	(-0,03673;-0,00227)	-2,91	0,033

Fonte: Autor (2023)

Nesses resultados, a estimativa da diferença da resistência de aderência à tração média é de -0,0195 MPa. O intervalo de confiança (IC) de 95 % indicou que a diferença média dos valores de resistência de aderência à tração está entre -0,03673 e -0,00227. Isto significa que os resultados numéricos obtidos possuem semelhança no comportamento mecânico quanto à resistência de aderência à tração nas amostras carbonatadas envelhecidas, apesar de serem estatisticamente significativos.

A Figura 104 apresenta as diferenças percentuais da distribuição de tensões de resistência de aderência à tração da face externa em direção a zona de interface da simulação numérica CARB E OL2 143 e 155. Na face externa a diferença entre uma camada e outra foi de 9,09 % para ambos os modelos numéricos. Na região próxima à interface, a redução de tensões foi de 50,01 % na CARB E OL2 143 e de 49,98 % na CARB E OL2 155 e indicou perda de aderência à tração equivalentes sem diferenças significativas entre as amostras.

Figura 104 – Porcentagem de tensões entre camadas distribuídas na direção vertical (S22) dos modelos numéricos CARB E OL2 143 e 155

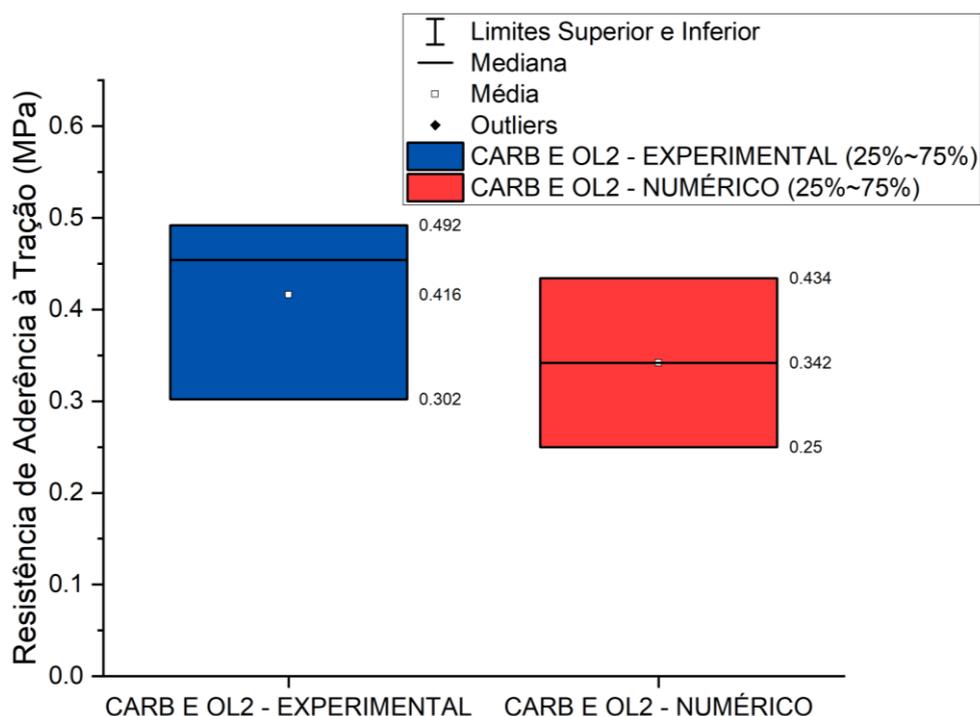


Fonte: Autor (2023)

A Figura 105 apresenta os resultados da resistência de aderência à tração das amostras CARB E entre os modelos experimentais obtidos da correlação de imagem digital e pela simulação numérica da olaria 2.

O valor médio para a resistência de aderência à tração dos modelos numéricos foi igual a 0,342 MPa e dos modelos experimentais foi de 0,416 MPa.

Figura 105 – Resistência de aderência à tração Experimental x Numérico – CARB E OL2



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 54 apresenta os resultados estatísticos de resistência de aderência à tração das amostras da olaria 2.

Tabela 54 – Resultado estatístico de resistência de aderência à tração CARB E OL2 experimental x numérico

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
CARB E OL 2 – Experimental	0,416	0,100	24,17	0,302	0,302	0,454	0,492	0,492
CARB E OL 2 – Numérico	0,342	0,094	28,86	0,250	0,250	0,302	0,434	0,434

Fonte: Autor (2023)

O valor médio de resistência de aderência à tração para as amostras CARB E OL 2 experimental foi de 0,416 MPa e dos modelos numéricos de 0,328 MPa, com coeficiente de variação, respectivamente iguais a 24,17 % e 28,86 %. Os valores de resistência de aderência à tração foram comparados pelo teste estatístico t pareado, em um nível de confiança de 95 %, conforme apresentada na Tabela 55.

Tabela 55 – Resultados do Teste t pareado aplicada nas amostras CARB E OL2 experimental x numérico

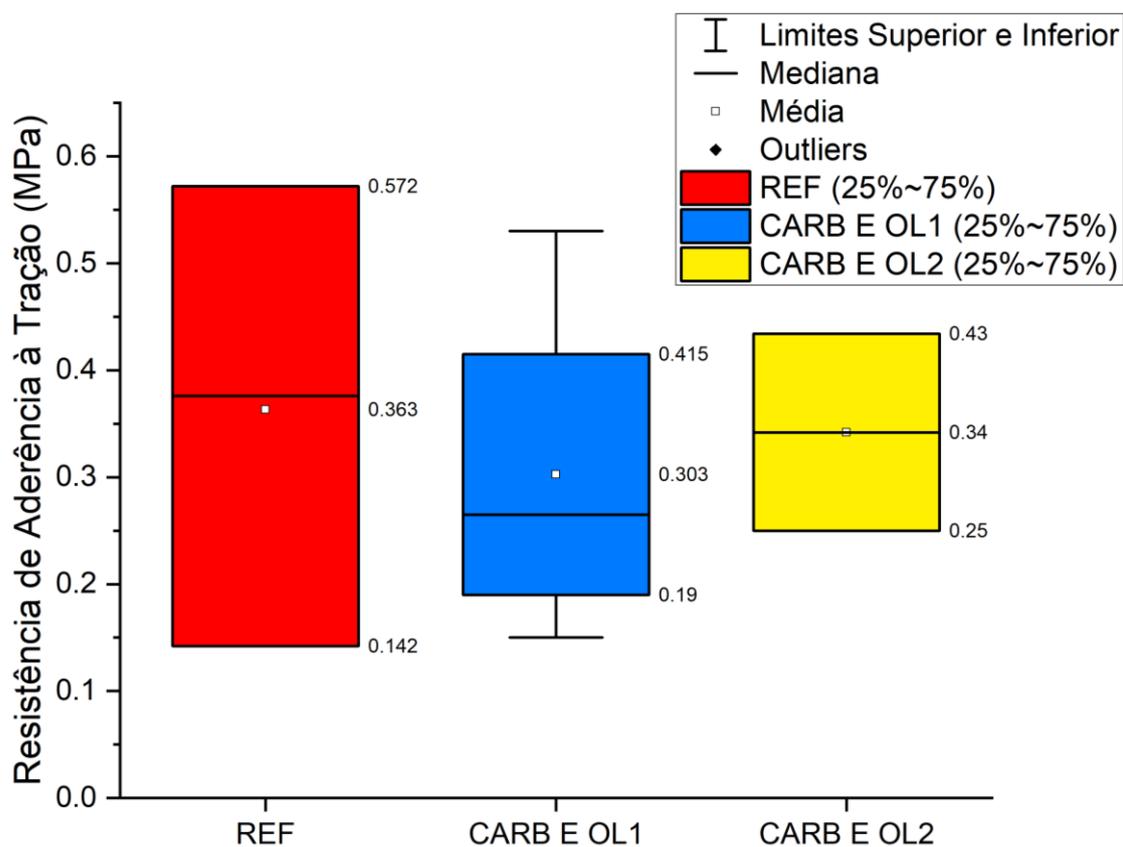
Estimativa da diferença pareada			Teste	
Média (MPa)	Desvio Padrão	IC de 95 % da diferença μ	Valor-T	Valor-p
-0,0367	0,0319	(-0,1159;0,0426)	-1,99	0,185

Fonte: Autor (2023)

Nesses resultados, a estimativa da diferença da resistência de aderência à tração média é de -0,0367 MPa. O intervalo de confiança (IC) de 95 % indicou que a diferença média dos valores de resistência de aderência à tração está entre -0,1159 e 0,04263. Porém, o valor-p é 0,185 e indica que a hipótese nula deve ser aceita, uma vez não existe diferença entre as médias dos resultados experimentais e numéricos para a amostra CARB E OL2.

A Figura 106 apresenta os resultados da resistência de aderência à tração das simulações numéricas REF, CARB E OL1 e CARB E OL2.

Figura 106 – Resistência de aderência à tração da simulação numérica



Fonte: Autor (2023)

Todos os resultados superam os valores mínimos de projeto da ABNT NBR 13749:2013. Observa-se que a simulação numérica das amostras REF foi superior em 19,80 % em relação à simulação numérica dos modelos CARB E OL1, e 6,76 % quando comparado com a simulação CARB E OL2. De forma semelhante observadas experimentalmente, os resultados numéricos indicam que a degradação proveniente do processo de envelhecimento contribuiu na alteração da resistência à tração, sendo menores nas amostras CARB E. Entretanto, houve aumento da resistência de aderência à tração ao mudar o tipo de substrato para as amostras da olaria 2, sendo superior em 12,21 % em relação à resistência de aderência à tração dos substratos da olaria 1. Esses resultados indicam que avaliar as propriedades dos substratos com relação a sua resistência de aderência à tração deva ser mais preciso.

A Tabela 56 apresenta os resultados estatísticos de resistência de aderência à tração das simulações numéricas.

Tabela 56 – Resultado estatístico de resistência de aderência à tração CARB E OL2 experimental x numérico

Amostra	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação %	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
REF	0,363	0,215	59,25	0,142	0,142	0,376	0,572	0,572
CARB E OL 1	0,303	0,164	54,08	0,150	0,170	0,265	0,473	0,530
CARB E OL 2	0,34	0,101	31,75	0,250	0,250	0,270	0,434	0,434

Fonte: Autor (2023)

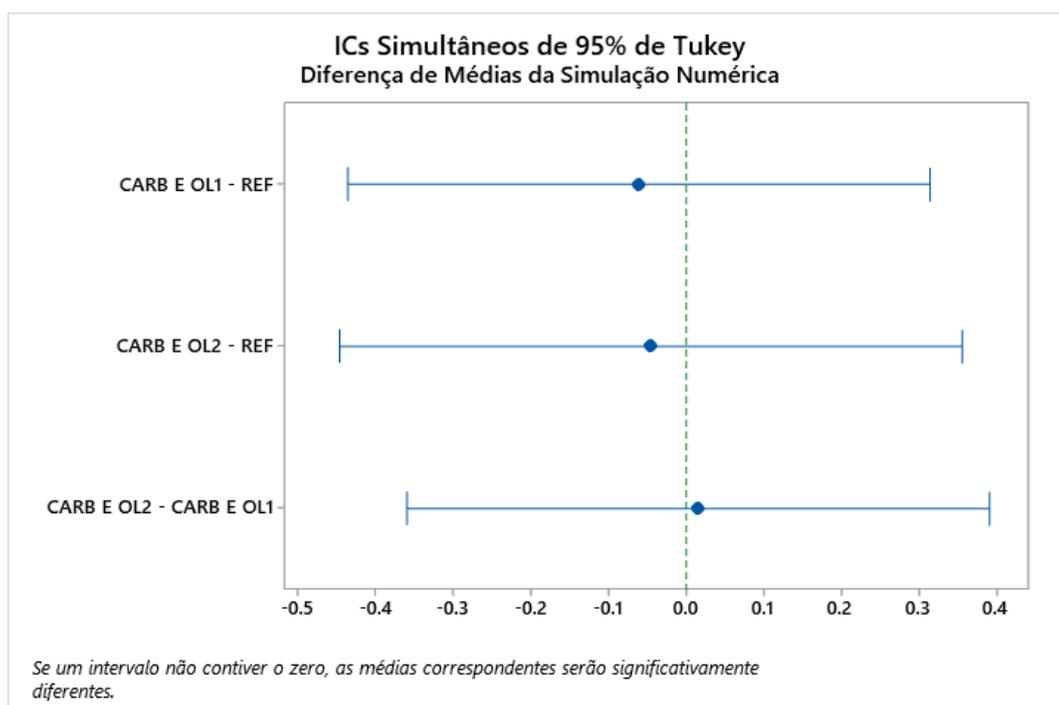
A Tabela 57 apresenta os testes simultâneos de Tukey para a verificação da diferença das médias das simulações numéricas.

Tabela 57 – Testes simultâneos de Tukey para as diferenças de médias da resistência de aderência à tração da simulação numérica

Níveis	Diferença de Médias (MPa)	IC de 95 %	Valor-T	Valor-P ajustado
CARB E OL1 x REF	-0,061	(-0,435; 0,313)	-0,48	0,883
CARB E OL2 x REF	-0,045	(-0,445; 0,355)	-0,33	0,941
CARB E OL1 x CARB E OL2	-0,016	(-0,359; 0,390)	0,12	0,992

Fonte: Autor (2023)

Figura 107 – Diferença de médias de resistência de aderência à tração entre os modelos numéricos



Fonte: Autor (2023)

Verificou-se que todos os pares de médias incluem zero, conforme apresentada na Figura 107. Estes resultados indicaram para o intervalo de confiança (IC) de 95 % que as diferenças entre às resistências de aderência à tração não foram estatisticamente significativas.

Todos os resultados obtidos das simulações numéricas indicam que tanto os modelos REF, como os CARB E tiveram as suas resistências de aderências à tração maiores na região próximas ao ponto de aplicação de carregamento e menores na interface e que a restrição dos nós nessa região, que perfaz o papel das pastilhas metálicas coladas, exercem considerável influência no comportamento global do modelo. O estudo realizado se resumiu a uma análise do efeito de resistência de aderência à tração e a sua correspondente deformação específica, e indicaram comportamento mecânico semelhantes com proporcionalidade de distribuição de tensões entre as simulações, entretanto, ficaram próximos aos ocorridos experimentalmente. Os resultados também demonstraram que as curvas de tensões para as diferenças percentuais entre 9% a 11% de todos os modelos numéricos estavam mais confinadas, indicativo de concentração de tensões, e se tornaram mais espaçadas a partir desse ponto em direção à interface.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho é estudado experimentalmente e numericamente o comportamento mecânico da aderência à tração de elementos formados por argamassas de revestimento aderidas a substratos cerâmicos comparativamente a argamassas de revestimento aderidas a substratos cerâmicos após carbonatação e envelhecimento acelerado por ciclos térmicos, utilizando-se correlação de imagem digital.

O entendimento dos mecanismos de aderência à tração leva em conta os valores do módulo de elasticidade da argamassa e dos substratos, bem como coeficientes de Poisson obtidos pela técnica de correlação de imagem digital.

A resistência de aderência à tração é mobilizada por mecanismos de transferências como a adesão, atrito e ação mecânica.

A correlação de imagem digital (CID), aplicada nos modelos experimentais, foi realizada pela ferramenta computacional Ncorr e permitiu obter os mapas de contornos das deformações específicas na argamassa de revestimento e na região da interface substrato cerâmico-argamassa. Para a aplicação do CID foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia que permitisse analisar as propriedades mecânicas ao considerar o efeito simultâneo das propriedades da argamassa de revestimento e de sua aderência ao substrato, bem como minimizar a interferência de fatores do ensaio na avaliação de amostras experimentais em escalas menores.

As análises numéricas foram realizadas no programa de elementos finitos ABAQUS, onde foi possível descrever os parâmetros lineares e não lineares das argamassas e dos substratos cerâmicos e que permitiu analisar mais profundamente a contribuição de cada um dos materiais na resistência de aderência à tração.

Enfim, as principais conclusões estão alinhadas com os objetivos específicos deste trabalho e podem ser enumeradas a seguir:

- a) Nas análises de resistência de aderência à tração, os resultados experimentais indicaram que a transferência de tensões na interface ocorreu com perda de adesão da argamassa de revestimento ao substrato cerâmico, resultante do descolamento de sua superfície interfacial.

- b) A resistência de aderência à tração entre as amostras REF foi maior em relação às amostras envelhecidas e carbonatadas. Esta relação é mais evidente nas amostras CARB E, pois, conforme explicado nos trabalhos de Poletanović et al. (2019), Maia et al. (2021), Jin, Tian e Li (2022), durante o processo de carbonatação e de envelhecimento acelerado, ocorre a propagação de fissuras até a perda de aderência interfacial ocasionada pela alteração microestrutural da argamassa. A resistência de aderência à tração se mostrou ser uma propriedade suscetível às variações inerentes do ensaio, pois tanto as amostras carbonatadas envelhecidas quanto às não carbonatadas apresentaram elevados coeficientes de variação, entre 41 % a 46 %, mesmo tendo resultados com médias de resistência de aderência à tração superiores aos valores mínimos da ABNT NBR 13749:2013. Este fator pode ter sido provocado pelos materiais empregados, pela forma de preparo das amostras, pelas condições de cura, tamanho da amostra e pela grande variabilidade observada neste tipo de ensaio.
- c) A correlação de imagem digital permitiu calcular os valores dos módulos elásticos das amostras de referência da olaria 1 e das amostras carbonatadas e envelhecidas das olarias 1 e 2. Ao analisar as amostras REF e CARB E de argamassas aderidas sobre o substrato proveniente da olaria 1, verificou-se que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os módulos elásticos, entretanto, ao comparar as suas respectivas médias, as amostras CARB E OL1 apresentaram módulos elásticos superiores em relação às amostras REF.
- d) Na comparação dos módulos elásticos entre as amostras CARB E OL1 e CARB OL2, foi constatado que a amostra CARB E com argamassa de revestimento aplicado no substrato cerâmico da olaria 1 possui maior módulo. Os resultados apontaram um sentido decrescente dos valores dos módulos elásticos na direção da face externa, central e interface com o substrato cerâmico. A hipótese provável do módulo de elasticidade ser maior na face externa das amostras deve-se à restrição de movimentação ocasionada pela cola das pastilhas metálicas aderidas em sua face

superior. Ou seja, a região onde as pastilhas foram coladas oferecem maior restrição de movimentação translacional e rotacional em relação à região de interface onde ocorre a aderência entre a argamassa e o substrato.

- e) Embora as amostras submetidas à carbonatação com envelhecimento acelerado e amostras de referência tenham apresentado diferenças nos valores médios dos módulos elásticos obtidos por correlação de imagem digital, estes estão em conformidade com a literatura técnica.
- f) Foi constatado um padrão comportamental mecânico tanto para as amostras REF quanto para as amostras CARB E em relação aos valores médios dos coeficientes de Poisson, analisados nas regiões da face externa, central e interface. Os menores valores de Poisson ocorreram na região da face externa das amostras e os maiores valores na região de interface bloco-argamassa. Os processos de carbonatação e de envelhecimento acelerado resultaram em alteração microestrutural da argamassa, uma vez que foi observado que as amostras CARB E apresentaram coeficientes de Poisson inferiores aos das amostras REF.
- g) O desenvolvimento da técnica de pintura por microagulhamento foi a que apresentou melhor adequação para a escala das amostras pesquisadas e que permitiu o processamento mais coerente da correlação de imagem digital para a obtenção dos resultados dos módulos elásticos.
- h) Quanto à simulação numérica, verificou-se que foi possível construir um modelo em elementos finitos adequado para a o estudo experimental. As simulações numéricas foram realizadas a partir de várias hipóteses ao buscar o refinamento dos parâmetros para obtenção dos resultados os mais realísticos aos ocorridos experimentalmente. Um fator relevante deste trabalho é que na ausência de dados experimentais, as propriedades elásticas da interface substrato cerâmico-argamassa são determinadas a partir da calibração com modelos reais.

- i) As condições de contorno aplicadas nos modelos numéricos sob o ensaio de resistência de aderência à tração influenciaram diretamente em seu comportamento global. A base rotulada na extremidade inferior dos modelos (pastilha colada no substrato cerâmico) ofereceu maior possibilidade de movimentação translacional em relação à sua face superior (pastilha colada na argamassa), isto fez com que houvesse maior diferença percentual de tensões entre as regiões de interface e menores diferenças na distribuição de tensões na face externa da argamassa.
- j) Em todos os casos, os resultados numéricos foram satisfatórios quando comparado os resultados experimentais em relação ao Abaqus, e indicou coerência da construção do modelo numérico desenvolvido. Houve semelhança dos resultados da resistência de aderência à tração e das deformações específicas na ordem de 10^{-4} a 10^{-5} mm/mm. O estudo apresentado permitiu esclarecer alguns aspectos em relação ao comportamento elástico da aderência da argamassa ao substrato cerâmico e indicou sobre quais circunstâncias as propriedades elásticas e inelásticas podem influenciar na região da interface, bem como na distribuição de tensões ocorridas na argamassa de revestimento.

Dessa maneira, este trabalho contribuiu na sistematização de uma metodologia de aplicação da correlação de imagem digital e modelagem numérica para avaliação das propriedades elásticas de argamassas de revestimento submetidos aos ensaios de resistência de aderência à tração em substrato cerâmico. O método desenvolvido permitiu analisar e avaliar as respostas mecânicas numéricas como experimentais do efeito do envelhecimento por carbonatação e ciclos térmicos no comportamento elástico de argamassas de revestimento.

7.1 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

- Quantificar e avaliar a influência da densidade de pontos da pintura de microagulhamento na qualidade da área de interesse em função do seu diâmetro médio;

- Verificar a diferença de resultados de deformações e deslocamento do ensaio de resistência de aderência à tração ao variar a lente da câmera na captura de imagens entre 1080P, 2K e 4K;
- Analisar a influência da profundidade da carbonatação na resposta mecânica de argamassas de revestimentos quanto à resistência de aderência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson obtidos da correlação de imagem digital;
- Avaliar numericamente e experimentalmente a resistência de aderência à tração em argamassas com distintas composições;

REFERÊNCIAS

- ABDULLA, K. F.; CUNNINGHAM, L. S.; GILIE, M. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. **Engineering Structures**. n. 151. pg. 349-365, 2017.
- ABAQUS. **ABAQUS Example Problems Manual - Volume II**. Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence, Rhode Island, USA, 2010.
- ABAQUS. **ABAQUS Theory Manual 6.11**. Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence, Rhode Island, USA, 2011.
- ALGOHI et al. Plastic-Damage Modeling of Unreinforced Masonry Walls (URM) Subject to Lateral Loading. **Arabian Journal for Science and Engineering**. 2017.
- AHMAD, S.; KHAN, R. A.; GUPTA, H. Seismic performance of a masonry heritage structure. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**. n. 3, 2014.
- ALEXANDRE, J. et al. Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil construction. **Journal of Building Engineering**. n.19, p. 342-348, 2018.
- ALFARO et al. Transverse Failure Behavior of Fiber-epoxy Systems. **Journal of Composite Materials**, v. 44, n.12, p. 1493-1516, 2010.
- ANDRAE, J. J. O. et al. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**. n. 161, p. 70-83, 2018.
- ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.
- ARNOLD, D. C. M et al. A Critical Analysis of Red Ceramic Blocks Roughness Estimation by 2d and 3d Methods. **Remote Sens**, (2021).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 4288 - Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5628 - Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7200 - Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9442 - Materiais de construção - Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9778:2009: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13528-3 - Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração Parte 3: Aderência superficial**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13749 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15270-2:2017: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 2: Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-4 - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE**. Rio de Janeiro, 2013.

AVANCINI, T. F.; LOUBACK, V. K. C. B. **Análise de Métodos de Retenção de Água e Consistência em Argamassas**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia Argamassas – SBTA. São Paulo: V SBTA, 2003. p. 233-242.

AVRIL, S.; EVANS, S. Material parameter identification and inverse problems in soft tissue biomechanics. **CISM International Centre for Mechanical Sciences. Courses and Lectures**. London: Springer, v. 573, 2017.

AZEVEDO et al. Influence of Sintering Temperature of a Ceramic Substrate in Mortar Adhesion for Civil Construction. **Journal of Building Engineering**. n 19, p. 342-348, 2018.

BARBOSA, W. S.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Alteração do Comportamento Reológico de Pastas Devido à Presença de Base Porosa**. In: VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia Argamassas – SBTA. Curitiba: VIII SBTA, 2009. p. 1-15.

BASTOS, P. K. X. **Retração e Desenvolvimento de Propriedades Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). São Paulo, SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 172 p. 2001.

BAUER, E. et al. Avaliação da consistência das argamassas industrializadas utilizando o método vane. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**. v. 2, n. 1, p. 54-63, Maio 2005.

BELLEI, P.; ARROMBA, J.; FLORES-COLEN, I.; VEIGA, R.; TORRES, I. Influence of Brick and Concrete Substrates on the Performance of Render Using in-situ testing techniques. **Journal of Building Engineering**. n. 43, p. 102871, 2021.

BELLO, A. C. D. et al. **Estudo Comparativo da Resistência de Aderência à Tração de Revestimento de Argamassa Aplicados Manualmente e com Projeção Mecânica Contínua**. In XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, São Paulo, 2017.

BELYTSCHKO, T.; LIU, W.; MORAN, B. **Nonlinear finite elements for continua and structures**. New York: Wiley, 2001.

BERTO et al. Shear behaviour of masonry panel: parametric FE analyses. Multisurface interface model for analysis of masonry structures. **International Journal Solid and Structures**. n. 41. pg. 4383-4405, 2004.

BHOSALE; S. D.; DESAI, A. K. Simulation of Masonry Wall using Concrete Damage Plasticity Model. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)**. vol. 8, pg. 1241-1244, 2019.

BLABER, J.; ADAIR, B.; ANTONIOU, A. Ncorr: Open-source 2D digital image correlation matlab software. **Exp. Mech**. n. 55. pg. 1105-1122, 2015.

BOYTON, R. S.; GUTSCHICK, K. A. Bond of Mortar to Masonry Units. Factors Influencing Strength, Extent and Durability of Bond. **Masonry Mortar Technical Notes**. n. 3, 1964.

BREZEZINSKI, D. E.; COLLATO, D.; KAZMIERCZAK, C. S. Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa. **Estudos Tecnológicos**. v. 3, n. 1, p. 47-58, 2007.

BRITISH STANDARD. **BS 5262 - Code of Practice for External Rendering**. London: BSi, 1976.

BRITISH STANDARD. **EN 1996-2 - Design of masonry structures - Part 2: Design considerations, selection of materials and execution of masonry**. Brussels: Comité Européen de Normalisation - CEN, 2006.

BRITO, J.; SILVA, J. Avaliação do comportamento à água de argamassas com incorporação de agregados cerâmicos. **Revista Engenharia Civil - UM**. n. 28, p. 37-45, 2007.

BUXUAN, W. et al. Dynamics of Spreading of Liquid on Solid Surface. **Chin. J. Chem. Eng.** n.15, p. 730-737, 2007.

CAO, H. T.; LAWRENCE, S. J. **Microstructure of the Interface Between Brick and Mortar**. In: 8th International Brick and Block Masonry Conference. Dublin: IBMAC, 1988. p. 194-204. Disponível em: <<http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/1988/194.pdf>> Acesso em: 23 jan. 2020.

CANDIA, M. C.; FRANCO, L. S. **Contribuição ao Estudo das Técnicas de Preparo da Base no Desempenho dos Revestimentos de Argamassa**. Boletim Técnico 223. São Paulo, 1998.

CANOVA, J. A.; MIOTTO, J. L.; DE MORI, L. M. Avaliação de Argamassa Mista de Revestimento com Substituição da Areia Natural por Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar. **Revista Ciência & Engenharia**. v. 24, n. 1, p. 125 – 134, jan.– jun. 2015.

CAPRARO, D. F. A. et al. Experimental and Numerical Evaluation of Mortar Specimens Shape and Size Influence on Compression Tests. **IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL**. v.12, n. 2, p. 429-444, 2019.

CARASEK, H. **Aderência de argamassa à base de cimento Portland a substratos porosos: Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). São Paulo, SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 285 p. 1996.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo; IBRACON, 2017.

CARNEIRO, A. M. P. **Revestimento Externo em Argamassa de Cimento, Cal e Areia – Sistemática das Empresas de Construção Civil de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993, 114p.

CASCUDO, O; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto – Concreto: Ciência e Tecnologia**. – São Paulo: IBRACON. v1. p. 849-883, 2011.

CASTELLOTE. et al. Chemical Changes and Phase Analysis of OPC Pastes Carbonated at Different CO₂ Concentrations. **Materials and Structures**. n.42, p. 515-525, 2009.

CAVA, S. S. et al. Influência da composição das matérias-primas no processo de gresificação de revestimentos cerâmicos. **Revista Cerâmica**. n.48, p. 137-145, 2002.

CEN (2010) **Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method, prTS 12390-12**. CEN, Brussels, Belgium.

CERIONI, A. **Simulation of delamination in composite materials under static and fatigue loading by cohesive zone models**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Cagliari, Italy, 2008.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT. **NF DTU 26.1 P1-1 – Travaux d' enduits de mortiers. Partie 1-1: Cahier des clauses techniques.** Paris: CSTB, 2008.

CHASE, G. W. **Characterization of the interface between brick and Mortar.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Ames, Iowa. Iowa State University. 203 p. 1983.

CHEN, S. Y.; MOON, F.; YI, T. A macroelement for the nonlinear analysis of in-plane unreinforced masonry piers. **Engineering Structures.** n. 30. pg. 2242-2252, 2008.

CHERGUI, J.; JURIC, D.; SHIN, S. Direct simulation of multiphase flows with modeling of dynamic interface contact angle. **Theor. Comput. Fluid Dyn.** n. 32, p. 655–687, 2018.

CHEE LIANG, N. G. **Experimental and theoretical investigation of the behavior of brickwork cladding panel subjected to lateral loading.** University of Edinburgh, 1996. (PhD Thesis).

CINCOTTO, M. A.; RAGO, F. **Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas.** Boletim Técnico 257. São Paulo, 1999.

CORDEIRO DOS SANTOS, A.; AUGUSTO, L.; BECERE, O. H. Água e argamassa. **Revista Notícias da Construção.** p. 40-42, maio, 2015.

CORTELASSI, E. M. et al. **Influência do Tipo do Cimento, do Traço e da Orientação Solar na Propriedade de Estanqueidade à Água de Argamassas de Revestimentos.** In: IV ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA – ENTECA. Maringá: UEM, p. 252-259, 2013.

COSTA, E. B. C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias** Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

COSTA, E. B. C.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Influence of high contents of limestone fines on rheological behaviour and bond strength of cement-based mortars. **Construction and Building Materials.** v. 156, n.15, p. 1114-11126, 2017.

CRAMMOND, G., BOYD, S.W., DULIEU-BARTON, J. M. Speckle pattern quality assessment for digital image correlation. **Optics and Lasers in Engineering,** n. 51. pg. 1368-1378, 2013.

CRESPO, J.; LATORRE, M.; MONTANS, F. J. WYPIWYG hyperelasticity for isotropic, compressible materials. **Computational Mechanics.** n. 59, p. 73-92, 2017.

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; HUERTAS, M. O. Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes. **Cement and Concrete Research.** n. 35, p. 2278-2289, 2005.

DA SILVA, F. G., HELENE, P., CASTRO-BORGES, P., LIBORIO, J. B. L. Sources of Variations When Comparing Concrete Carbonation Results. **Journal of Materials in Civil Engineering,** v. 21, ed. 7, p. 333-342, 2009.

DAUDA, J. A.; IUORIO, O.; LOURENÇO, P.B. Numerical Analysis and Experimental Characterization of Brick Masonry. **International Journal of Masonry Research and Innovation,** v. 5. pg. 321-347, 2020.

DAVID, S.; DUURSMA, G. R.; SEFIANE, K. Advancing and receding contact lines on patterned structured surfaces. **Chemical Engineering Research and Design.** n. 88, p. 737-743, 2010.

DAVISON, J. I. Loss of Moisture from Fresh Mortar to Brick. **Materials, Research and Standards**. Ottawa. v. 1, n. 5. p. 385-388, July, 1961.

D' ALTRI, et al. A 3D detailed micro-model for the in-plane and out-of-plane numerical analysis of masonry panels. **Computers and Structures**. n.206, p.18-30, 2018.

DÉTRICHÉ, C.H.; GALLIAS, J.L.; GRANDET, J.; MASO, J.C. Influence des paramètres de mise en oeuvre et de composition sur le comportement des mortiers d'enduit. **Matériaux et Constructions**, v.18, n. 105, p.193-200, 1985.

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials: Their nature and behaviour**. 4. ed. New York: Spon Press, 2010.

DONG, B. et al. Study on The Carbonation Behavior of Cement Mortar by Electrochemical Impedance Spectroscopy. **Materials (Basel)**. v.7, n. 1, p. 218-231, 2014.

DROUGKAS, A.; ROCA, P.; MOLINS, C. **Micro-Modeling of Stack Bond Masonry in Compression Using a Plasticity Law**. In: XII International Conference on Computational Plasticity, Fundamentals and Applications – COMPLAS XII. Barcelona, 2013.

DROUGKAS, A. et. al. Macro scale material characterization in support of meso scale modelling of masonry under uniaxial in-plane loading. **International Journal Masonry Research and Innovation**. v. 5, n. 1, p. 121-141, 2020.

DUPIN, I; DÉTRICHÉ, C.H.; MASO, J.C. Accrochage direct d'un enduit sur un isolant par une liaison de type mécanique dans le cadre d'un procédé d'isolation par l'extérieur. **Matériaux et Constructions**, v.21, p.370-378, 1988.

ELSALAMAWY, M.; MOHAMED, A. R.; KAMAL, E. M. The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete. **Alexandria Engineering Journal**. v. 58, n.4, p.1257-1264, 2019.

EVANS, D. et al. Properties of Some Masonry Cement. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**. vol. 51, n. 1, p. 11-16, jul, 1953.

FREITAS JR, J. A. et al. Assessment of the impact of binders in the evolution of carbonation in mortars. **Construction and Building Material**. vol. 225, p. 496-501, nov, 2019.

FU, Y. B.; CHUI, C. K.; TEO, C. L. Liver tissue characterization from uniaxial stress-strain data using probabilistic and inverse finite element methods. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**. N. 20, p, 105-112, 2013.

GASPAR, S.; MATOS SILVA, C; FLORES-COLEN, I. **Application of Numerical Analysis to Study Adherence of Render on Walls**. In: XII International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto, 2011.

GASPAR, S.; MATOS SILVA, C; FLORES-COLEN, I. Numerical Analysis of Render' Adhesion Using an Interface Model. **Construction and Building Materials**. n.38, p. 292-305, 2013.

GEHRI, N.; MATA-FALCÓN, J.; KAUFMANN, W. Automated crack detection and measurement based on digital image correlation. **Construction and Building Materials**, n. 256, p. 1-14, 2020.

GOUIN, H. The wetting problem of fluids on solid surfaces. Part 1: the dynamics of contact lines. **Continuum Mech. Thermodyn**. n. 15. p. 581–596, 2003.

GREAVES, et al. Poisson's ratio and modern materials. **Nature Materials**, v.10, p. 823–837, 2011.

HANZIC, L. et al. **Water Retention Capability of Mortars Made of Recycled Aggregate**. In: Proceedings of the 2008. World Sustainable Building Conference. v. 2. Melbourne, 2008.

HARRISON, T. A., JONES, M. R., NEWLANDS, M. D., KANDASAMI, S., KHANNA, G. Experience of using the prTS 12390-12 accelerates carbonation test to assess the relative performance of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.64, p. 737-747, 2012.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. Tese (Título de Livre Docência em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Paulo, 1993.

HEINEN, P. et al. Desempenho de Argamassas de Revestimentos do Tipo Estabilizada, Industrializada Ensacada e a Fabricada *in Loco*. **Anais da Engenharia Civil / 2595-1823**, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 19 - 33, out. 2018. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/ENGCIVIL/article/view/219>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

HEWLETT, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4 ed. Burlington: Elsevier - Butterworth-Heinemann, 2004.

HILD, F., ROUX, S. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties – a review. *Strain*, n. 42, p. 69-80, 2006.

HILL, R. Constitutive Inequalities for Isotropic Elastic Solids Under Finite Strain. **Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences**. n. 314, p.457-472, 1970.

HOLANDA, J. N. F.; SOUSA, S. J. G. Development of red wall tiles by the dry process using Brazilian raw materials. **Ceramics International**. n. 31, p. 215-222, 2005.

HOSSAIN, M. A.; TOTOEV, Y.Z.; MASIA, M. J. Friction on mortar-less joints in semi interlocking masonry. **Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges**. p. 1635-1643, 2016.

HOUST, Y. F. **Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie**. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - **Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters**. (ISO 25178-2:2012), Geneva Switzerland.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: **Testing of concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete -- Accelerated carbonation method**. ISO 1920-12, First edition. Geneva, Switzerland, 2015.

JAAFAR, W. **Influence de la Carbonatation sur la Porosité et la Perméabilité des Bétons, Diplôme d' études Approfondies** [M.S. thesis], Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2003.

JANMEY, PA et al. Negative normal stress in semiflexible biopolymer gels. **Nature Materials**. n. 6, p. 48–51, 2006.

JEONG, J.; BASSIR, D.; RAMÉZANI, H. **Investigation on multi scale modeling of carbonation shrinkage of mortars**. École Polytechnique de l' Université d' Orléans, 2009.

JIN, H.; TIAN, Q.; LI, Z. Aging Test and Performance Prediction of Rubber in Mortar Medium. **Journal of Cleaner Production**. v. 331, 2022. Disponível em; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129981>.

JOHANNESSON, B.; UTGENANNT, P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. **Cement and Concrete Research**. v. 31, p. 925-931, 2001.

- KAMPF, L. **Factors affecting bond of mortar to brick**. New York: ASTM, STP320-EB, p. 127-142, 1963.
- KLINGALL et al. The effect of EBM Process Parameters Upon Surface Roughness. **Rapid Prototyp. Journal**. v. 22, pg. 495–503, 2016.
- KIRYUSHIN. V. V. Flows with a Moving Contact Line. **Fluid Dynamics**. vol. 47, n. 2, p. 157–167, 2012.
- KOSIACHEVSKY, D. et al. Influence of Natural Aging on The Chemical Composition of Hemp Mortar. **Journal of Physics: Conference Series**. n. 2423, p. 1-7, 2023.
- KOWALEWSKI, L.; GAJEWSKI, M. Determination of failure modes in brick walls using cohesive elements approach. **FProcedia Engineering**. n. 111, p. 454-461, 2015.
- KUMAR, S. L.; ARAVIND, H. B.; HOSSINEY, N. Digital image correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program. **Results in Engineering**. n. 4, 2019.
- LACERDA, B. M., PEREIRA, A. G. Comparação Analítica e Numérica de Elementos Estruturais Por Meio do Programa Livre Code_Aster Aplicada na Engenharia. **Revista Científica da UNESC**, v. 15, p. 1-20, 2017.
- LAWRENCE, S. J.; PAGE, A. W. **Bond Studies in Masonry**. In: 10th IB² Mac. Calgary, Canada. p. 909-917, jul, 1994.
- LECOMPTE, D. et al. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. **Optics and Lasers in Engineering**. n. 44, p. 1132-1145, 2005.
- LEE, G. C. et al. Influence of CNT Incorporation on the Carbonation of Conductive Cement Mortar. **Materials**, n. 14, p. 1-14, 2021.
- LEEMANN, A. et al. Carbonation resistance of mortar produced with alternative Cements **Materials and Structures**, p. 1-12, 2018.
- LIMA, N. B. et al. A chemical approach to the adhesion ability of cement-based mortars with metakaolin applied to solid substrates. **Journal of Building Engineering**. vol. 115, n. 105643, 2023.
- LIU, XIAO-YOUNG. et al. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation by Shannon entropy. **Optik**. n. 126, p. 4206-4211, 2015.
- LOTFI, H. R; SHING, P. B. Interface model Applied to fracture of masonry structures. **Journal of Structural Engineering**. n. 120, pg. 63–80, 1994.
- LOURENÇO, P.B.; ROTS, J.G. Multisurface interface model for analysis of masonry structures. **Journal of Engineering Mechanics**. n. 123, pg. 660-8, 1997.
- LOURENÇO, P.B. **Computational strategies for masonry structures**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Delft, Netherlands. Delft University of Technology, 1996.
- LOPES DOS SANTOS et al. Tensile bond strength of lime-based mortars: The role of the microstructure on their performance assessed by a new non-standard test method. **Journal of Building Engineering**. v. 29, 2020.

LUKASIK, M.; MICHALOWSKI, B.; MICHALAK, J. Assessment of the Constancy of Performance of Cementitious Adhesives for Ceramic Tiles: Analysis of the Test Results Commissioned by Polish Market Surveillance Authorities. **Journal of Applied Sciences**. v. 10, n.6561, 2020.

LUNARDI, M. P. **Avaliação multiescalar do efeito da carbonatação na durabilidade de argamassas de revestimento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2021.

MAKKONEN, L. Young's equation revisited. **Journal of Physics: Condensed Matter**. n.28, p. 1-4, 2016.

MAIA, J.; RAMOS, N. M. M.; VEIGA, R. Assessment of Test Methods for The Durability of Thermal Mortars Exposure to Freezing. **Materials and Structures**. V. 52, n. 112, 2019.

MAIA, J. et al. Durability of a New Thermal Aerogel-Based Rendering System Under Distinct Accelerated Aging Conditions. **Materials 2021**. v.14, n. 5413, p. 1-17, 2021.

MARTINELLI, F. A.; HELENE, P. R. L. Uso, **Funções e Propriedades das Argamassas Mistas Destinadas ao Assentamento e Revestimento de Alvenarias**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/47. São Paulo: EPUSP, 1991.

MARTÍNEZ, I. et al. Comparative Analysis of The Properties of Recycled and Natural Aggregate in Masonry Mortars. **Construction and Building Materials**. n.49, p.384-392, 2013.

MASUERO, A. B.; STOLZ, C. M. Analysis of main parameters affecting substrate/mortar contact área through tridimensional laser scanner. **Journal of Colloid and Interface Science**. n.455, p. 16-23, 2015.

McCLUNG, A. J. W et al. Non-contact technique for characterizing full-field surface deformation of shape memory polymers at elevated and room temperatures. **Polymer Testing**. n.30, p. 140–149, 2011.

MELO, A. C. et al. Influence of The Contact Area in The Adherence of Mortar-Ceramic Tiles Interface. **Construction and Building Materials**. v.243, 118274, 2020.

MENEGOTTO, C. W. **Avaliação do Comportamento de Argamassas de Revestimentos Submetidas a Envelhecimento Acelerado e Carbonatação**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2023.

MEYERS, C. S. Development of Brick and Mortar Material Parameters for Numerical Simulations. **Dynamic Behavior of Materials**. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 99. v. 1, p.351-359, 2011.

MICKAEL, T. **Modelling of Atmospheric Carbonation of Cement Based Materials Considering the Kinetic Effects and Modifications of the Microstructure** [Ph.D. thesis], L' École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2005.

MIHAI, L. A.; GORIELY, A. How to characterize a nonlinear elastic material? A review on nonlinear constitutive parameters in isotropic finite elasticity. **Proceedings of the Royal Society A**. n. 473, 2017.

MILANI, G.; LOURENÇO, P. B.; TRALLI, A. Homogenised limit analysis of masonry wall. Part I. Failure surfaces. **Computers & Structures**. n. 84. pg. 166-180, 2006.

MILANI, G. 3D Upper bound limit analysis of multi-leaf masonry walls. **International Journal of Mechanical Sciences**. n. 52. pg. 784-803, 2010.

MINDESS, S. Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone. **Interfacial Transition Zone in Concrete**. Pg 47-63, 1996.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. 3. ed. New Jersey: Pearson, 2008.

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, p. 181-192, 2007.

MOHAMAD, G. et al. Stiffness plasticity degradation of masonry mortar under compression: preliminar results. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 11, n.2, p. 279-295, 2018.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. **Applied Clay Science**. n.27, p. 229-234, 2004.

MORENO-MATEO, M. A.; VASCO-OLMO, J. M.; DÍAZ, F. A. Integración de Correlación Digital de Imágenes y Termoelasticidad Para El Cálculo De Los Factores de Intensidad de Tensiones. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**. vol. 25, n. 2, p. 13-20, 2021.

MYSHKIN, N. K.; PETROKOVETS, M. I.; CHIZHIK, S. A. Simulation of Real Contact in Tribology. **Tribology International**. v. 31, n. 1-3, p. 79-86, 1998.

NEVILLE, A. M.; BROKS, J. J. **Tecnologia do concreto**, 2ª edição, editora Bookman, Porto Alegre, 2013.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L.. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**. v. 27, n. 7, p. 995–1007, 1997.

NGUYEN, V. T. et al. Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Imagem Correlation Method. **Procedia Engineering**. n.184, p. 381-389, 2017.

NUNES, L.C.S.; MOREIRA, D. C. Simple shear under large deformation: experimental and theoretical analyses. **European Journal of Mechanics – A/Solids**. n. 42, p. 315–322, 2013.

OLIVEIRA, V. C. **Análise Quantitativa da Influência da Rugosidade e da Área de Interface Entre Substratos Cerâmicos e Revestimentos Cimentício na Resistência de Aderência à Tração**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). São Leopoldo, RS. Escola Politécnica da Universidade dp Vale do Rio dos Sinos, 2022.

PAULON, W. **Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**. Tese (Doutorado), São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PAGE, A. W. The strength of brick masonry under biaxial tension-compression. **Proceedings from the Institution of Civil Engineers – Part 2**. n. 71, p. 893-906, 1981.

PAGNUSSAT, D. T. **Efeito da Temperatura de Queima de Blocos Cerâmicos sobre a Resistência de Aderência à Tração de Revestimentos de Argamassas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

PALMER, L. A.; PARSONS, D. A. A Study Of The Properties Of Mortars And Bricks And Their Relation To Bond. Research Paper RP683. **Bureau of Standards Journal of Research**. vol. 12, p. 609-644, 1934.

PHAM, S. T. **Modifications on Microporosity and Physical Properties of Cement Mortar Caused by Carbonation: Comparison of Experimental Methods.** *Advances in Materials Science and Engineering*. vol. 2013, p. 1-9, 2013.

PAN, B. et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. **Meas. Sci. Technol**, n. 20, p. 1-17, 2009.

PAN, B. et al. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals. **Meas. Sci. Technol**, n. 19, 2018.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS C. G.; FARDIS, M. N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AICHE Journal**, v. 35 n. 10, p. 1639-1650, 1989.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation, **ACI Materials Journal**, n. 88-M43, p. 363-373, 1991b.

PAULETTI, C. **Estimativa da Carbonatação Natural de Materiais Cimentícios a Partir de Ensaio Acelerados e de Modelos de Predição.** Tese (Doutorado em Engenharia de Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PINA, F. B. C. **Resistance to carbonation of mortars for repairs of reinforced concrete structures. Study of cementitious mortars modified and unmodified with polymers.** Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

PÓLITO, G.; CARVALHO JUNIOR, A. N.; BRANDÃO, P. R. G. Caracterização Microestrutural da Interface Argamassa Mista / Bloco Cerâmico. **Construindo**, Belo Horizonte, v.2, n.2, p.11-17, jul./dez. 2010.

POLETANOVIĆ, B. et al. **Comparison of Physical and Mechanical Properties of Cementitious Mortars Reinforced With Natural and Synthetic Fibres Prior and After Wet/Dry Cycles.** In: 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials. Belfast, UK, v. 37, p. 433-437, 2019

PLUIJIM, V. D. Non-linear behavior of masonry under tension. **Heron**, v. 42, n.1, p.25-54, 1997.

RAIJMAKERS, T. M. J.; VERMELTFOORT, AL. T. Deformation controlled meso shear tests on masonry piers. **Building and Construction Research**. 1992.

RAMESH, B. A.; KONDRAIVENDHAN, B. Effect of Accelerated Carbonation on the Performance of Concrete Containing Natural Zeolite. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 32, n. 4, 2020.

RAMOS, N. M. M. et al. Reliability of the Pull-Off Test in Situ Evaluation of Adhesion Strength. **Construction and Building Materials**. v.31, p. 86-93, 2012.

RESENDE, P. S. O. **Efeito do Ar Incorporado Em Argamassas de Revestimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, 2010.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX. – **Workability, consistence, plasticity of mortar – MR-3.** France: RILEM, 1982.

ROMERO-HERMIDA, M. I. et al. Characterization and Analysis of the Carbonation Process of a Lime Mortar Obtained from Phosphogypsum Waste **International Journal of Environmental Research and Public Health**. n.18, p. 1-20, 2021.

ROSEMANN, F. **Resistência ao Fogo de Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos Cerâmicos pelo Critério de Isolamento Térmico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

ROTS, J. G. **Structural masonry: an experimental/numerical basis for practical design rules.** Balkema: Netherlands, 1997.

SALSAVILCA et al. Numerical analysis of bonding between masonry and steel reinforced grout using a plastic-damage model for lime-based mortar. **Construction and Building Materials**. n. 262, p1-11, 2020.

SALUSTIO, J. et al. Mortar Bond Strength: A Brief Literature Review, Test for Analysis, New Research Needs and Initial Experiments. **Materials**. v.15, 2332, 2022.

SANTAGUIDA, R. et al. **CO2 measurements at the sites of the Italian observing network**. In: 13th WMO/IAEA, meeting of experts on carbon dioxide concentration and related tracers measurement techniques. Boulder, USA, p. 156-160, 2005.

SARHOSIS, V.; GARRITY, S. W.; SHENG, Y. Influence of brick–mortar interface on the mechanical behaviour of low bond strength masonry brickwork lintels. **Engineering Structures**. n.11, p1-11, 2015.

SASSE, H.; SNETHLAGE, R. Methods for the evaluation of stone conservation treatments, in: N.S. Baer, R. Snethlage (Eds.), **Saving Our Architectural Heritage: the Conservation of Historic Stone Structures**. Wiley-Blackwell, 1997, p. 223–243.

SCARTEZINI, L.M.; CARASEK, H. **Fatores que Exercem Influência na Resistência de Aderência à Tração dos Revestimentos de Argamassas**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia Argamassas – SBTA. São Paulo: V SBTA, 2003. p. 569-581.

SCHRADER, M. E. Young-Drupe Revisited. **Langmuir**. n.11, p. 3585-3589, 1995.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**. v. 105, n. 15, p.400-415, 2016.

STABER, B.; GUILLEMINOR, J. Stochastic hyperelastic constitutive laws and identification procedure for soft biological tissues with intrinsic variability. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**. N. 65, p. 743-752, 2017.

STEINER, S. et al. Effect of relative humidity on the carbonation rate of portlandite, calcium silicate hydrates and ettringite. **Cement and Concrete Research**. v. 135, 106116, 2020.

STRAVRIDS, A.; SHING, PB. Finite-element modeling of nonlinear behaviour of masonry-infilled RC frames. **Journal of Structural Engineering**. n. 136, p. 285–296, 2010.

STULL, R. T.; JOHNSON, P. V. Some Properties of The Pore System in Bricks and Their Relation to Frost Action. RESEARCH PAPER RP1349. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**. v. 25, 1940.

TABOR, D. Interaction Between Surfaces: Adhesion and Friction. In: BLAKELY, J. M. (Org.). **Surface Physics of Materials**. New York: Academic Press, 1975. cap. 10, p. 476-525.

TASSOS, C. et al. Influence of cement type on carbonation of concrete mixtures. **MATEC Web of Conferences**. n. 163, 2018.

TEIJÓN-LÓPEZ-ZUAZO et al. Compression and Strain Predictive Models in Non-Structural Recycled Concretes Made from Construction and Demolition Wastes. **Materials**. n.14, p. 1-26, 2021.

TIMOSHENKO, SP. **History of strength of materials**. Dover: New York, 1983.

THIERRY, M. **Modélisation de la carbonatation atmospherique des béton – Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique**. Thèse de doctorat, École Nationales des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

TOLENTINO SOUZA, A. et al. Evaluation of The Mechanical Performance of Different Coating Mortar Types After an Accelerated Aging Process. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 15, n.1, p. 29-41, 2021.

TORRES, I.; VEIGA, R.; FREITAS, V. Influence of Substrate Characteristics on Behavior of Applied Mortar. **Journal of Materials in Civil Engineerings**. v. 30, n.10, p. 04018254, 2018.

TRAVINCAS, R. et al. The influence of the substrate type on the performance of an industrial cement mortar for general use. **Journal of Building Engineering**. n. 73, p. 1-14, 2023.

VAZ, F. H. B.; CARASEK, H. Resistência de Aderência de Revestimentos de Argamassa – Contribuição por Meio de Mapeamento e Revisão Sistemática de Literatura para Futuras Pesquisas no Tema. **Cerâmica**. v. 65, n 374, Abr-Jun, 2019.

VERMELTFOORT, A. T.; RAIJMAKERS, T. M. J.; JANSSEN, H. J. M. Shear tests on masonry walls. **Procedure 6th North American Masonry Conference**. p. 1183-1193, 1993.

VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; MONTEIRO, S. N. Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamote. **Cerâmica**. n. 55, p. 332 – 336, 2009.

VILASBOAS, J. M. L.; MACHADO, S. L.; PINTO, S. A. Utilização do método do papel-filtro para determinação de curvas de retenção de água em argamassas e concretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 9, n. 4, p. 525 – 543, 2016.

Wang Y, Cuitino AM. Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation. **Int J Solid Struct**, 39, p. 3777–96, 2002.

WEX, C. et al. Isotropic incompressible hyperelastic models for modelling the mechanical behaviour of biological tissues: a review. **Biomed. Tech./Biomed. Eng**. n. 60, p. 577–592, 2015.

WRIGGERS, P. Mixed finite-element-methods. New York: Springer, 2007.

WOLF, J.; DAL MOLIN, D. C. C. **Carbonatação de argamassas e concretos**. In: Simpósio sobre Patologia das Edificações: Prevenção e Recuperação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

XP P 18-458. **Essai pour béton durci – Essai de carbonatation accélérée** – Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté, 2008.

YAOFENG, Sun; PANG, John HL. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images. **Optics and lasers in engineering**, v. 45, n. 9, p. 967-974, 2007.

YAKUB, I.; DU, J.; SOBOYEJO, W. O. Mechanical Properties, Modeling and Design of Porous Clay Ceramics. **Materials Science & Engineering A**. n. 558, p. 21 – 29, 2012.

YOU, K.; JEONG, H.; HYUNG, W. Effects of Accelerated Carbonation on Physical Properties of Mortar, **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, 13:1, 217-221, 2014.

YOUNG, T. An Essay on the Cohesion of Fluids. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. vol. 95. p. 65-87, 1805.

ZANELATTO, E. B. et al. Evaluation of Roughcast on The Adhesion Mechanisms of Mortar on Ceramic Substrates. **Materials and Structures**, n. 52, 2019. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1353-x>.

ZHAN, M. et al. Effect of presoak-accelerated carbonation factors on enhancing recycled aggregate mortars. **Magazine of concrete research**, v. 69, p. 838–849, 2017.

ZHANG, P., TERAMOTO, A., OHKUBO, T. Laboratory-scale Method to Assess the Durability of Rendering Mortar and Concrete Adhesion Systems. **Journal of Advanced Concrete Technology**. vol. 18, p. 521–531, 2020.

ZHANG, Y. et al. Numerical Simulation on Damage Behaviors of Tile-Mortar Interface Induced by Mortar Shrinkage and Temperature Cycles. **Engineering Failure Analysis**. v. 148, 2023.

ZHAO, Y. Moving contact line problem Advances and perspectives. **Theoretical & Applied Mechanics Letters**. n. 4, 2014.

ZHAO, L. Y.; ZHU, Q. Z.; SHAO, J. F. A micro-mechanics based plastic damage model for quasi-brittle materials under a large range of compressive stress. **International Journal of Plasticity**. n. 100, p. 156-176, 2018.

ZHAO, W. et al. Use of digital image correlation to confirm the enhancement of concrete-epoxy resin mortar adhesion through surface precoating treatment. **Construction and Building Materials**. n. 295, 2021.

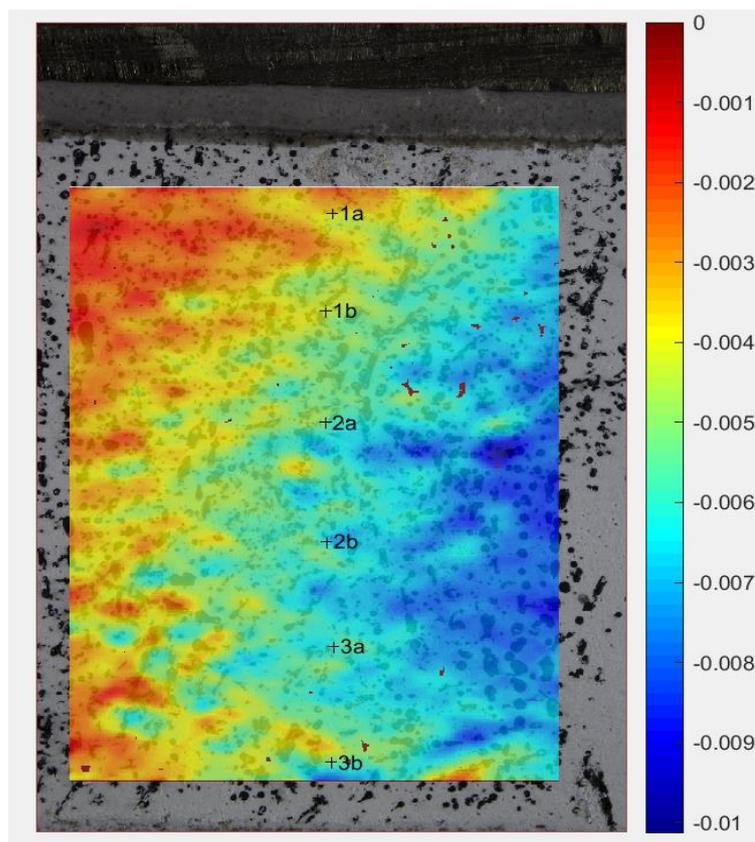
APÊNDICE A – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS EXPERIMENTAIS CARB E PELA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

Tabela 58 – Resultados do processamento das amostras experimentais CARB E
pela correlação de imagem digital

Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
67	6,15	2500	67,697	27,5	253,09
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0	0
1	19,29	6,15	0,025	2,55E-06	-3,86E-05
2	19,30	12,31	0,049	3,21E-06	-0,00011855
3	23,04	18,46	0,074	-4,13E-07	-0,00014216
4	27,55	24,62	0,098	-3,91E-06	-0,00017343
5	30,10	30,77	0,123	-7,98E-06	-0,00018007
6	32,83	36,93	0,148	-1,24E-05	-0,00017579
7	30,40	43,08	0,172	-8,30E-06	-0,00013742
8	31,40	49,23	0,197	-1,15E-05	-0,00010575
9	32,64	55,39	0,222	-1,34E-05	-5,92E-05
10	31,94	61,54	0,246	-1,62E-05	-1,93E-05
11	35,89	67,70	0,271	-1,74E-05	-2,85E-06
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0,00E+00	0,00E+00
1	19,29	6,15	0,025	2,00E-06	0,00035162
2	19,30	12,31	0,049	-1,43E-08	0,00098654
3	23,04	18,46	0,074	-5,62E-06	0,0011656
4	27,55	24,62	0,098	-1,16E-05	0,0013997
5	30,10	30,77	0,123	-1,63E-05	0,0013899
6	32,83	36,93	0,148	-2,21E-05	0,0012662
7	30,40	43,08	0,172	-1,77E-05	0,0010266
8	31,40	49,23	0,197	-2,03E-05	0,000663
9	32,64	55,39	0,222	-2,18E-05	0,00029111
10	31,94	61,54	0,246	-2,35E-05	-9,92E-05
11	35,89	67,70	0,271	-2,41E-05	-0,0002625
Interface					

Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	Extensômetro na direção Vertical	
				ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0,00E+00	0
1	19,29	6,15	0,025	2,87E-06	-0,00010488
2	19,30	12,31	0,049	-1,53E-06	-0,00033278
3	23,04	18,46	0,074	-8,63E-06	-0,00041052
4	27,55	24,62	0,098	-1,56E-05	-0,00047193
5	30,10	30,77	0,123	-2,05E-05	-0,00049625
6	32,83	36,93	0,148	-2,48E-05	-0,00051946
7	30,40	43,08	0,172	-2,05E-05	-0,00042595
8	31,40	49,23	0,197	-2,15E-05	-0,00032757
9	32,64	55,39	0,222	-2,11E-05	-0,00021385
10	31,94	61,54	0,246	-1,98E-05	-9,95E-05
11	35,89	67,70	0,271	-2,13E-05	-7,00E-05

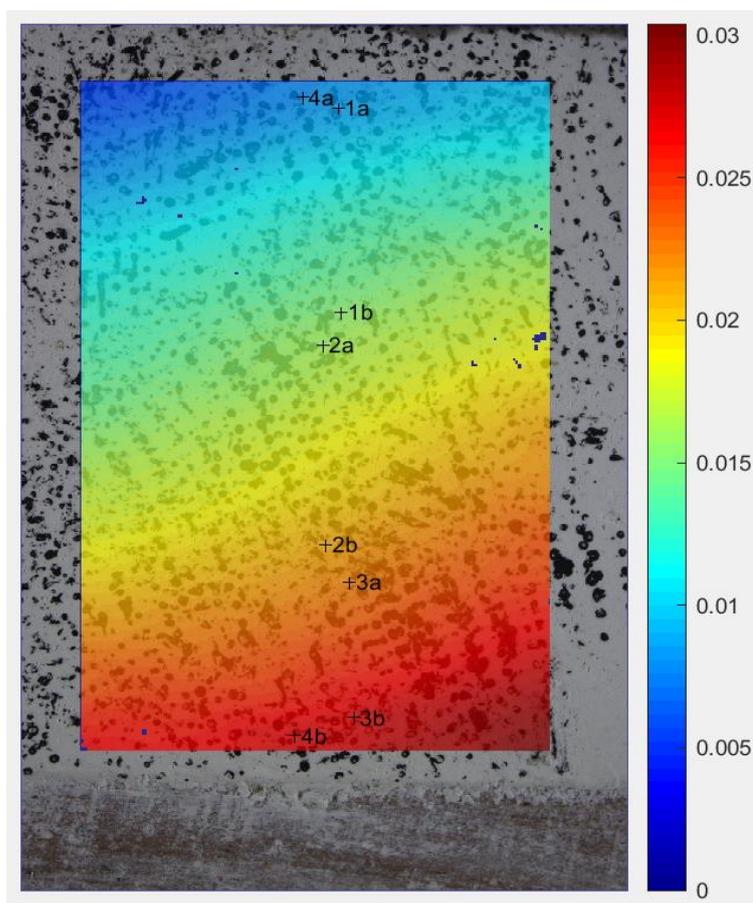
- Tempo de processamento = 5,27 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
69	10,398	2500	114,38	28	248,57
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	17,50	10,40	0,042	4,4856E-06	-0,000096395
2	17,23	20,80	0,083	0,000016997	0,00002893
3	17,37	31,19	0,125	0,000028844	0,00020374
4	17,62	41,59	0,166	0,000036713	0,00039347
5	18,17	51,99	0,208	0,000039896	0,00047847
6	17,88	62,39	0,250	0,000042653	0,0005576
7	18,08	72,79	0,291	0,00004252	0,00060566
8	18,10	83,19	0,333	0,000041943	0,00064542
9	18,13	93,58	0,374	0,000043172	0,00064557
10	18,53	103,98	0,416	0,000045492	0,00055639
11	18,62	114,38	0,458	0,000049491	0,00048458
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	17,50	10,40	0,042	7,2384E-06	-0,000090773
2	17,23	20,80	0,083	0,000021824	0,00002663
3	17,37	31,19	0,125	0,000034593	0,00020764
4	17,62	41,59	0,166	0,000044234	0,00039117
5	18,17	51,99	0,208	0,000049914	0,00046868
6	17,88	62,39	0,250	0,000054808	0,00054221
7	18,08	72,79	0,291	0,000057452	0,0005911
8	18,10	83,19	0,333	0,00005926	0,00063178
9	18,13	93,58	0,374	0,000062869	0,00063317
10	18,53	103,98	0,416	0,000067876	0,00055206
11	18,62	114,38	0,458	0,000074714	0,00048347
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	17,50	10,40	0,042	9,4179E-06	-0,000031152
2	17,23	20,80	0,083	0,000026612	0,000039401
3	17,37	31,19	0,125	0,000040536	0,00013384

4	17,62	41,59	0,166	0,000052058	0,00022824
5	18,17	51,99	0,208	0,000060273	0,00027345
6	17,88	62,39	0,250	0,000067483	0,00031535
7	18,08	72,79	0,291	0,000072528	0,00034404
8	18,10	83,19	0,333	0,000076265	0,00036812
9	18,13	93,58	0,374	0,00008199	0,00037218
10	18,53	103,98	0,416	0,000089382	0,0003448
11	18,62	114,38	0,458	0,000098787	0,00031871

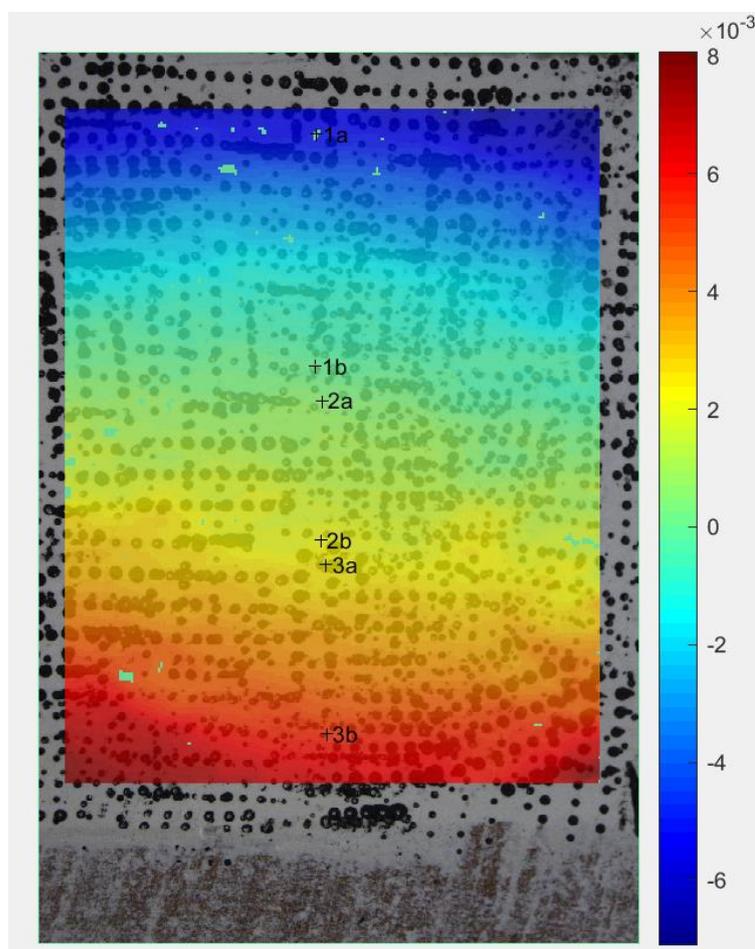
- Tempo de processamento = 3,29 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
70	10,789	2500	118,684	27,5	253,09
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	15,87	10,79	0,043	0,000018049	0,000118
2	19,03	21,58	0,086	0,00003218	0,0025222
3	23,77	32,37	0,129	0,000046922	0,0053647
4	24,41	43,16	0,173	0,000061487	0,0076118
5	24,78	53,95	0,216	0,000080183	0,0052667
6	24,43	64,74	0,259	0,000093202	0,0050304
7	24,04	75,53	0,302	0,0001028	0,0035081
8	24,17	86,32	0,345	0,000097621	0,0012292
9	24,42	97,11	0,388	0,00010437	0,0013706
10	24,14	107,89	0,432	0,00013053	0,0018164
11	23,86	118,68	0,475	0,00013885	0,0022337
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	15,87	10,79	0,043	0,000013157	-0,00043753
2	19,03	21,58	0,086	0,000017874	-0,0005172
3	23,77	32,37	0,129	0,000021579	-0,0008482
4	24,41	43,16	0,173	0,000023751	-0,0012596
5	24,78	53,95	0,216	0,000026085	-0,0017741
6	24,43	64,74	0,259	0,000023301	-0,0019589
7	24,04	75,53	0,302	0,00001909	-0,002061
8	24,17	86,32	0,345	0,000014382	-0,0021136
9	24,42	97,11	0,388	0,000011087	-0,002079
10	24,14	107,89	0,432	7,6552E-06	-0,0018491
11	23,86	118,68	0,475	5,8553E-06	-0,0017785
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	15,87	10,79	0,043	0,000014692	0,00067341

2	19,03	21,58	0,086	0,000020594	0,0008445
3	23,77	32,37	0,129	0,000024834	0,0012391
4	24,41	43,16	0,173	0,000027272	0,0018095
5	24,78	53,95	0,216	0,000030522	0,0025163
6	24,43	64,74	0,259	0,000027854	0,0027311
7	24,04	75,53	0,302	0,00002442	0,0028593
8	24,17	86,32	0,345	0,000020393	0,0029198
9	24,42	97,11	0,388	0,000018095	0,0028431
10	24,14	107,89	0,432	0,000015417	0,0025447
11	23,86	118,68	0,475	0,000014054	0,0024058

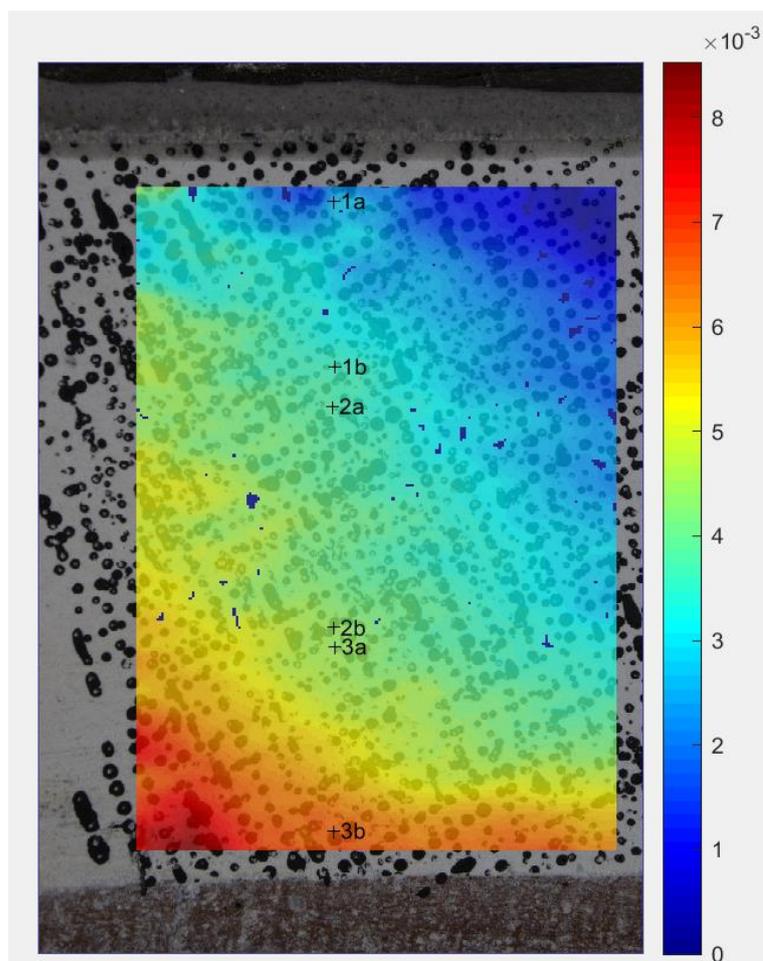
- Tempo de processamento = 4,22 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
71	8,634	2500	94,96	28,2	246,81
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	55,93	8,63	0,035	1,3995E-06	-0,00030698
2	13,09	17,27	0,069	3,3165E-06	-0,00050657
3	13,17	25,90	0,104	0,000008983	-0,00049529
4	15,05	34,53	0,138	0,000011278	-0,00061721
5	13,41	43,17	0,173	0,000012022	-0,00091453
6	13,40	51,80	0,207	0,00001385	-0,0011228
7	13,55	60,43	0,242	0,000014593	-0,0014314
8	13,59	69,07	0,276	0,000014521	-0,0020607
9	20,15	77,70	0,311	0,000014232	-0,0024717
10	20,99	86,34	0,345	0,000012788	-0,0031527
11	20,36	94,97	0,380	0,000011667	-0,0034339
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	55,93	8,63	0,035	0,000001798	-0,00042253
2	13,09	17,27	0,069	0,000004043	-0,00068902
3	13,17	25,90	0,104	0,000011109	-0,00066933
4	15,05	34,53	0,138	0,000014513	-0,00083448
5	13,41	43,17	0,173	0,000016382	-0,0011412
6	13,40	51,80	0,207	0,000019219	-0,0014334
7	13,55	60,43	0,242	0,00002069	-0,0019296
8	13,59	69,07	0,276	0,000020477	-0,0027357
9	20,15	77,70	0,311	0,000019918	-0,0033949
10	20,99	86,34	0,345	0,000017676	-0,004287
11	20,36	94,97	0,380	0,00001672	-0,0046481
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0

1	55,93	8,63	0,035	1,8141E-06	0,00037236
2	13,09	17,27	0,069	4,6242E-06	0,00061715
3	13,17	25,90	0,104	0,0000129	0,00055603
4	15,05	34,53	0,138	0,000017332	0,00075909
5	13,41	43,17	0,173	0,00002003	0,00096998
6	13,40	51,80	0,207	0,0000238	0,0012677
7	13,55	60,43	0,242	0,000026153	0,0016451
8	13,59	69,07	0,276	0,000026274	0,0023335
9	20,15	77,70	0,311	0,000025373	0,0028844
10	20,99	86,34	0,345	0,000022692	0,0036377
11	20,36	94,97	0,380	0,000021523	0,0039176

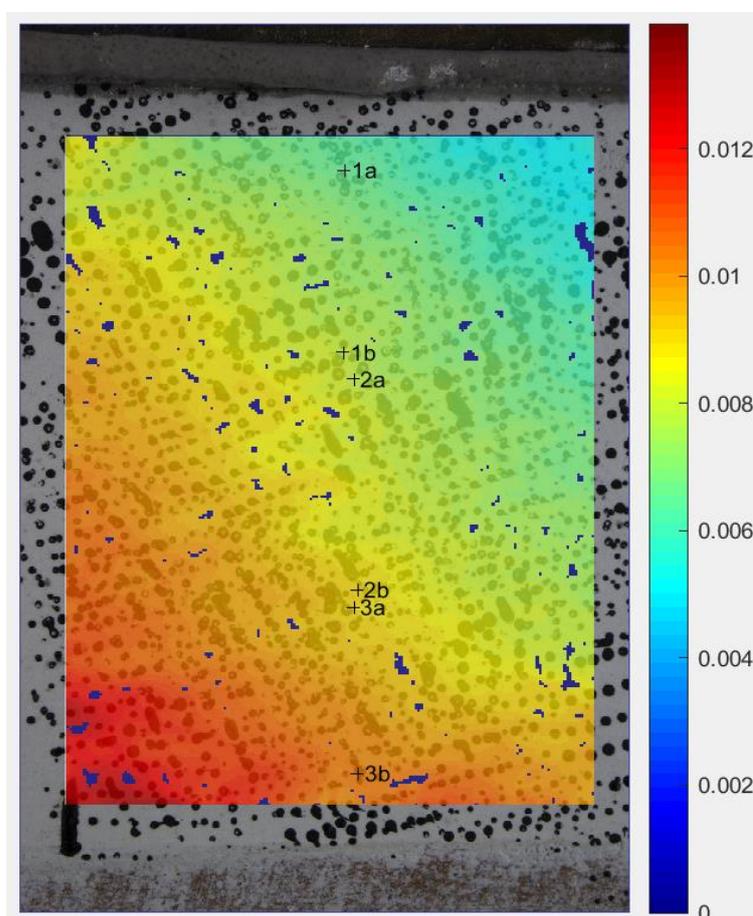
- Tempo de processamento = 3,54 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
72	4,014	2500	44,15	28	248,57
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	17,99	4,01	0,016	3,8594E-06	1,57E-05
2	22,96	8,03	0,032	0,000007945	0,00031407
3	15,16	12,04	0,048	0,000010014	0,00072112
4	15,11	16,06	0,064	0,000011526	0,0011585
5	15,09	20,07	0,080	0,000012864	0,0014392
6	15,26	24,08	0,096	0,000014606	0,0015307
7	15,22	28,10	0,112	0,000018651	0,001757
8	15,15	32,11	0,128	0,000022402	0,0020191
9	15,24	36,13	0,145	0,00002488	0,0022103
10	15,28	40,14	0,161	0,000027266	0,0022099
11	15,22	44,15	0,177	0,000029638	0,0021755
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	17,99	4,01	0,016	4,2785E-06	-0,000005485
2	22,96	8,03	0,032	9,7191E-06	-0,000097372
3	15,16	12,04	0,048	0,000012564	-0,00023963
4	15,11	16,06	0,064	0,000014684	-0,00042159
5	15,09	20,07	0,080	0,00001677	-0,00051272
6	15,26	24,08	0,096	0,000018863	-0,00054205
7	15,22	28,10	0,112	0,000022795	-0,00063137
8	15,15	32,11	0,128	0,000026175	-0,00073216
9	15,24	36,13	0,145	0,000028577	-0,00081273
10	15,28	40,14	0,161	0,000031441	-0,00081027
11	15,22	44,15	0,177	0,000034092	-0,00079639
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	17,99	4,01	0,016	0,000005016	-2,9038E-06
2	22,96	8,03	0,032	0,000011434	-0,000054631

3	15,16	12,04	0,048	0,000015331	-0,00014205
4	15,11	16,06	0,064	0,000018146	-0,00023557
5	15,09	20,07	0,080	0,000020612	-0,00029241
6	15,26	24,08	0,096	0,000023209	-0,00031174
7	15,22	28,10	0,112	0,000027551	-0,00035344
8	15,15	32,11	0,128	0,000030401	-0,00041535
9	15,24	36,13	0,145	0,000032678	-0,00046421
10	15,28	40,14	0,161	0,000035928	-0,00045854
11	15,22	44,15	0,177	0,000039075	-0,00045129

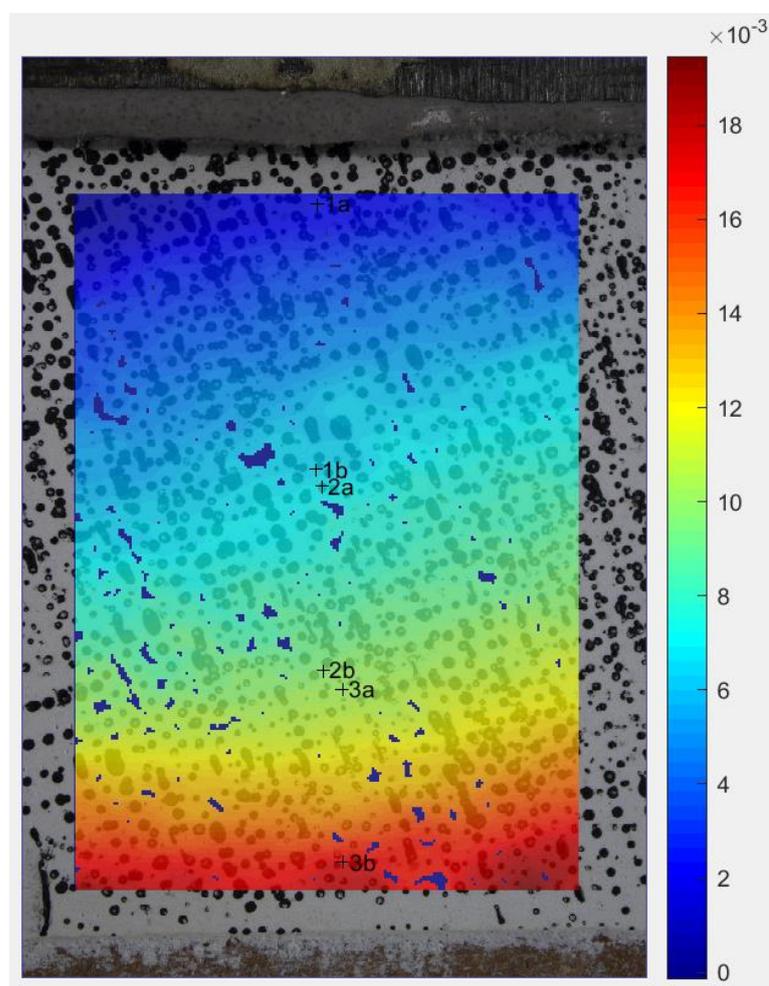
- Tempo de processamento = 2,96 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
74	14,261	2500	156,87	27,2	255,88
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	20,46	14,26	0,057	3,2311E-06	-0,00075075
2	16,92	28,52	0,114	7,9449E-06	-0,0011395
3	17,10	42,78	0,171	0,00001735	-0,00094474
4	17,79	57,04	0,228	0,000022763	-0,00081844
5	17,00	71,31	0,285	0,000023743	-0,00083517
6	17,01	85,57	0,342	0,000023385	-0,00082386
7	16,98	99,83	0,399	0,000021474	-0,00090418
8	29,63	114,09	0,456	0,000020429	-0,00099005
9	17,06	128,35	0,513	0,000019905	-0,00090884
10	17,16	142,61	0,570	0,000019006	-0,00059708
11	17,03	156,87	0,627	0,000018467	-0,00054665
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	20,46	14,26	0,057	5,5442E-06	0,0010173
2	16,92	28,52	0,114	0,000013758	0,0014201
3	17,10	42,78	0,171	0,000024293	0,0011474
4	17,79	57,04	0,228	0,000029902	0,0010285
5	17,00	71,31	0,285	0,000032512	0,0010514
6	17,01	85,57	0,342	0,000032176	0,0010894
7	16,98	99,83	0,399	0,000031483	0,0011754
8	29,63	114,09	0,456	0,00003192	0,0012787
9	17,06	128,35	0,513	0,000031875	0,0011237
10	17,16	142,61	0,570	0,000033116	0,00076422
11	17,03	156,87	0,627	0,000032743	0,00068868
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	20,46	14,26	0,057	7,9995E-06	0,00091819
2	16,92	28,52	0,114	0,000018616	0,0012385

3	17,10	42,78	0,171	0,000031102	0,0008858
4	17,79	57,04	0,228	0,000037119	0,00080218
5	17,00	71,31	0,285	0,000041728	0,00083009
6	17,01	85,57	0,342	0,000042114	0,00090288
7	16,98	99,83	0,399	0,000043286	0,0010119
8	29,63	114,09	0,456	0,000044115	0,0011098
9	17,06	128,35	0,513	0,000045599	0,0010194
10	17,16	142,61	0,570	0,000049547	0,00062555
11	17,03	156,87	0,627	0,000050672	0,00053667

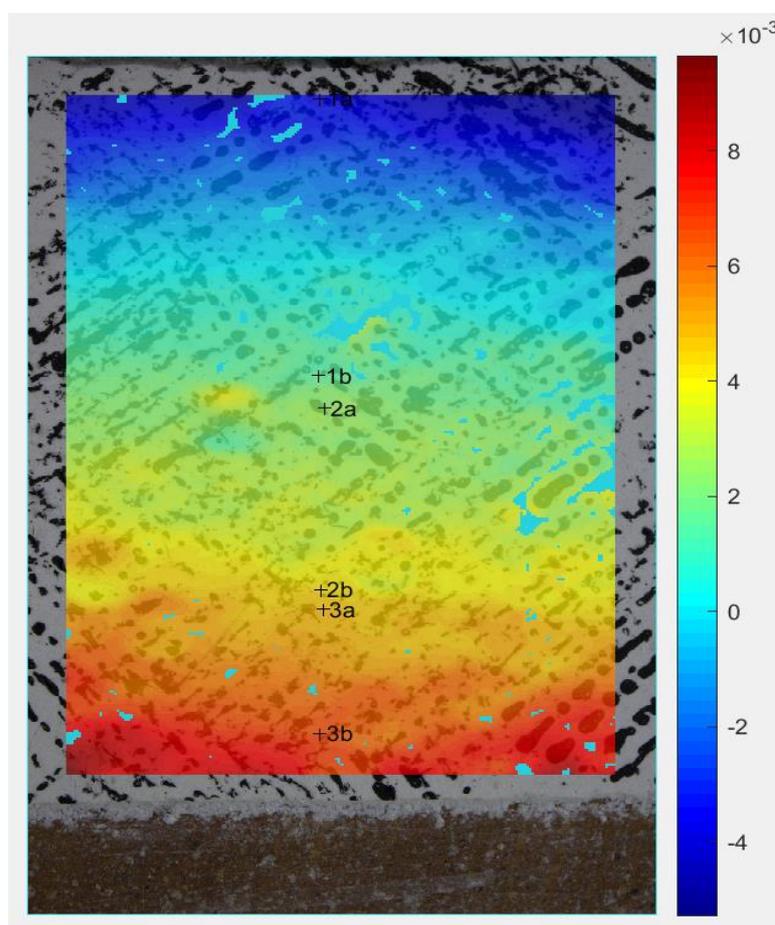
- Tempo de processamento = 3,40 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
75	12,225	2500	134,47	27	257,78
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	24,67	12,22	0,049	0,000026869	0,00027895
2	31,53	24,45	0,098	0,000052155	0,0066086
3	19,99	36,67	0,147	0,000086245	0,00074675
4	20,04	48,90	0,196	0,00011223	0,0038573
5	20,47	61,12	0,244	0,00014302	0,0022117
6	20,18	73,34	0,293	0,00016402	0,0055232
7	20,18	85,57	0,342	0,00018517	0,007025
8	20,17	97,79	0,391	0,00020823	0,007189
9	20,14	110,02	0,440	0,00022006	0,0082402
10	20,10	122,24	0,489	0,0002381	0,0080385
11	20,06	134,47	0,538	0,00025115	0,0074413
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	24,67	12,22	0,0489	2,2231E-06	-0,000056229
2	31,53	24,45	0,0978	4,9763E-06	-0,000079828
3	19,99	36,67	0,1467	6,8527E-06	-0,000010752
4	20,04	48,90	0,1956	7,2347E-06	0,00003954
5	20,47	61,12	0,2445	7,3685E-06	0,000087121
6	20,18	73,34	0,2934	8,3869E-06	0,00013587
7	20,18	85,57	0,3423	9,3522E-06	0,00016112
8	20,17	97,79	0,3912	0,000010037	0,00019804
9	20,14	110,02	0,4401	0,00001057	0,00020841
10	20,10	122,24	0,489	0,000011652	0,00024375
11	20,06	134,47	0,5379	0,000012234	0,00025946
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	24,67	12,22	0,049	4,2374E-06	7,8107E-06
2	31,53	24,45	0,098	8,9786E-06	-0,000037318

3	19,99	36,67	0,147	0,000010116	-9,4023E-06
4	20,04	48,90	0,196	0,000012574	0,000042924
5	20,47	61,12	0,244	0,00001315	0,000032298
6	20,18	73,34	0,293	0,000015232	0,0001112
7	20,18	85,57	0,342	0,000016568	0,00011447
8	20,17	97,79	0,391	0,000018663	0,00014783
9	20,14	110,02	0,440	0,000019702	0,00015305
10	20,10	122,24	0,489	0,000021292	0,00017306
11	20,06	134,47	0,538	0,00002239	0,00020623

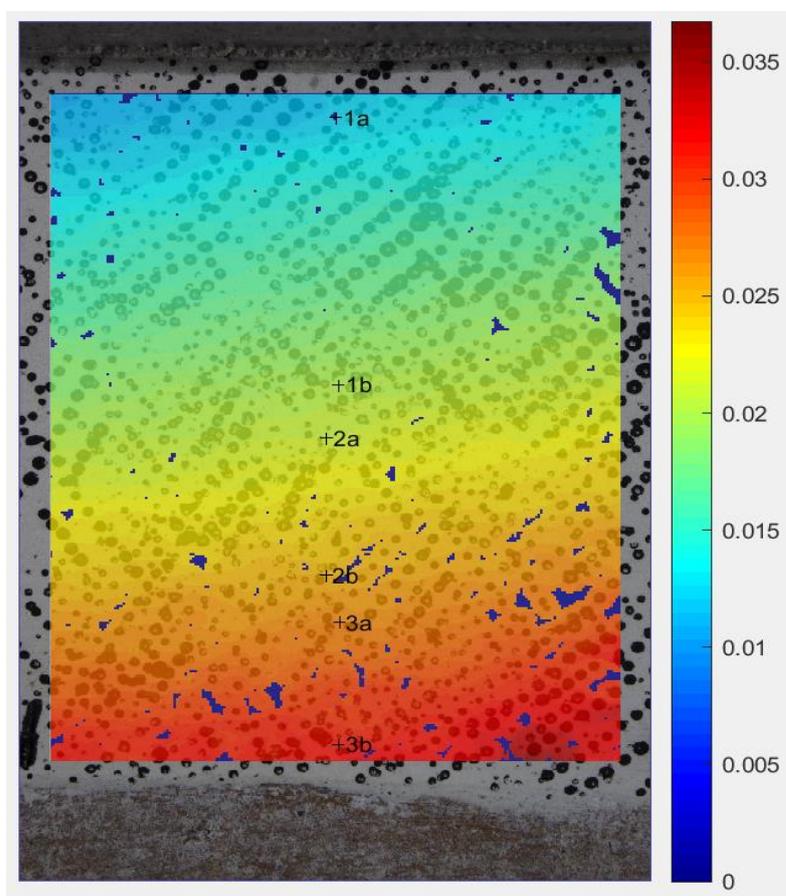
- Tempo de processamento = 3,96 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
78	6,266	2500	68,93	28,6	243,36
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	20,54	6,26	0,025	5,2075E-06	0,00026728
2	28,70	12,53	0,050	0,000015977	1,25E-05
3	19,36	18,79	0,075	0,000025595	3,31E-05
4	19,33	25,06	0,100	0,000037601	0,00041606
5	19,61	31,33	0,125	0,000046403	0,00073119
6	19,85	37,59	0,150	0,000053936	0,00085171
7	20,04	43,86	0,175	0,000060825	0,00099004
8	20,20	50,13	0,201	0,00006766	0,0010687
9	20,52	56,39	0,226	0,000074404	0,0012646
10	26,78	62,66	0,251	0,000086362	0,001577
11	20,90	68,93	0,276	0,000089736	0,001924
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	20,54	6,26	0,025	8,8106E-06	-0,00022214
2	28,70	12,53	0,050	0,000022407	0,00013114
3	19,36	18,79	0,075	0,000032995	0,00030929
4	19,33	25,06	0,100	0,000044432	0,00031159
5	19,61	31,33	0,125	0,000054331	0,000036404
6	19,85	37,59	0,150	0,000062086	-0,00020017
7	20,04	43,86	0,175	0,00006922	-0,0003697
8	20,20	50,13	0,201	0,000076141	-0,00059679
9	20,52	56,39	0,226	0,000083406	-0,00084909
10	26,78	62,66	0,251	0,000089621	-0,0011459
11	20,90	68,93	0,276	0,000096492	-0,0015406
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	20,54	6,26	0,025	0,000011661	-0,00017293
2	28,70	12,53	0,050	0,000027297	0,00013279

3	19,36	18,79	0,075	0,000040329	0,00029061
4	19,33	25,06	0,100	0,000053336	0,00030776
5	19,61	31,33	0,125	0,000065103	8,09E-05
6	19,85	37,59	0,150	0,000075108	-0,00010191
7	20,04	43,86	0,175	0,000083939	-0,00024234
8	20,20	50,13	0,201	0,000093398	-0,00042774
9	20,52	56,39	0,226	0,00010169	-0,00064419
10	26,78	62,66	0,251	0,0001101	-0,00090597
11	20,90	68,93	0,276	0,00011875	-0,0012662

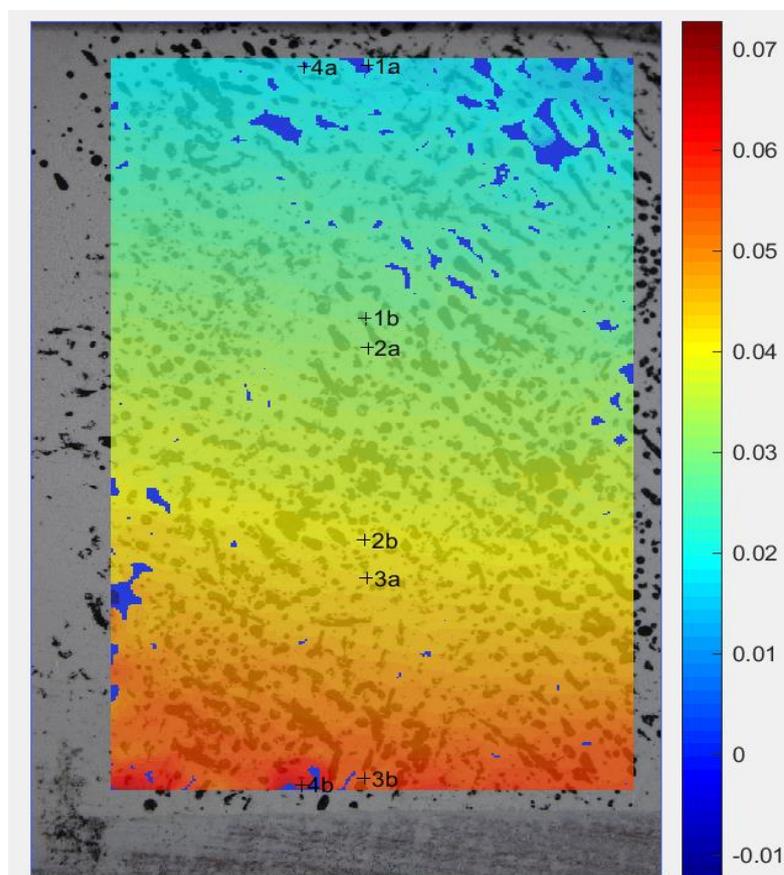
- Tempo de processamento = 3,93 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
79	8,309	2500	91,40	28	248,57
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	33,06	8,31	0,033	0,000021862	-0,0018008
2	43,51	16,62	0,066	0,000033786	-0,0036499
3	42,63	24,93	0,100	0,000046299	-0,0046436
4	28,63	33,24	0,133	0,000059128	-0,0058702
5	28,96	41,55	0,166	0,000075365	-0,0068324
6	29,48	49,86	0,199	0,000095191	-0,0076722
7	29,52	58,17	0,233	0,00011224	-0,0076556
8	29,65	66,47	0,266	0,00013639	-0,0094258
9	29,84	74,78	0,299	0,00016148	-0,010399
10	29,86	83,09	0,332	0,00018745	-0,009718
11	30,43	91,40	0,366	0,00023792	-0,0085742
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	33,06	8,31	0,033	0,000042041	-0,0002635
2	43,51	16,62	0,066	0,000063646	-0,00046677
3	42,63	24,93	0,100	0,000077589	-0,00069635
4	28,63	33,24	0,133	0,000089348	-0,00092336
5	28,96	41,55	0,166	0,00010058	-0,0011906
6	29,48	49,86	0,199	0,00011041	-0,0014084
7	29,52	58,17	0,233	0,00011763	-0,0015585
8	29,65	66,47	0,266	0,00012281	-0,0017395
9	29,84	74,78	0,299	0,00012669	-0,0020507
10	29,86	83,09	0,332	0,00012928	-0,0022538
11	30,43	91,40	0,366	0,00014415	-0,0022867
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	33,06	8,31	0,033	0,000047676	-0,0004892
2	43,51	16,62	0,066	0,000076396	-0,00087164

3	42,63	24,93	0,100	0,00009576	-0,0012084
4	28,63	33,24	0,133	0,0001125	-0,0016129
5	28,96	41,55	0,166	0,00012754	-0,0020541
6	29,48	49,86	0,199	0,00014151	-0,0023728
7	29,52	58,17	0,233	0,00015153	-0,0026421
8	29,65	66,47	0,266	0,00015971	-0,0029683
9	29,84	74,78	0,299	0,00016858	-0,0034727
10	29,86	83,09	0,332	0,00017544	-0,0037579
11	30,43	91,40	0,366	0,0001942	-0,0038179

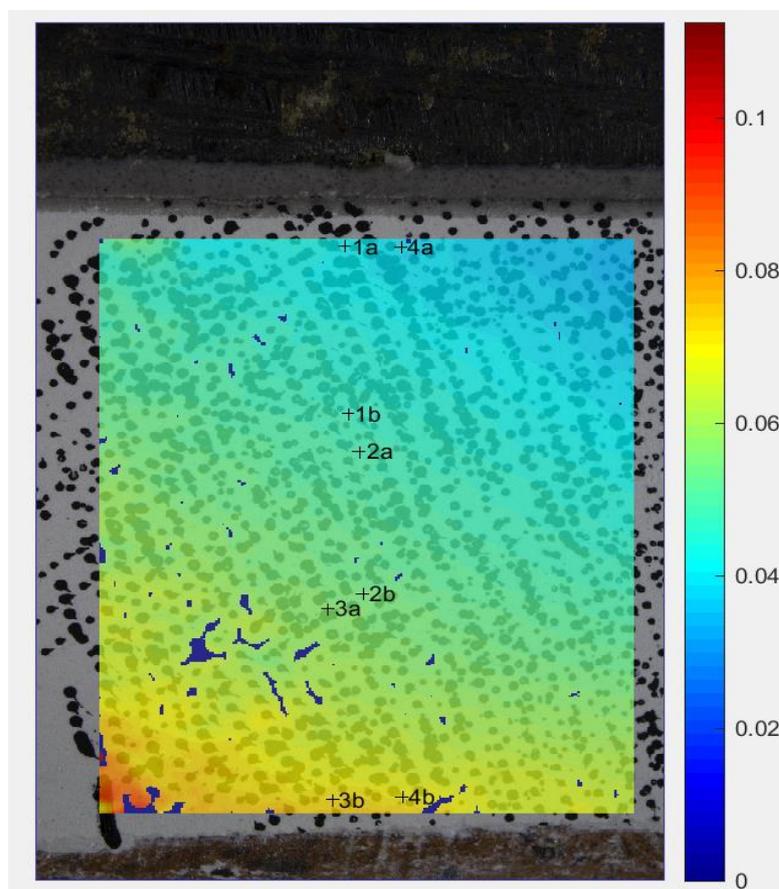
- Tempo de processamento = 5,93 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
143	12,302	2500	135,32	29	240,00
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	35,00	12,30	0,049	0,000019914	0,00067372
2	41,12	24,60	0,098	0,000046658	0,00086852
3	42,73	36,91	0,148	0,000074371	0,0011254
4	44,06	49,21	0,197	0,000096217	0,001321
5	46,10	61,51	0,246	0,00011932	0,001496
6	50,90	73,81	0,295	0,00013819	0,0016078
7	49,16	86,11	0,344	0,00015129	0,0017147
8	56,59	98,42	0,394	0,00016515	0,0019
9	51,26	110,72	0,443	0,00017619	0,0020401
10	50,92	123,02	0,492	0,00017809	0,0020558
11	55,81	135,32	0,541	0,00018048	0,0021044
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	35,00	12,30	0,049	0,000021833	0,00057342
2	41,12	24,60	0,098	0,000053397	0,00077526
3	42,73	36,91	0,148	0,000085494	0,001007
4	44,06	49,21	0,197	0,00011134	0,0011853
5	46,10	61,51	0,246	0,00013791	0,0013392
6	50,90	73,81	0,295	0,00015983	0,0014598
7	49,16	86,11	0,344	0,00017527	0,0015383
8	56,59	98,42	0,394	0,00019083	0,0017058
9	51,26	110,72	0,443	0,00020388	0,0018607
10	50,92	123,02	0,492	0,00020691	0,0018836
11	55,81	135,32	0,541	0,00020977	0,0019116
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	35,00	12,30	0,049	0,000025746	0,00055293
2	41,12	24,60	0,098	0,000064162	0,00072224

3	42,73	36,91	0,148	0,00010301	0,0009354
4	44,06	49,21	0,197	0,00013422	0,0010999
5	46,10	61,51	0,246	0,00016605	0,0012279
6	50,90	73,81	0,295	0,00019228	0,0013303
7	49,16	86,11	0,344	0,00021183	0,001415
8	56,59	98,42	0,394	0,00023174	0,0015713
9	51,26	110,72	0,443	0,00024944	0,0016812
10	50,92	123,02	0,492	0,00025275	0,0017079
11	55,81	135,32	0,541	0,00025684	0,0017521

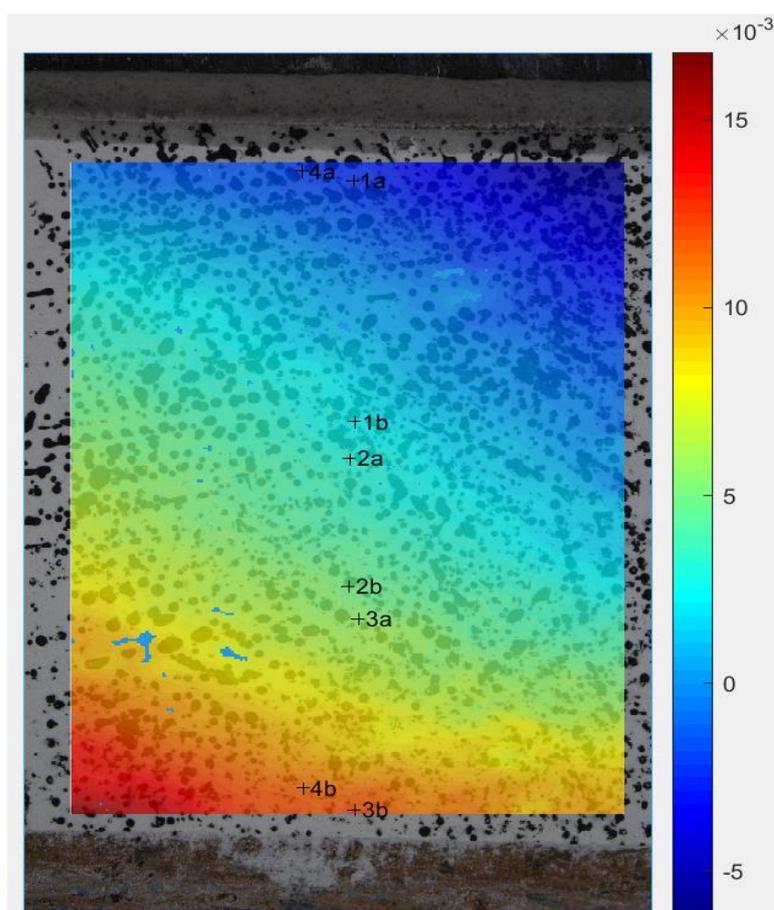
- Tempo de processamento = 8,33 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
153	10,313	2500	113,44	27,5	253,09
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	29,07	10,31	0,041	2,2598E-06	0,00048676
2	22,22	20,63	0,083	3,9024E-06	0,00085365
3	22,59	30,94	0,124	6,4873E-06	0,0012055
4	23,75	41,25	0,165	0,000039871	0,00048624
5	23,55	51,57	0,206	0,000040223	0,00019107
6	23,55	61,88	0,248	0,000040688	0,000073907
7	23,47	72,19	0,289	0,000039246	0,00011194
8	23,39	82,51	0,330	0,000036443	0,00020302
9	23,08	92,82	0,371	0,000028362	0,00027041
10	22,93	103,13	0,413	0,000016982	0,00067453
11	22,96	113,45	0,454	1,3617E-06	0,00073617
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	29,07	10,31	0,041	4,8295E-06	-0,0005179
2	22,22	20,63	0,083	9,6088E-06	-0,00088638
3	22,59	30,94	0,124	0,00001465	-0,0012521
4	23,75	41,25	0,165	0,000066747	-0,00042674
5	23,55	51,57	0,206	0,000067559	-0,000097609
6	23,55	61,88	0,248	0,000068284	0,000023758
7	23,47	72,19	0,289	0,000066792	-0,000011796
8	23,39	82,51	0,330	0,000063089	-0,000072167
9	23,08	92,82	0,371	0,000052208	-0,00019297
10	22,93	103,13	0,413	0,000037128	-0,00062977
11	22,96	113,45	0,454	0,000015692	-0,00074626
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	29,07	10,31	0,041	7,9734E-06	-0,00023748
2	22,22	20,63	0,083	0,000013635	-0,0003865

3	22,59	30,94	0,124	0,000020503	-0,00052008
4	23,75	41,25	0,165	0,000078338	0,00014709
5	23,55	51,57	0,206	0,000077867	0,00032024
6	23,55	61,88	0,248	0,000079607	0,00036114
7	23,47	72,19	0,289	0,000076684	0,00027873
8	23,39	82,51	0,330	0,000072248	0,00024281
9	23,08	92,82	0,371	0,000058269	0,00017438
10	22,93	103,13	0,413	0,000039787	-0,000055722
11	22,96	113,45	0,454	0,000013847	-0,00011801

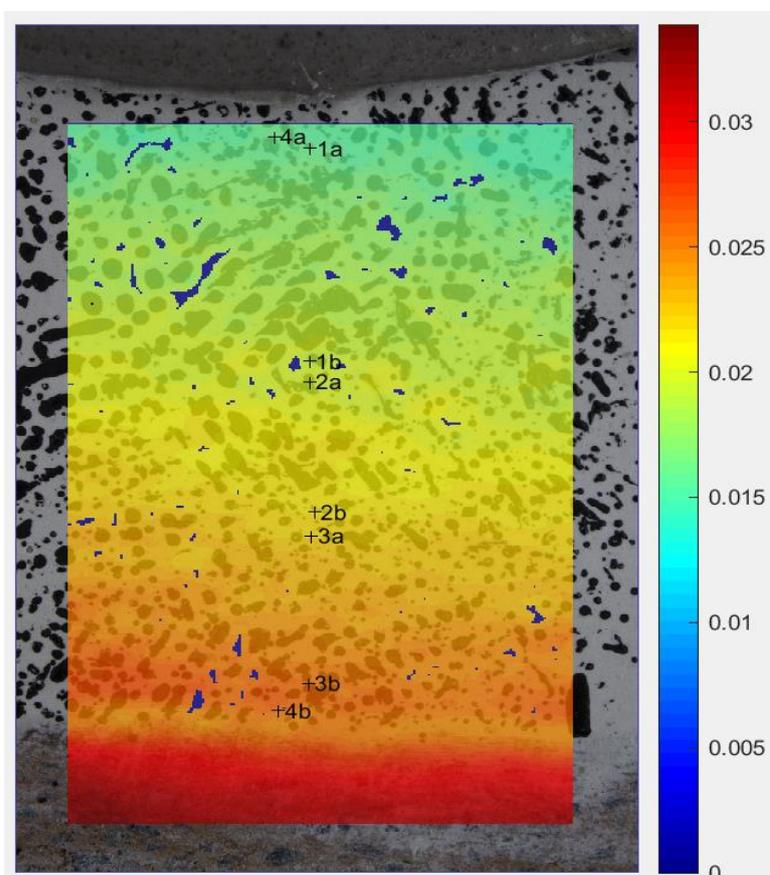
- Tempo de processamento = 4,34 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
155	6,855	2500	75,41	26,5	262,64
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	33,69	6,85	0,027	6,2745E-06	-0,0005085
2	27,33	13,71	0,055	0,000016351	-0,00052059
3	27,22	20,56	0,082	0,000024756	-0,00062357
4	27,80	27,42	0,110	0,000034608	-0,00026227
5	27,81	34,27	0,137	0,000039965	-0,00017888
6	27,92	41,13	0,165	0,000045762	-0,00016874
7	28,05	47,98	0,192	0,000050802	-0,00033152
8	39,72	54,84	0,219	0,000053673	-0,00047263
9	28,37	61,69	0,247	0,000057229	-0,00048238
10	49,26	68,55	0,274	0,000061154	-0,00052227
11	28,58	75,41	0,302	0,000068383	-0,00052262
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	33,69	6,85	0,027	8,2365E-06	0,000073912
2	27,33	13,71	0,055	0,000019748	0,000096073
3	27,22	20,56	0,082	0,000030098	0,00011858
4	27,80	27,42	0,110	0,000041211	0,000084377
5	27,81	34,27	0,137	0,000047556	0,000078177
6	27,92	41,13	0,165	0,000054244	0,000092944
7	28,05	47,98	0,192	0,000059063	0,00012297
8	39,72	54,84	0,219	0,00006291	0,00013992
9	28,37	61,69	0,247	0,000067124	0,00014363
10	49,26	68,55	0,274	0,000071218	0,00016355
11	28,58	75,41	0,302	0,000078969	0,00016046
Inferior					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0	0,000	0	0
1	33,69	6,85	0,027	9,9171E-06	-0,00011799
2	27,33	13,71	0,055	0,000022825	-0,00012396

3	27,22	20,566	0,082	0,00003461	-0,00011282
4	27,80	27,42	0,110	0,000047272	-0,000034113
5	27,81	34,2	0,137	0,000054781	-0,000011378
6	27,92	41,13	0,165	0,000061763	-9,5338E-06
7	28,05	47,98	0,192	0,000066662	-0,000061443
8	39,72	54,84	0,219	0,000072172	-0,000083933
9	28,37	61,69	0,247	0,000076913	-0,000083512
10	49,26	68,55	0,274	0,000081257	-0,00010024
11	28,58	75,41	0,302	0,000089964	-0,000078609

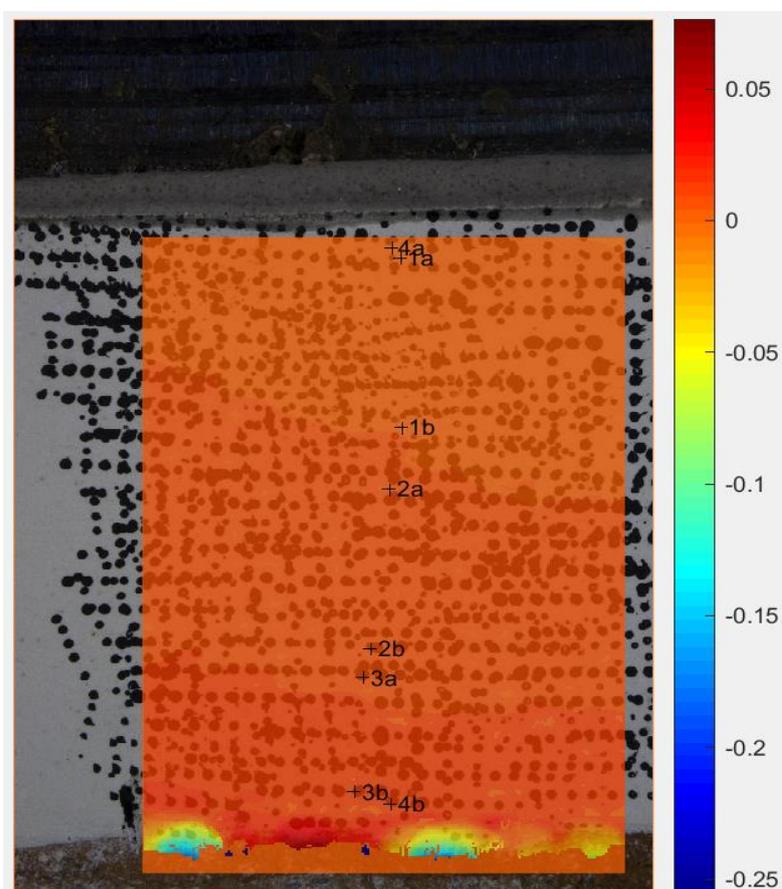
- Tempo de processamento = 5,76 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
158	13,108	2500	144,19	30	232,00
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	21,52	13,11	0,052	0,000013697	0,0016845
2	32,66	26,22	0,105	0,000036595	0,0056047
3	33,35	39,33	0,157	0,00004986	0,0042198
4	32,51	52,43	0,210	0,00004986	0,0042198
5	21,37	65,54	0,262	0,000065435	0,0064769
6	27,64	78,65	0,315	0,0000784	0,0059761
7	33,54	91,76	0,367	0,000090617	0,0059427
8	32,63	104,87	0,419	0,0001021	0,0051746
9	21,26	117,98	0,472	0,00011539	0,0054015
10	21,05	131,08	0,524	0,00013002	0,0057841
11	20,91	144,19	0,577	0,0001508	0,0063855
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	21,52	13,11	0,052	7,9154E-06	-0,00011775
2	32,66	26,22	0,105	0,000015423	-0,00021627
3	33,35	39,33	0,157	0,000019732	-0,00026697
4	32,51	52,43	0,210	0,000019732	-0,00026697
5	21,37	65,54	0,262	0,000022755	-0,00032631
6	27,64	78,65	0,315	0,000024554	-0,00037586
7	33,54	91,76	0,367	0,00002491	-0,00040955
8	32,63	104,87	0,419	0,000025621	-0,00042789
9	21,26	117,98	0,472	0,000027825	-0,00044545
10	21,05	131,08	0,524	0,000029251	-0,00046123
11	20,91	144,19	0,577	0,000030547	-0,00047046
Inferior					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	21,52	13,11	0,052	0,000010433	-0,00017773
2	32,66	26,22	0,105	0,000019445	-0,00032972

3	33,35	39,33	0,157	0,000025505	-0,00039915
4	32,51	52,43	0,210	0,000025505	-0,00039915
5	21,37	65,54	0,262	0,000030312	-0,00049287
6	27,64	78,65	0,315	0,000034834	-0,0005639
7	33,54	91,76	0,367	0,000037315	-0,00060675
8	32,63	104,87	0,419	0,000039478	-0,00063786
9	21,26	117,98	0,472	0,000042221	-0,00066667
10	21,05	131,08	0,524	0,000046273	-0,00069368
11	20,91	144,19	0,577	0,000049117	-0,00069852

- Tempo de processamento = 4,97 horas



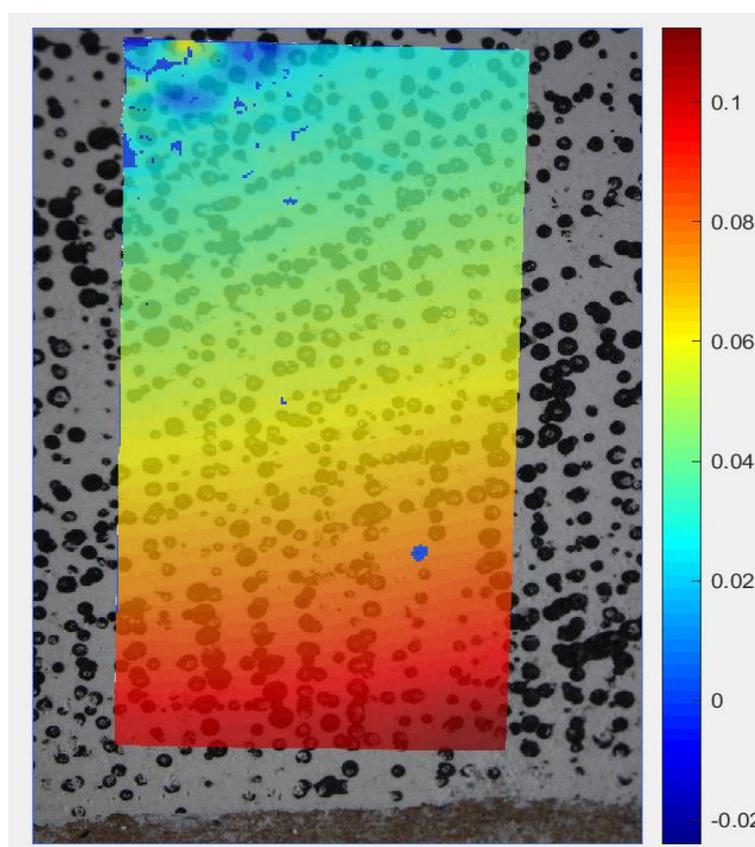
APÊNDICE B – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS EXPERIMENTAIS REF PELA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

Tabela 59 – Resultados do processamento das amostras experimentais REF pela
correlação de imagem digital

Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
167	10,4038	2500	114,442	20	348,00
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0,00E+00
1	46,41	10,40	0,042	0,000026014	0,00017588
2	50,93	20,81	0,083	0,00004955	0,00040451
3	51,87	31,21	0,125	0,000061186	0,00047319
4	52,97	41,62	0,166	0,000065118	0,000494
5	52,29	52,02	0,208	0,000060917	0,00047614
6	34,64	62,42	0,250	0,000045086	0,00041205
7	35,12	72,83	0,291	0,00004122	0,00040161
8	35,32	83,23	0,333	0,0000386	0,00038939
9	35,80	93,63	0,375	0,000040376	0,00037493
10	35,56	104,04	0,416	0,000040784	0,00034356
11	34,29	114,44	0,458	0,00010091	0,0043538
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0,00E+00	0
1	46,41	10,40	0,042	2,86E-05	-0,0001165
2	50,93	20,81	0,083	5,81E-05	-0,00021056
3	51,87	31,21	0,125	7,74E-05	-0,00023727
4	52,97	41,62	0,166	8,33E-05	-0,00017908
5	52,29	52,02	0,208	8,64E-05	-0,00012005
6	34,64	62,42	0,250	7,88E-05	-0,000093777
7	35,12	72,83	0,291	8,05E-05	-0,000072611
8	35,32	83,23	0,333	8,49E-05	-0,000039901
9	35,80	93,63	0,375	9,18E-05	-1,3293E-06
10	35,56	104,04	0,416	9,51E-05	4,5083E-06
11	34,29	114,44	0,458	1,71E-04	-0,0037606
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual

0	0	0,00	0,000	0	0
1	46,41	10,40	0,042	0,000034864	-0,0002565
2	50,93	20,81	0,083	0,00007295	-0,00041951
3	51,87	31,21	0,125	0,000099152	-0,00046328
4	52,97	41,62	0,166	0,0001109	-0,00030427
5	52,29	52,02	0,208	0,00012075	-0,00013082
6	34,64	62,42	0,250	0,00011996	-0,00023531
7	35,12	72,83	0,291	0,00012755	0,00012396
8	35,32	83,23	0,333	0,00013714	0,00021398
9	35,80	93,63	0,375	0,000149	0,00032314
10	35,56	104,04	0,416	0,00015663	0,00034714
11	34,29	114,44	0,458	0,00025083	-0,0074727

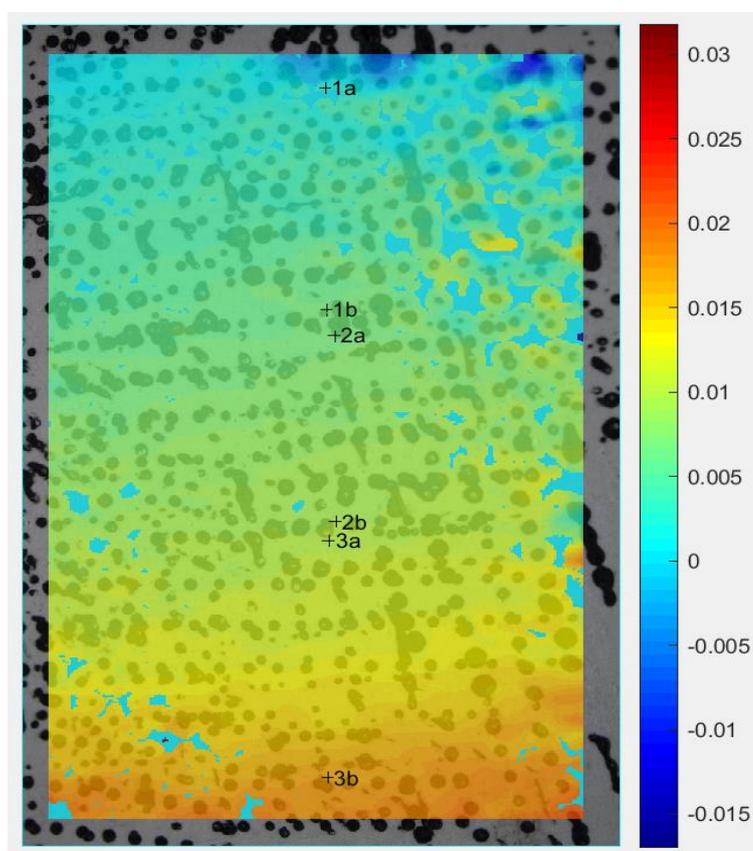
- Tempo de processamento = 7,7 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm ²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
168	10,21818182	2500	112,4	21	331,43
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	51,95	10,22	0,041	4,2246E-06	0,00016784
2	58,36	20,44	0,082	0,000013223	0,00021701
3	58,71	30,65	0,123	0,000022766	0,00053146
4	37,60	40,87	0,163	0,000031089	0,00025719
5	37,58	51,09	0,204	0,000036301	0,00014709
6	37,60	61,31	0,245	0,000044822	-0,000021081
7	37,53	71,53	0,286	0,000054954	-0,00021393
8	42,68	81,75	0,327	0,000058592	0,000015272
9	54,46	91,96	0,368	0,000069088	-0,00017798
10	56,69	102,18	0,409	0,000073818	0,000062036
11	55,90	112,40	0,450	0,000086172	-0,00022468
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	51,95	10,22	0,041	1,0416E-06	0,00001491
2	58,36	20,44	0,082	3,1163E-06	0,000058225
3	58,71	30,65	0,123	5,7846E-06	0,000093821
4	37,60	40,87	0,163	9,2595E-06	0,00014227
5	37,58	51,09	0,204	0,000010788	0,00016704
6	37,60	61,31	0,245	0,000013662	0,00023811
7	37,53	71,53	0,286	0,000016353	0,00031027
8	42,68	81,75	0,327	0,000017648	0,00033981
9	54,46	91,96	0,368	0,000020506	0,00041301
10	56,69	102,18	0,409	0,000022799	0,00044285
11	55,90	112,40	0,450	0,000025757	0,00051392
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0,000	0	0
1	51,95	10,22	0,041	1,7883E-06	0,000014413
2	58,36	20,44	0,082	5,8432E-06	0,000036323
3	58,71	30,65	0,123	0,000010192	0,00005875
4	37,60	40,87	0,163	0,000014991	0,000085981
5	37,58	51,09	0,204	0,000017371	0,0001004
6	37,60	61,31	0,245	0,000021719	0,00013506

7	37,53	71,53	0,286	0,00002582	0,00017386
8	42,68	81,75	0,327	0,000027999	0,00019085
9	54,46	91,96	0,368	0,000031895	0,00022578
10	56,69	102,18	0,409	0,000035143	0,00024722
11	55,90	112,40	0,450	0,000039291	0,00028023

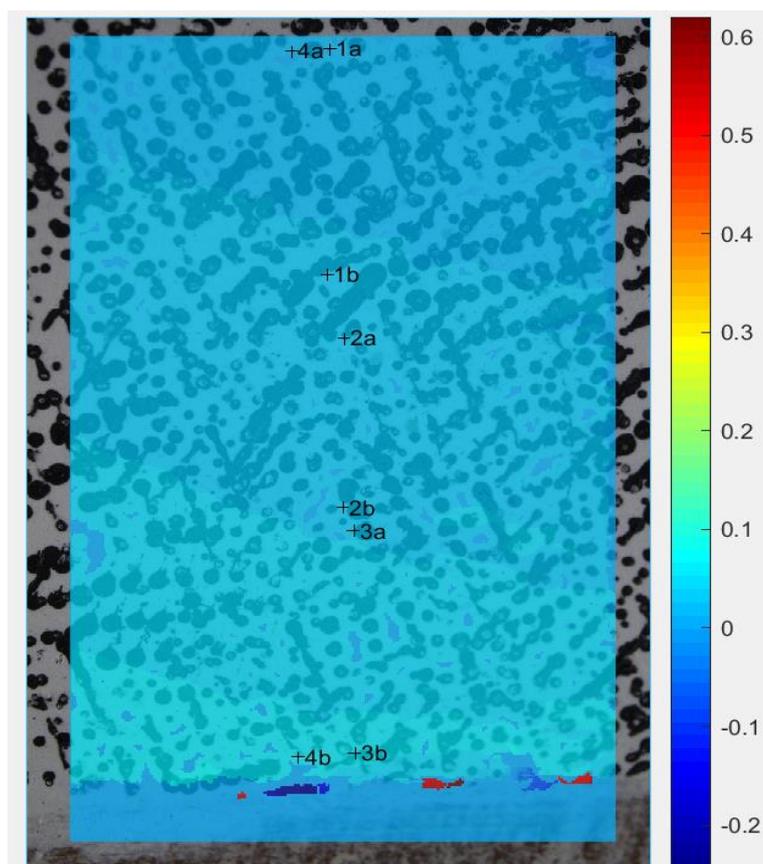
- Tempo de processamento = 8,82 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
169	10,31090909	2500	113,42	24	290,00
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0	0
1	46,41	10,31	0,041	0,000010068	0,00064742
2	50,93	20,62	0,082	0,000030758	0,001024
3	51,87	30,93	0,124	0,000046759	0,001194
4	52,97	41,24	0,165	0,000060368	0,0012252
5	52,29	51,55	0,206	0,000070192	0,001037
6	34,64	61,87	0,247	0,000075403	0,0011548
7	35,12	72,18	0,289	0,000079699	0,0015499
8	35,32	82,49	0,330	0,000085896	0,0023657
9	35,80	92,80	0,371	0,000094913	0,0033453
10	35,56	103,11	0,412	0,00010566	0,0041846
11	34,29	113,42	0,454	0,00013398	0,0056625
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0	0
1	46,41	10,31	0,041	0,000015194	0,0013428
2	50,93	20,62	0,082	0,000040647	0,003062
3	51,87	30,93	0,124	0,000059606	0,0044978
4	52,97	41,24	0,165	0,000073847	0,0056804
5	52,29	51,55	0,206	0,000083313	0,0058239
6	34,64	61,87	0,247	0,000086874	0,0054895
7	35,12	72,18	0,289	0,000088736	0,0058733
8	35,32	82,49	0,330	0,000089953	0,0067986
9	35,80	92,80	0,371	0,000093553	0,0084152
10	35,56	103,11	0,412	0,000099765	1,01E-02
11	34,29	113,42	0,454	0,00011567	0,014336
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0	0
1	46,41	10,31	0,041	0,000018824	-0,001757
2	50,93	20,62	0,082	0,000050036	-0,0038798
3	51,87	30,93	0,124	0,000073772	-0,0056487
4	52,97	41,24	0,165	0,000092781	-0,0071399
5	52,29	51,55	0,206	0,00010606	-0,0072513
6	34,64	61,87	0,247	0,00011311	-0,0068432

7	35,12	72,18	0,289	0,00011852	-0,0074248
8	35,32	82,49	0,330	0,00012323	-0,0086623
9	35,80	92,80	0,371	0,00012996	-0,010609
10	35,56	103,11	0,412	0,00013845	-0,012872
11	34,29	113,42	0,454	0,00015753	-0,018206

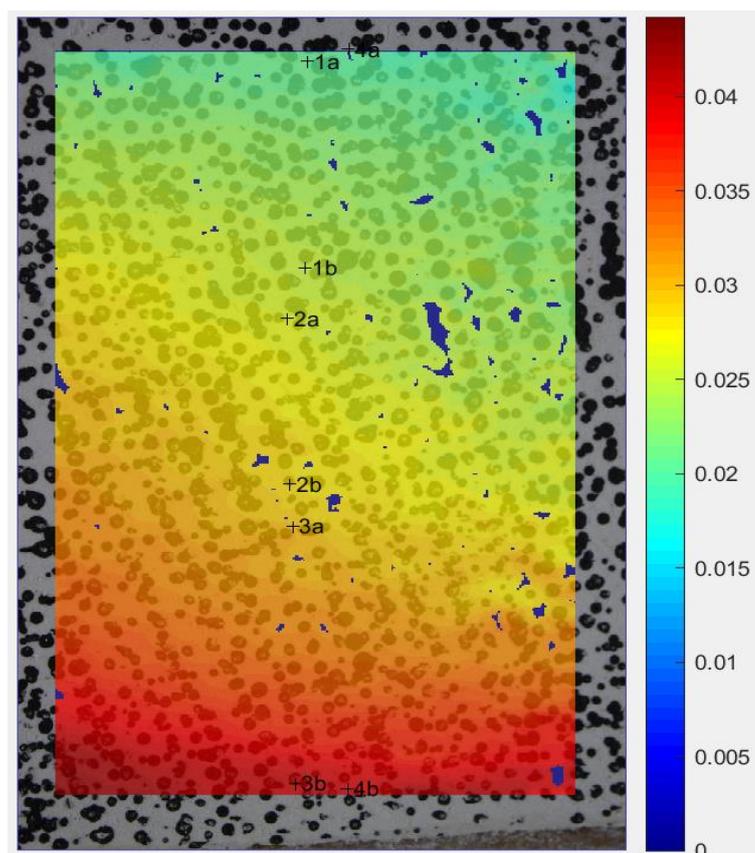
- Tempo de processamento = 7,75 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
170	3,825636364	2500	42,082	21,5	323,72
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0,00	0,00	0	0	0
1	32,20	3,83	0,015	8,8878E-06	-4,8971E-06
2	39,19	7,65	0,031	0,000018021	-0,00015636
3	32,26	11,48	0,046	0,000022968	-0,00010672
4	32,46	15,30	0,061	0,00002918	-0,00017759
5	34,21	19,13	0,077	0,000034501	-0,0003775
6	34,55	22,95	0,092	0,000043129	-0,00044989
7	34,77	26,78	0,107	0,000051856	-0,0007359
8	34,57	30,61	0,122	0,000057957	-0,00087689
9	32,72	34,43	0,138	0,000063613	-0,00099306
10	45,86	38,26	0,153	0,000067693	-0,0011086
11	51,25	42,08	0,168	0,000071177	-0,0011864
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0,00	0,00	0	0	0
1	32,20	3,83	0,015	0,000010651	0,00002484
2	39,19	7,65	0,031	0,000021416	0,00019185
3	32,26	11,48	0,046	0,000027891	0,00018565
4	32,46	15,30	0,061	0,000035815	0,00031146
5	34,21	19,13	0,077	0,000041762	0,00053147
6	34,55	22,95	0,092	0,000052271	0,00063233
7	34,77	26,78	0,107	0,000062461	0,00090309
8	34,57	30,61	0,122	0,000070535	0,00106770
9	32,72	34,43	0,138	0,000076097	0,00117180
10	45,86	38,26	0,153	0,000080291	0,00127100
11	51,25	42,08	0,168	0,000083801	0,00134490
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0,00	0,00	0	0	0
1	32,20	3,83	0,015	0,000013511	0,000060083
2	39,19	7,65	0,031	0,000027337	0,00034891
3	32,26	11,48	0,046	0,000035478	0,00037134
4	32,46	15,30	0,061	0,000045768	0,00063266
5	34,21	19,13	0,077	0,000059402	0,0024522
6	34,55	22,95	0,092	0,000076155	0,0030889

7	34,77	26,78	0,107	0,000092171	0,0038663
8	34,57	30,61	0,122	0,000088791	0,0020333
9	32,72	34,43	0,138	0,000095101	0,0022012
10	45,86	38,26	0,153	0,00010019	0,0023616
11	51,25	42,08	0,168	0,00010419	0,0024742

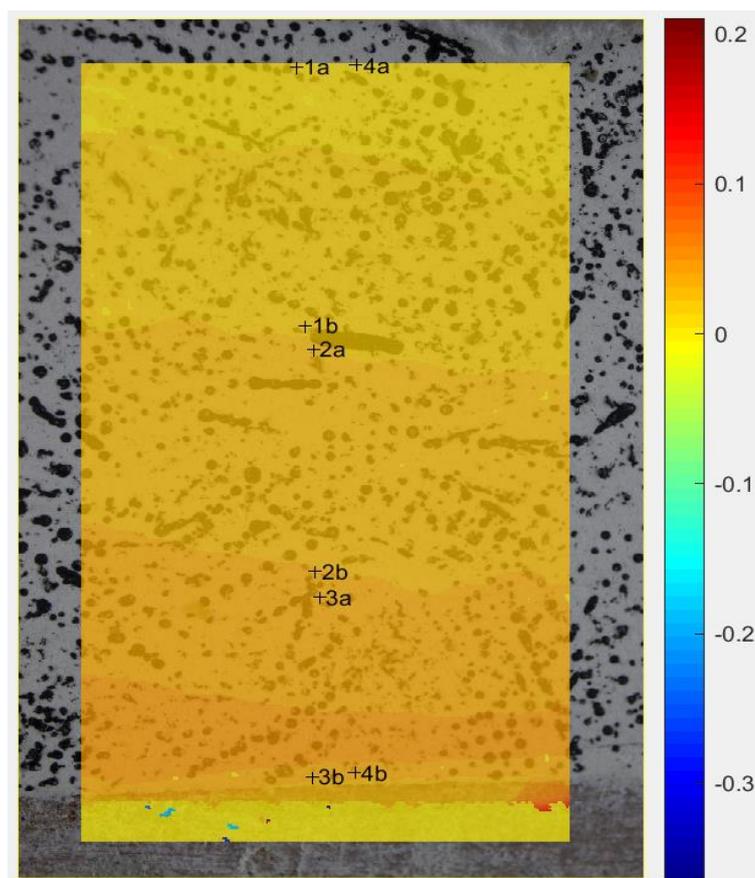
- Tempo de processamento = 6,73 horas



Nº Amostra	P/frame	Área (mm²)	P (kgf)	Altura Física (mm)	Relação(pixels/mm)
171	15,63845455	2500	172,023	22,3	312,11
Face externa					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0	0
1	39,23	15,64	0,063	0,000018965	0,00012207
2	44,43	31,28	0,125	0,000037347	0,00080077
3	45,91	46,92	0,188	0,000058243	0,0011003
4	29,18	62,55	0,250	0,000078122	0,00096827
5	29,16	78,19	0,313	0,00010272	0,00026862
6	28,99	93,83	0,375	0,00012413	7,8282E-06
7	28,84	109,47	0,438	0,00014545	-0,000119
8	28,83	125,11	0,500	0,00016848	-0,00038805
9	28,52	140,75	0,563	0,00018993	-0,00058529
10	28,23	156,38	0,626	0,00021264	-0,00084125
11	28,11	172,02	0,688	0,00023698	-0,00095839
Central					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0	0
1	39,23	15,64	0,063	0,000020584	0,00065353
2	44,43	31,28	0,125	0,000032479	0,00092128
3	45,91	46,92	0,188	0,000043712	0,0015151
4	29,18	62,55	0,250	0,000049296	0,0018469
5	29,16	78,19	0,313	0,000053084	0,0017231
6	28,99	93,83	0,375	0,000056033	0,0011799
7	28,84	109,47	0,438	0,000061169	0,0008026
8	28,83	125,11	0,500	0,000067412	0,00071977
9	28,52	140,75	0,563	0,000073846	0,00077414
10	28,23	156,38	0,626	0,000078984	0,00082942
11	28,11	172,02	0,688	0,000084986	0,00077906
Interface					
				Extensômetro na direção Vertical	
Frame	Custo Comput. (min.)	Pi (kgf)	σ (MPa)	ϵ_y (mm/mm) - Extensômetro Virtual	ϵ_x (mm/mm) - Extensômetro Virtual
0	0	0,00	0	0	0
1	39,23	15,64	0,063	0,000024863	-0,00013392
2	44,43	31,28	0,125	0,000041419	-0,00017603
3	45,91	46,92	0,188	0,00005625	-0,00029937
4	29,18	62,55	0,250	0,000065299	-0,00037015
5	29,16	78,19	0,313	0,000072538	-0,00033137
6	28,99	93,83	0,375	0,000079234	-0,00019357

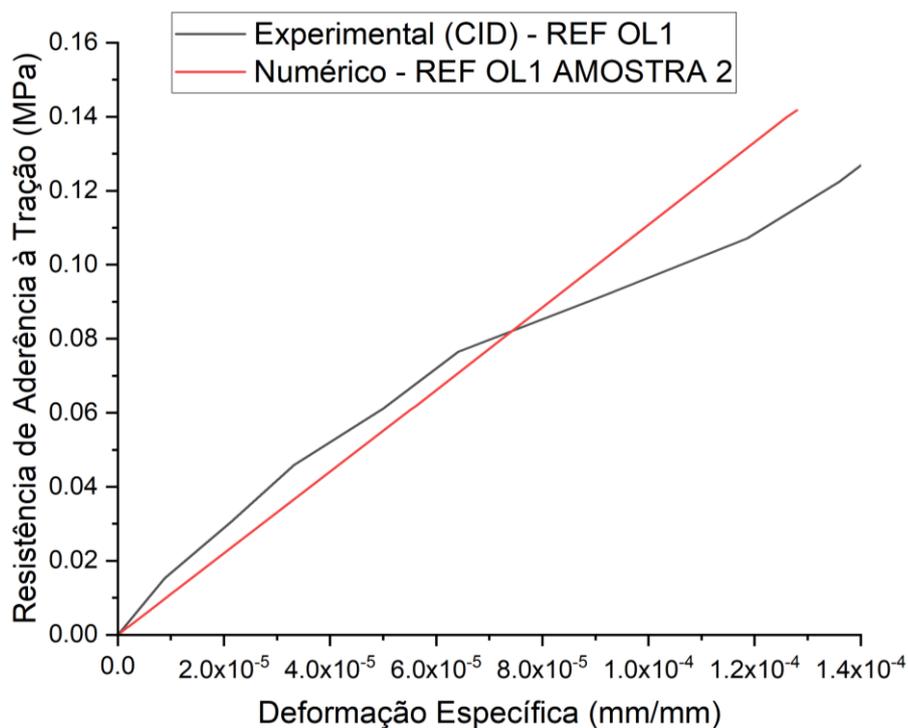
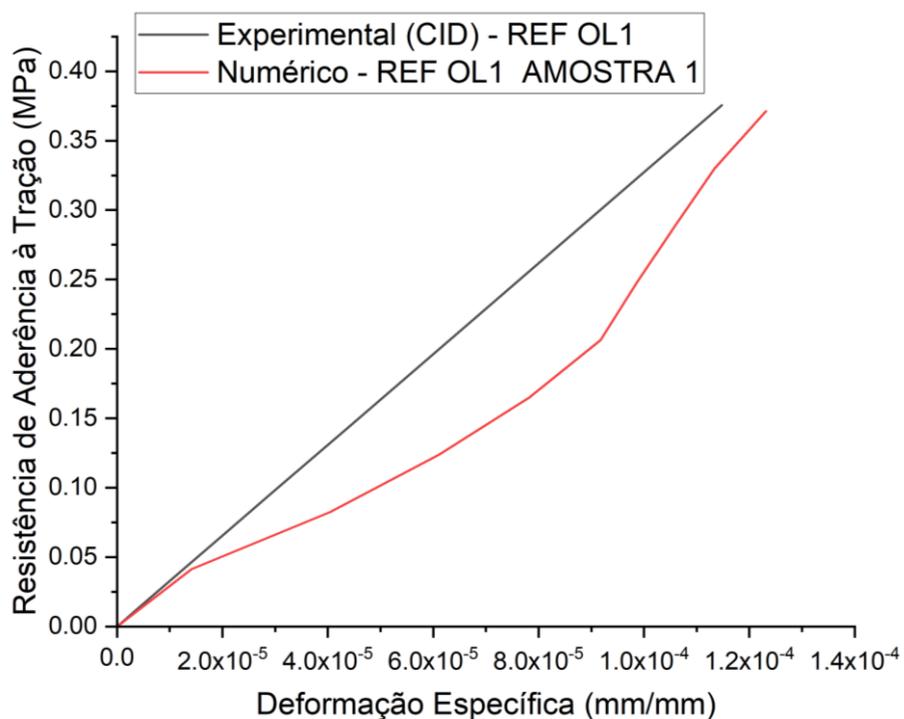
7	28,84	109,47	0,438	0,000087648	-0,00010212
8	28,83	125,11	0,500	0,000097032	-0,000068202
9	28,52	140,75	0,563	0,0001064	-0,00008394
10	28,23	156,38	0,626	0,00011421	-0,000072428
11	28,11	172,02	0,688	0,00012279	-0,000040156

- Tempo de processamento = 5,99 horas



APÊNDICE C – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS EXPERIMENTAIS E OS MODELOS NUMÉRICOS

Figura C.1 – Resistência de aderência à tração experimental × numérico – REF OL1



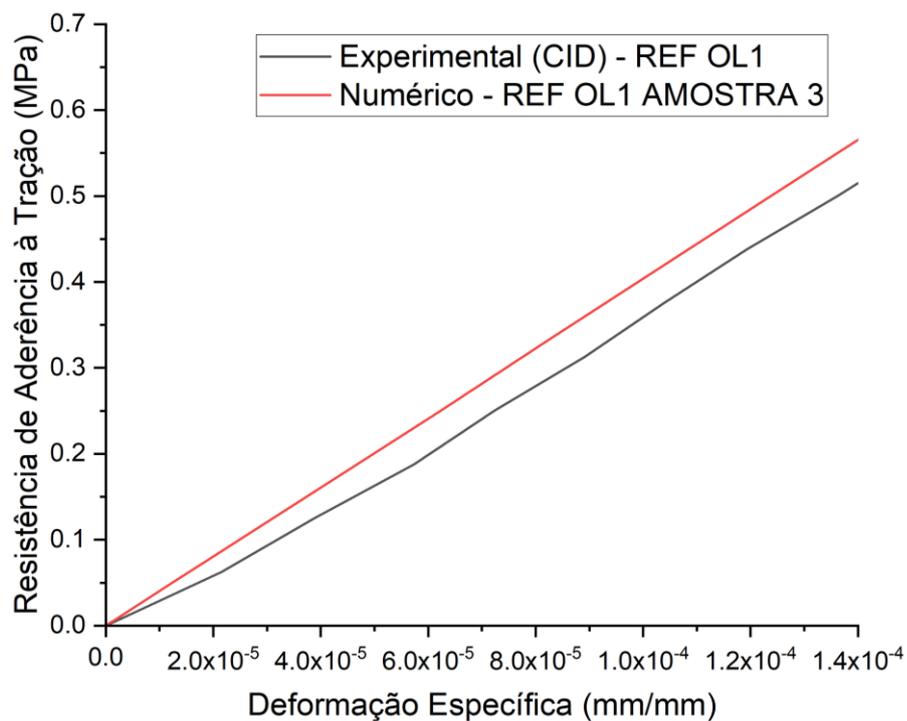
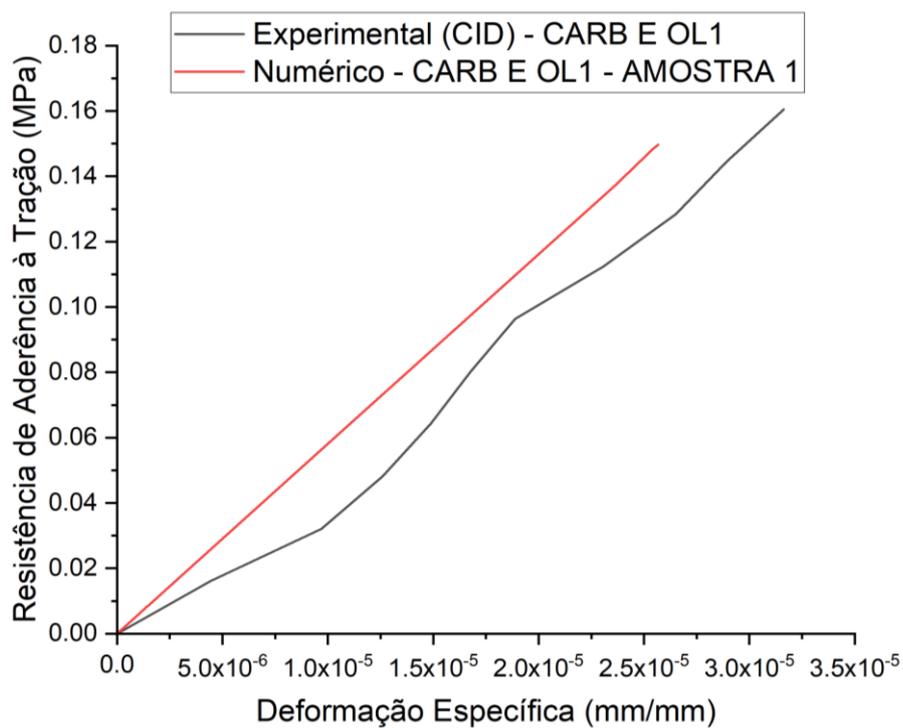
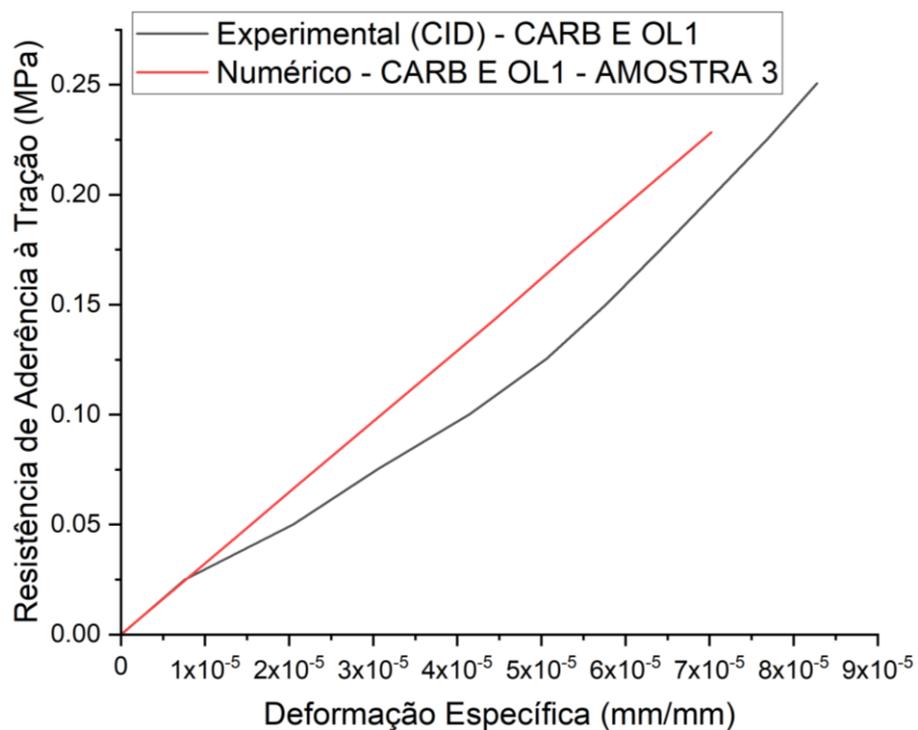
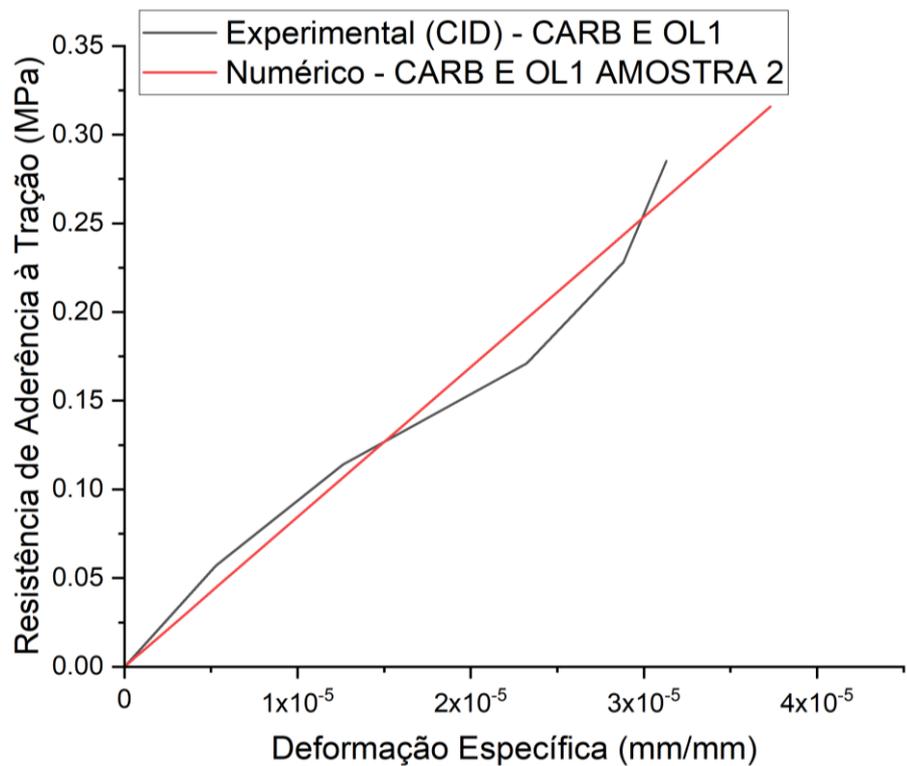


Figura C.2 – Resistência de aderência à tração experimental x numérico – CARB E OL1





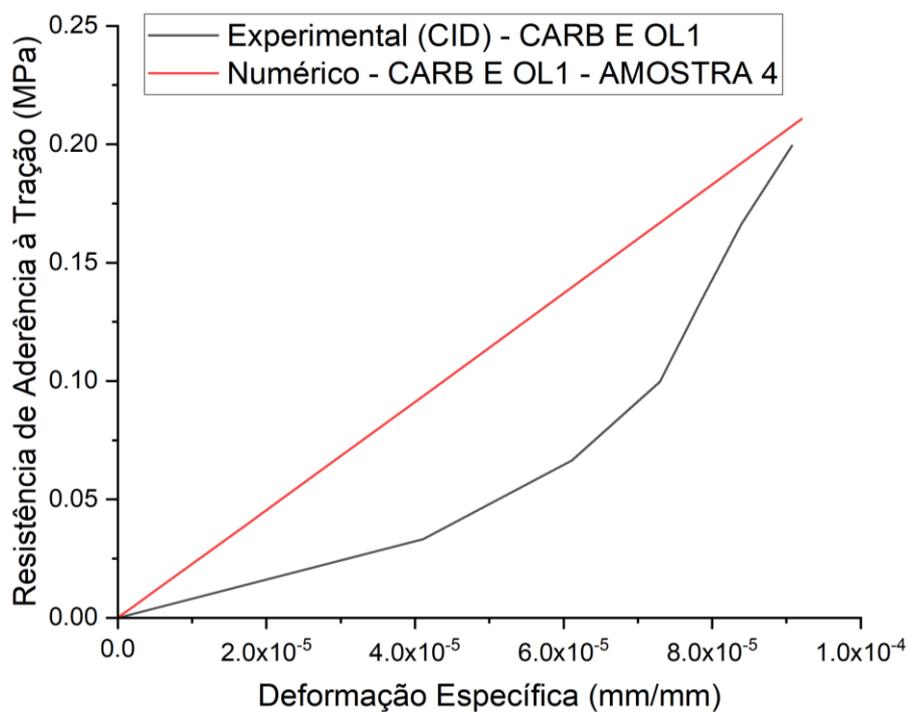


Figura C.3 – Resistência de aderência à tração experimental x numérico – CARB E OL2

