

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

DAIANA CRISTINA METZ ARNOLD

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA A ANÁLISE QUANTITATIVA DA
RUGOSIDADE DE SUBSTRATOS CERÂMICOS ARGILOSOS**

SÃO LEOPOLDO

2021

DAIANA CRISTINA METZ ARNOLD

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA A ANÁLISE QUANTITATIVA DA
RUGOSIDADE DE SUBSTRATOS CERÂMICOS ARGILOSOS**

Tese apresentada como requisito parcial
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

2021

A753d Arnold, Daiana Cristina Metz.

Desenvolvimento de método para a análise quantitativa da rugosidade de substratos cerâmicos argilosos / Daiana Cristina Metz Arnold. – 2021.

226 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

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

1. Rugosidade. 2. Área de contato. 3. Blocos cerâmicos. 4. Aderências. I. Título.

CDU 624

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

DAIANA CRISTINA METZ ARNOLD

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA A ANÁLISE QUANTITATIVA DA
RUGOSIDADE DE SUBSTRATOS CERÂMICOS ARGILOSOS**

Tese apresentada como requisito parcial
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

Aprovado em 26 de agosto de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Ângela Borges Mausero
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Dênis Jardim Villarinho
Universidade FEEVALE (FEEVALE)

Prof^a. Dr^a. Helena Carasek
Universidade Federal de Goiás (UFG)

Prof. Dr. Maurício Mancio
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

AGRADECIMENTO À CAPES

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



Dedico este estudo à minha família, que foi a maior incentivadora na realização desta pesquisa, em especial, ao meu esposo Rafael Arnold e às minhas filhas Laura Rafaela Metz Arnold e Helena Metz Arnold.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a **Deus**, ser supremo, no qual me apoiei nos momentos difíceis, busquei forças para superar os obstáculos.

Ao meu esposo, amigo e companheiro **Rafael Arnold** é em você onde busquei força, alegria e amor para seguir em frente. É você que me levantou nos momentos em que estava cansada física e mentalmente achando que não conseguiria concluir. Sempre me apoiando. Agradeço por ter me dado todo suporte necessário com as nossas filhas **Laura** e **Helena** em todas as etapas desse estudo. Amo muito você!

A toda a minha família que sempre acreditou na minha capacidade, em especial aos meus pais **Luiz Carlos Metz** e **Nelli Metz**, que nunca mediram esforços para me proporcionar a educação, sempre me dando apoio, principalmente cuidando das minhas filhas para que eu pudesse concluir esse trabalho. Se hoje sou a primeira da família em concluir o doutorado, e isso me orgulha muito, sou grata a vocês.

Durante todo o processo da elaboração deste trabalho, **muitas pessoas** se fizeram presentes dedicando momentos das suas vidas e contribuindo de alguma forma para a finalização da minha pesquisa, à estas pessoas dedico todos os meus agradecimentos.

Meu orientador professor **Dr.º Claudio de Souza Kazmierczak** que, apostou na minha capacidade para desenvolvimento do trabalho, esclareceu as dúvidas geradas no decorrer da pesquisa, disponibilizou do seu tempo para direcionar o meu foco principal. Compartilhou seus conhecimentos e desta forma orientou o caminho percorrido, facilitando minha compreensão, impulsionando a conclusão de toda minha pesquisa.

Professor **Dr.º Fernando Dal Pont Morisso**, Coordenador do Laboratório de Estudos Avançados em Materiais, da Universidade Feevale, que desprende o seu tempo para fazer as imagens e análises de microscopia eletrônica de varredura, e também o auxílio prestado na análise e interpretação dos resultados.

Ao Professor **Dr.º Joao Batista Mossmann**, Diretor Instituto de Ciências Criativas e Tecnológicas da Universidade Feevale, pelo auxílio na interpretação dos resultados e análise de dados de rugosidade, através de algoritmos computacionais e modelagens matemáticas.

Professor **Dr.º Carlos Pérez Bergmann** pelo auxílio nas definições dos parâmetros relacionados a argila como temperatura de queima e a interpretação da

microestrutura mineralógica dos blocos cerâmicos, sempre muito solícito e esclarecedor. Assim como, a Professora **Dr.^a Feliciane Andrade Brehm** que auxiliou em dúvidas relacionadas as propriedades químicas das argilas. Ao professor **Dr.^o Atilio Efrain Bica Grondona** pelo auxílio no desenvolvimento dos parâmetros e análise estatística dos dados.

Aos colegas de pesquisa integrada de teses, **Leandro Tonietto e Valeria de Oliveira**, que auxiliaram de forma intensa na redação, interpretação e análises de resultados, possibilitando a publicação do trabalho, antes mesmo da defesa.

Ao laboratorista do Laboratório de Metrologia da Unisinos, **Victor Silva da Costa**, pelo desenvolvimento dos ensaios de rugosidade com a utilização do perfilômetro 3D, mesmo em época de pandemia, desprendeu o seu tempo e sua dedicação para realização das tarefas com êxito. Ao **Lauro Rosa**, laboratorista do laboratório de Laminação da Unisinos, pelo corte das amostras para ensaios de microscopias, que no período de pandemia, saiu do seu lar, para realizar essa tarefa. A mestranda **Monique Lunardi** pelas análises de microscopia de força atômica e auxílio na interpretação dos resultados, sempre extremamente prestativa.

As alunas voluntárias do Centro de Construções Sustentáveis da Universidade Feevale, **Letícia Lange, Letícia Andreolli Dias, Tayná Thomaz Guterres, Eliane Eliane Cavalheiro, Nicole Xue Fillmann e Paula Fleck Killing** pelo auxílio nos ensaios de rugosidade com o uso do rugosímetro 2D, caracterização geométrica, física e mecânica dos blocos cerâmicos e criação de imagens utilizadas no estudo.

Aos colegas da Oficina Tecnológica da Universidade Feevale, que disponibilizaram o seu tempo e vontade, me auxiliando de maneira direta na pesquisa. **Jorge Rogerio Nobles Orba e Julia Mathyna Rodrigues Carpes** que deram todo o suporte na utilização do equipamento rugosímetro 2D.

Agradeço aos fornecedores dos materiais utilizados nos ensaios. **Pauluzzi Blocos Cerâmicos, Olaria Diehl Irmãos, Cerâmica Ritter, Cepazzi Produtos Cerâmicos e Construrohr** que forneceram os blocos cerâmicos para realização da pesquisa.

As colegas de doutorado e amigas, **Angélica Koppe e Bárbara Jordani** que no decorrer desses quatro anos estivemos juntas e buscando auxílio psicológico uma na outra para finalização de cada etapa. Aos colegas **José Ernesto de Azevedo Nadalon e Adriana Tersinha da Silva Dutra** por toda a ajuda desprendida no estudo. A **todos** que de alguma forma fizeram parte desta etapa da minha vida.

RESUMO

A diversificação dos materiais utilizados como substratos na Construção Civil dificulta a padronização dos sistemas construtivos, elevando a probabilidade de ocorrência de manifestações patológicas. Um exemplo disso são os deslocamentos de revestimentos. A variabilidade da textura superficial, assim como a reologia da argamassa utilizada são fatores que influenciam diretamente na falta de aderência dos sistemas de revestimento. Neste contexto, a indústria da construção civil normalmente analisa seus materiais quanto a macroestrutura, desconhecendo a microestrutura da superfície. Neste cenário, a presente pesquisa desenvolveu um método quantitativo para análise de rugosidade de blocos cerâmicos a nível microestrutural. E como resultados, aponta que o material constituinte e a temperatura de queima influenciam na rugosidade e na área de contato dos substratos cerâmicos. O método de aquisição de dados em 3D é mais eficiente do que o método 2D na caracterização de rugosidade de blocos cerâmicos. O método desenvolvido permite a localização e níveis de detalhes precisos para avaliação dos coeficientes de rugosidade de superfícies e facilita a análise comparativa entre diferentes superfícies de blocos cerâmicos, com dados qualitativos e quantitativos. A rugosidade média, como fator único de análise, não pode ser utilizada para determinar a aderência entre o substrato de blocos cerâmicos e a argamassa, visto que a área de contato e a reologia da argamassa também irão influenciar neste parâmetro. A aplicação do método indicou que um mesmo material adotado como substrato pode apresentar variação significativa de rugosidade e área de contato, que irão interferir diretamente na aderência entre o bloco cerâmico e a matriz cimentícia. Após a análise multiescalar com os métodos para análise de medição de blocos cerâmicos conclui-se que a rugosidade deve ser analisada com equipamentos que permitam as medições entre $0,025\mu\text{m}$ e $0,50\mu\text{m}$. O método para determinação de rugosidade de blocos cerâmicos proposto neste estudo, com aquisição de dados pelo perfilômetro 3D, é adequado para a avaliação da rugosidade de um substrato cerâmico, sendo possível o mapeamento da superfície, a reprodução dos dados e a classificação da rugosidade do substrato cerâmico.

Palavras-chave: Rugosidade. Área de contato. Blocos cerâmicos. Aderência

ABSTRACT

The diversification of materials used as substrates in Civil Construction hinders the standardization of building systems, increasing the probability of pathological manifestations. An example of this is the detachment of coatings. The variability of the surface texture, as well as the rheology of the mortar used are factors that directly influence the lack of adhesion of the coating systems. In this context, the construction industry usually analyzes its materials regarding the macrostructure, not knowing the microstructure of the surface. In this context, the present research developed a quantitative method to analyze the microstructural roughness of ceramic blocks. And as results, it points out that the constituent material and burning temperature influence the roughness and contact area of ceramic substrates. The 3D data acquisition method is more efficient than the 2D method in roughness characterization of ceramic blocks. The developed method allows precise location and detail levels for evaluation of surface roughness coefficients and facilitates the comparative analysis among different ceramic block surfaces with qualitative and quantitative data. The average roughness, as a single factor of analysis, can not be used to determine the adherence between the ceramic block substrate and the mortar, since the contact area and the rheology of the mortar will also influence this parameter. The application of the method indicated that the same material adopted as substrate can present significant variation of roughness and contact area, which will directly interfere in the adherence between the ceramic block and the cementitious matrix. After the multiscale analysis with the methods for measurement analysis of ceramic blocks it is concluded that the roughness must be analyzed with equipment that allows the measurements between $0,025\mu\text{m}$ and $0,50\mu\text{m}$. The method for roughness determination of ceramic blocks proposed in this study, with data acquisition by 3D profilometer, is appropriate for the evaluation of the roughness of a ceramic substrate, being possible the mapping of the surface, the reproduction of the data and the classification of the roughness of the ceramic substrate.

Keywords: Roughness. Contact area. Ceramic blocks. Adherence

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores influentes no mecanismo de adesão	29
Figura 2 - Ângulos de Molhabilidade - (a) $\theta > 90^\circ$, Indica a Não-Molhabilidade, (b) $\theta < 90^\circ$, Indica Molhabilidade.....	31
Figura 3 - Comportamento do Líquido sobre Superfície Rugosa - (a) Líquido em Contato Total com a Superfície com Picos Pouco Elevados; (b) Bolsões de Ar sob o Líquido.....	32
Figura 4 - Composição de superfícies.....	36
Figura 5 - Perfil com a demonstração da R_a	39
Figura 6 - Perfis com a mesma R_a	40
Figura 7 - Perfil com a demonstração da R_y e $R_{máx}$	41
Figura 8 - Perfil com a demonstração da R_p e R_v	41
Figura 9 - Perfil obtido por um rugosímetro 2D	47
Figura 10 - Representação gráfica do <i>sand patch test</i>	48
Figura 11 - Representação gráfica do <i>Slit-Island</i>	49
Figura 12- Representação gráfica do medidor Digital de Rugosidade da Superfície	50
Figura 13 - Representação gráfica do perfilômetro a laser.....	52
Figura 14 - Definição escalar de rugosidade, erro de forma e ondulação para blocos cerâmicos	66
Figura 15 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no programa experimental.....	69
Figura 16 - Fluxo da caracterização e obtenção dos substratos cerâmicos	74
Figura 17 - Diferença de tonalidade entre os blocos cerâmicos sinterizados em diferentes temperaturas, (a) blocos de 700°C e (b) blocos de 1000°C	75
Figura 18 - Processo geral para realização das medições.....	80
Figura 19 - Processo de leitura de dados no rugosímetro 2D	81
Figura 20 - Processo de cálculo da rugosidade em amostras de dados 2D.....	82
Figura 21 - R_a calculado para diferentes níveis da <i>quadtree</i> de superfície. Em (a) R_a no 2º nível da <i>quadtree</i> , (b) R_a no 3º nível da <i>quadtree</i> e (c) R_a no 4º nível da <i>quadtree</i>	84
Figura 22 - Assinatura da rugosidade 2D de uma área de 10mm x 10mm gerada pelo método apresentado na ETAPA 1, com média e desvio padrão por linha e por coluna	85

Figura 23 - Processo de preparação dos blocos cerâmicos para aquisição dos dados no perfilômetro 3D	90
Figura 24 - Planos calculados sobre uma mesma nuvem de pontos. Em (a) o plano médio calculado com o método proposto na ETAPA 1 e no artigo Tonietto <i>et al.</i> (2019). Em (b) os planos com os ajustes da geometria da amostra	91
Figura 25 - Fluxo do processo para cálculo dos planos de ajuste para cada local da superfície, em todos os níveis de divisão hierárquica	92
Figura 26 - Componentes principais computados para um conjunto de pontos (a) e (b) cálculo de distância do ponto ao plano	93
Figura 27 - Processo geral para computação de áreas de vales	95
Figura 28 - Classificação das regiões de área de vale	96
Figura 29 - Classificação das regiões de área de vale	97
Figura 30 - Processo de preparação e caracterização dos substratos cerâmicos	99
Figura 31 - Posicionamento do gabarito sobre o bloco cerâmico e identificação da área de medição de rugosidade	100
Figura 32 - MEV das amostras de 700°C e 1000°C (a) Amostra de 700°C e 1000°C com ampliação de 6.000x e (b) Amostra de 700°C e 1000°C com ampliação de 10.000x	104
Figura 33 - Fluxo do processo de preparação dos substratos	106
Figura 34 - Fluxo do processo de leitura de dados	107
Figura 35 - Dispositivo criado para nivelamento e leitura de dados dos substratos: a) caixa de areia e b) dispositivo com substrato cerâmico	110
Figura 36 - Fluxo do processo computacional de cálculo dos coeficientes de rugosidade.....	111
Figura 37 - Plano de ajuste (em vermelho) calculado em uma nuvem de pontos (em preto).....	112
Figura 38 - Subdivisão espacial hierárquica da <i>quadtree</i> : a) superfície original, b) primeira subdivisão, c) segunda subdivisão e d) terceira subdivisão	114
Figura 39 - Processo para cálculo de ferramentas de avaliação e análise de coeficientes de rugosidade.....	115
Figura 40 - Exemplo de código de rugosidade superficial (assinatura).....	117
Figura 41 - Exemplo de avaliação de rugosidade de superfície	118
Figura 42 - Versão reduzida da assinatura de rugosidade para os níveis da <i>quadtree</i> dos diferentes substratos cerâmicos	120

Figura 43 - Versão reduzida da assinatura de rugosidade para os níveis da <i>quadtree</i> dos diferentes substratos cerâmicos	122
Figura 44 - Resultados das assinaturas de rugosidade para cada superfície a 700°C	123
Figura 45 - Resultados das assinaturas de rugosidade para cada superfície a 1000°C	124
Figura 46 - Assinatura da rugosidade de uma área de 10mm x 10mm gerada pelo método apresentado na ETAPA 1 do estudo, com média e desvio padrão por linha e por coluna.....	126
Figura 47 - Representação da orientação da aquisição dos dados pelo método 2D	127
Figura 48 - Comparação dos métodos 2D e 3D dentro dos níveis de valores de R_a	134
Figura 49 - Resultados que demonstram as áreas calculadas para cada substrato. Em (a) substrato da olaria 1, em (b) substrato da olaria 2, em (c) substrato da	136
Figura 50 - Distribuição dos valores por R_{aavg} e R_{vm} por ΔT . Em (a) distribuição de R_{aavg} em relação ΔT e (b) distribuição de R_{aavg} em relação a ΔT	155
Figura 51 - Distribuição dos valores por R_a e por ΔT . Em (a), (b), (c), (d) e (e) valores de uma olaria em destaque, respectivamente, 1, 2, 4, 5 e 3	157
Figura 52 - Distribuição dos valores de R_{aavg} por Olarias. Em (a) dispersão de todas as olarias, (b), (c), (d), (e) e (f) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5.....	160
Figura 53 - Análise de correlação linear entre R_a e R_{pm} das superfícies de 1,5625mm ² de cada bloco cerâmico, das diferentes olarias.....	162
Figura 54 - a) Análise de correlação linear e (b) visualização comportamental entre R_a e R_{pm} dos blocos cerâmicos, das diferentes olarias.....	165
Figura 55 - Dispersão entre R_{pm} e R_{aavg} médio de todos os blocos de cada olaria. Em (a),(b), (c), (d) e (e) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5	166
Figura 56 - Análise de correlação linear entre R_a e R_{vm} das superfícies de 1,5625mm ² de cada bloco cerâmico, das diferentes olarias.....	168
Figura 57 - (a) Análise de correlação linear e (b) comportamental entre R_a e R_{vm} dos blocos cerâmicos, das diferentes olarias	171

Figura 58 - Dispersão entre R_{vm} e R_{aavg} médio de todos os blocos de cada olaria. Em (a),(b), (c), (d) e (e) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5	172
Figura 59 - Análise de dispersão através de quadrantes para todos os blocos cerâmicos de todas olarias, correlação entre R_a e Δ_{avg}	173
Figura 60 - Dispersão através de quadrantes entre R_a e Δ_{avg} de todos os blocos de cada olaria. Em (a),(b), (c), (d) e (e) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5.....	175
Figura 61 - Mapa de cores das superfícies dos blocos cerâmicos relação entre Δ_{avg} e Z.....	177
Figura 62 - Análise comparativa entre as imagens obtidas por MEV e as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser, das diferentes olarias.....	181
Figura 63 - Imagens da superfície dos blocos das diferentes olarias através do MEV	184
Figura 64 - Dispersão através de quadrantes entre R_a e Δ_{avg} de todos os blocos de cada olaria (a). Em (b),(c), (d), (e) e (f) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5.....	188
Figura 65 - Dispersão através de quadrantes entre R_{vm} e Δ_{avg} de todos os blocos de cada olaria (a). Em (b),(c), (d), (e) e (f) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5.....	191
Figura 66 - Análise comparativa entre as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser e MFA, e as imagens de MEV das diferentes olarias.....	195
Figura 67 - Proposta de método de medição de rugosidade para blocos cerâmicos	204

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados de estudos já realizados.....	63
Quadro 2 - Classificação multiescalar de blocos cerâmicos.....	201

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da rugosidade R_a	37
Tabela 2 - Equações para cálculo de parâmetros de rugosidade	42
Tabela 3 - Características dos métodos de medição de rugosidade	55
Tabela 4 - Descrição das olarias e dos procedimentos de produção dos blocos cerâmicos	87
Tabela 5 - Dados dos compostos químicos obtidos pelas técnicas de FRX	88
Tabela 6 - Desvio padrão dos dados 2D R_a	127
Tabela 7 - Resultados do teste F	129
Tabela 8 - R_a médio de dados 3D e 2D	131
Tabela 9 - Resultados do teste Z, comparando os dados médios de amostras 2D e 3D	132
Tabela 10 - Intervalos para agrupar valores de R_a	133
Tabela 11 - Valores de R_a agrupados por método e faixa de valor.....	134
Tabela 12 - Valores Δ_{avg} , Δ_T e $\Delta_{T\ avg}$ dos substratos de cada uma das cinco olarias	137
Tabela 13 - Valor de médias de área de lagos dos substratos cerâmicos para os blocos 01 a 10 das 5 diferentes olarias.....	138
Tabela 14 - Resultado do teste-Z para os dados de média de área (Δ_{avg}).....	141
Tabela 15 - Média e desvio-padrão dos índices de área de vales (Δ_T)	142
Tabela 16 - Índice de área de vales (Δ_T) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica o índice de área de vales, e a cor classifica os índices desde o menor Δ_T (em azul claro) até o maior Δ_T (em azul escuro)	143
Tabela 17 - Níveis para agrupamento de valores de Δ_T	146
Tabela 18 - Distribuição percentual de valores de Δ_T por olaria e por faixa de representação. As linhas estão ordenadas pela média de Δ_T da olaria	147
Tabela 19 - Rugosidade média (R_{aavg}) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica a Rugosidade média, e a cor classifica os índices desde o menor R_{aavg} (em verde claro) até o maior R_{aavg} (em verde escuro).....	148
Tabela 20 - Média e desvio-padrão da rugosidade média (R_{aavg}) dos substratos ...	152
Tabela 21 - Níveis para agrupamento de valores de R_{aavg}	153

Tabela 22 - Níveis para agrupamento de valores de R_{aavg} e as linhas estão ordenadas pela média (R_{aavg})	153
Tabela 23 - Coeficientes de variação R_{aavg} vs Δ_T e R_{vm} vs Δ_T	156
Tabela 24 - Coeficiente de variação do R_{aavg} das olarias	161
Tabela 25 - Coeficiente de variação do R_{pm} em relação ao R_{aavg} das olarias	167
Tabela 26 - Coeficiente de variação do R_a em relação ao Δ_{avg} das olarias	174
Tabela 27 - Rugosidade média (R_{aavg}) de todas as amostras, com escala do menor (em branco) até o maior (em verde mais escuro) R_{aavg}	186
Tabela 28 - Níveis para agrupamento de valores de R_{aavg}	187
Tabela 29 - Níveis para agrupamento de valores de R_{aavg} e as linhas estão ordenadas pela média (R_{aavg})	187
Tabela 30 - Valores de R_a e Δ_{avg} das diferentes olarias calculados com os diferentes métodos de aquisição de dados perfilometria 3D e MFA.....	190
Tabela 31 - Valores de R_{vm} e Δ_{avg} das diferentes olarias calculados com os diferentes métodos de aquisição de dados perfilometria 3D e MFA.....	193

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E HIPÓTESES	23
1.2 OBJETIVOS	23
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.2.2 Objetivos Específicos	24
1.3 JUSTIFICATIVA.....	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1 ADERÊNCIA	27
2.1.1 Mecanismos de Adesão	28
2.1.1.1 Influência da Rugosidade na Adesão Mecânica entre Argamassa e Substrato.....	30
2.1.2 Estudos sobre Aderência	32
2.2 RUGOSIDADE.....	35
2.2.1 Parâmetros de Rugosidade	39
2.2.2 Métodos para Análise da Rugosidade	43
2.2.2.1 Métodos com contato	46
2.2.2.2 Métodos sem contato	49
2.2.3 Métodos de Medição de Rugosidade Utilizados para Avaliação de Substratos	55
2.2.3.1 Perfilômetro 3D	56
2.2.3.2 Rugosímetro 2D	59
2.2.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	60
2.2.3.4 Microscopia de Força Atômica	61
2.3 RUGOSIDADE DE SUBSTRATOS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	64
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	70
3.2 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	73
3.2.1 ESTUDO PRELIMINAR: Delimitação da pesquisa	73
3.2.1.1 Caracterização e obtenção dos substratos cerâmicos.....	73

3.2.2 ETAPA 1: Método para medir rugosidade de superfícies de blocos cerâmicos.....	77
3.2.3 ETAPA 2: Método de aquisição de dados 2D e 3D para medição de rugosidade de blocos cerâmicos	78
3.2.4 ETAPA 3: Aplicação do método de análise tridimensional.....	86
3.2.4.1 Análises das superfícies para computação de planos	90
3.2.4.2 Cálculo das Áreas dos Vales.....	94
3.2.5 ETAPA 4: Caracterização multiescalar de rugosidade.....	98
3.2.5.1 Obtenção e Caracterização dos substratos cerâmicos.....	99
3.2.5.2 Determinação dos parâmetros de rugosidade.....	101
3.2.5.3 Criação de quatro diferentes níveis de rugosidade	101
3.2.5.4 Método para analisar rugosidade de blocos cerâmicos	102
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	103
4.1 ESTUDO PRELIMINAR: DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	103
4.1.1 Substrato Cerâmico.....	103
4.1.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura	103
4.2 ETAPA 1: MÉTODO PARA MEDIR RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES DE BLOCOS CERÂMICOS	105
4.2.1 Proposição do método de quantificação de rugosidade de superfícies de blocos cerâmicos.....	105
4.2.1.1 Processo de preparação dos substratos cerâmicos	105
4.2.1.2 Processo de leitura dos dados	106
4.2.1.3 Configurações e problemas relacionados à leitura dos dados	108
4.2.1.4 Processo de nivelamento do substrato cerâmico no equipamento.....	110
4.2.1.5 Definição dos critérios de cálculo para os parâmetros de rugosidade das superfícies.....	111
4.2.1.6 Cálculo do Plano de Adaptação	112
4.2.1.7 Cálculo dos Parâmetros de Rugosidade	113
4.2.1.8 Estrutura hierárquica para representação dos parâmetros de rugosidade.....	113
4.2.1.9 Cálculo dos parâmetros de rugosidade para as regiões da <i>quadtree</i>	114
4.2.1.10 Método para determinação do coeficiente de rugosidade de superfícies cerâmicas.....	115

4.2.1.11 Assinatura de rugosidade da superfície	116
4.2.1.12 Ferramentas complementares para avaliação de rugosidade.....	118
4.2.2 Resultados da aplicação do método proposto para substratos cerâmicos queimados em distintas temperaturas	119
4.2.3 Avaliação por nível de detalhe	121
4.2.4 Avaliação comparativa da rugosidade.....	123
4.3 ETAPA 2: MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE DADOS 2D E 3D PARA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE DE BLOCOS CERÂMICOS.....	125
4.4 ETAPA 3: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE TRIDIMENSIONAL	135
4.4.1 Análise das áreas média de vales	137
4.4.2 Comparativo de Índices de Área de Vales	142
4.4.3 Comparativo de R_{avg}	147
4.4.4 Comparativo entre Rugosidade Média, Rugosidade Média de Vale e Índice de Área de Vales	154
4.5 ETAPA 4: CARACTERIZAÇÃO MULTIESCALAR DE RUGOSIDADE.....	159
4.5.1 Estudo dos parâmetros de rugosidade analisados com o perfilômetro 3D.....	159
4.5.1.1 Análise estatística de correlação linear e dispersão da influência dos parâmetros de rugosidade.....	159
4.5.1.2 Análise estatística dos quadrantes para verificar a influência dos parâmetros de rugosidade nas superfícies.....	173
4.5.2 Parâmetros de rugosidade analisados a partir de captura de dados por meio de microscopia eletrônica de varredura - MEV	180
4.5.3 Parâmetros de rugosidade analisados a partir de aquisição de dados por meio de microscopia de força atômica - MFA	185
4.5.3.1 Comparativo de R_{avg} a partir de nuvem de pontos adquirida por MFA.....	186
4.5.3.2 Análise estatística dos quadrantes para verificar a influência dos parâmetros de rugosidade nas superfícies.....	188
4.5.3.3 Análise qualitativa e quantitativa através das assinaturas de rugosidade obtidas por perfilometria 3D e MFA	194
4.5.4 Caracterização multiescalar de rugosidade	200
4.5.5 Metodologia proposta para quantificação e classificação de rugosidade de blocos cerâmicos.....	203

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	206
5.1 ESTUDO PRELIMINAR	206
5.2 ETAPA 1..	206
5.3 ETAPA 2.	206
5.4 ETAPA 3..	209
5.5 ETAPA 4	210
5.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	211
REFERÊNCIAS.....	213

1 INTRODUÇÃO

A frequente ocorrência de manifestações patológicas em revestimentos, nos primeiros anos de uso do empreendimento, gera preocupações sobre a precariedade do sistema construtivo atual, exigindo novos estudos e a implantação de um programa de gestão de qualidade efetivo, já existente em outras indústrias mais desenvolvidas (MUNIZ, 2017; MELO *et al.* 2020).

Os deslocamentos de revestimentos, oriundos da falta de aderência entre substrato e matriz cimentícia, e as fissuras, são as principais manifestações patológicas encontradas nas edificações e são influenciadas por diversos fatores, como: substrato, argamassa, mão de obra, preparação da base, entre outros (CARASEK, 2010; THAMBOO; DHANASEKAR, 2015; VAZ; CARASEK, 2019; MELO *et al.* 2020).

Este cenário dificulta a elaboração de uma padronização do processo construtivo, então, para um estudo aprofundado, necessita-se obter o conhecimento dos fatores que influenciam esse processo, anteriormente ao estudo do sistema construtivo como um todo (LUNGISANSILU, 2015).

A variabilidade dos materiais utilizados como substratos na construção civil resulta na falta de padronização do sistema de revestimento, visto que cada superfície apresenta características de texturas superficiais distintas, devido aos seus constituintes e à forma de fabricação das mesmas (CONTARDI; CORNAGLIA; TARDITI, 2017).

Sabendo que nenhum material é totalmente liso, a rugosidade, que representa a morfologia microestrustral de cada superfície em que será aplicado o revestimento, apresenta importante influência no desempenho do sistema, já que as matrizes cimentícias do revestimento necessitam ser adotadas a partir da superfície em que serão aplicadas, quando a aderência entre o substrato e o revestimento for através de intertravamento mecânico (CONTARDI; CORNAGLIA; TARDITI, 2017).

. Então, se um material apresenta diferentes configurações de rugosidade, em tese, necessitaria de distintas matrizes cimentícias para cada tipo de rugosidade, visto que o intertravamento mecânico entre o revestimento e o substrato é diretamente influenciado pelas características de ambos os materiais (CONTARDI; CORNAGLIA; TARDITI, 2017).

Neste contexto, Santos e Júlio (2013) e Moreau, Roudet e Gentil (2014) buscaram meios de verificar a rugosidade das superfícies, resultando em métodos que podem ser classificados pela necessidade de contato ou não, tridimensionais ou bidimensionais, qualitativos ou quantitativos e, por fim, destrutivos e não destrutivos. Contudo, nenhum estudo é capaz de afirmar qual o método é ideal para a determinação de rugosidade das superfícies de blocos cerâmicos.

No entanto, sabe-se que para a caracterização precisa da microestrutura de substratos, o ideal seria o uso de um método tridimensional, quantitativo, sem contato e não destrutivo, por possibilitar a melhor visualização da rugosidade da superfície, que é constituída pelo conjunto de irregularidades compostas de picos e vales que caracterizam qualquer superfície, são imperfeições que ocorrem ao longo de sua topografia, sendo reentrâncias, fissuras ou ondulações, das quais irão classificar e determinar a utilização do material (SANTOS e JÚLIO, 2013).

Perez, Bissonnette e Courard (2009) indicam o uso de mais de um equipamento de medição para maior precisão dos resultados, adotando, por exemplo, um método bidimensional, com contato, e um tridimensional, sem contato, sendo possível análises comparativas entre os valores encontrados, para determinar o valor de rugosidade real da superfície. Outro ponto importante no estudo da rugosidade é a escala, pois quando menores a ampliação da escala de visualização a rugosidade pode ser considerada suave e ao se adotar escalas maiores, esta passa a apresentar superfície rugosa, já que as micro imperfeições ficam aparentes (MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014).

Dentro deste contexto, percebe-se que o estudo da rugosidade dos substratos é uma importante ferramenta para adoção do revestimento adequado para cada tipo de superfície. Nesse sentido, a busca pelo conhecimento da superfície dos materiais utilizados, como substrato na construção civil, é necessária para se implantar uma gestão de qualidade adequada, minimizando as manifestações patológicas nos revestimentos e possibilitando a evolução do setor (MUNIZ, 2017).

Partindo desta condição de pesquisa e focando nos substratos de blocos cerâmicos utilizados na construção civil, nota-se que as variações de rugosidades desses materiais afetam as propriedades de aderência entre a matriz cimentícia e o substrato, gerando manifestações patológicas que necessitam de novos estudos para sua prevenção. Porém, poucas pesquisas analisaram o quanto se difere a rugosidade entre blocos cerâmicos e até mesmo a variação desta em um mesmo material,

dificultando assim o conhecimento da real microestrutura da superfície em que os revestimentos serão aplicados.

As etapas elaboradas no programa experimental desta Tese, no que tange o estudo de rugosidade de substratos de blocos cerâmicos e aderência de revestimentos, estão em desenvolvimento, em conjunto com pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Unisinos (PPGEC), mais especificamente com o grupo de pesquisa em Materiais e Reciclagem (GMat) e também com o Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PPGCA). Em paralelo, e complementar a esta tese, foi realizada e defendida a Tese do aluno Leandro Tonietto, aprovada no dia 05/05/2021, intitulada como “Um novo método para avaliar os coeficientes de rugosidade e áreas de vale de superfícies adquiridas por scanner a laser”, em que o pesquisador desenvolveu um programa computacional para avaliar, de forma quantitativa, os dados obtidos no programa experimental do presente estudo (TONIETTO, 2021). E está em desenvolvimento a Tese da aluna Valeria de Oliveira Costa (OLIVEIRA; PRELO, 2021) que fará a validação dos resultados de rugosidade dos blocos cerâmicos obtidos neste estudo, através da aplicação de matrizes cimentícias sobre os blocos cerâmicos analisados na presente tese e analisará resistência de aderência entre os substratos e a matriz cimentícia. Como forma parcial de validação dos dados obtidos nessa pesquisa, foram publicados, no decorrer do trabalho, dois artigos¹².

Nessa lógica, analisando o estado da arte dos conceitos envolvidos e identificando as lacunas presentes nos métodos e processos relacionados à área de estudo da falta de aderência de materiais de revestimentos em superfícies no setor da construção civil, este trabalho tem como objetivo avaliar quantitativamente a rugosidade de substratos cerâmicos em 3D, através de um método que aborda medidas como picos, vales, picos médios, vales médios, rugosidade média e área de contato na definição e caracterização do material. Portanto, nesse estudo é analisada,

¹ Tonietto, L; Gonzaga, L; Veronez, M. R; Kazmierczak, C. S.; Arnold, D. C. M.; Costa, C. A. **New method for evaluating surface roughness parameters acquired by laser scanning**. Sci. Reports 9,15038 (2019). DOI 10.1038/s41598-019-51545-7.

² Arnold, D. C. M; Oliveira, V. C.; Kazmierczak, C. S.; Tonietto, L; Menegotto, C. W.; Gonzaga, L; Costa, C.A; Veronez, M. R; **A critical analysis of red ceramic blocks roughness estimation by 2d and 3d methods**. Remote. Sens.13 (2021). DOI 10.3390/rs13040789.

de forma quantitativa, com análise globais e locais, de forma inédita, a diferença de rugosidade entre blocos cerâmicos utilizados como substrato na construção civil.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E HIPÓTESES

A construção civil utiliza inúmeros materiais como substratos, sendo que existem diferenças de rugosidades entre cada um, afetando assim a propriedade de aderência entre substrato e revestimento. Nesse contexto, a presente pesquisa buscou viabilizar um programa experimental que avalie e responda as dúvidas a seguir:

Os blocos cerâmicos utilizados como substratos na construção civil apresentam diferenças de rugosidades em nível microestrutural?

De que forma é possível avaliar quantitativamente a rugosidade de um bloco cerâmico?

Com o objetivo de responder às questões elencadas no problema desta pesquisa, foram levantadas as seguintes hipóteses:

- Há variações significativas na rugosidade de blocos cerâmicos, obtidos a partir da mesma mistura argilosa entre blocos cerâmicos, sinterizados sob diferentes temperaturas;

- Distintas olarias apresentam blocos cerâmicos com diferentes rugosidades em suas superfícies.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente estudo serão apresentados separadamente, em objetivo geral do trabalho e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Objetivo geral deste trabalho é desenvolver um método para mapear e quantificar a rugosidade microestrutural da superfície de blocos cerâmicos, permitindo análises globais e locais do substrato.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos desta pesquisa, destacam-se:

- a) estabelecer os parâmetros para desenvolvimento do método de mensuração de rugosidade;
- b) quantificar a diferença de rugosidade na superfície de um mesmo bloco cerâmico;
- c) mensurar a diferença de rugosidade em único lote de produção de blocos cerâmicos;
- d) avaliar a diferença de rugosidade de blocos cerâmicos quando submetidos a diferentes temperaturas de queima;
- e) estimar a diferença de rugosidade entre blocos cerâmicos provenientes de diferentes misturas argilosas e ciclos de queima.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os engenheiros civis estão constantemente desenvolvendo pesquisas, com o intuito de analisar características microestruturais dos materiais empregados nas edificações. Assim, é fundamental a utilização de equipamentos para a leitura e indicação de comportamentos destes objetos, além disso, as ferramentas computacionais podem ser empregadas para o processamento – obtenção de informações – e visualização dos mesmos.

Uma característica alvo de estudos, recentemente, na Engenharia Civil, é a rugosidade dos materiais, comumente definida como a suavidade não geométrica de uma superfície (MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014). Na superfície de substratos cerâmicos, a rugosidade é estudada como motivadora de manifestações patológicas relacionadas à falta de aderência a revestimentos de argamassa, porém, os estudos, na área da Engenharia Civil, são incipientes e pouco conclusivos (DAPPER, 2013; STOLZ; MASUERO, 2015).

Na área de estudo da geografia, medidas de rugosidade são frequentemente usadas para identificar vegetação em modelos tridimensionais (3D) de terrenos (DORNINGER; PFEIFER, 2008). Na área da saúde, pesquisas no ramo odontológico utilizam a identificação da rugosidade do dente como parte do estudo da aderência de

materiais (MARSHALL *et al.*, 2010). Na Engenharia Mecânica, são utilizados rugosímetros bidimensionais e tridimensionais para análise de superfícies de diferentes materiais, com a finalidade principal de avaliar o atrito entre peças.

Percebe-se que, nas demais áreas de atuação, as medidas microestruturais e quantitativas são realizadas com a expectativa de eliminar manifestações patológicas, porém, na Engenharia Civil, a análise relacionada às superfícies é estudada de maneira macroestrutural e qualitativa, gerando resultados inadequados para o propósito. Recentemente, os pesquisadores da área, estão se preocupando com as análises microestruturais da superfície para obtenção de dados e resultados mais exatos e assertivos, com a intenção de minimizar manifestações patológicas em revestimentos.

A digitalização 3D pode ser utilizada para obtenção de um modelo digital de um objeto. Para este procedimento, existe uma série de métodos disponíveis, indicados para cada tipo de finalidade, tais como tomografia computadorizada, ressonância magnética e digitalização 3D a laser (SANTOS e JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; MA *et al.*, 2017; GURAU *et al.*, 2017).

Na Engenharia Civil, recentemente, em estudos isolados, vem sendo utilizado o método a laser, efetuado através de um *scanner* que proporciona leituras detalhadas da superfície. O aparelho funciona posicionado sobre a peça que será lida, e seu cabeçote movimenta-se sobre os eixos x e y, enquanto realiza a medição do valor do eixo z, através da emissão do laser contra a peça. Após a leitura, todos os pontos – em forma de coordenadas x, y e z – são armazenados em um arquivo. A coleção de pontos discretos que representa a forma é denominada nuvem de pontos e é fonte de dados para processamentos seguintes (BERGER *et al.*, 2014).

Devido à precisão e qualidade alcançada pelos *scanners*, a computação gráfica interessou-se imediatamente em tal tecnologia, seguindo um de seus objetivos de longa data: a modelagem, o reconhecimento e a análise do mundo real (BERGER *et al.*, 2014).

Nas últimas décadas, as nuvens de pontos geradas por eles têm sido uma importante fonte de dados para o mapeamento de aplicações voltadas a fotogrametria e sensoriamento remoto (WANG; PEETHAMBARAN; CHEN, 2018). Além disso, os aplicativos atuais fizeram uso de tais *scanners* em todos os campos da ciência orientada por dados, abrangendo desde a escala micro a macro, para modelos

qualitativos de análises (BERGER *et al.*, 2014), porém, é importante salientar a falta de modelos quantitativos e precisos consagrados.

Na área da Engenharia Civil, pesquisas indicam que o aumento da textura da superfície de um substrato não é suficiente para propiciar a aderência do revestimento, se a argamassa aplicada na mesma não puder penetrar e molhar o substrato (PRETTO, 2007; COSTA, 2014). Assim sendo, a identificação de propriedades na grandeza micro oportuniza a análise minuciosa da microadesão do substrato com o revestimento, avaliada pela absorção de pastas de argamassa que entram em contato com o substrato poroso (STOLZ; MASUERO, 2015).

Na literatura, são apresentadas diversas características analisadas no estudo da rugosidade. No entanto, Moreau, Roudet e Gentil (2014) comentam que características como padrões, tamanho e quantidade dos picos e vales não são computados nem explorados. A obtenção destes dados possibilitaria automatizar mensurações tridimensionais aplicadas diretamente ao modelo permitindo, então, a modelagem e análise 3D da rugosidade, em grandeza micrométrica, de uma determinada superfície de substrato, e a aplicação de teste de compatibilidade com o revestimento.

As características mencionadas podem ser obtidas através de um processamento digital, utilizando algoritmos de segmentação, que têm por objetivo dividir uma imagem em regiões espacialmente contínuas, disjuntas e homogêneas. Esta é uma etapa fundamental, pois a qualidade deste procedimento atua diretamente na veracidade dos dados obtidos do objeto, que serão utilizados para ensaios posteriores (MORAES, 2020). O intuito é mapear todas as rugosidades do substrato, permitindo as análises globais e locais da peça.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sistema de vedação vertical cumpre papel essencial na estanqueidade à água e gases, além de desempenhar a função de isolamento térmico e acústico. Para atingir todas as suas finalidades, é necessário que se mantenha de forma íntegra, sem apresentar fissuras, deslocamentos ou demais manifestações patológicas. A ocorrência das anomalias em revestimentos de argamassa aplicados sobre substratos de blocos cerâmicos é frequente na construção civil, sendo, muitas vezes originadas pela falta de padronização do sistema de revestimentos (MELO *et al.*, 2020).

A fim de garantir que o sistema de vedação vertical cumpra suas atribuições de maneira satisfatória, a NBR 15575 (ABNT, 2013) determina os padrões de desempenho adequados, iniciando pela durabilidade, definida pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) como a capacidade que a edificação, ou um dado elemento construtivo, possui em desempenhar a sua finalidade, durante um determinado período de tempo e condições específicas de exposição. Sendo assim, a norma ainda determina, para sistemas de vedação externos, uma vida útil de projeto, em sua categoria mínima, igual ou superior a 40 anos.

Dando continuidade, a NBR 15575-4 (ABNT, 2013) determina padrões para os demais critérios que são relevantes para o atendimento das necessidades do usuário. Entre os itens observados pela norma, citam-se estanqueidade, desempenho térmico e acústico, juntamente com a resistência a impactos.

Sob esta ótica, os requisitos específicos abordados pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013) buscam o atendimento à durabilidade e o funcionamento satisfatório do sistema de vedação vertical, porém, estes fatores são dependentes de uma correta aderência entre os componentes do sistema. Sendo assim, este discute este fenômeno e dois elementos constituintes da vedação vertical: substrato e matriz cimentícia.

2.1 ADERÊNCIA

A aderência é descrita pela NBR 13528 (ABNT, 2019) como a propriedade do revestimento que tem por função resistir às tensões mecânicas que venham a atuar na interface do substrato. Ou seja, como o estado no qual duas fases distintas se mantêm unidas através de um contato interfacial, de maneira que as forças mecânicas ou de trabalho possam ser transferidas através da interface (COSTA, 2014).

Os mecanismos de aderência ocorrem em duas diferentes fases, porém, que se relacionam entre si: a adesão inicial e a aderência. A fase de adesão inicial ocorre quando a argamassa, em seu estado fresco, é lançada sobre o substrato poroso; enquanto a segunda etapa, a aderência, ocorre com o decorrer do tempo de cura e hidratação dos ligantes da argamassa (MORENO JUNIOR; SELMO, 2007). Pretto (2007) ressalta que esta adesão inicial, a qual permite que a argamassa se mantenha aderida ao substrato momentaneamente após a sua aplicação, não garante a aderência do sistema em longo prazo.

Stolz, Masuero e Kirchheim (2016) mencionam que a aderência mecânica resulta de três propriedades da interface argamassa/substrato, que são a resistência de aderência à tração, resistência de aderência ao cisalhamento e a extensão de aderência. Já Lawrence e Cao (1988) referem que a resistência de aderência é derivada do grau de hidratação do cimento, da natureza da microestrutura da interface e da continuidade de aderência. Dentre os itens mencionados, o mais utilizado é a resistência de aderência à tração, que possui ensaios normalizados.

Para melhor compreensão dos mecanismos de adesão e aderência, nos itens posteriores são descritos tópicos pertinentes ao presente tema, sendo divididos em estado fresco, molhabilidade e Lei de Wenzel, capilaridade e determinação de aderência.

2.1.1 Mecanismos de Adesão

Marshall *et al.* (2010) divide a adesão em ligações físicas, químicas e mecânicas. A adesão física se encontra presente em todas as ligações, mesmo em níveis mais fracos, atuando pelas forças de Van der Waals; as ligações mecânicas são classificadas como sendo as mais comuns e mais intensas; as ligações químicas, por sua vez, atribuídas a ligações iônicas, covalentes ou de hidrogênio, são fortes e de grande contribuição para os fenômenos de aderência, no entanto, são de difícil produção em interfaces contendo dois materiais diferentes (PULKER; PERRY; BERGER, 1981; MARSHALL *et al.*, 2010; PHAN, 2012).

São vários os fatores que irão afetar os mecanismos de adesão. Da perspectiva da argamassa, citam-se o tipo de argamassa selecionada, seus constituintes, sua trabalhabilidade, retenção de água e percentual de ar incorporado; quanto ao substrato, são relevantes os materiais do qual é formado, suas

características de absorvidade, textura e rugosidade. Também é interveniente o método de aplicação do operário, a sua capacidade em preencher os vazios da superfície, a pressão aplicada e o tipo de ferramenta utilizada (THAMBOO; DHANASEKAR, 2015). Os fatores influentes nos mecanismos de adesão podem ser visualizados na Figura 1.

Figura 1 - Fatores influentes no mecanismo de adesão



Fonte: adaptação Carasek (2010)

Considerando a divisão de adesão explanada por Marshall *et al.* (2010) e os coeficientes que interferem na mesma, pode-se dizer, de um modo aplicado, que os mecanismos de adesão têm como resultado a adesão específica (ligações físicas e químicas) e a adesão mecânica. Quanto à adesão específica, esta inclui interações elétricas, químicas e termodinâmicas, que dependem da superfície específica disponível. Da perspectiva termodinâmica, três aspectos são importantes, sendo eles a tensão interfacial³, a absorvidade⁴ e a adsorção do substrato⁵ (COURARD; NELIS, 2003; PRETTO 2007).

A adesão mecânica depende da rugosidade do substrato em combinação com a reologia da argamassa; baseia-se na penetração da argamassa nas rugosidades e

³ Tensão Interfacial: propriedade que existe na fronteira entre duas substâncias que interagem, é a afinidade entre moléculas de substâncias diferentes e a capacidade de mistura entre elas.

⁴ Absorvidade: propriedade de absorver líquidos.

⁵ Adsorção do substrato: fixação de uma substância em um **substrato** em contato com o meio líquido.

poros, que agirão como mecanismo adesivo, garantindo a ancoragem posterior à cura (COURARD; NELIS, 2003; PRETTO, 2007). O que também é apontado por Pour (2016), que cita que rugosidade superficial dos materiais influencia diretamente na aderência dos revestimentos, já que a tendência é de que, ao aumentar a rugosidade da superfície, a área de contato também seja aumentada. Estes aspectos mencionados serão abordados mais especificamente no tópico seguinte.

2.1.1.1 Influência da Rugosidade na Adesão Mecânica entre Argamassa e Substrato

Barbosa, John e Pileggi (2009) discutem a respeito da interação da argamassa sobre uma superfície porosa, que ocorre em quatro etapas definidas: a molhagem do substrato através do contato com a argamassa e a ocorrência de sucção capilar; o transporte dos materiais finos para a interface, atribuído ao fluxo capilar; equilíbrio da umidade entre o substrato e a argamassa; e a fase final, que consiste na hidratação do cimento e a formação da coesão entre o substrato e a argamassa.

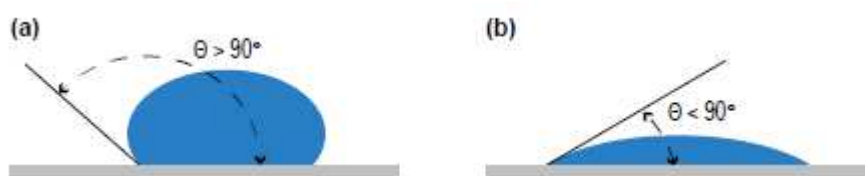
Bauer (2005) e Costa (2014) citam que o fenômeno de adesão mecânica entre argamassa e substrato é formado pela interação dos seguintes mecanismos:

- Tensão interfacial: ocorre entre as duas fases do sistema de revestimento, substrato e argamassa. Ela faz parte do desempenho da aderência quanto a seu fenômeno termodinâmico, que compreende a tensão interfacial, a adsorção do substrato. Quanto ao revestimento de argamassa, busca-se a máxima aderência e durabilidade, para tal, deve-se considerar que a argamassa é aplicada em seu estado líquido e irá desenvolver sua resistência enquanto sólido e, sendo assim, esta propriedade, bem como consistência, viscosidade, elasticidade e massa específica, serão variáveis com o tempo e condições ambientais impostas;
- Adsorção do substrato: relacionada diretamente com o intertravamento mecânico. Neste caso, a penetração da argamassa nas irregularidades do substrato é a principal força atuante na aderência, logo, a rugosidade do substrato é determinante;
- Adsorção do substrato: as partículas presentes no sistema podem aderir devido às forças interatômicas e intermoleculares entre argamassa e a base, as quais são estabelecidas na interface após os processos de molhagem, englobando conceitos como reologia, molhabilidade e energia de superfície.

O molhamento ou molhabilidade é o fenômeno que ocorre quando o líquido, em contato com o sólido, pode se espalhar totalmente, parcialmente ou até não se espalhar sobre a superfície. Ele ocorrerá de modo mais facilitado quanto menor for a tensão na interface líquido/sólido (CARASEK, 2010; VAZ; CARAZEK, 2019). Costa (2014), por sua vez, relata que o processo de molhamento envolve o equilíbrio entre as fases quando estas são colocadas em contato, submetidas à cinética e tensões, com o intuito de criar uma nova área interfacial.

Klein *et al.* (2012) analisam a molhabilidade de materiais de acordo com as tensões da superfície, de como o sólido e o líquido interagem e o ângulo de contato que formam e, segundo os autores, ângulos iguais ou superiores à 90° representam o substrato impermeável, como indica a Figura 2.

Figura 2 - Ângulos de Molhabilidade - (a) $\theta > 90^\circ$, Indica a Não-Molhabilidade°, (b) $\theta < 90^\circ$, Indica Molhabilidade



Fonte: Klein *et al.* (2012)

Pretto (2007) reforça que, para uma boa molhabilidade, são importantes as características da argamassa, do substrato e da interação entre ambos. As argamassas necessitam características compatíveis com o substrato, além de quesitos como a tensão superficial e a baixa viscosidade. O substrato, por sua vez, terá como elementos de influência a composição química e a rugosidade. Esta última, inclusive, afetará o ângulo de contato referido entre o substrato e o líquido, determinando se a superfície do material será hidrofílica, como aconselhado para uma adequada molhabilidade.

É neste contexto que se introduz a Lei de Wenzel. Segundo Preto (2007), Wenzel, através do aperfeiçoamento da Lei de Young, criou uma fórmula para analisar o comportamento do líquido sobre a superfície rugosa (equação 1).

$$\cos \theta = r \cdot \cos \theta \quad \text{(equação 1)}$$

Esta fórmula, que inclui o parâmetro de rugosidade “ r ”, pode ser aplicada desde que o deslocamento do fluido sobre a superfície ocorra em conformidade com a

grandeza da rugosidade do substrato. No caso de não cumprimento deste comportamento, poderá ocorrer a formação de bolsões de ar, gerando o efeito chamado “Tapete de Fakir”, conforme a Figura 3:

Figura 3 - Comportamento do Líquido sobre Superfície Rugosa - (a) Líquido em Contato Total com a Superfície com Picos Pouco Elevados; (b) Bolsões de Ar sob o Líquido



Fonte: Bico (2000) apud Pretto (2007)

Explicando a Lei de Wenzel, Marshall (2010) menciona que, quando a partícula de líquido entra em contato com o substrato e forma ângulos inferiores a 90° , a molhabilidade irá aumentar com a rugosidade. Para o autor, o conceito de rugosidade é referido pela média aritmética entre os picos e os vales de uma superfície, ou seja, quanto maior essa rugosidade, menor será o ângulo de contato entre a argamassa e o substrato. Quéré (2008) cita que o modelo criado por Wenzel prevê que a rugosidade eleva a molhabilidade e que, apesar de ser provável que este fenômeno ocorra na maior parte dos casos, não há como verificar se a relação estabelecida é seguida, considerando que o líquido irá se adequar.

Outro fato importante bastante discutido quando se refere a adesão mecânica é a pressão capilar definida como a medida da tendência de um meio poroso absorver um líquido molhante ou, ainda, de repelir um líquido não-molhante; que varia de acordo com a geometria do substrato, de sua porosidade, dos ângulos de contato entre a superfície e o líquido, além do grau de saturação do meio (PRETTO, 2007).

2.1.2 Estudos sobre Aderência

Os diversos fatores que possuem influência nos mecanismos de aderência e adesão foram estudados por diferentes pesquisadores nacionais e internacionais, porém, ainda não há uma concordância sobre uma única teoria que explique os fatores físicos e químicos envolvidos. Pode-se citar, entre as teorias difundidas, o intertravamento mecânico, a teoria de ligações químicas, a teoria de adsorção, a teoria

de difusão e teoria da eletrostática (TYKHONIUK *et al.*, 2007; PHAN, 2012; COSTA, 2014).

Os autores, de modo geral, buscam enquadrar as suas pesquisas nas teorias referidas. Paes (2004), por exemplo, analisou a diferença de porosidades entre blocos cerâmicos e de concreto, aliado a argamassas com diferentes traços e espessuras, para avaliar o transporte de água entre ambos e a forma como isto afeta na aderência. Como resultado, constatou que o bloco de concreto succiona mais água de amassamento que o substrato cerâmico, visto que possui uma distribuição de poros de tamanhos heterogêneos, enquanto que na cerâmica, apesar da grande quantidade de poros, todos são de pequenos diâmetros. A autora também conseguiu relacionar esta capacidade de sucção de água de amassamento com a aderência, verificando que quanto maior esta for, maior será a resistência de aderência à tração, porém, não considera os ensaios de absorção de água como confiáveis para esta representação.

Os estudos de Scartezini e Carazek (2003) com os mesmos substratos, porém com preparações diferentes, também apontaram a importância da tipologia do substrato utilizado e a sua rugosidade quanto aos mecanismos de aderência. Os resultados obtidos apresentaram o substrato de concreto com maior rugosidade superficial, atribuindo a este fator a obtenção de valor superior quanto à resistência de aderência. Quanto à cerâmica, observaram que o seu preparo é importante, ressaltando que a utilização de chapisco ou o preparo com solução de cal retornam em maiores valores de aderência. Então, nota-se que as características geométricas da superfície, em nível macroscópico, exercem influência na aderência. Neste sentido, Vaz e Carasek (2019) identificou que a resistência de aderência com a presença do chapisco é em torno de 35% maior que na superfície lisa, e quando os blocos têm superfícies estriadas apresentam um aumento médio de 12%, demonstrando, também, a influência da rugosidade na aderência entre os substratos e os revestimentos.

Kazmierczak, Brezezinski e Collato (2007), por sua vez, realizaram estudos para determinar a influência da base, seu preparo e a idade do revestimento na aderência. Para tanto, é utilizado o chapisco para aumento de rugosidade da superfície inicial, e como resultado observaram que, em todos os sistemas em que é adotado o uso de chapisco, o rompimento no ensaio de aderência à tração ocorreu na argamassa ou na interface argamassa/chapisco, comprovando que aderência deste, junto ao substrato, é superior do que junto ao emboço, corroborando com os estudos

anteriores em que há influência da rugosidade na aderência entre substrato e o revestimento (CARASEK, 1996; CARASEK, 2010; VAZ; CARAZEK, 2019).

Porém, Carasek (1996) afirma que a rugosidade do substrato cerâmico, por si só, não é considerada um bom parâmetro para a definição da capacidade de aderência, pois resultados em estudos realizados pela própria autora (CARASEK, 1990) demonstraram que os substratos cerâmicos com menor rugosidade superficial aparente resultaram em maiores valores de resistência à aderência, a considerar também a argamassa utilizada (CARASEK, 2010; VAZ; CARAZEK, 2019).

Os trabalhos mencionados anteriormente não consideram rugosidade determinada na casa de micrômetros, e sim, na ordem de frações de milímetros, o que impede conclusões confiáveis. Nos trabalhos seguintes, já se iniciam estudos de rugosidade no sentido estrito do termo, porém todos apenas com avaliações qualitativas.

De acordo com as pesquisas realizadas por Stolz *et al.* (2016), o aumento da área de contato, através da criação de texturas, não necessariamente resulta em maior aderência. O estudo mostra ainda que as características de rugosidade do substrato e a reologia da argamassa são os fatores que possuem maiores influências na área de contato efetiva da interface.

Pagnussat (2013), por sua vez, estudou a influência do processo de queima do substrato cerâmico na constituição geométrica do mesmo, e a sua posterior influência na aderência. O referido autor observou que a queima não possui influência na rugosidade, visto que houve pouca variação nas amostras estudadas, mas observou diferenças relativas à porosidade e absorção de água, sendo que nestes quesitos, as amostras com valores de queima mais altos apresentaram melhores resultados. Os blocos com queima em temperatura mais elevada também apresentaram melhores respostas quanto à aderência, fato que o autor relaciona com o aumento da porosidade, medidos através da absorção capilar de água.

Ainda no contexto da aderência por ancoragem mecânica, Polito *et al.* (2010) citam que os produtos de hidratação dos aglomerantes da pasta da argamassa penetram a profundidades entre 100 e 1600 μ m no interior do substrato e que a região de ruptura onde ocorre a perda da aderência acontece em uma camada adjacente a interface substrato/argamassa com aproximadamente 50 a 200 μ m. Contudo, os estudos realizados ainda não podem ser generalizados, principalmente devido à falta de um método reconhecido para mostrar o efeito da rugosidade no aumento da área

de contato da matriz cimentícia com o substrato. Neste contexto, a resistência de adesão interfacial dos revestimentos depende das características morfológicas da região de interface (MA *et al.*, 2017) e da área de contato entre superfícies, que é dependente da rugosidade do substrato e das características da matriz cimentícia do revestimento.

Na mesma perspectiva, Scrivener *et al.* (2004) afirmam que a aderência depende da compatibilidade geométrica do tamanho mínimo das partículas da matriz cimentícia e da área de rugosidade formada por picos e vales, de forma a reduzir as falhas de contato entre os materiais. Colaborando com o estudo dos autores citados, Ghumatkar *et al* (2016) verificaram que existe rugosidade superficial ideal para aderência máxima e a faixa de rugosidade depende do material aderente.

Diante do exposto, a influência da rugosidade dos blocos cerâmicos na aderência de revestimentos necessita ser discutida, principalmente quando se trata de superfícies que macroscopicamente são consideradas lisas, pois há distintos resultados de análises de rugosidades, dependendo da escala do estudo realizado, uma vez que a percepção de que a parametrização adequada de uma superfície é ainda mais complexa do que a simples medição de picos e vales (PATRÍCIO; SANZ-LOBERA; LOSANO; 2015).

Sendo assim, percebe-se a falta de padronização e definições dos conceitos de rugosidade na área de Engenharia Civil. Para facilitar o entendimento, nos próximos tópicos do estudo, serão discutidos os conceitos, métodos de medição e formas de avaliações quantitativas e qualitativas de rugosidade.

2.2 RUGOSIDADE

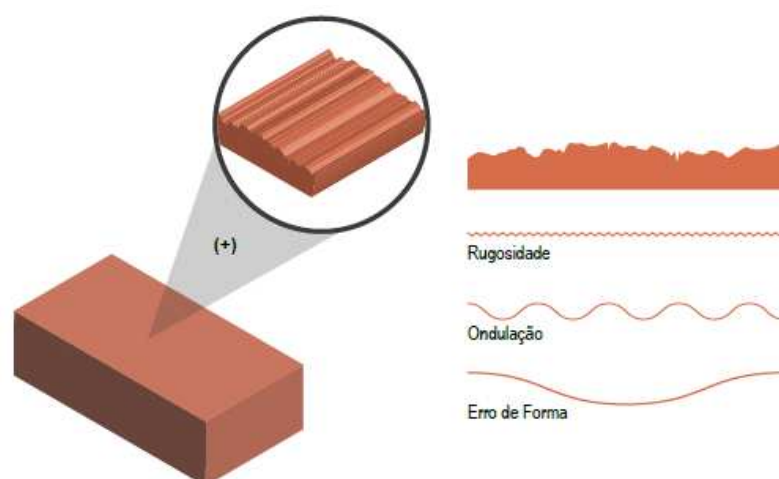
A rugosidade é o conjunto de irregularidades compostas de picos e vales que caracterizam qualquer superfície. São imperfeições que ocorrem ao longo de sua topografia, sendo reentrâncias, fissuras ou ondulações, das quais irão classificar e determinar a utilização do material. Existem níveis de rugosidades e estes são calculados a partir das aferições dos picos e vales de um determinado perfil (MARCHIORI, 2013).

Sendo assim, toda superfície apresenta rugosidade, podendo ser áspera ou suave, nos casos em que o material seja aparentemente liso e polido. Entretanto, mesmo que a rugosidade seja imperceptível em determinada superfície, esta irá

apresentar uma infinidade de picos e vales minúsculos, estreitamente espaçados entre si, e posicionados em um complexo de ondulações e comprimentos de onda (SOUSA, 1980).

Os perfis podem apresentar componentes de curto comprimento de onda, conhecidos como rugosidades, e os de frequência média com maior comprimento de onda, denominados de ondulações ou erros de forma (Figura 4). Assim, entende-se que quanto menores são os comprimentos de onda e quanto mais alta a frequência na superfície, pior será a visualização desta rugosidade, necessitando o uso de equipamentos com alcances em escalas ampliadas (BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012).

Figura 4 - Composição de superfícies



Fonte: Adaptado de Rosa (2007)

Neste sentido, sabe-se que a avaliação da rugosidade das superfícies depende também da escala em que o material é visto, posto que um perfil visualizado em macroescala pode apresentar irregularidades mais suaves, enquanto que na microescala, percebe-se picos e vales cada vez mais salientes. Deste modo, uma superfície pode ser caracterizada como suave quando avaliada a olho nú ou microscópio óptico e rugosa quando avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), scanner a laser e microscopia de força atômica (MFA) (SANTOS e JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; MA *et al.*, 2016; GURAU *et al.*, 2017).

No Brasil, a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e a NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), determinam especificações de rugosidades e parâmetros para a caracterização da textura de superfícies, como rugosidade e ondulação, por meio de métodos de criação

de perfis em duas dimensões (BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012). A NBR ISO 8404 (ABNT, 1984) apresenta os parâmetros de rugosidade média (R_a) e traz a classificação de rugosidade, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Características da rugosidade R_a

Classe de Rugosidade	R_a (μm)	Classe de Rugosidade	R_a (μm)
N12	50	N6	0,8
N11	25	N5	0,4
N10	12,5	N4	0,2
N9	6,3	N3	0,1
N8	3,2	N2	0,05
N7	1,6	N1	0,025

Fonte: NBR ISO 8404 (1984)

Ao analisar a Tabela 1, percebem-se valores de rugosidade média de 50 a 0,025 μm , contudo, a norma referenciada não define os materiais que essa classificação é aplicável, indicando que são valores para análise de perfis bidimensionais. Segundo a norma, a intensidade de rugosidade pode ser avaliada por seus picos e vales, sendo que quando estes apresentarem valores elevados, a superfície alcançará maiores níveis de rugosidade, pois a mesma é avaliada pela média aritmética entre os pico e vales e, quanto maior for essa média, maior será o nível de rugosidade do perfil (POUR, 2016; JIAN *et al.*, 2017).

O *Fip Model Code* (TAERWE; METTHYS, 2013) classifica a superfície com base na rugosidade média R_a , no qual uma superfície lisa é definida com $R_a < 1,5$ mm, rugosa com $R_a \geq 1,5$ mm e muito rugosa com $R_a \geq 3$ mm. Observa-se que o Model Code classifica a rugosidade apenas em macro escala, desconsiderando que a topografia das superfícies varia em função da escala de observação, que pode determinar a textura superficial, direção superficial predominante de estrias provocadas pelo processo de produção e imperfeições (macroescala), ondulações ou macrorugosidades (mesoescala), rugosidade (nano e microescala) (SAHOO e DAVIM, 2011).

Moreau, Roudet e Gentil (2014) salientam que os perfis com rugosidades excessivas são difíceis de serem analisados com a devida precisão, por apresentarem formas variadas e de difícil visualização em seus extremos, peculiaridade encontrada em superfícies produzidas com composições heterogêneas de materiais. Essas configurações de rugosidades diferem entre materiais e este fato é atribuído às etapas do processo de fabricação e a composição química e mineralógica dos mesmos (HUANG; LIN; CHIU, 2005; LIN, 2006; CONTARDI; CORNAGLIA; TARDITI, 2017; BARRIOS-MURIEL, *et al.* 2019).

Nota-se a dificuldade encontrada na literatura para classificar rugosidades em distintos materiais, sendo que nenhum autor conseguiu caracterizar precisamente esta definição com análises bidimensionais. Como estudo de Moreau, Roudete e Gentil (2014), entende-se que análises em duas dimensões são ineficientes na avaliação de toda a extensão de uma superfície de um material compósito, visto que analisam apenas um perfil da área em medição, o que pode gerar dados imprecisos de rugosidades, pelas variações químicas e mineralógicas do material utilizado, demonstrando a importância de estudos tridimensionais, sendo que estes irão avaliar toda a superfície e alcançar os picos e vales extremos, apresentando valores de rugosidade próximos aos reais do material (VENKATARAMA REDDY; LAL; NANJUNDA RAO, 2007; GRZELKA, MAJCHROWSKI E SADOWSKI, 2011; EK *et al.*, 2016; BARRIOS-MURIEL *et al.*, 2019).

O padrão de rugosidade, ondulação e extensão de aderência ideal ainda é desconhecido para materiais compósitos como blocos cerâmicos, concretos e argamassas, embora estas propriedades sejam importantes para determinar o bom desempenho do sistema de revestimento. Variações de rugosidade e de ondulação dos materiais influenciam nas propriedades de adesão destes aos revestimentos, por meio da alteração da área de contato (MYSHKIN, PETROKOVETS e CHIZHIK, 1998; EK *et al.*, 2016; GRIGORIADIS, 2016; POUR, 2016).

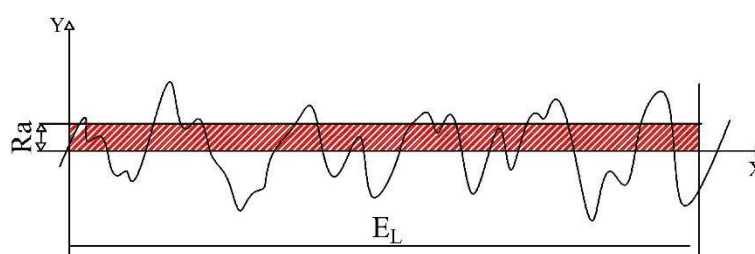
A rugosidade superficial dos materiais influencia diretamente na aderência dos revestimentos, já que a tendência é de que, ao aumentar a rugosidade da superfície, a área de contato também seja aumentada e, conseqüentemente, o intertravamento mecânico melhorado. Porém, os constituintes e a forma de fabricação dos substratos estão diretamente vinculados a rugosidade superficial, necessitando estudos mais aprofundados com cada material isoladamente, a partir dos parâmetros de rugosidade.

2.2.1 Parâmetros de Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade são termos escalares e quantidades numéricas, baseados em características geométricas de espaçamento, altura ou profundidade entre picos e vales e são, geralmente, obtidos por meio de perfis 2D ou superfícies 3D (SANTOS e JÚLIO, 2013). Os parâmetros de rugosidade auxiliam no processo de avaliação de configurações das superfícies (HOLA *et al.*, 2015), visto que estes são estabelecidos a partir da linha média do perfil (KAMARTHI; SULTORNSANEE; ZEID, 2016).

Dentre os parâmetros mais utilizados para quantificação de rugosidade de superfícies tem-se a rugosidade média (R_a), que é a média aritmética de todos os picos e vales dentro do comprimento do perfil denominado E_L (Figura 5) e a raiz quadrada média (R_q) que equivale a raiz quadrada de R_a , sendo utilizada já que o mesmo aumenta o efeito das irregularidades que se afastam da média (SANTOS e JÚLIO, 2013; CARRABBA *et al.*, 2017).

Figura 5 - Perfil com a demonstração da R_a

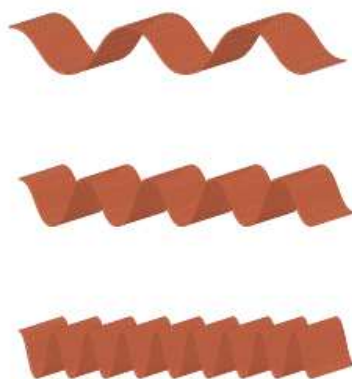


Fonte: Bagherifard; Ghelichi; Guagliano (2012)

Rocha *et al.* (2017) complementam, afirmando que geralmente os parâmetros R_a e R_q produzem uma medida estatística da superfície e não um valor real do perfil, porém estes parâmetros estão interligados e são importantes na determinação do intertravamento mecânico, visto que superfícies com esses parâmetros altos possuem melhores resultados de aderência mecânica quando solicitadas, (GRIGORIADIS, 2016), porém a aderência mecânica citada pelos autores está diretamente relacionada ao atrito entre duas superfícies, e não se aplica diretamente na área da Engenharia Civil, para medição de resistência de aderência à tração entre substrato e argamassa. No entanto, em função desses parâmetros R_a e R_q avaliarem apenas rugosidade na

dimensão vertical (perpendicular ao eixo da superfície), eles são pouco eficientes no processo de visualização da rugosidade da superfície analisada, na distinção de picos e vales, visto que se pode obter diferentes perfis com a mesma rugosidade média (Figura 6) (MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; GURAU *et al.*, 2017).

Figura 6 - Perfis com a mesma Ra

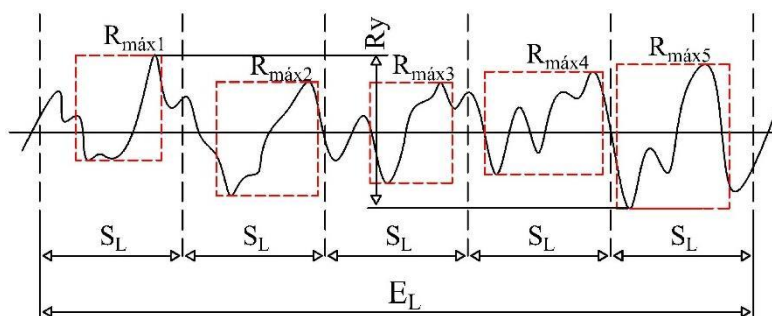


Fonte: Adaptado de Santos e Júlio (2013)

Alguns parâmetros foram criados para superar as limitações do R_a , já que são mais sensíveis à presença de picos, imperfeições e arranhões locais, por se tratarem de medidas extremas, sendo mais indicados para a caracterização do perfil. Não obstante, estes são geralmente avaliados em cinco comprimentos de amostragem (S_L), conforme Bagherifard, Ghelichi e Guagliano (2012), assim cada um corresponde a um quinto do comprimento do perfil (E_L), utilizando-se a média destes valores como parâmetros da superfície. Porém o S_L é válido apenas para materiais homogêneos, que irão apresentar uma rugosidade padrão, e em materiais compósitos, como o bloco cerâmico, não é utilizado. Para materiais heterogêneos o recomendando é a medição da superfície total, e não amostragens parciais, para a determinação dos parâmetros de rugosidade (GURAU *et al.*, 2017; SILVA; JÚLIO, 2013).

Deste modo, existe a altura média dos elementos do perfil (R_c) que representa 10 medidas extremas, sendo a média da soma dos 5 picos predominantes e 5 vales mais profundos no S_L . A rugosidade total (R_y) é calculada pela diferença entre o pico mais alto e o vale mais profundo. Já a rugosidade máxima de pico e vale (R_{max}) corresponde à máxima altura de pico a vale dentro de qualquer um dos S_L (Figura 7) (BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012; HOLA *et al.*, 2015 e ROCHA *et al.*, 2017).

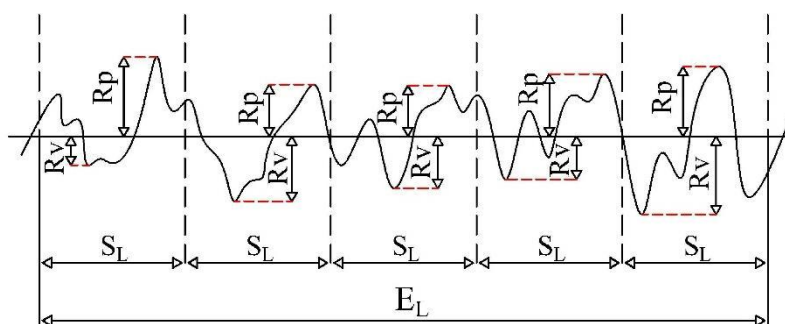
Figura 7 - Perfil com a demonstração da R_y e $R_{m\acute{a}x}$



Fonte: Bagherifard, Ghelichi e Guagliano (2012)

Ainda, conforme os mesmos autores citados anteriormente, a R_y e a R_{max} podem ser facilmente confundidas por apresentarem definições semelhantes, porém a R_{max} é determinada como o valor máximo de rugosidade parcial dentro de um S_L , enquanto na R_y é analisada a máxima em todo E_L . Já a altura máxima de pico (R_p) e profundidade máxima de vale (R_v) representam a altura máxima do pico e máxima profundidade de vale, respectivamente, dentro do S_L (Figura 8).

Figura 8 - Perfil com a demonstração da R_p e R_v



Fonte: Santos e Júlio (2013)

Existem outros parâmetros que são menos utilizados, todavia não deixam de ser importantes, como é o caso da média da altura de pico (R_{PM}), que é definida como a média da máxima altura dentro de cada S_L e a profundidade média de vale (R_{VM}), que se caracteriza pela média de profundidade de vales do perfil por S_L (SANTOS e JÚLIO, 2013). Alguns autores analisam o parâmetro de assimetria (R_{sk}), que é uma medida da simetria da curva, então se picos e vales têm uma distribuição simétrica, esse parâmetro será zero, também podendo ser utilizada para distinguir dois perfis

com o mesmo R_a (BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014).

Além disso, os mesmos autores explicam que o sinal de R_{sk} representa as características do perfil, isto é, se R_{sk} for negativo, a superfície apresenta vales baixos e ausência de picos altos, ou o contrário, quando R_{sk} for positivo. E, por fim, o parâmetro curtose (R_{ku}), que representa a densidade do perfil. Então, se uma superfície apresenta picos mais espaçados, obtém-se um valor de R_{ku} menor e, para picos mais próximos, esse parâmetro aumenta. Na Tabela 2 são apresentadas as fórmulas para calcular todos os parâmetros citados (BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014).

Tabela 2 - Equações para cálculo de parâmetros de rugosidade

Parâmetros	Equações	Parâmetros	Equações
R_a	$R_a \approx \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n Z_i $	R_v	$R_v = \max\{v_i\}$
R_q	$R_q \approx \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n Z_i^2}$	R_y	$R_y = \max\{p_i\} + \max\{v_i\}$
R_{pm}	$R_{pm} = \frac{1}{5} \times \sum_{n=1}^5 p_i$	R_{max}	$R_{max} = \max\{p_i + v_i\}$
R_{vm}	$R_{vm} = \frac{1}{5} \times \sum_{n=1}^5 v_i$	R_{sk}	$R_{sk} = \frac{1}{nR_q^3} \times \left(\sum_{i=1}^N Z_i^3 \right)$
R_c	$R_c = \frac{1}{5} \times \left(\sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right)$	R_{ku}	$R_{ku} = \frac{1}{nR_q^4} \times \left(\sum_{i=1}^N Z_i^4 \right)$
R_p	$R_p = \max\{p_i\}$		

Fonte: Elaborada pela Autora (2020)

Nos Estados Unidos da América ocorrem algumas diferenciações quanto à adoção dos parâmetros citados, como é o caso do R_a que é utilizada no lugar do R_q , sendo chamada de média aritmética (AA), ou rugosidade de R_a . O mesmo ocorre no

Reino Unido. Já no restante do continente europeu e no Japão, a R_{max} é utilizada no lugar de R_q (KAMARTHI; SULTORNSANEE; ZEID, 2016).

Atualmente, o parâmetro mais utilizado é o R_a em estudos que analisam a rugosidade de materiais devido a sua simplicidade de cálculo (SANTOS e JÚLIO, 2013). No entanto, como já explicado por Moreau; Roudet e Gentil (2014), Grigoriadis (2016), Rocha *et al.*, (2017) e Gurau *et al.* (2017) esse parâmetro é ineficaz na real caracterização do perfil, além de que não se pode analisar uma superfície apenas com um valor, devendo-se utilizar no mínimo um parâmetro para cada característica da superfície, amplitude, frequência e inclinação, principalmente quando se trata de análises 3D, já que se necessita de maior precisão (EK *et al.*, 2016; MA *et al.*, 2017).

Portanto, existem vários parâmetros capazes de auxiliar na determinação da rugosidade de superfícies, sendo que cada um especifica uma característica do perfil, entre elas, a altura, profundidade, frequência ou inclinação. Ao se tratar de análises com elevada precisão, necessita-se o uso de mais de um parâmetro para se obter a real determinação da rugosidade superficial, principalmente quando se trata de análises tridimensionais, já que alguns parâmetros, como R_a e R_q , não são eficientes isoladamente nessa determinação, por apresentarem uma medida estatística das superfícies. Então, se torna necessário o uso de parâmetros mais sensíveis aos valores extremos de picos e vales, para quantificar e diferenciar a real superfície dos materiais.

Porém, cabe ressaltar, que nos estudos da aderência entre argamassas e substrato, ainda não é identificado algum parâmetro que permita a quantificação de rugosidade que se relacione adequadamente com a resistência de aderência, visto que não há na literatura uma definição exata com valores quantitativos dos parâmetros de rugosidade para classificação de substratos, uma vez que existem divergências de valores e nomenclaturas para o mesmo parâmetro de rugosidade.

2.2.2 Métodos para Análise da Rugosidade

Para análise de rugosidade de substratos é possível identificar várias pesquisas (PEREZ, BISSONNETTE, COURARD, 2009; SANTOS e JÚLIO, 2013; MOREAU, ROUDET E GENTIL, 2014; LE ROUX, 2015; SADOWSKI, CZARNECKI, HOLA, 2016; SADOWSKI, 2016; SASSONI *et al.*, 2017) que adotam distintos métodos de

quantificação, sendo que não existe indicação sobre o método ideal para definição de rugosidade para blocos cerâmicos (SANTOS e JÚLIO, 2013).

Os métodos para determinação de rugosidade de superfícies são variados, porém o consenso entre as pesquisas realizadas na área é de que uma única medida de rugosidade não é um parâmetro informativo para descrever toda a extensão da superfície, devendo-se realizar estudos aprofundados com maiores quantidades de medições para fornecer dados confiáveis (PEREZ, BISSONNETTE, COURARD, 2009; BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012; EK *et al.*, 2016).

Neste contexto, percebe-se distinção entre os métodos já estudados quanto à existência de contato ou não, métodos destrutivos quando impossibilitam o uso da peça ou não destrutivos quando, após o ensaio, a superfície continua utilizável, a análise bidimensional ou tridimensional e métodos quantitativos ou qualitativos. Ainda, existem métodos analógicos e outros que convertem os resultados em dados numéricos (Perfilômetro tridimensional ou rugosímetro), sendo que alguns apenas conseguem identificar ondulações, como o método *sand patch test*, enquanto outros são capazes também de detectar rugosidades (SANTOS e JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014).

Para obter-se precisão nos métodos de contato, é necessária a realização de diversas medições em um mesmo perfil, utilizando-se a média dos resultados encontrados em cada etapa. Este fato é explicado por conta das superfícies não apresentarem uma configuração de rugosidade uniforme em toda a sua extensão e variando em direções diferentes, podendo causar porcentagens significativas de erros, caso se avalie o perfil com apenas uma medição. Para resolução deste problema, autores que analisaram a eficiência destes métodos indicam o uso do processamento de imagem para determinação da textura superficial, obtendo-se maior precisão nos resultados sem a necessidade de inúmeras medições, assim, tornando o processo mais fácil de ser executado e também em um menor tempo (POUR, 2016).

Os métodos bidimensionais estudam as características de uma superfície em um perfil longitudinal, gerando a sinuosidade do material analisado (SAMPAIO, 2014), entretanto, um único perfil não caracteriza adequadamente uma superfície 3D (GRELKA, MAJCHROWAKI E SADOWSKI, 2011; BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012; KLINGVALL EK; RÄNNAR; BÄCKSTÖM E CARLSSON, 2016; BARRIOS-MURIEL *et. al.*, 2019).

Os métodos tridimensionais vêm ganhando espaço na análise de materiais da construção civil. Estes facilitam a visualização da estrutura das superfícies e fornecem valores mais precisos, contudo há falta de literaturas sobre esse tipo de aplicação (MIRÓ *et al.*, 2015; SADOWSKI; CZARNECKI; HOLA, 2016). Moreau, Roudet e Gentil (2014) afirmam que há necessidade de realizar medições de rugosidade tridimensionais, pois, quando se analisa apenas o perfil 2D, muitos vales extremos podem passar despercebidos, sendo que estes são importantes no processo de aderência de revestimentos, necessitando-se a verificação de toda sua área. Portanto, para a real visualização do perfil, se faz necessário o uso de equipamentos tridimensionais, já que estes possibilitam o alcance a todos os pontos extremos da superfície.

As análises tridimensionais geram uma nuvem de pontos (x,y,z) representadas no espaço de coordenadas do objeto, necessitando serem convertidas para coordenadas globais, para tanto, utiliza-se uma faixa de medições padrão. Esse processo é necessário em todas as superfícies, visto que o cálculo é não linear e dependente da geometria medida e da calibração do equipamento (HOLA *et al.*, 2015). Assim, o resultado da nuvem de pontos irá gerar uma superfície espacial que geralmente consiste em triângulos de coordenadas conhecidas (x, y, z), entretanto, para ter uma precisão do perfil é necessário o cuidado para que o feixe de luz alcance todos os vales do material, caso contrário, uma superfície mais suave do que a real será criada (SIEWCZYNSKA, 2012).

A avaliação da rugosidade de forma quantitativa ao invés de qualitativa traz mais precisão às variáveis de resposta, facilitando que se obtenha uma padronização dos resultados, por meio da adoção de parâmetros com medidas escalares na determinação da rugosidade e verificação do método mais adequado para cada superfície, visto que a abordagem visual é tendenciosa e pode variar bastante ao se mudar o observador.

O método quantitativo também auxilia no entendimento da propriedade de adesão entre substrato e revestimento, sendo que, podem-se ter duas superfícies com rugosidades semelhantes no método qualitativo e apresentando forças de ligação distintas, já que apenas no método quantitativo a diferenciação da microestrutura entre superfícies se torna viável (SANTOS e JÚLIO, 2013; ZHANG *et al.*, 2014). Porém, há influência do método de aferição utilizado e das dimensões da área

estudada na análise de rugosidade e nos resultados obtidos (COSTA, 2014; SAMYN; VAN ERPS; THIENPONT, 2016).

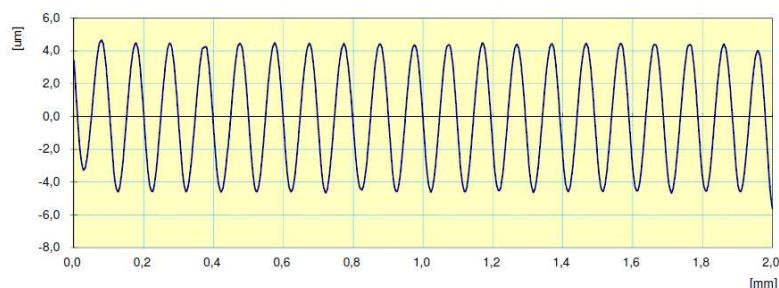
Não existem dados que comprovem qual o método mais adequado. Assim, devido a gama diversificada de equipamentos de medição de rugosidade, não existe padronização, podendo-se encontrar valores de parâmetros diferentes em cada equipamento ao analisar o mesmo perfil. Contudo, sabe-se que métodos mais exatos são, conseqüentemente, mais complexos e a realização dos ensaios deve ser em laboratórios (FIP MODEL CODE, 2010; SANTOS e JÚLIO, 2013; EK *et al.*, 2016).

2.2.2.1 Métodos com contato

Os métodos com contato apresentam a necessidade de contato com a amostra no momento da medição, podendo ser destrutivos ou não e bidimensionais ou tridimensionais. Neste cenário, a rugosidade na extensão de uma superfície não é semelhante, apresentando variações desta propriedade em determinadas regiões e em direções distintas. As análises com o uso de equipamentos de contato necessitam de repetidas medições para a determinação da rugosidade do perfil, calculando-se a média dos resultados encontrados para obter-se a precisão adequada, ressaltando-se as limitações quanto ao tamanho do diâmetro da ponta do equipamento, assim, muitas vezes, sendo viável apenas a medição macroestrutural da superfície (EK *et al.*, 2016; POUR, 2016).

O rugosímetro ou perfilômetro mecânico é um equipamento de medição de rugosidade por método de contato muito aplicado nas Engenharias (KAMARTHI; SULTORNSANEE; ZEID, 2016). O seu processo de execução é relativamente simples, onde uma ponta fina entra em contato com a superfície a ser analisada e este equipamento realiza a varredura em uma linha longitudinal do perfil, em que os picos e vales se convertem em variações elétricas, gerando gráficos.

Alguns cuidados que devem ser tomados são: a superfície deve estar sem vibração e limpa, e a agulha deve estar perpendicular ao perfil (POUR, 2016). Neste método, há a necessidade do contato, visto que a ponta do equipamento varre o perfil a ser verificado e gera a imagem do mesmo (Figura 9).

Figura 9 - Perfil obtido por um rugosímetro 2D

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

O rugosímetro é utilizado normalmente de forma bidimensional, contudo podem-se criar perfis tridimensionais a partir de varreduras consecutivas, técnica denominada de Microscopia Mecânica de Varredura. Suas vantagens são a precisão nas medições e a velocidade de processamento e apresenta como desvantagens a necessidade de contato, o tamanho da ponta que pode gerar erros na medição se for maior que os picos e vales e a falta de mobilidade (SADOWSKI; CZARNECKI; HOLA, 2016).

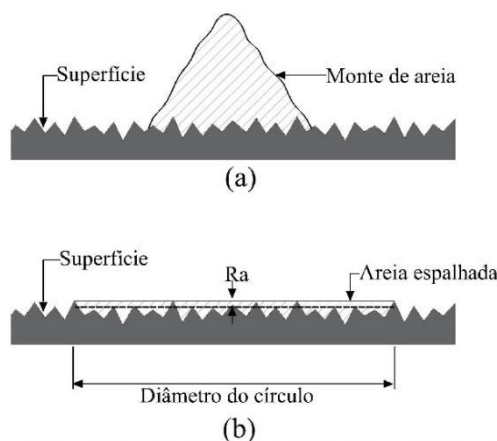
Como alternativa, um método utilizado é o microscópio de força atômica (MFA), que se caracteriza pelo modo de contato ou modo de não contato. O mesmo possui uma sonda ligada a uma consola, também conhecida como cantilever, que é um elemento que garante o engastamento de uma extremidade, assim inviabilizando o movimento de translação, mesmo utilizando uma sonda de contato, o equipamento praticamente não gera danos na superfície. Esse método se caracteriza por sua precisão em até nanômetros, capacidade de avaliar a superfície em imagens 3D e adequação para comparação qualitativa e quantitativa da rugosidade dos materiais (KIMYAI, S. *et al*, 2011; CORTÉS-SANDOVAL *et al.*, 2015).

Autores como Fouchier, Pargon e Bardet (2013) analisaram a rugosidade de superfícies com MFA para obter imagens tridimensionais. Nesta técnica, a amostra é inclinada a 50° e as paredes foram digitalizadas ao longo de seu comprimento com a ponta do MFA, resultando em imagens de alta resolução. Porém, uma limitação do método é a análise de áreas muito pequenas, com 50 micrometros ou menor, o que limita muito seu uso.

Outro método com a necessidade de contato é o do *sand patch test*, que chama a atenção por sua simplicidade de execução, consistindo no preenchimento dos vales da superfície a ser analisada com areia fina calibrada de volume conhecido (Figura

10), assim quantificando a parte da superfície que será coberta, sendo que dependendo do diâmetro do grão, a rugosidade média pode ser estimada, utilizando a altura média do cilindro de areia, dividido pelo diâmetro do círculo (FIP MODEL CODE, 2010; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014).

Figura 10 - Representação gráfica do *sand patch test*

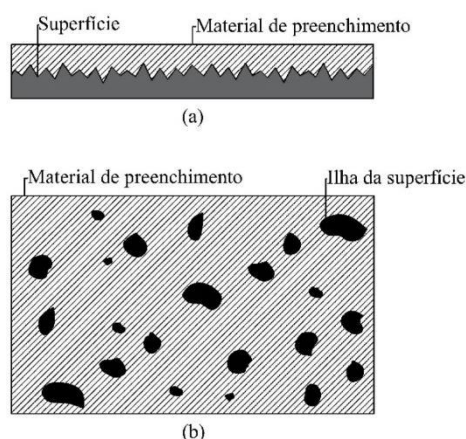


Fonte: Adaptado de Santos e Júlio (2013)

Entretanto, na Figura 10, é perceptível que o método do *sand patch test* realiza uma verificação da macroestrutura, não sendo indicado para análises de microestrutura, além de não apresentar exatidão nos resultados e inviabilizar a realização do ensaio em superfícies inclinadas.

O método *Slit-Island* é semelhante ao método *sand patch test*, contudo o material aplicado sobre as irregularidades é geralmente uma resina epóxi que é polida paralelamente ao plano da superfície ou água tingida, em que o nível deve ser diminuído ou aumentado até expor a superfície do material, assim várias ilhas aparecem (Figura 11). Após, a partir da vista superior, utiliza-se o processamento de imagem para a determinação da área e perímetro de cada ilha (SANTOS e JÚLIO, 2013).

Figura 11 - Representação gráfica do *Slit-Island*



Fonte: Adaptado de Santos e Júlio (2013)

O método do *Slit-Island*, assim como o do *sand patch test*, não é indicado para análises de microestrutura, porém, se torna eficaz quando o objeto é apenas caracterizar a macrotextura da superfície e por se tratar de um método destrutivo, quando se utiliza resina epóxi, deve-se evitá-lo quando há necessidade do uso da amostra após a medição.

Portanto, métodos com contato podem ser precisos ao se tratar de análises quantitativas, contudo a maior limitação é o tamanho da ponta do equipamento nos casos do rugosímetro, que são indicados para análises tanto macro como microestruturais. Já outros métodos, como o *sand patch test* e o *Slit-Island*, se caracterizam por análises macroestruturais, por não obterem a precisão adequada ao se tratar de verificações qualitativas.

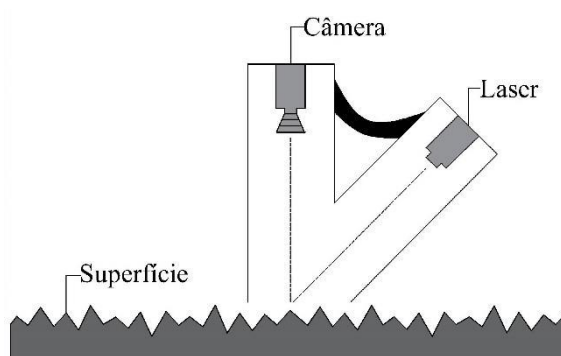
2.2.2.2 Métodos sem contato

O uso de técnicas de processamento de imagens é indicado para suprir a necessidade de várias medições quando se utiliza métodos de contato, assim realizando-se verificações com maior velocidade, precisão, sem o uso de contato e, muitas vezes, de forma tridimensional, possibilitando uma maior precisão na quantificação de rugosidade das superfícies. Na análise de imagens, o posicionamento do ângulo de iluminação e a planicidade da amostra são fatores de extrema importância, já que o mau dimensionamento destes pode acarretar em erros na visualização dos perfis, gerando sombreamento e dificultando a análise das irregularidades existentes, já ao se utilizar o ângulo adequado e uma amostra plana, a rugosidade do perfil aumenta, já que é possível a visualização de todas as

irregularidades. Portanto, antes da implementação do método escolhido, necessita-se adotar o ângulo, a distância da iluminação em relação à superfície e garantir a planicidade da amostra (POUR, 2016).

Neste contexto, o Medidor Digital de Rugosidade da Superfície (DSRM) é um dispositivo de processamento de imagens composto de um equipamento de alumínio, que contém uma câmera e uma faixa de laser (Figura 12). A avaliação pode se dar tanto na horizontal como na vertical, aumentando as possibilidades de seu uso (SANTOS e JÚLIO, 2013).

Figura 12- Representação gráfica do medidor Digital de Rugosidade da Superfície



Fonte: Adaptado de Santos e Júlio (2013)

Os autores citados explicam que no equipamento da Figura 12, a iluminação natural é rejeitada e os dados são transmitidos para um computador, e após são digitalizados, calculando automaticamente vários parâmetros de rugosidade em escala microestrutural. As principais vantagens deste equipamento são sua portabilidade, velocidade e adaptação da iluminação ideal, apresentando como desvantagens a necessidade de dois técnicos para avaliação e execução do ensaio e alto custo de aquisição (SANTOS e JÚLIO, 2013).

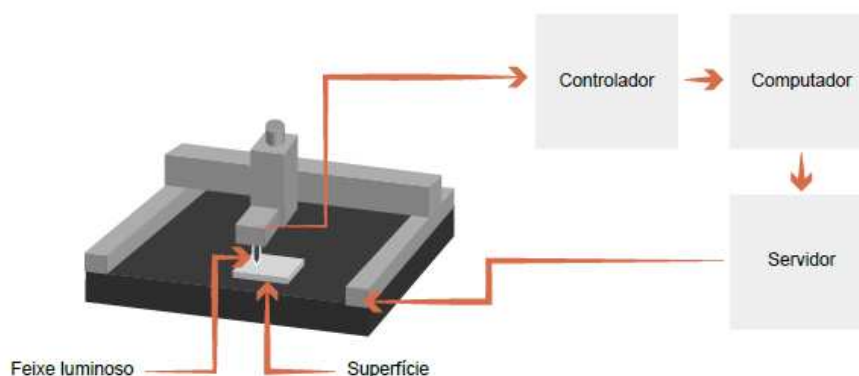
A fotometria é um método de análise de superfície que se caracteriza pelo uso de duas câmeras, sendo uma métrica e outra não métrica, a um curto alcance digital, utilizando uma superfície referência, ou seja, um padrão que é calculado matematicamente, então se pode dizer que este método utiliza o processamento de imagens para a determinação da rugosidade, ressaltando-se que a precisão dos resultados está diretamente relacionada com a resolução das câmeras (LEE; AHN, 2004). Os autores citados adotaram este método para analisar a rugosidade de rochas em escala microestrutural, e para o processamento dos resultados é necessário o uso de um *software*). O mesmo é desenvolvido para a leitura dos dados e para garantir a

eficiência, as rochas foram medidas também por um perfilômetro tridimensional, encontrando resultados semelhantes aos calculados na fotometria.

A perfilometria é um método tridimensional que se caracteriza por não ter a necessidade de contato com a peça, possuir alta velocidade de análise, gerar superfícies 3D e possibilitar o cálculo dos parâmetros de rugosidade, porém, apresenta falta de mobilidade (pois os testes precisam ser realizados em laboratório específico) e altura de medição limitada (SADOWSKI; CZARNECKI; HOLA, 2016). Esta técnica é executada com o uso do perfilômetro a laser tridimensional, também conhecido como *scanner* tridimensional. Pretto *et al.* (2009) e Stolz e Masuero (2016) utilizaram este equipamento para análise de superfícies de concreto quanto a sua microestrutura, ondulações e áreas de contato de substratos, verificando que este método é eficiente para a medição de superfícies por análises qualitativas, visto que os autores não analisam rugosidade de modo quantitativo. Contudo, apresenta a necessidade de calibrar o dispositivo com frequência, para manter a precisão dos dados encontrados (HOLA *et al.*, 2015; SADOWSKI; CZARNECKI; HOLA, 2016).

Lee e Ahn (2004) explicam que o equipamento de perfilometria utilizado em seu estudo, onde mediram a rugosidade de uma rocha, é constituído de um medidor de deslocamento do laser, um sistema de posicionamento e um computador para controlar todos os dados (Figura 13). O sistema de posicionamento é composto por um medidor de coordenadas, um servidor e uma parte de entrada de dados, sendo que estes foram gerados em uma nuvem de pontos x, y, z, tridimensional com resolução de 0,01 mm. O *software* realiza o cálculo dos parâmetros e a criação da imagem tridimensional, porém não há uma forma padronizada para se realizar uma análise quantitativa a partir da nuvem de pontos gerada, essa forma precisa ser desenvolvida. A análise do perfil gerado, na maioria das vezes, é qualitativa.

Figura 13 - Representação gráfica do perfilômetro a laser



Fonte: Lee e Ahn (2004)

Devido as vantagens dos métodos de processamento de imagens, o uso de microscópios para análise de rugosidade de superfícies se tornou frequente em diversos estudos atuais. Assim, Alves, Ferreira e Leta (2011), ao compararem o estereomicroscópio da marca ZEISS Stemi 508, verificaram que o primeiro apresentou menor porcentagem de erros, demonstrando ser um método mais confiável na avaliação de rugosidade de superfícies, quando confrontado ao microscópio eletrônico.

Limandri *et al.* (2016) adotaram mapas de imagens estéreo, que utilizam o princípio de estereoscopia, em que duas câmeras capturam a mesma imagem de ângulos diferentes, proporcionando tridimensionalidade, para transformar superfícies geradas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) em mapas topográficos para o cálculo dos parâmetros de rugosidade, tornando o método quantitativo.

Os autores ainda ressaltam que no MEV todas as amostras devem utilizar a mesma ampliação para garantir a precisão da superfície. Os pares estéreo foram utilizados em dois ângulos, sendo eles 0° e 5° , então para transformar as imagens em mapas e quantificar a rugosidade, utilizou-se o *software Compucentric Stage*. A nova técnica de medição demonstrou maior ampliação dos dados na ordem de micrometro em comparação ao perfilômetro 3D, contudo, a área de medição da amostra é muito pequena dificultando a análise da superfície como um todo e impossíveis, muitas vezes de serem extrapolados para outros equipamentos. A preparação das amostras, nesse caso, necessita de maior atenção (LIMANDRI *et al.*, 2016)

Santos e Júlio (2013), após estudarem métodos de análise de rugosidade, quanto as suas vantagens e desvantagens, afirmam que mesmo não existindo um

padrão de medição de rugosidade, o método ideal para caracterização de superfícies deve ser quantitativo ao invés de qualitativo, por conta da padronização dos resultados, e não destrutivo, assim não exigiria contato com a superfície. Atendendo a essas especificações, o método tende a evitar limitações na medição, garantir a precisão, rapidez e evitar danos à superfície.

A Tabela 3 apresenta as características dos métodos abordados nesta pesquisa, quanto à existência de contato ou não, o tipo de análise, seja ela qualitativa ou quantitativa e a destruição ou não da superfície, a fim de se analisar quais os métodos são mais adequados para a análise de rugosidade.

Contudo, vale salientar que, os métodos apresentam restrições ou procedimentos complementares de forma a atender a resolução ou representar fidedignamente a rugosidade das superfícies. Por exemplo, a resolução lateral da ferramenta de medição óptica é limitada pelo comprimento de onda da luz, além da capacidade limitada de medir as áreas inclinadas, pois o ângulo de inclinação mensurável máximo depende da abertura da objetiva (REITHMEIER, VYNNYK, SCHULTHEIS, 2010), além de apresentar-se sensível aos fenômenos de difração de luz (SANTOS e JÚLIO, 2013).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), segundo Reithmeir, Vunnyk & Schultheis (2010) apresenta uma resolução lateral claramente superior (até 5nm) contudo, essa técnica produz apenas imagens 2D (na escala x-y), assim, a verdadeira superfície 3D necessita inúmeras imagens usando métodos de reconstrução adicionais, tais como a fotometria e utilização de algoritmos.

Na MEV, um perfil de superfície pode ser obtido integrando o sinal do elétron retroespalhado para as respectivas varreduras. Isso se baseia no princípio de que o sinal é proporcional à inclinação da superfície ao longo da direção da digitalização (SATO & O-HORI, 1987). Para Hameed, Ali & Hassun (2018), as imagens do MEV têm alta resolução, no entanto, os detalhes de altura (escala z) são representados em escalas de cinza que contém um número que denota ângulo de inclinação, ampliação e tamanho do pixel (HENAO LONDOÑO, 2015).

Nesse sentido, Sato & O-Hori (1987) citam que o sinal retroespalhado inclui ruídos nas imagens geradas, o que causa um brilho desigual na imagem, ou seja, próximo ao centro, a imagem é mais brilhante e ao longo da periferia torna-se mais escura, pois o sinal é sobreposto pelo elétron retroespalhado. Já o ruído componente de alta frequência, os autores comentam que o perfil médio aparece convexo, mesmo

que a peça de teste seja plana. Isso porque, conforme Russ & Russ (1986), os elétrons secundários produzem variações de brilho que correspondem às arestas e à aspereza da superfície, de maneira que parecem grosseiramente semelhantes às imagens de luz visível de objetos maiores.

Outra restrição da MEV é a demanda de alta aquisição de dados, manutenção, custos e a amostra a ser analisada deve ter no máximo 1,0cm² de área. No caso de substratos como blocos cerâmicos, o método se torna destrutivo e demanda um número maior de amostras quando comparadas ao método que emprega o perfilômetro 3D.

No caso do método da fotometria, os perfis de superfície podem ser reconstruídos via algoritmos de reconstrução simples, porém o coeficiente de emissão dependente do material e a distribuição angular dos elétrons de emissão secundária é assumida como tendo uma forma cosseno. Esta suposição é uma aproximação grosseira do real, o que leva à perda da resolução lateral (REITHMEIER, VYNNYK, SCHULTHEIS, 2010).

A Microscopia de Força Atômica (MFA) apresenta uma limitação na captura da imagem da amostra por conta da ponteira com dimensões finitas na extremidade, assim, o escaneamento é limitado no que se pode abordar pelo topo da amostra, em particular reentrâncias com dimensões inferiores àquelas da ponteira ou ocultas à ela, de forma que será inacessível topograficamente, assim, o resultado final é uma estrutura de contorno que não contempla as partes inacessíveis ou intocáveis (MORAES, 2020). Assim como a MEV, a MFA apresenta uma série de restrições quando a finalidade do experimento é determinar a rugosidade de um material como o bloco cerâmico, pois sugerem a análise de múltiplas varreduras da superfície, o que representa uma tarefa que leva muito tempo para obter um resultado satisfatório, além de que essas duas técnicas só permitem avaliar pequenas áreas em um tempo razoável.

Tabela 3 - Características dos métodos de medição de rugosidade

Métodos	Quantitativo	Qualitativo	Não-destrutivo	Destrutivo	Com contato	Sem contato	Escala
Análise Visual (ICRI)		x	x			x	>50 μm
Fotometria	x		x			x	0,025 a 50 μm
Medidor Digital de Rugosidade da Superfície (DSRM)	x		x			x	0,025 a 50 μm
Método <i>Slit-Island</i>	x			x	x		>50 μm
Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	x	x	x			x	0,025 a 50 μm
Microscópio de Força Atômica (MFA)	x		x		x		0,025 a 50 μm
Microscópio Eletrônico		x	x	x		x	0,025 a 50 μm
Microscópio Óptico		x	x	x		x	0,025 a 50 μm
Perfilometria a Laser	x		x			x	0,025 a 50 μm
<i>Sand patch test</i>	x		x		x		>50 μm
Rugosímetro	x			x	x		0,025 a 50 μm

Fonte: Elaborada pela Autora (2020)

Sendo assim, após verificar que os métodos com contato exigem maiores números de medições para estabelecer uma precisão adequada e que se limitam ao diâmetro da ponta do equipamento, nota-se que os métodos mais indicados para análises de microestrutura são os sem contato, porém devem ser quantitativos, por obterem maior padronização dos resultados e não destrutivos, para possibilitar o uso das amostras após a medição.

Neste contexto, ressalta-se que nos métodos sem contato, a maioria não utiliza laser como princípio de aquisição de dados, mas os que utilizam deve-se ter atenção ao ângulo de inclinação do laser e a planicidade da amostra, para garantir a caracterização real do perfil, optando-se, sempre que viável, pelo processamento de imagens tridimensionais por apresentarem uma melhor visualização de toda a superfície. Os métodos que atendem essas exigências são a fotometria, o DSRM, o MEV e a perfilometria a laser.

2.2.3 Métodos de Medição de Rugosidade Utilizados para Avaliação de Substratos

Neste tópico, serão apresentados os resultados encontrados por autores que utilizaram os métodos relatados no presente estudo, sendo eles quantitativos ou

qualitativos, assim como a comparação entre métodos quando utilizados em conjunto, facilitando o entendimento do comportamento dos equipamentos em diferentes análises.

2.2.3.1 Perfilômetro 3D

Com o perfilômetro 3D, Siewczynska (2012) adotou cálculos de rugosidade a partir de medições geométricas de toda a extensão da superfície de concretos, e não pela média de dados. O equipamento utilizado gerou uma nuvem de pontos 3D (x, y e z), sendo possível a maior precisão dos parâmetros de superfície e o erro estimado durante a medição foi de 0,20 mm. O autor ressalta que durante a medição deve-se ter o devido cuidado para o feixe luminoso atingir todas as cavidades da superfície, isso será possível com um bom posicionamento do equipamento e da planicidade da amostra, caso contrário o resultado será uma superfície mais suave do que a realidade.

O scanner gerou 1.400.000 pontos, sendo que quanto maior a quantidade de pontos mais precisa é a medição, contudo, o autor verificou que esse equipamento supriu as necessidades do trabalho e gerou dados confiáveis para as amostras que foram analisadas. Cabe salientar que a precisão tem grande relação com as distâncias entre os pontos obtidos para gerar a nuvem de pontos, discordando da afirmação de Siewczynska (2012), que fala que a precisão de dá pelo número de pontos obtidos no ensaio.

Já Ge *et al.* (2014) utilizaram um perfilômetro tridimensional para análise de rugosidade em rochas naturais, explicando que os dados medidos tem um padrão de coordenadas (x,y) na horizontal e o valor de z é a altura em cada ponto medido. Os autores adotaram um método de triangulação para a geração das superfícies, semelhante ao estudado por Delaunay (1934), em que o objetivo é criar a superfície a partir da geração de triângulos com a menor aresta possível. Os planos x e y foram espaçados em intervalos de 0,10 mm na extensão das amostras. Portanto, foi verificado que a rugosidade neste material varia em cada direção ao longo do comprimento de medição e também que a anisotropia varia com a escala.

Perez, Bissonnette e Courard (2009) utilizaram o perfilômetro a laser adotando um padrão chamado de *Moiré*, que é um padrão de interferência, quando duas grades são sobrepostas e geram movimento relativo entre si em referência a um observador,

assim gerando um padrão de franjas. Desta forma, analisaram duas imagens com diferentes padrões de *Moiré*, sendo o primeiro utilizado como referência, sem deformação, e o segundo é projetado de acordo com a rugosidade da superfície, obtendo-se dados tridimensionais do perfil. A precisão da medição está relacionada a qualidade da imagem, sendo que a um ângulo de 45° e com 512x512 pixels, a resolução deve ser 1/5000 o tamanho do objeto. Perez, Bissonnette e Courard (2009) ainda constataram que o método foi adequado quando utilizado em conjunto ao rugosímetro, com o objetivo de complementar os resultados.

Garbacz, Courard e Kostana (2006) também utilizaram o método de perfilometria a laser em comparação ao rugosímetro para análise de superfícies de concreto com distintos tratamentos superficiais, em que observaram falhas de dados de altura obtidos com o perfilômetro tridimensional, essas sendo corrigidas utilizando uma relação com os dados de medidas próximas.

A precisão do perfilômetro foi de 1µm com um ângulo máximo de 90°, na qual foram medidas áreas de 10x30 mm², realizando o escaneamento em linhas paralelas espaçadas entre si com 50 µm de distância. Os autores citados explicam que, em seguida as medições os dados, foram filtrados e separados em macrotextura e microtextura e o filtro utilizado para separar a ondulação do perfil adotado foi de 0,8 mm.

Após as análises de resultados, os autores afirmam que o perfilômetro a laser fornece uma medida mais coerente do perfil a ser analisando, verificando variâncias significativas entre os dois métodos, sendo que o rugosímetro 2D não foi sensível a certas ranhuras da superfície como fissuras e maiores vales, tornando as medidas mais suaves (GARBACZ, COURARD e KOSTANA, 2006).

Mullan *et al.* (2017) analisaram quantitativamente o esmalte de dentes polidos e não polidos quanto a rugosidade superficial com o uso de um perfilômetro 3D, em que o mesmo disponibilizava o vídeo da superfície em uma linha indicando a horizontal, assim facilitando o posicionamento do laser, além disso, a fonte do laser tinha um tamanho de 2µm e uma resolução vertical de 10nm, os dados obtidos geraram uma nuvem de pontos 3D utilizando um *software*, porém ressalta-se que antes da utilização dos pontos, estes passaram por um filtro gaussiano de 25µm, então os parâmetros foram automaticamente calculados e para gerar a imagem tridimensional, utilizou-se um *software* de metrologia de superfície. Assim, em

amostras não polidas e polidas, obtiveram R_a de 1,45 e 0,04 μ m na parte central das amostras, respectivamente.

Dapper (2013) utilizou a tecnologia de digitalização 3D para a aquisição de dados topográficos da superfície do córtex inferior dos líquens, a fim de criar um modelo para melhorar a aderência do revestimento de argamassa com o concreto. O equipamento utilizado foi o *Digimill* 3D da marca *Tecnodrill*, com lente *Optimet* 150 mm, e uma resolução de 0,005 mm nos eixos X e Y. A partir da digitalização tridimensional, extraiu-se uma parcela da textura do líquen para a confecção de um módulo.

Antonova *et al.* (2021) utilizaram um perfilômetro para quantificar a rugosidade de um tipo de fibra, pois as medições ultrapassaram os limites de medição do MFA. O perfilômetro permitiu a medição do perfil de rugosidade da superfície dessa terceira fibra de aço como uma linha ao longo de seu comprimento (eixo X), usando duas linhas de 200 μ m medidas em locais diferentes da fibra. A rugosidade da superfície de cada fibra foi determinada calculando a altura média e o comprimento de onda do perfil da superfície e a rugosidade quadrada média (R_q) correspondeu ao desvio padrão da distribuição de altura.

Pretto *et al.* (2009) caracterizaram as rugosidades dos diferentes tratamentos superficiais em substratos de concreto, através da técnica de digitalização tridimensional a laser, para aquisições de dados topográficos de superfícies. Para tanto foi utilizado o *scanner* tridimensional a laser, marca *Tecnodrill*, modelo *Digimill* 3D. Esse equipamento também atua como fresadora, na qual a movimentação de um cabeçote de digitalização sobre determinada peça no plano dos eixos x e y, que simultaneamente vai medindo a altura no eixo z e os resultados da varredura permitem a obtenção de pontos da superfície em coordenadas (x, y, z).

Outro detalhe importante foi a seleção das lentes do equipamento que são de 25mm, 75mm e 100mm e em seus estudos, a lente escolhida de acordo com a maior faixa de operação, foi de 100mm, com precisão máxima de 5,2 μ m. Em média para cada linha de perfil de rugosidade foram obtidos de 6.000 a 7.000 pontos para uma linha com aproximadamente 14mm de comprimento em plano. Desse modo, os autores escanearam áreas com dimensões de 30 mm x 30 mm e obtiveram em média de 300.000 a 400.000 pontos.

Como parâmetro de rugosidade, Pretto *et al.* (2009) adotaram o ISS (Incremento Específico da Superfície), proposto por Bélair *et al.* (2005). Este

parâmetro é obtido dividindo-se a superfície efetiva (SS) pela superfície geométrica (SG) de uma superfície. Define-se por superfície geométrica (SG) a superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento e a superfície efetiva (SS) é aquela avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada da superfície real de uma peça.

O incremento específico da superfície representa o aumento na área potencial de contato gerado pelo tratamento superficial. Como conclusão do estudo, os autores citam que quanto mais poroso for o concreto e mais agressivo for o tratamento superficial, maior é o Incremento de Superfície Específica (ISS), o que reflete em maior área potencial de contato entre o substrato e o revestimento.

Pagnasut (2013) também utilizou blocos cerâmicos, porém utilizou um scanner tridimensional a laser, marca Tecnodrill, modelo Digimill 3D. O autor ensaiou 5 amostras de superfície de um bloco para cada temperatura de sinterização, realizando uma varredura do scanner 3D por uma linha de 10, 727mm, com um cutt-off de 0,08 mm, totalizando que cada ponto analisado é a média resultante de 134 leituras do scanner sobre a superfície do bloco cerâmico. Os resultados de R_a das amostras analisadas não foram significativamente diferentes e apresentaram valores entre 0,60 a 0,80 μ m.

2.2.3.2 Rugosímetro 2D

Os métodos de medições com contato apresentam limitações quanto aos tamanhos das irregularidades, pois a rugosidade apresenta variação entre diferentes locais do perfil (JIAN *et al.* (2017), dessa forma, conforme os autores, para minimizar o efeito dos erros obtidos, deve-se desconsiderar os resultados máximos e mínimos entre as medições, adotando o valor médio e variância dos resultados para caracterizar a rugosidade das superfícies e seu desvio padrão.

Perez, Bissonnette e Courard (2009), ao analisarem superfícies de concreto com o rugosímetro 2D, adotaram o raio de ponta de 6 μ m para análise da rugosidade e da ondulação (R_a de 0,50 μ m a 0,5mm) e após, trocaram o raio para 3mm, apenas para a análise da macroestrutura. Por fim, os autores verificaram que este método é menos preciso para altas frequências (rugosidade) e que bolhas de ar podem interferir na medição, visto que ocorre o deslocamento da ponteira.

Sassoni et al. (2017) utilizaram em seus estudos três diferentes blocos para mostrar uma alta variabilidade em termos de propriedades mecânicas e microestruturais. Um tipo de bloco produzido por extrusão (superfície muito lisa e o substrato parece mais homogêneo e denso) e dois blocos artesanais produzidos por compactação (rugosidade superficial mais alta). A rugosidade da superfície foi determinada quantitativamente por um rugosímetro (Leica Dual Core Microscope 3D Software DCM 3D e Leica Map Premium) usando a técnica confocal (objetivo: 10, resolução em Z: 30nm).

Para cada tipo de bloco e cada superfície, foram medidos perfis de rugosidades em 5 linhas longitudinais e 2 linhas transversais, de forma a detectar qualquer diferença na rugosidade da superfície ao longo das duas direções ortogonais. Os autores observaram que a extrusão causa uma orientação paralela preferencial das lamelas de argila, que influenciam notavelmente a anisotropia mecânica do tijolo, criando uma direção mais resistente. Desta forma, os autores quando aplicaram perfilômetro, obtiveram resultados da superfície superior mais áspera que a superfície frontal, apresentando diferenças de valores de índice de rugosidade mais que o dobro.

2.2.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A MEV é útil para observar e caracterizar diferentes tipos de materiais de escala nanométrica (nm) a micrométrica (μm). Os elétrons secundários do MEV são preferíveis para analisar a morfologia e a topografia das amostras pelo fato de permitirem a obtenção de uma imagem tridimensional, contudo para a realização das análises, as amostras necessitam ser metalizadas com uma fina camada de ouro de modo a garantir a adequada condução de corrente elétrica para a obtenção das imagens (SANTOS *et al.* 2020). Além disso, para reconstruir uma imagem 3D empregando a MEV, recomenda-se movimento ao longo de cinco eixos (x, y, z, inclinação e rotação) e reconstrução 3D combinados a algoritmos (LONDOÑO, 2015).

Para a análise visual da superfície, Cortés-Sandoval *et al.* (2015) adotaram o MEV, em que verificaram que materiais metálicos apresentavam mais rugosidade quando comparados aos acrílicos, entretanto, após o polimento, ocorreu a diminuição desta propriedade, já o material acrílico não apresentou mudanças visuais em sua superfície após o polimento, afirmando que quando utilizado este método de forma

qualitativa, o mesmo não demonstra total precisão, dificultando a visualização da microestrutura da superfície.

Os autores ainda ressaltam que as principais desvantagens deste método são o alto custo de aquisição e manutenção, inserção das amostras em um sistema de vácuo, necessidade de alimentação de alta tensão e grandes dimensões, não sendo um dispositivo portátil (SANTOS e JÚLIO, 2013).

Os resultados de Dapper (2013) foram escalados em 3 níveis de rugosidade diferentes, numa comparação análoga do objeto de estudo (líquen) com a atual técnica de tratamento de superfície de concreto (chapisco). Além disso, o líquen foi submetido à secagem em estufa, com temperatura constante em 30°C por 24 horas, para a visualização no microscópio eletrônico de varredura (MEV) de bancada, da marca *Hitachi*, modelo TM3000, que permitiu a visualização de pequenas fibras responsáveis pela fixação do líquen em diferentes superfícies (DAPPER, 2013).

2.2.3.4 Microscopia de Força Atômica

Assim como o rugosímetro, a MFA também se caracteriza pela necessidade de contato (CORTÉS-SANDOVAL *et al.*, 2015). Nesta técnica emprega-se um sistema de alinhamento com feixe de laser que incide sobre o cantilever e reflete em um sensor de quatro quadrantes e dessa forma fornece informações de localização para o sistema de realimentação e controle, que corrige a posição do cantilever de forma a manter o contato com a amostra e permitir a obtenção da imagem (FERNANDES, PAULIN FILHO; MORELLI, 2011).

Conforme Fernandes, Paulin Filho e Morelli (2011) o MFA obtém as imagens em modo contato e modo não-contato, dependendo das forças líquidas entre a sonda e a amostra, onde a atração e repulsão causam uma deflexão no cantiléver, assim se o aparelho opera na região atrativa, o cantilever e amostra são atraídos, trata-se então do modo não-contato. Se a operação é na região repulsiva, o cantilever e amostra são repelidos, trata-se do modo contato. As imagens realizadas podem ser observadas em duas e três dimensões, através do software de tratamento de imagem da NanoScope® que contém algoritmos poderosos para apresentação e medição dos resultados, podendo também visualizar-se secções de corte, efetuar a medição da rugosidade superficial. Contudo, as amostras precisam ser polidas e recobertas com

resina polimérica, além de que para cada amostra devem ser obtidas imagens com diferentes áreas de varredura.

Fouchier, Pargon e Bardet (2013) afirmaram que a técnica MFA, quando utilizada para análises quantitativas, consegue alcançar medições em vales profundos e superfícies de altas frequências, por apresentar um pequeno diâmetro de ponta de $0,007\mu\text{m}$ (FOUCHIER; PARGON; BARDET, 2013).

Hao, Lv e Zhang (2014) também utilizaram o MFA para avaliar diferentes superfícies quanto ao R_a , porém, para efeito de complemento dos resultados, adotaram juntamente o perfilômetro tridimensional. Assim, os autores verificaram que superfícies lisas de silício apresentaram R_a menor ($R_a = 0,0087\mu\text{m}$), quando comparadas a superfícies de alumínio com nanoestruturas ($R_a = 0,377\mu\text{m}$).

A relação entre a rugosidade e a molhabilidade da superfície da fibra e sua conexão com a formação da microestrutura da pasta de cimento próximo a fibra foram estudadas por Antonova *et al.* (2021). Para quantificação da rugosidade da superfície da fibra de aço, os autores empregaram o MFA com cantiléver de ponta de silicone (*ScanAsyst-Air*) e um rugosímetro (*Veeco Dektak 6M*). O MFA foi usado para quantificar a rugosidade de duas fibras, considerando áreas de $80\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$ medidas em três locais. Dentro de cada uma dessas áreas, 256 linhas foram varridas na direção longitudinal da fibra a uma taxa de 0,3Hz. O perfil de rugosidade da superfície da fibra foi quantificado usando as coordenadas X e Z. A curvatura da fibra na direção da coordenada angular foi considerada mapeando as linhas medidas no plano tangente. O mapeamento foi realizado pelo software de análise Nanoscope, que gera dados qualitativos e quantitativos.

Rochas minerais apresentam rugosidade na escala de grãos. Neste sentido, Alnoush *et al.* (2021) citam que, normalmente, a rugosidade de uma superfície é relatada como elevações ou diferenças de pico a vale e no caso de rochas minerais como a calcita e o quartzo, não possibilitam a captura totalmente da rugosidade interna das paredes dos poros e as heterogeneidades. Dessa forma, os autores avaliaram a rugosidade da superfície da calcita por interferometria e MFA. Os mapas de superfície de interferometria correspondem a rugosidade da superfície. No caso de imagens obtidas a partir do MFA, possibilitam amostras em escalas de $0,50$ a $20\mu\text{m}$, porém a escala de $5\mu\text{m}$ foi considerada uma escala representativa, pois as áreas de amostragem maiores não parecem alterar o quadro qualitativo geral. Os desvios de altura nas imagens 2D são representados por barras de cores enquanto as imagens

3D exibem a topografia, ilustrando recursos de superfície com a mesma escala de cores. Os resultados de rugosidades para superfície de calcita lixada com lixa de gramatura 600 variam de - 437,1nm a 483,1nm, enquanto que as amostras com gramatura 1000 variam de - 227,7nm a 214,4nm. Ou seja, a rugosidade da superfície diminui à medida que aumenta a gramatura da lixa para as diferentes amostras de calcita.

Ressalta-se que no caso do estudo de blocos cerâmicos, tanto a MFA, quanto a MEV demandam uma quantificação maior de áreas de forma a caracterizar a rugosidade da superfície devido a heterogeneidade do material.

Outro ponto relevante apontado por Fernandes, Paulin Filho & Morelli (2011) é que conforme a área de varredura vai diminuindo passa-se a ter uma visão mais localizada de alguns pontos específicos da amostra e a análise se torna menos reprodutível.

Neste contexto, no Quadro 1 estão apresentados alguns resultados já encontrados por literaturas sobre rugosidade de superfícies. Para o desenvolvimento desse Quadro foi adotado rugosímetro, no caso de obtenção de dados em 2D, e perfilômetro quando medido em 3D.

Quadro 1 - Resultados de estudos já realizados

(continua)

Autor	Ano	Equipamento	Material	Ra (µm)
ALNOUSH <i>et al.</i>	2021	Interferometria e MFA	Rochas minerais de calcita	0,03 - 0,893
		MFA	Rochas minerais de calcita	-0,028 - 0,483
ANTONOVA <i>et al.</i>	2021	MFA	Fibras de aço	0,02 - 0,23
		Rugosímetro	Fibras de aço	5,58
JIAN <i>et al.</i>	2017	Rugosímetro	Chapas de aço	0,197-1,916
MULLAN <i>et al.</i>	2017	Perfilômetro 3D	Esmalte de dentes polidos	0,04
SASSONI <i>et al.</i>	2017	Rugosímetro	Blocos cerâmicos	11 - 164
LIMANDRI <i>et al.</i>	2016	MEV	Dentes com clareamento	0,56
EK <i>et al.</i>	2016	Rugosímetro	Superfície de Titânio	24-30
CORTÉS-SANDOVAL <i>et al.</i>	2015	Microscópio de força atômica	Metal polido	0,084

Quadro 2 - Resultados de estudos já realizados

(conclusão)

Autor	Ano	Equipamento	Material	Ra (μm)
HAO, LV e ZHANG	2014	Microscópio de força atômica e Perfilômetro 3D	Alumínio Polido	0,377
PAGNUSAT	2013	Rugosímetro	Blocos cerâmicos	0,60 – 0,80
PEREZ, BISSONETTE e COURARD	2009	Rugosímetro	Concreto com tratamentos superficiais	20-209
PRETTO et al.	2009	Rugosímetro	Concreto com tratamentos superficiais	-
GARBACZ, COURARD e KOSTANA	2006	Perfilômetro 3D	Concreto com jato de areia	13
		Rugosímetro	Concreto com jato de areia	15

Fonte: Elaborado pela Autora (2020)

Ao analisar os resultados dos autores citados neste trabalho, percebe-se claramente que não há consenso entre os métodos de medição de rugosidade. Na pesquisa, após a análise dos métodos existentes, nota-se que os mais indicados são os métodos 3D, quantitativos, visto que desejasse quantificar e ser capaz de determinar a rugosidade, e não apenas a ondulação, conforme indicação de autores como Perez, Bissonnette e Courard (2009).

2.3 RUGOSIDADE DE SUBSTRATOS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme a NBR 13529 (ABNT, 2013), substratos se caracterizam por serem superfícies de tetos ou paredes constituídas de materiais inorgânicos, não metálicos, sobre os quais os revestimentos serão aplicados. Para caracterização completa dos substratos, deve-se analisar tanto a microestrutura quanto a macroestrutura, que estão relacionadas a diferentes frequências e comprimentos de onda (SANTOS e JÚLIO, 2013).

A tendência atual dos estudos é trabalhar com análise multidimensional, utilizando-se simultaneamente ensaios macro e microestruturais para caracterização das superfícies (KRAKOWIAK; LOURENÇO; ULM, 2011; KIEFER, *et al.*, 2020). Neste contexto, Kiefer *et al.* (2020) sugeriram o desenvolvimento de um modelo de material

em análise de multiescala, possibilitando prever propriedades eficazes em função das características microestruturais de argilas sinterizadas. Assim, uma compreensão mais profunda deste tipo de material pode ser obtida e uma base para novos conceitos no desenvolvimento de produtos podem ser lançados.

Uma análise multiescala utiliza diferentes técnicas de medição para avaliar propriedades de materiais em diferentes escalas, que vão desde a microscopia eletrônica de varredura (MEV), juntamente com espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), porosimetria de intrusão de mercúrio, nanoindentação e testes de resistência macroscópica e de durabilidade (KRAKOWIAK, LOURENÇO, ULM, 2011).

Uma modelagem multiescala considera caracterizações distintas: a macroescala, em que o material é considerado homogêneo e a topografia pode se apresentar lisa ou estriada; a mesoescala permite analisar partículas de cada elemento componente do composto heterogêneo e a topografia depende do local estudado, podendo se apresentar lisa ou rugosa; a microescala apresenta as porcentagens de elementos químicos formados no material homogêneo e a topografia apresenta picos e vales, além de caracterizar a porosidade das interfaces ou zonas de transição. Já a nanoescala discrimina as fases, dureza, porosidade e nanorugosidades da topografia do material.

A macroescala é a maior escala de observação, dessa forma a matriz de argila sinterizada é quase homogênea e apresenta macroporos que podem ser identificados a olho nu com raio de até 1 mm (KRAKOWIAK, LOURENÇO, ULM, 2011). Já a mesoescala, a matriz de argila é analisada através de micrografias do MEV, juntamente com o mapeamento elementar do EDS, que permite acesso à fração de volume e morfologia das lâminas de argila e dos poros embutidos na matriz. Numa microescala não é possível avaliar quantitativamente a forma e orientação dos poros, fazendo-se necessárias análises por intrusão de mercúrio.

Por falta de padronização e consenso das definições, para o presente estudo é proposta uma escala para definição quantitativa do que são erro de forma, ondulação e rugosidade para os blocos cerâmicos em estudo (Figura 14).

Figura 14 - Definição escalar de rugosidade, erro de forma e ondulação para blocos cerâmicos



Fonte: Elaborada pela Autora (2021)

Os materiais constituintes de cada substrato cerâmico e o processo de fabricação afetam diretamente sua rugosidade superficial, sendo que, quando os tamanhos dos grãos em sua composição são menores, este apresenta uma superfície com rugosidade mais suave. Já materiais com grãos maiores, geram superfícies mais ásperas, facilitando o intertravamento mecânico (LIN, 2006).

Outro fator que também influencia na rugosidade dos substratos é a forma de fabricação, por exemplo, blocos cerâmicos são fabricados com o uso de extrusora, que gera uma orientação paralela preferencial das lamelas de argila, e influencia notavelmente a anisotropia mecânica do bloco cerâmico, criando uma direção mais resistente para o material (SASSONI *et al.*, 2017), o que pode causar rugosidades diferentes em cada direção do bloco cerâmico, influenciando diretamente na ancoragem do revestimento no mesmo, por meio da área de contato (GRIGORIADIS, 2016; GADRI; GUETTALA, 2017). Utilizando um perfilômetro óptico, os autores observaram que a superfície dos blocos onde ocorre o corte da argila após a extrusão apresenta um índice de rugosidade mais de 100% superior ao das superfícies laterais (GRIGORIADIS, 2016; GADRI; GUETTALA, 2017).

Outra propriedade que irá influenciar na adesão ao substrato é a porosidade dos materiais, sendo que para aplicação de revestimentos em substratos porosos, o tamanho e distribuição dos poros, a rugosidade, a homogeneidade da superfície e a densidade de massa devem ser levadas em consideração, para selecionar o traço de revestimento adequado e proporcionar bom intertravamento mecânico (CONTARDI; CORNAGLIA; TARDITI, 2017). Salienta-se que superfícies com os mesmos tamanhos de poros podem apresentar rugosidades distintas.

Embora os blocos cerâmicos sejam materiais amplamente utilizados como substratos, há grande escassez de informações sobre suas características de superfície. Kazmierczak, Brezezinski e Collatto (2007) compararam a distribuição de poros em substratos de concreto e cerâmicos, verificando diferenças significativas nessa propriedade entre os materiais, sendo que no trabalho referido pelos autores, os blocos de concreto apresentaram maior quantidade de poros maiores (30 a 200 μm), enquanto os substratos de cerâmica vermelha tiveram maior quantidade de poros menores (0,01 a 30 μm).

Já Gazulla *et al.* (2011) estudaram telhas de cerâmica vermelha com diferentes temperaturas de sinterização e notaram que a porosidade variou significativamente ao se mudar a temperatura, sendo que, conforme se aumenta a temperatura de sinterização, a porosidade diminui. Neste cenário, Saleiro e Holanda (2012) analisaram blocos cerâmicos e justificam que ocorre a diminuição dos poros devido a fase vítrea de sinterização. Pagnussat (2013) notou a diminuição da porosidade e o aumento da rugosidade na temperatura mais elevada (1000°C).

O processo de sinterização influencia fortemente nas propriedades mecânicas da cerâmica e em suas propriedades de superfície, como a rugosidade, porosidade e a absorção de água. O efeito da temperatura de sinterização em peças cerâmicas se deve fundamentalmente ao fechamento da porosidade aberta no interior da cerâmica vermelha, devido à desidroxilação da caulinita (formação da metacaulinita amorfa) e posterior transformação para fases cerâmicas de alta temperatura (formação da mullita) (PINHEIRO; HOLANDA 2010; KIEFER, *et al.*, 2020). Acima de 950°C, a porosidade aberta pode se fechar de forma mais significativa, devido à presença de uma pequena quantidade de finos filamentos de vidro. A diminuição da porosidade é acompanhada por uma diminuição volumétrica da peça, que irá alterar as características de rugosidade da superfície (KRAKOWIAK, LOURENÇO, ULM, 2011).

A maioria das normas sobre produtos de cerâmica vermelha, como a BS 3921, a ASTM C67, a EN 771-1 e a NBR 15270-1 (ABNT, 2017) não especificam parâmetros relevantes à aderência com a argamassa, como as características de superfície, textura ou rugosidade do substrato. Ao revisar a bibliografia, constata-se que não há um método consolidado para a caracterização da rugosidade de substratos cerâmicos. Segundo Santos e Júlio (2013) e Pedro & Eduardo (2010), uma abordagem qualitativa, baseada em uma inspeção visual, é proposta por vários

códigos, como CEB-FIP *Model Code* (TAERWE e METTHYS, 2013), Eurocode 2 (BS, 1997), ACI 318 (ACI318, 2019) e CAN / CSA A23.3 (CAN CSA A23.3, 2004).

Em relação a aderência entre substratos e revestimentos, no estudo de adesivos, é conhecido que um substrato mais rugoso aumenta a área de contato do adesivo com a superfície do substrato, conseqüentemente aumentando a resistência de aderência do adesivo. Entretanto, ainda não há consenso de que esse comportamento geral possa ser aplicado a argamassas de revestimento (HOLA, 2015; WANG, 2014). Conforme Kozubal *et al.* (2020) e Ma *et al.*, (2017), para que se possa modelar as áreas de contato entre a pasta de cimento e o substrato a partir de funções que simulam a probabilidade de densidade de partículas do cimento no plano da superfície, é imprescindível que se conheça os parâmetros de superfície do substrato.

Os parâmetros de rugosidade dos substratos influenciam diretamente na aderência dos revestimentos e nas precoces manifestações patológicas em fachadas de edifícios novos. A propriedade de adesão entre os substratos e revestimentos está entre as principais causas deste problema, devido à falta de especificação em relação a produção das argamassas com a análise do intertravamento mecânico com os substratos.

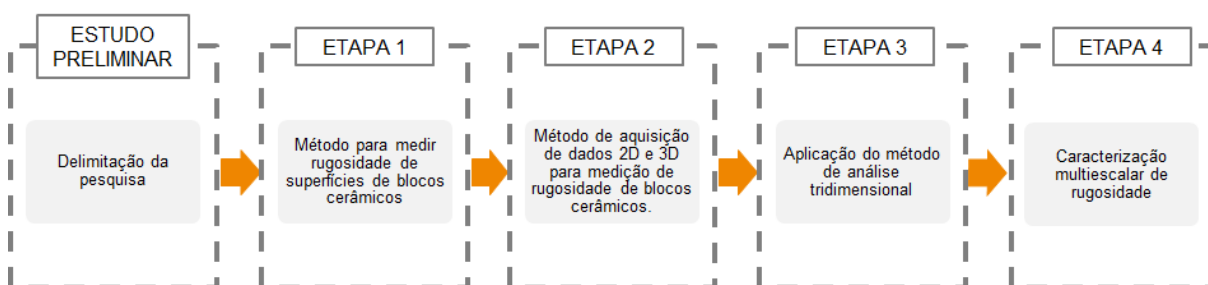
A área de contato será menor com rugosidades mais suaves de substratos, assim, gerando a necessidade de maiores estudos, visando prolongar a vida útil do sistema e reduzir essas manifestações patológicas (KAZMIERCZAK; BREZEZINSKI; COLLATTO, 2007; STOLZ; MASUERO, 2016).

Desta maneira, baseando-se nos estudos prévios realizados pelos autores pesquisados e pelas lacunas encontradas no que se relaciona à quantificação de rugosidades presentes no substrato e o estabelecimento de relação entre este elemento e os mecanismos de aderência, elaborou-se o programa experimental descrito posteriormente.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental deste estudo foi desenvolvido através de cinco etapas experimentais distintas (Figura 15), com foco no atendimento dos objetivos da pesquisa.

Figura 15 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no programa experimental



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

- **ESTUDO PRELIMINAR (Delimitação da pesquisa):** No Estudo Preliminar foram analisados substratos cerâmicos queimados em diferentes temperaturas com o objetivo de avaliar, qualitativamente, as diferenças de características superficiais, a fim de delimitar a pesquisa.
- **ETAPA 1 (Método para medir rugosidade de superfícies de blocos cerâmicos):** O foco principal da ETAPA 1 é na análise quantitativa de rugosidade dos substratos com o objetivo de desenvolver um método adequado para quantificação da rugosidade de blocos cerâmicos.
- **ETAPA 2 (Método de aquisição de dados 2D e 3D para medição de rugosidade de blocos cerâmicos):** Na ETAPA 2 o método criado foi aplicado, onde os princípios de cálculo e a assinatura de rugosidade foram utilizados para comparar a qualidade e adequação da informação obtida com o uso de duas categorias de equipamentos de medição de rugosidade, um rugosímetro 2D e um perfilômetro 3D.
- **ETAPA 3 (Aplicação do método de análise tridimensional):** Na ETAPA 3, a metodologia desenvolvida para a avaliação de rugosidade de substratos cerâmicos foi aplicada para a avaliação de diferenças de rugosidade entre blocos produzidos em diferentes olarias.

- **ETAPA 4 (Caracterização multiescalar de rugosidade):** A ETAPA 4 possui o objetivo de validar o método de determinação de rugosidade de blocos cerâmicos proposto no estudo.

Nesta etapa foram correlacionados os parâmetros de rugosidade obtidos por meio de diferentes métodos de análise a fim de criar uma caracterização multiescalar de rugosidade para os blocos cerâmicos de vedação utilizados no estudo, e avaliar se as diferentes técnicas utilizadas apresentam similaridade nos dados de rugosidade.

3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a realização das análises estatísticas foram definidos os fatores de respostas de interesse a pesquisa, para que sejam alcançados os objetivos propostos:

- a) Parâmetros de rugosidade de blocos cerâmicos (ETAPA 1);
- b) Variação de rugosidades entre distintas amostras e mesma temperatura de sinterização (ETAPAS 1, 2, 3 e 4);
- c) Comparação de rugosidades entre diferentes temperaturas de sinterização (ETAPAS 1 e 2);
- d) Análise de variações de rugosidade de blocos entre as distintas olarias (ETAPAS 3 e 4).

Os fatores de controle do Bloco Cerâmico foram a temperatura de sinterização, as olarias e os diferentes métodos aplicados para determinação dos parâmetros de rugosidade, e as variáveis fixas foram os equipamentos utilizado para cada medição, substratos de origem cerâmica e faces de estudo lisas.

Para a realização de experimentos significativos e confiáveis deve-se usar o tratamento de dados experimentais e análise de resultados, logo é imprescindível o uso de métodos estatísticos. A análise estatística dos resultados obtidos é uma importante ferramenta na validação desses dados (NORMANDO, TJÄDERHANE, QUINTÃO; 2010).

A priori, os dados foram padronizados numa distribuição normal, pois muitos testes estatísticos requerem essa padronização, além disso desenvolveu-se gráficos de dispersão, pois há o interesse em avaliar o comportamento do conjunto de duas variáveis quantitativas. Uma análise gráfica preliminar permite ter uma noção do tipo de relação existente entre as variáveis, além de proporcionar indícios sobre a

variabilidade dos dados e sobre pontos atípicos ou discrepantes. As técnicas estatísticas utilizadas nesse estudo foram:

a- Análise de Variância - constitui um conjunto de técnicas estatísticas que permitem um estudo da relação existente entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes (fatores) (MONTGOMERY, 2002). Permite determinar o afastamento da média que os dados de um conjunto analisado apresentam.

b- Análise do desvio-padrão - expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados. Quanto menor o desvio-padrão, melhor é a homogeneidade da amostra.

c- Teste – F - compara a variância de duas amostras provenientes de distribuições normal, que podem ter as suas médias iguais ou diferentes. Possibilitam aceitar ou rejeitar uma determinada hipótese, são denominados teste de hipótese ou teste de significância. Esta razão entre as estimativas é usada para testar as seguintes hipóteses: H0: A hipótese nula propõe, que qualquer diferença observada entre as amostras é considerada como uma ocorrência casual, mero resultado do erro amostral. Portanto, uma diferença, entre duas ou mais medias não representam, à luz da hipótese nula, uma verdadeira diferença entra as medias amostrais. H1, a hipótese alternativa que afirma existir uma verdadeira diferença populacional. E, tem-se que grandes valores de F_{cal} favorecem H1. Para esse trabalho, fixou-se o nível de significância em 5%, isto indica que haverá 5 possibilidades em 100 de rejeitar a hipótese quando ela deveria ser aceita, ou seja, existe uma confiança de 95% de que é tomado uma decisão correta. Utiliza-se a seguinte regra para controlar o nível de significância α do teste: Se $F_{cal} \leq F$, então não se rejeita H0. Se $F_{cal} \geq F$, então rejeita-se H0, e aceita-se H1. No caso desse estudo, o teste F é aplicado de forma a verificar entre os métodos 2D e 3D, qual é o mais indicado para determinar a rugosidade de blocos cerâmicos. Assim, é utilizado o desvio-padrão entre as amostras para a análise. Além disso, o teste é aplicado também quando se utilizou o método 2D em uma linha e duas linhas tanto na direção horizontal quanto vertical com o objetivo de avaliar igualdade ou diferença entre os valores de R_a .

d- Teste Z - testa a média de uma população normalmente distribuída com variância conhecida. No caso desse estudo é empregado para comparar se as médias de R_a , quando determinados pelos métodos 2D e 3D, eram iguais ou diferentes a um nível de significância de 5%.

e- Análise de correlação – interesse em avaliar o comportamento do conjunto de duas variáveis quantitativas. O coeficiente de correlação (r) mede quão

bem as variáveis se ajustam a um modelo linear. De forma que os valores aumentam e diminuem quase sempre juntos; há correlação positiva e se os valores de um dos parâmetros caem quase sempre que o outro aumenta, ou vice-versa; há correlação negativa. O indicativo que diz se há ou não há correlação, ou se ela é positiva ou negativa, é o coeficiente de correlação, que é um número que varia de -1 a +1. Quanto mais próximo de 1 for o valor do coeficiente, sendo positivo ou negativo, mais forte é a evidência de que há uma relação entre as duas variáveis.

f- O coeficiente de regressão de Pearson (R^2), ou coeficiente de determinação, modela a proporção da variância de Y que pode ser explicada pelo modelo de regressão, ou seja, mostra o quão bom é o ajuste da reta construída na correlação dos resultados e o coeficiente de correlação indica o quão forte os parâmetros correlacionam-se. De maneira que o coeficiente R^2 mede apenas a intensidade da associação e não diz nada sobre se é positiva ou negativa (Fernandes, 1999).

g- O coeficiente angular é um valor associado ao estudo da equação da reta, indicando o quanto a reta está inclinada em relação ao eixo das abscissas (eixo x) em um sistema de coordenadas. É usado para verificar a relação entre os parâmetros de rugosidade.

h- Análise de dispersão por quadrante – é utilizado nesse trabalho de forma a explicar os parâmetros que apresentaram uma correlação com R^2 menor que 0,60. De forma a verificar os dados espalhados, mas com uma tendência leve de direção. No diagrama de dispersão, as retas paralelas aos eixos e que se interceptam no centro de gravidade dividem o plano em quatro quadrantes: I, II, III, IV. Se houver uma maior concentração de pontos nos quadrantes I e III, a correlação é positiva. Se houver uma maior concentração de pontos nos quadrantes II e IV, a correlação é negativa. Nos casos em que não há uma maior predominância nos quadrantes I e III, ou nos quadrantes II e IV, diz-se que não há correlação ou que a correlação é nula. Neste caso, as variáveis dizem-se independentes, isto é, a variação de uma não influencia a variação de outra.

i- Coeficiente de variação – é utilizado para medir a instabilidade das variáveis. O coeficiente de variação permite comparações entre variáveis de naturezas distintas e fornece uma ideia de precisão dos dados (PIMENTEL-GOMES, 1985). Para Da Fonseca; Farias; Dos Santos (2018), o valor do coeficiente de variação pode servir como reflexo dos cuidados com o planejamento e condução da pesquisa,

transmitindo conseqüentemente maior confiabilidade dos resultados. Assim, os autores citam a importância em estabelecer níveis de classificação de coeficientes de variação para as principais variáveis respostas com relação à precisão dos dados de sua pesquisa. Dessa forma, torna-se necessária, portanto, uma classificação dos coeficientes de variação, voltados para a realidade de caracterização de blocos cerâmicos e que tenham em consideração não só a variável a ser estudada, mas também o tipo de experimentação aos quais os dados se referem. Logo, dada a heterogeneidade das massas cerâmicas, as diferenças no processo produtivo, as diferenças nas temperaturas de queima, na matéria prima de origem etc, sugere-se a classificação de coeficiente de variação para blocos cerâmicos analisados através de perfilômetro tridimensional a laser como: Baixos (CV inferiores a 25%); Médios (CV entre 25 e 50%); Altos (CV entre 50 e 75%) e Muito Altos (para valores acima de 75%).

3.2 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nos tópicos a seguir serão explicados os materiais e métodos utilizados nas ETAPAS do desenvolvimento do programa experimental.

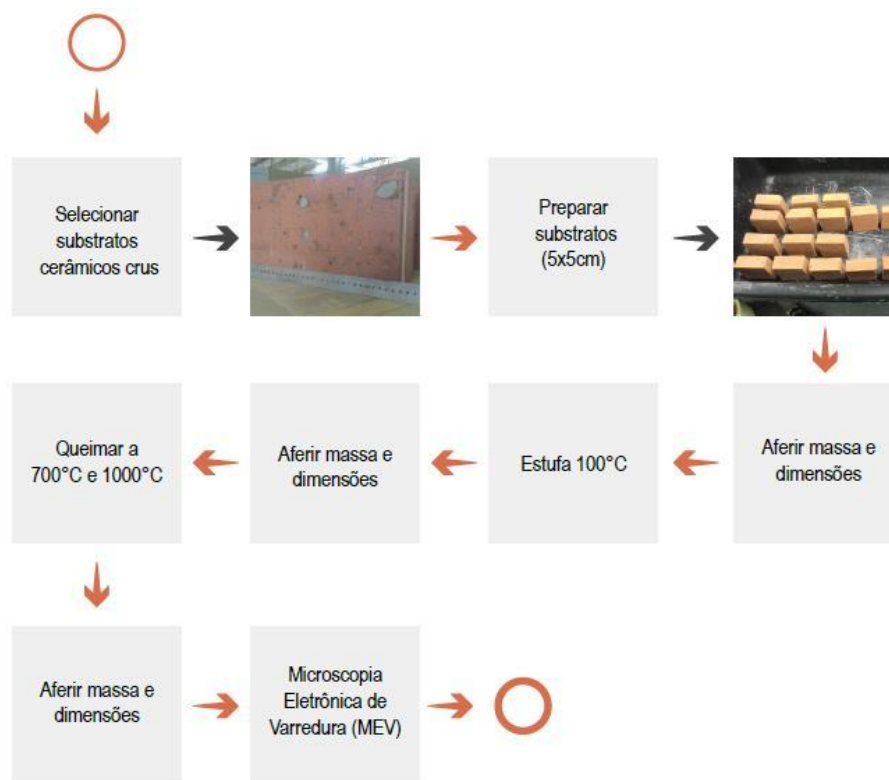
3.2.1 ESTUDO PRELIMINAR: Delimitação da pesquisa

O trabalho tem como objetivo principal comparar e determinar a rugosidade de superfícies de blocos cerâmicos. Para isto, no ESTUDO PRELIMINAR foram analisadas as características superficiais, de forma qualitativa, de blocos queimados em diferentes temperaturas.

3.2.1.1 Caracterização e obtenção dos substratos cerâmicos

Para a realização do ESTUDO PRELIMINAR da pesquisa, foram analisadas duas temperaturas de sinterização, 700 e 1000°C. A Figura 16 mostra o processo para aquisição de blocos. Cada bloco cerâmico precisou cuidadosamente ser preparado e caracterizado para o desenvolvimento do programa experimental.

Figura 16 - Fluxo da caracterização e obtenção dos substratos cerâmicos



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

O substrato cerâmico selecionado para o estudo foi obtido em seu estado cru em uma indústria cerâmica da região de Porto Alegre - RS. Seu formato inicial era o de bloco, com dimensões de 14 cm x 19 cm x 44 cm. Para o estudo, os blocos foram reduzidos em substratos cerâmicos de 5 cm x 5 cm, visando a obtenção do plano de rugosidade com maior precisão, visto que a cerâmica vermelha utilizada para confecção dos blocos é um material heterogêneo, então, optou-se em trabalhar com superfícies menores, a fim de qualificar os ensaios, dessa forma, é necessário a remoção da parede lisa do bloco. Após a obtenção de vinte amostras de 5 cm x 5 cm, prosseguiu-se para a aferição de suas massas em balança de precisão (resolução 0,01g) e verificação de suas dimensões com utilização de um paquímetro digital.

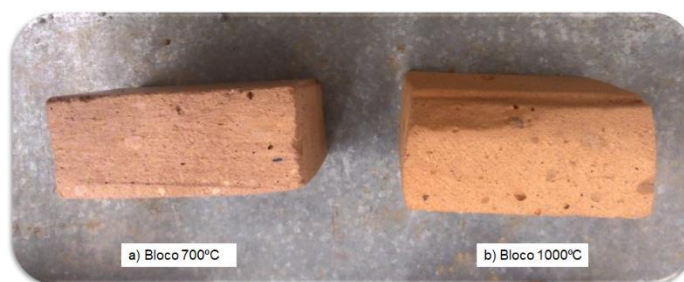
Os corpos de prova então foram inseridos na estufa, em temperatura de 100°C para estabilização de massa. Após a estabilização, as amostras tiveram suas dimensões e massa novamente verificadas, utilizando o mesmo sistema descrito previamente. Em seguida, iniciou-se o processo de queima, para a qual é utilizada a mufla disponível na no Laboratório de Materiais da Unisinos, de Marca Marconi, modelo MA 385/3.

As vinte amostras foram divididas em dois grupos diferentes para a sinterização: dez amostras sinterizadas a 700°C e dez amostras a 1000°C. Para os dois conjuntos, o processo seguiu os mesmos padrões, sendo estabelecida uma rampa de temperatura de 150°C/hora, até atingir o patamar desejado. O patamar, por sua vez, teve duração de dez horas e o resfriamento ocorreu de modo natural. Findada a sinterização, foram verificadas as dimensões e a massa de todas as amostras, com o intuito de observar alterações em comparativo com os dados aferidos previamente, observando possíveis retrações.

A partir disto, é possível observar valores similares quanto as dimensões aferidas entre os processos, notando-se somente em algumas amostras pequenas diferenças na ordem de 0,10cm, ocasionadas, possivelmente, pela irregularidade oriunda do corte, e, portanto, consideradas insignificantes quando referentes à retração. Já quanto à massa das amostras, percebeu-se uma redução de aproximadamente 3% posterior a estabilização inicial, e cerca de 7% após a sinterização, representando a redução no teor de umidade intrínseco à argila. Observa-se, então, uma perda de massa maior para as amostras de 1000°C quando comparadas à de 700°C, em cerca de 0,73%.

Do mesmo modo, após o procedimento de sinterização, é possível realizar um comparativo visual entre os dois grupos de amostragem. Os corpos de prova de 700°C apresentaram uma coloração mais rosada (Figura 17-a) quando comparados com os corpos de prova que passaram pela sinterização a 1000°C, que apresentaram coloração mais alaranjada (Figura 17-b). Esta diferença de coloração acredita-se que ocorre devido à temperatura de queima reduzida deste primeiro grupo, que não conclui os processos de oxidação.

Figura 17 - Diferença de tonalidade entre os blocos cerâmicos sinterizados em diferentes temperaturas, (a) blocos de 700°C e (b) blocos de 1000°C



Fonte: Elaborada pela Autora (2021)

Em adição, verificou-se que nas amostras de 700°C, em sua totalidade, apresentaram formação de fissuras. De acordo com Rizzatti *et al.* (2011), este fenômeno pode ocorrer devido à presença de sílica livre sobre a forma de quartzo; já segundo Cultrone *et al.* (2003), as fraturas podem ser explicadas pelas reações químicas que resultam em Calcita (CaCO_3).

Logo, percebem-se várias razões para a aparição das fissuras mencionadas, acreditando-se que no caso do estudo, a fissuração tenha origem na cristalização dos elementos, que com a temperatura de 700°C ainda não ocorreu, além da perda da umidade superficial da amostra que também corroborou para fissuração.

Após a sinterização, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é empregada com intuito de caracterizar qualitativamente a superfície cerâmica quanto as suas rugosidades. O ensaio foi realizado no Laboratório de Estudos Avançados em Materiais da Universidade Feevale, utilizando o equipamento de marca *JEOL*, modelo JSM-6510LV, sabendo-se que este é um estudo destrutivo, visto que é necessária uma redução no tamanho das amostras para a introdução no equipamento. Sendo assim, ocorreu a remoção de uma amostra da superfície do corpo de prova, de tamanho aproximado de 1cm x 1cm, atendendo assim este requisito. Como preparo para o ensaio, estas amostras passaram por um processo de metalização da superfície de interesse, na metalizadora *DESK V DENTON VACUUN*, onde é aplicada uma camada de ouro e realizada ponte de ligação com cola prata. Em adição a este processo, também é colada uma fita de carbono na amostra a ser analisada. Este ensaio não possui normatização e é executado conforme orientações do Laboratório na Universidade Feevale.

Com a conclusão do ESTUDO PRELIMINAR, a pesquisa foi direcionada e delimitada, buscando nas próximas etapas quantificar os parâmetros de rugosidade superficial dos blocos cerâmicos, visto que apresentaram, em análise qualitativa, diferenças superficiais. Definiu-se também, com base nesta etapa e no referencial teórico, que o procedimento de coleta de dados de rugosidade para blocos cerâmicos precisa de um método específico, pois na análise foi perceptível a heterogeneidade do material, gerando maior complexidade para quantificação da rugosidade dos blocos de cerâmica vermelha.

3.2.2 ETAPA 1: Método para medir rugosidade de superfícies de blocos cerâmicos

A partir da ETAPA 1 da pesquisa o objetivo do desenvolvimento das próximas etapas foi desenvolver um método adequado para quantificação da rugosidade 3D de blocos cerâmicos, em conjunto com o Tonietto (2021). O método deve levar em consideração a padronização da coleta de informação pelos equipamentos que medem rugosidade, precisão dos equipamentos, dados coletados e cálculo dos parâmetros de rugosidade aplicados para substratos de blocos cerâmicos.

Importante salientar que, como o material em análise é heterogêneo, há necessidade de aquisição de dados de rugosidade em distintos locais da superfície para proporcionar o entendimento e a quantificação da rugosidade do substrato como um todo.

Os blocos cerâmicos utilizados para a análise da ETAPA 1 foram os mesmos utilizados no ESTUDO PRELIMINAR, porém a área de medição de rugosidade foi alterada, passou de 5cm x 5cm para áreas de 1cm x 1cm, em função da identificação da necessidade de coleta de dados de rugosidade em locais distintos na mesma amostra, da resolução do equipamento 3D utilizado para leitura da superfície e da quantidade de dados gerados para aquisição da nuvem de pontos.

A criação do método de determinação de rugosidade em blocos cerâmicos está descrita e analisada no Capítulo 4 (Resultados e Discussões) e consistiu nas seguintes etapas:

- a) Processo de preparação dos substratos cerâmicos;
- b) Processo de leitura dos dados;
- c) Configuração e problemas relacionados a leitura dos dados;
- d) Processo de nivelamento dos substratos no equipamento;
- e) Definição dos critérios de cálculo para os parâmetros de rugosidade da superfície;
- f) Cálculo do plano de adaptação;
- g) Cálculo dos parâmetros de rugosidade;
- h) Estrutura hierárquica para cálculo dos parâmetros de rugosidade;
- i) Cálculo dos parâmetros de rugosidade para as regiões da quadtree;
- j) Método para determinação do coeficiente de rugosidade de superfícies de blocos cerâmicos;

- k) Assinatura de rugosidade da superfície;
- l) Ferramentas complementares para avaliação de rugosidade.

3.2.3 ETAPA 2: Método de aquisição de dados 2D e 3D para medição de rugosidade de blocos cerâmicos

Na ETAPA 2, os princípios de cálculo e a assinatura de rugosidade foram utilizados para comparar a adequação da informação obtida com o uso de duas categorias de equipamentos de medição de rugosidade, um rugosímetro 2D e um perfilômetro 3D.

Como não existe uma metodologia definida para a determinação da rugosidade de blocos cerâmicos, o estudo se propôs a verificar se o uso do método 2D, recomendado pela NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), é adequado para a determinação da rugosidade de substratos de blocos cerâmicos.

Dois equipamentos de medição de dados foram usados, um rugosímetro bidimensional de contato marca Mitutoyo, modelo SJ-210 / 178-561-02A, com uma caneta para aquisição dos dados que apresenta ponteira com raio de $5\mu\text{m}$, com ângulo de ponta de 90° e detector de medição de força de 4nM ; e um perfilômetro tridimensional a laser da marca Starrett, modelo AV300 +, com precisão X-Y (μm): $E2 = 1,9\mu\text{m} + 5L / 1000$, Precisão Z (μm): $E1 = 2,5\mu\text{m} + 5L / 1000$ e resolução da escala $0,1\mu\text{m}$.

Com a finalidade de realizar as determinações de rugosidade, foram adquiridos blocos cerâmicos crus com dimensões de $9\text{cm} \times 14\text{cm} \times 24\text{cm}$, que foram obtidos em uma olaria localizada no Vale do Rio dos Sinos. No laboratório de materiais da Unisinos, os blocos foram separados em quatro grupos e sinterizados em temperaturas de queima de 700°C , 800°C , 900°C e 1000°C , com o objetivo de fornecer quatro grupos de blocos com diferentes topografias de superfície.

Para eliminação de variáveis, todos os blocos foram constituídos da mesma argila, modificando apenas as temperaturas de queima, levando em consideração a hipótese de que argilas de diferentes composições mineralógicas podem gerar alterações nas características superficiais dos blocos cerâmicos, podendo gerar uma variável não controlada no programa experimental, influenciando na análise do

objetivo dessa ETAPA, que é verificar a diferença de medição de rugosidade em diferentes equipamentos.

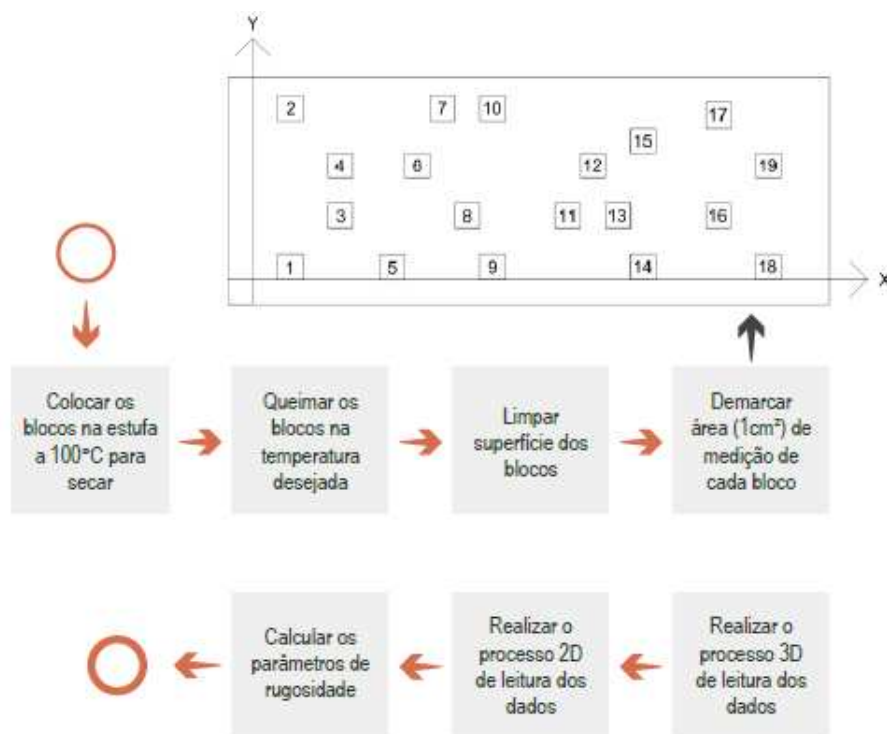
Os blocos crus foram secos em estufa a 100°C por um período de 24 h. O ciclo de sinterização é realizado em mufla, com rampa de 150° C/hora até que a temperatura desejada fosse alcançada, seguindo o estudo de Lengler; Vicenzi; Bergmann (2009). Quando a temperatura de sinterização atingiu a temperatura desejada (700°C, 800°C, 900°C ou 1000°C), essa temperatura é mantida por 10h, gerando blocos com características distintas, denominados amostras tipo 7, 8, 9 e 10.

Para materiais com rugosidade homogênea, como metais, apenas uma linha é lida para determinação da rugosidade do substrato na íntegra. No entanto, para materiais cerâmicos, em que a rugosidade da superfície é heterogênea, uma linha pode não ser representativa. Para permitir uma comparação estatística com o método 3D, neste trabalho foram lidas 2 linhas verticais e 2 linhas horizontais, perpendiculares entre si. No método 3D, todos os pontos na superfície foram considerados. Desta forma, as medições de rugosidade foram realizadas em 4608 regiões (células cinza da assinatura de rugosidade); resultando em 1536 valores de R_a , usando equipamento de medição 2D e 3072 valores de R_a , utilizando métodos de aquisição de dados 3D.

Após determinar os parâmetros de rugosidade para cada área, os resultados foram analisados usando a média e o desvio padrão do parâmetro R_a para comparar os dados encontrados nos métodos 2D e 3D, com o objetivo de verificar se variam significativamente entre si, para isso, é utilizado o teste de hipóteses.

As demarcações do posicionamento das áreas na superfície dos blocos foram mantidas no mesmo local para os blocos cerâmicos utilizados nessa etapa do estudo. O processo de seleção das áreas ocorreu de forma qualitativa, com um único observador, evitando quadrados com deformações, por isso, é necessário analisar todas as superfícies antes selecionar cada área de 1 cm². A escolha das áreas para cálculo do R_a é de acordo com a disponibilidade de regiões sem imperfeições de macroescala nas faces dos blocos. Em cada bloco, 4 regiões dos 19 locais possíveis foram selecionadas, excluindo aqueles com imperfeições. A Figura 18 apresenta o processo geral definido para o estudo.

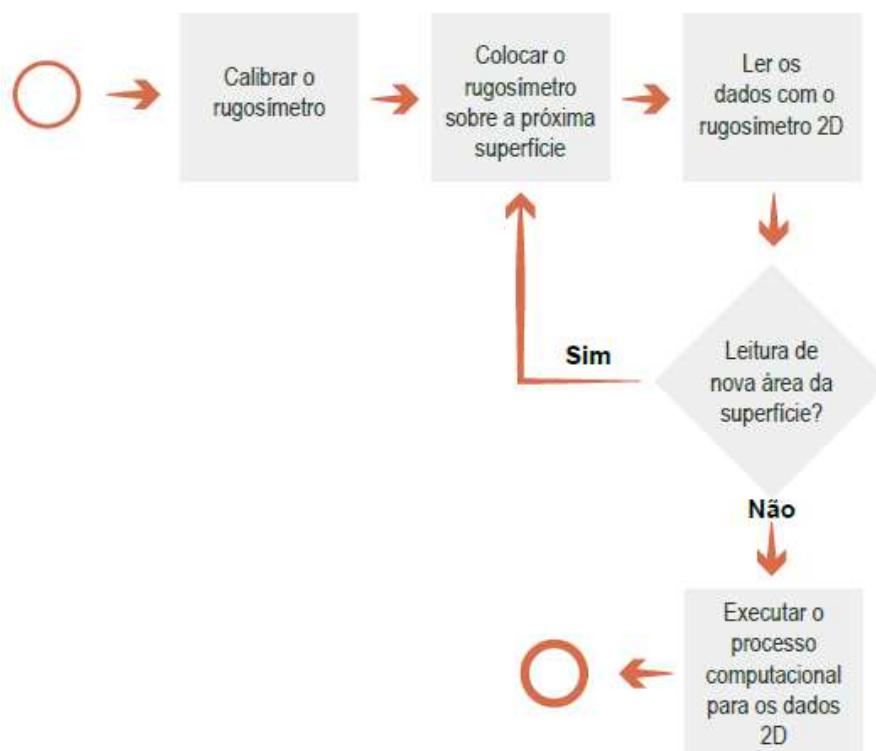
Figura 18 - Processo geral para realização das medições



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

As análises quantitativas bidimensionais com contato foram realizadas seguindo o procedimento recomendado pela NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), que especifica o método de medição R_a 2D usando medição em linha em uma direção, para compor a determinação da rugosidade do perfil. As amostras foram previamente limpas com jato de ar comprimido e secas em estufa, a temperatura de 100° C. Em cada bloco, perfis lineares de superfície foram medidos, dentro das áreas de 10 mm x 10 mm, demarcadas nos blocos. O processo de aquisição de dados é ilustrado na Figura 19.

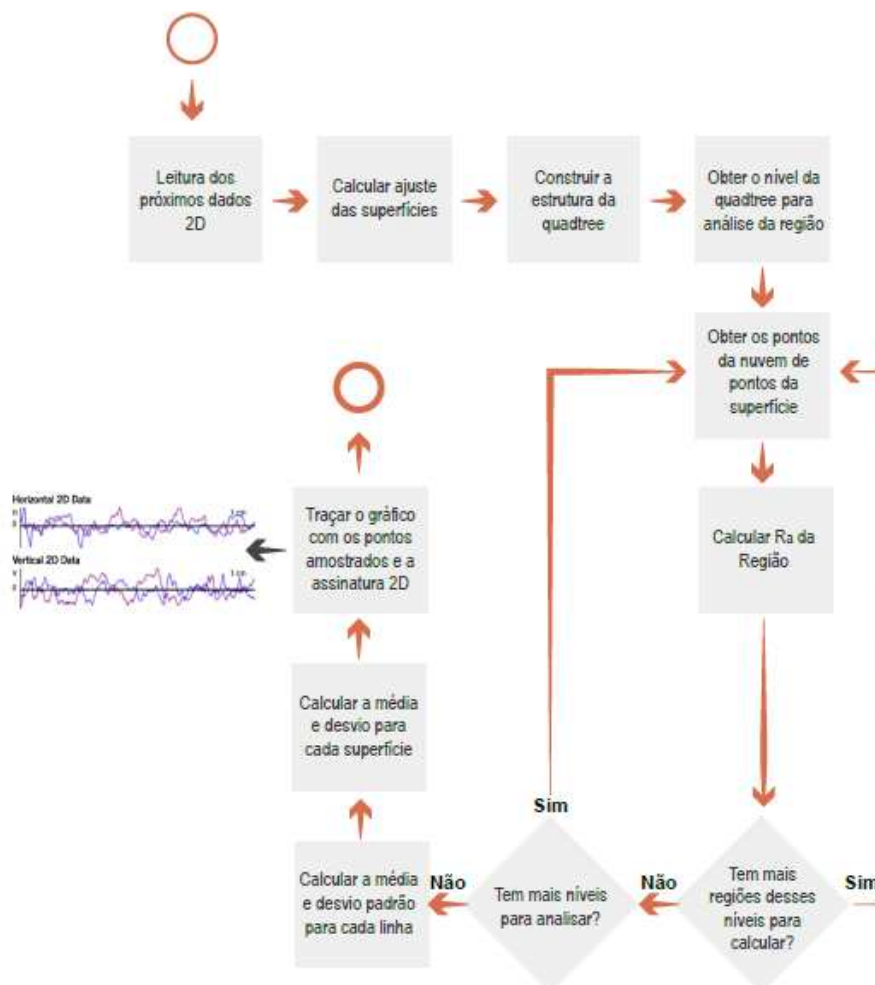
Figura 19 - Processo de leitura de dados no rugosímetro 2D



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A leitura do perfil é realizada a partir do contato da agulha com a superfície do bloco cerâmico. As medições ocorreram na direção horizontal e vertical, a fim de verificarse, ao alterar a orientação da análise, a rugosidade apresenta comportamento significativamente semelhante ou distinto. O parâmetro R_a é calculado para cada linha medida pelo equipamento. A Figura 20 apresenta o processo para calcular rugosidade para dados 2D. A mesma equação matemática usada para o equipamento 3D de aquisição de dados é usado no cálculo de R_a .

Figura 20 - Processo de cálculo da rugosidade em amostras de dados 2D



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Para a elaboração do programa experimental, é assumida que a heterogeneidade dos substratos de cerâmica vermelha é superior a rugosidade de superfícies de metal, onde a determinação da rugosidade por métodos bidimensionais em apenas uma linha é consolidada e de vasta utilização, na prática. Se a hipótese for validada, o método não é considerado adequado para a determinação de R_a em substratos cerâmicos.

Após a aquisição de dados com equipamento 2D, nos dois sentidos de medição, é verificado se a mudança na direção da amostragem resulta em diferença significativa na R_a . Para realizar esta análise estatística, o teste de hipótese das variâncias é usado. Com isso, constata-se se há evidência suficiente, ao nível de significância de 5%, de que as variâncias de R_a medido na direção horizontal são iguais às variâncias de R_a medido na direção vertical (correspondendo aos eixos x e y).

Em uma segunda análise é verificada se o R_a determinado a partir da coleta de dados em apenas uma linha é representativo para definir o R_a do substrato. Para tanto, é apurado se há evidência suficiente, no nível de significância de 0,05, para confirmar a similaridade na determinação de R_a entre grupos de linha única, medidos na mesma direção de amostragem.

Além da análise 2D, é realizada a determinação da rugosidade quantitativa, tridimensional e sem contato por meio do perfilômetro 3D. Antes das medições, cada superfície é limpa com um jato de ar comprimido e seca em estufa, a temperatura de 100°C. A partir das demarcações das áreas amostradas, um total de 380 áreas de 10 mm x 10 mm foram ensaiadas, porém, para a determinação do R_a , foram selecionadas qualitativamente um total de 48 amostras com áreas de 100mm². Para aquisição da nuvem de pontos, é utilizado o passo de 10µm, totalizando a aquisição de nuvens de dados com cerca de 10.000 pontos em cada amostra, a partir dos quais os valores de R_a são calculados.

Para obter resultados dos parâmetros de rugosidade na nuvem de pontos 3D, é utilizado o método proposto na ETAPA 2. Para cada nuvem de pontos, um plano de ajuste é calculado, para descrever a superfície média da nuvem de pontos. O plano com os devidos ajustes é calculado pelo método dos mínimos quadrados e os parâmetros de rugosidade são determinados levando em consideração a distâncias do eixo z de cada ponto em relação ao plano.

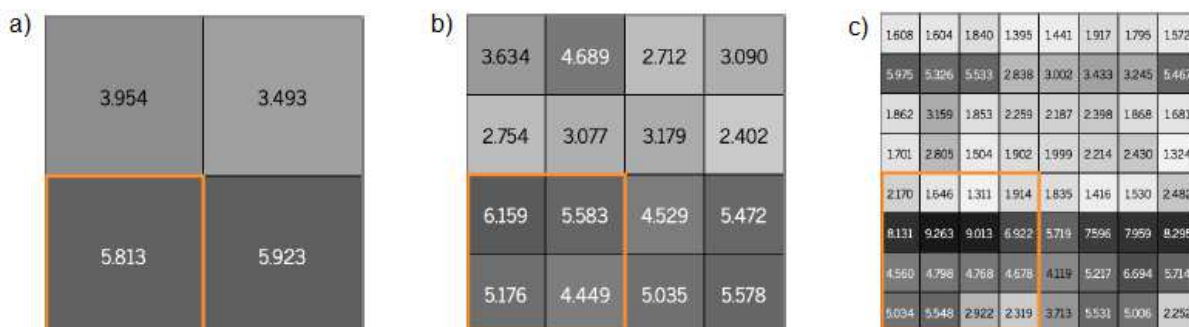
O plano de ajuste representa a altura média dos pontos da nuvem de pontos. A fim de fornecer um maior nível de detalhe para a análise de rugosidade da superfície, a mesma é dividida em regiões do mesmo tamanho, dentro dos vários níveis de representação. Então, é adotado um *quadtree* que divide a superfície em uma estrutura hierárquica, para representar os dados de rugosidade em níveis de detalhe.

A Figura 21 mostra um exemplo de coeficientes de rugosidade representado em diferentes níveis do *quadtree*. No 4º nível da *quadtree*, a área amostrada é dividida em 8 x 8 partes da superfície, permitindo a análise individual em 64 regiões de cada superfície amostrada.

Para cada região, os parâmetros de rugosidade são calculados e os dados estatísticos são analisados e comparados. Apenas um plano de ajuste é calculado para a nuvem de pontos da superfície, portanto, a rugosidade média (R_a) de cada

parte, em todos os níveis da *quadtree*, é a média das distâncias entre cada ponto da região até o plano de ajuste da superfície.

Figura 21 - R_a calculado para diferentes níveis da *quadtree* de superfície. Em (a) R_a no 2º nível da *quadtree*, (b) R_a no 3º nível da *quadtree* e (c) R_a no 4º nível da *quadtree*



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Então, o método proposto neste estudo calculou o plano de ajuste para os valores obtidos entre as linhas 2D da mesma superfície, e a partir deste plano o cálculo de R_a , usando o mesmo método descrito anteriormente para análise 3D. O plano de ajuste é calculado para todos os dados adquiridos da mesma amostra em 2D. Para este propósito, os dados relativos à altura do ponto no método 2D são definidos como a coordenada Z e os dados relativos à posição das linhas horizontais são definidos como a coordenada X.

Depois de redefinir a nuvem de pontos de 2D para 3D e calcular o plano de ajuste, a subdivisão hierárquica das regiões (*quadtree*) é realizada e o R_a é calculado para cada região, conforme definido na ETAPA 1. A rugosidade média (R_{aavg}) e os dados de desvio padrão (R_{asdv}) de cada amostra também foram calculados, no mesmo nível de detalhe proposto na ETAPA 1. A Figura 22 mostra o resultado da assinatura de rugosidade para uma amostra 2D, obtida a partir da aquisição de duas linhas horizontais e duas verticais e o ajuste de dados subsequentes.

Figura 22 - Assinatura da rugosidade 2D de uma área de 10mm x 10mm gerada pelo método apresentado na ETAPA 1, com média e desvio padrão por linha e por coluna

-	-	-	1.063	1.330	-	-	-		
-	-	-	0.440	1.788	-	-	-		
-	-	-	1.252	2.060	-	-	-		
1.515	1.603	1.407	0.661	0.946	0.587	1.014	1.448	1.148	(0.372)
0.757	1.207	0.954	1.298	1.922	1.773	1.257	0.892	1.257	(0.385)
-	-	-	1.058	1.566	-	-	-		
-	-	-	0.765	1.130	-	-	-		
-	-	-	0.908	0.621	-	-	-		
			0.930	1.421					
			(0.277)	(0.471)					

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

As regiões na Figura 22 que não têm valores associados são aquelas correspondentes às regiões em que a amostragem 2D não é realizada. É importante notar que cada linha vertical ou horizontal representa uma linha amostrada 2D, e que cada região contém 250 pontos, com exceção das regiões que coincidem com as duas direções, que têm 500 pontos.

O método desenvolvido na ETAPA 1 também apresenta um valor de R_a 2D (gráfico de linha) para avaliar o comportamento da amostra e um histograma para demonstrar onde os valores de R_a estão concentrados. A R_{aavg} e o R_{asdv} também foram calculados. A partir da definição do procedimento de cálculo, é possível comparar os resultados de amostragem 2D e 3D.

A validação é realizada por meio de teste de hipótese (teste Z), ao nível de significância de 5%, para confirmação que as médias de R_a usando o método 3D são semelhantes às médias de R_a usando o método 2D. O teste Z é usado, uma vez que 48 amostras foram analisadas, com distribuição normal, em vez do teste t-student (apropriado para tamanhos de amostra abaixo de 30).

A partir dos resultados obtidos, definiu-se que os estudos de rugosidade de substratos cerâmicos devem ser realizados exclusivamente com o método 3D de aquisição dos dados da nuvem de pontos, uma vez que fica comprovada a ineficiência do método de aquisição de dados 2D para determinação da rugosidade nesse tipo de substrato.

3.2.4 ETAPA 3: Aplicação do método de análise tridimensional

Nessa ETAPA 3, a metodologia desenvolvida para a avaliação de rugosidade de substratos cerâmicos foi utilizada para a avaliação de diferenças de rugosidade entre blocos produzidos em diferentes olarias.

Além da determinação da rugosidade a partir do parâmetro de rugosidade R_a (definido a partir de variações de amplitude no eixo “z” da nuvem de pontos), nessa ETAPA foi desenvolvida uma segunda ferramenta visando a avaliação das áreas dos vales observados na superfície do substrato em análise (ao longo do plano definido pelos eixos x e y).

Na ETAPA 3, foram analisados com o perfilômetro 3D, 20 faces de blocos cerâmicos produzidos em 5 diferentes olarias, conforme descrição apresentada na Tabela 4. A seleção pela utilização destes substratos foi em função da alta demanda de utilização na construção civil como elementos de vedação, e que, posteriormente, recebem revestimentos de argamassa, que apresentam alta incidência de manifestações patológicas em função da falta de aderência entre ambos.

Tabela 4 - Descrição das olarias e dos procedimentos de produção dos blocos cerâmicos

Identificação da Olaria	Tipo de forno	Temperatura de queima	Modelo e dimensões	Tipo de bloco
1	Caracol	870°C	Modelo: 6 furos; Dimensões: 12 × 19 × 26 (cm)	Vedação
2	Túnel	950°C	Modelo: 6 furos; Dimensões: 9 × 4 × 23,5 (cm);	Vedação
3	Túnel	930°C	Modelo: 6 furos; Dimensões: 9 x 14 x 24 (cm);	Vedação
4	Túnel	869 °C	Modelo: 4 furos; Dimensões: 9 x 14 x 19 (cm);	Vedação
5	Túnel	900 °C	Modelo: 2 Furos quadrados; Dimensões: 14 x 19 x 44 (cm);	Estrutural

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Os blocos cerâmicos foram selecionados de maneira a buscar o modelo de maior comercialização em cada olaria, para ter amostragem representativa em relação aos blocos utilizados na construção civil. Os blocos de vedação foram adquiridos sinterizados, foram lavados, secos em estufa a temperatura de 100°C, limpos com jato de ar e identificados, para posterior análise no perfilômetro 3D.

De forma a caracterizar as argilas utilizadas na produção dos blocos cerâmicos utilizados no estudo foi realizada análise de FRX a fim de caracterizar os compostos químicos presentes nas amostras (Tabela 5).

Tabela 5 - Dados dos compostos químicos obtidos pelas técnicas de FRX

Substratos	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Perda ao fogo (%)
Olaria 1	0,418	0,337	12,551	49,113	0,166	0,015	0,635	0,036	0,785	0,006	2,814	1,2048
Olaria 2	0,1	0,29	13,451	36,425	0,156	N.D	0,46	0,121	1,374	0,07	9,422	1,1597
Olaria 3	0,102	0,529	11,004	48,437	0,128	0,037	1,811	0,108	0,579	0,018	5,527	0,6805
Olaria 4	0,113	0,411	12,107	35,642	0,159	N.D	0,575	0,258	1,195	0,158	12,195	0,9233
Olaria 5	0,402	1,145	9,864	32,922	N.D	0,36	2,909	0,979	0,738	0,113	8,892	0,788

Fonte: Própria Autora (2021)

Ao analisar a composição química dos blocos produzidos pelas diferentes olarias, percebem-se diferenças. Do resultado da análise química, pode-se verificar que aproximadamente 60% de cada matéria-prima analisada é constituída basicamente por SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃.

As olarias 2, 4 e 5 apresentam teores elevados de óxidos corantes (Fe₂O₃ e TiO₂), respectivamente, 10,80%, 13,39 % e 9,63%, resultando uma cor de queima avermelhada. Já a olaria 1 apresenta um baixo teor dos óxidos corantes, 3,60%.

Conforme Souza (2008), os Fe₂O₃ formam, com SiO₂, Al₂O₃, sistemas ternários onde a fusão se inicia a partir de 1200°C. Com os alcalinos (K₂O e Na₂O), o início da fusão ocorre em torno de 1000°C ou abaixo desta temperatura. Os compostos químicos fundentes na massa cerâmica tendem a reduzir a temperatura de formação de fase líquida durante o processo de queima das massas cerâmicas, de forma que este líquido formado preenche as cavidades da amostra cerâmica e dependendo da sua viscosidade, ocorre também a diminuição da porosidade (RIELLA,

FRANJNDLICH; DURAZZO, 2002), e aumenta a densidade do material, reduzindo a absorção de água e aumentando a resistência mecânica (SOUZA, 2008). A fase líquida quando resfriada se transforma em filamentos finos de vidro que tende a preencher os vazios das peças cerâmicas (PINHEIRO; HOLANDA, 2010). Os blocos cerâmicos utilizados no estudo não apresentaram temperatura de queima acima de 950°C.

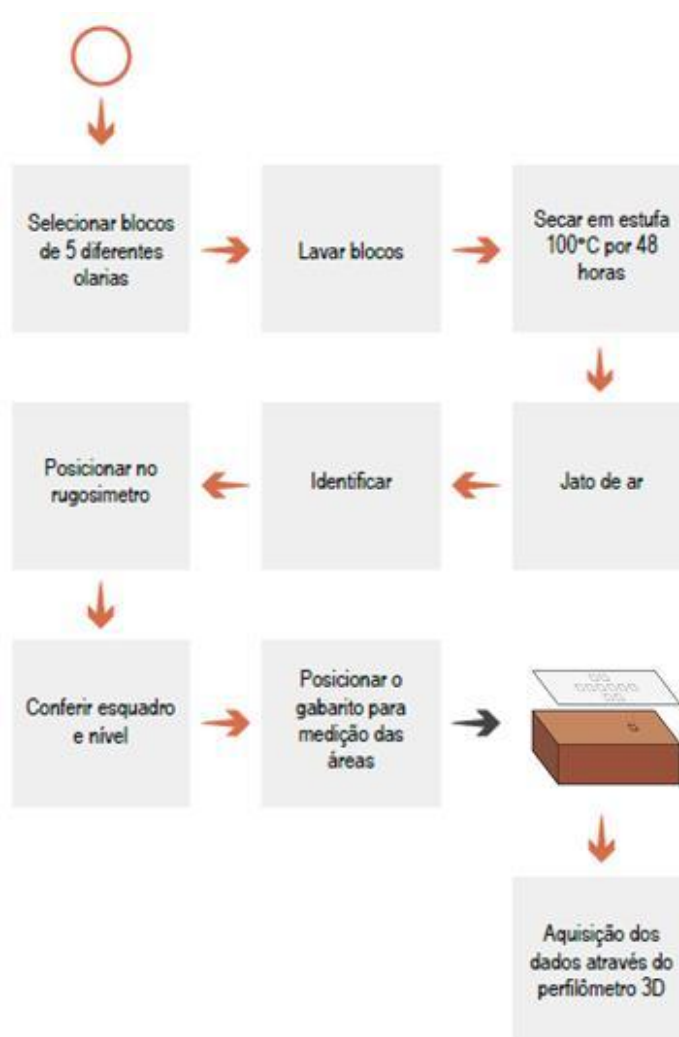
Os óxidos de ferro reforçam a ação dos fundentes K_2O e Na_2O , fazendo com que a fusão inicie em temperaturas ainda mais baixas e com fase líquida mais abundante (SOUZA, 2008). Os K_2O e Na_2O originam líquidos viscosos com dificuldade em cristalizar e que tendem a permanecer no corpo queimado como fases vítreas. Para Pinheiro & Holanda (2010), a formação de uma fase líquida são os principais responsáveis pela eliminação de grande quantidade de porosidade aberta no interior da peça de cerâmica vermelha. Nesse sentido, ressalta-se que as olarias 2, 4 e 5 apresentam a maior quantidade de fundentes ($CaO+MgO+K_2O+Na_2O+Fe_2O_3$), 10,39%, 13,55% e 14,33% respectivamente. A perda ao fogo apresentada pelas olarias foi baixa, pois não ultrapassou 1,20%, o que também contribui para redução da porosidade das peças cerâmicas.

Observa-se que a olaria 5 apresenta teor superior as demais olarias de MgO , de 1,145% em massa. O MgO pode estar associado a traços de cloritas e vermiculitas (COUVIGNOU, 2007).

A Olaria 1 apresenta os maiores teores de SiO_2 com maior predominância de cristalinidade, tendendo a ser uma argila mais cristalina. Salientando que a cristalinidade também está relacionada com a temperatura de queima do material que na Olaria 1 foi de 870°C.

Para posicionar os blocos no equipamento, foram observados o esquadro e o nível dos blocos, com o intuito de padronizar a aquisição dos dados. Posteriormente, foi desenvolvido um gabarito polimérico com identificação de 10 áreas com dimensões de 10mm x 10mm (Figura 23). Esse gabarito foi posicionado sobre os blocos para demarcação das áreas de medição com o laser.

Figura 23 - Processo de preparação dos blocos cerâmicos para aquisição dos dados no perfilômetro 3D



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

3.2.4.1 Análises das superfícies para computação de planos

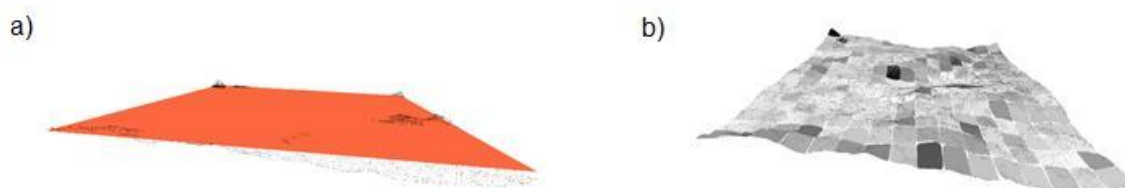
Ainda na ETAPA 3 foi realizada uma proposta de aperfeiçoamento no método descrito na ETAPA 1, para considerar as variações locais da geometria e alterar a forma de cálculo de distância do ponto em relação ao plano. Percebeu-se que o método desenvolvido na ETAPA 1 calcula apenas um plano médio de ajuste para a nuvem de pontos e a rugosidade é calculada através da distância absoluta do ponto ao plano, considerando apenas a diferença absoluta no eixo Z.

Mesmo que o método defina uma avaliação local de rugosidade, subdividindo a área da superfície em áreas igualmente espaçadas da superfície, o mesmo plano geral é utilizado para computar os parâmetros de rugosidade em qualquer região.

Assim sendo, não é considerada a variação local dos pontos, ou seja, os valores de rugosidade são computados sobre o plano geral e podem ser superestimados, justamente por não considerarem a inclinação do plano no local dos pontos analisados.

Em superfícies com maior nível de ondulação, o plano de ajuste único considera estas ondulações (relevos) como parte da rugosidade, interferindo ou acentuando os valores de picos e vales para a superfície. A Figura 24 apresenta a diferença entre um plano médio calculado com o método descrito na ETAPA 1 deste trabalho, e vários planos calculados, levando em consideração a superfície média local e as diferenças de níveis, a partir da mesma nuvem de pontos.

Figura 24 - Planos calculados sobre uma mesma nuvem de pontos. Em (a) o plano médio calculado com o método proposto na ETAPA 1 e no artigo Tonietto *et al.* (2019). Em (b) os planos com os ajustes da geometria da amostra



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

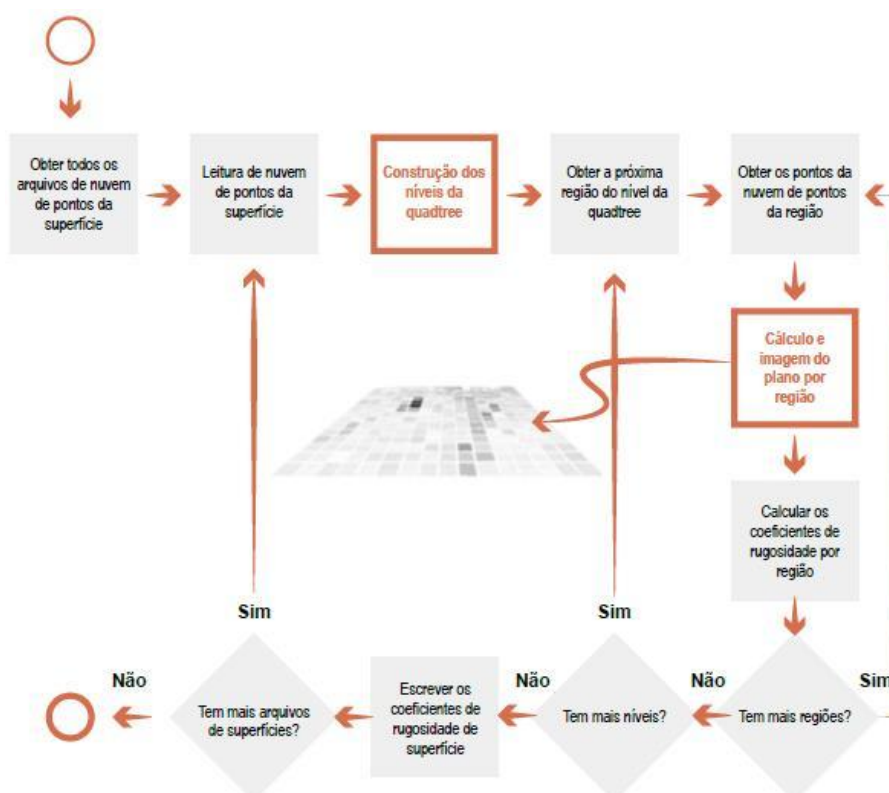
A primeira modificação necessária é a computação de planos de ajuste locais para cada região da superfície, detalhada na tese de Tonietto (2021). Desta forma, os parâmetros de rugosidade associados a uma região ou local da superfície foram calculados com base no plano local, e não mais em relação ao plano global.

A modificação em relação ao método descrito na ETAPA 1 do estudo se deu em dois pontos importantes: primeiro, a modificação na ordem do algoritmo para cálculo do plano e da divisão de áreas; segundo, a utilização do método de análise dos componentes principais para calcular o plano associado com os pontos de cada local, com base no estudo de Gomes *et al.* (2016).

No método descrito na ETAPA 1, o plano de ajuste é computado considerando o eixo Z como altura. Conseqüentemente, as distâncias em relação ao plano são sempre ortogonais (diferença em Z). Quando existe apenas um plano geral em relação à superfície, isto não representa um problema, pois não há um ângulo de orientação significativo, visto que os dados são adquiridos de uma superfície plana e nivelada.

No entanto, os planos locais apresentam maior variação de ângulo, então é necessário calcular a distância do ponto em relação ao plano de forma independente da orientação do plano. O fluxo de processos de cálculo dos planos de ajustes está apresentado na Figura 25. As etapas que estão em destaque são as principais modificações do processo geral do método descrito na ETAPA 1.

Figura 25 - Fluxo do processo para cálculo dos planos de ajuste para cada local da superfície, em todos os níveis de divisão hierárquica



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Observa-se no fluxo de processos do plano de ajustes que a construção da subdivisão da nuvem de pontos é executada primeiro, e o cálculo do plano é realizado para cada região em cada nível da estrutura hierárquica, para que se tenha uma divisão uniforme da área de cada região, seguindo a regra de divisão da *quadtree* (tal como definido na ETAPA 1 deste estudo).

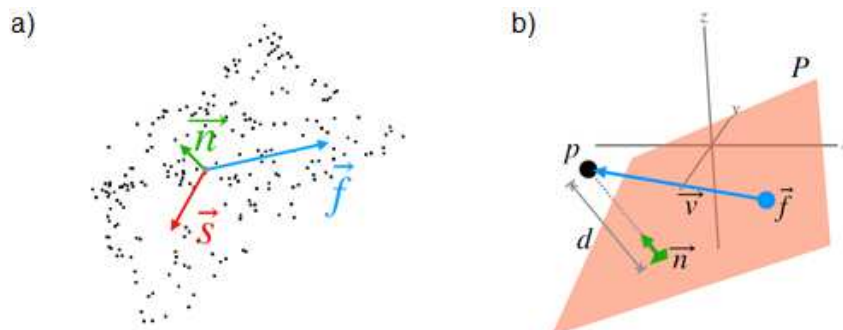
Nessa etapa, é proposto uso do método de análise dos componentes principais, conforme trabalho de Gomes *et al.* (2016). O método proposto pelos autores analisa uma nuvem de pontos e calcula três vetores próprios que definem o plano. O primeiro vetor é o que representa a maior dispersão dos dados, o segundo é ortogonal ao

primeiro na segunda maior dispersão dos valores e o terceiro é perpendicular aos dois anteriores e representa a terceira maior dispersão dos dados e a direção do plano.

Sendo assim, um plano de ajuste P de um conjunto de pontos NP é um sistema definido por três vetores: $P(NP)=(\vec{f}, \vec{s}, \vec{n})$, em que \vec{f} e \vec{s} são os dois vetores que definem a base do plano, e \vec{n} é a direção do plano. Para calcular os planos de ajustes em relação à superfície original, o processo é executado dividindo os pontos da nuvem associados ao plano atual, em duas metades. Para cada metade, o processo de computação de planos através dos vetores foi executado. O processo se repetiu até o limite mínimo de pontos por plano, ou atingir o número máximo de subdivisões.

A Figura 26 ilustra a representação dos vetores de um conjunto de pontos. O vetor azul (\vec{f}), que possui o maior valor, representa o primeiro componente do sistema. O vetor vermelho (\vec{s}), com segundo maior valor, é usado em conjunto com (\vec{f}) para definir o plano e o vetor verde (\vec{n}) é a orientação do plano.

Figura 26 - Componentes principais computados para um conjunto de pontos (a) e (b) cálculo de distância do ponto ao plano



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

O método original proposto por Gomes *et al.* (2016) é adaptado para esse estudo e ficou ajustado para não permitir subdivisões e é fixo o parâmetro de número mínimo de pontos para quatro, com objetivo de ter uma geometria mínima para cálculo do plano. Em resumo, o método de cálculo de planos pelo sistema com 3 vetores é executado para cada região de cada nível da *quadtree*.

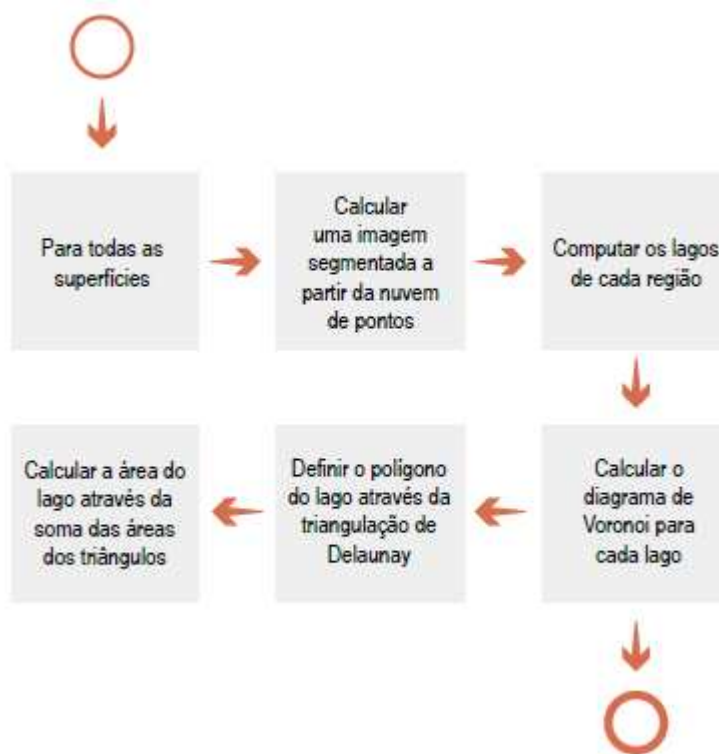
Após o cálculo de plano para cada região, o parâmetro R_a é computado em cada local de cada nível da superfície. Para cada ponto associado a região, calculou-se a distância do ponto ao plano. Depois, a forma de cálculo dos parâmetros de rugosidade seguiu a ETAPA 1 deste estudo. Logo, a distância d de um ponto p ao

plano P , é obtida através do produto escalar do vetor que vai do plano ao ponto. Então, $d = \vec{v} \cdot \vec{n}$, sendo que o \vec{v} vai do primeiro vetor do sistema do plano até o ponto atual da nuvem: $\vec{v} = p - \vec{n}$. Portanto, d é a projeção do ponto p na normal do plano. Por fim, todos os dados de rugosidade foram calculados e analisados da mesma forma que é descrito na ETAPA 1.

3.2.4.2 Cálculo das Áreas dos Vales

O método escolhido neste estudo para análise de áreas de contato classifica regiões da superfície denominadas “vales”, consideradas como regiões onde poderá haver penetração de grãos dos ligantes da argamassa ou seus produtos de hidratação, então são computadas as áreas dessas regiões para determinar a área total de vales. O valor calculado para área total das regiões de vales foi chamado de índice de área de vales ($\Delta\tau$), pois é uma razão entre a soma das áreas dessas regiões pela área total da superfície, o que garante um valor padronizado de medição e isento das variações de dimensões da superfície. Os detalhes sobre o cálculo, a inserção e a análise destes dados no software estão em Tonietto (2021), que desenvolveu o seu trabalho em parceria com este estudo. A Figura 27 apresenta, de forma resumida, o processo geral do algoritmo para cálculo de áreas associadas a rugosidade.

Figura 27 - Processo geral para computação de áreas de vales



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

O processo geral para computação de áreas de vale para cada superfície é executado da seguinte maneira: primeiro ocorreu a segmentação da amostra em regiões cujos pontos estejam abaixo do nível de ajuste. A partir dos pontos definidos como pontos de regiões de vales, foram identificados com *pixels* pretos na imagem segmentada da superfície, na sequência foram computadas todas essas regiões, ou seja, regiões de pontos conectados (vizinhos) e que juntos formam uma área.

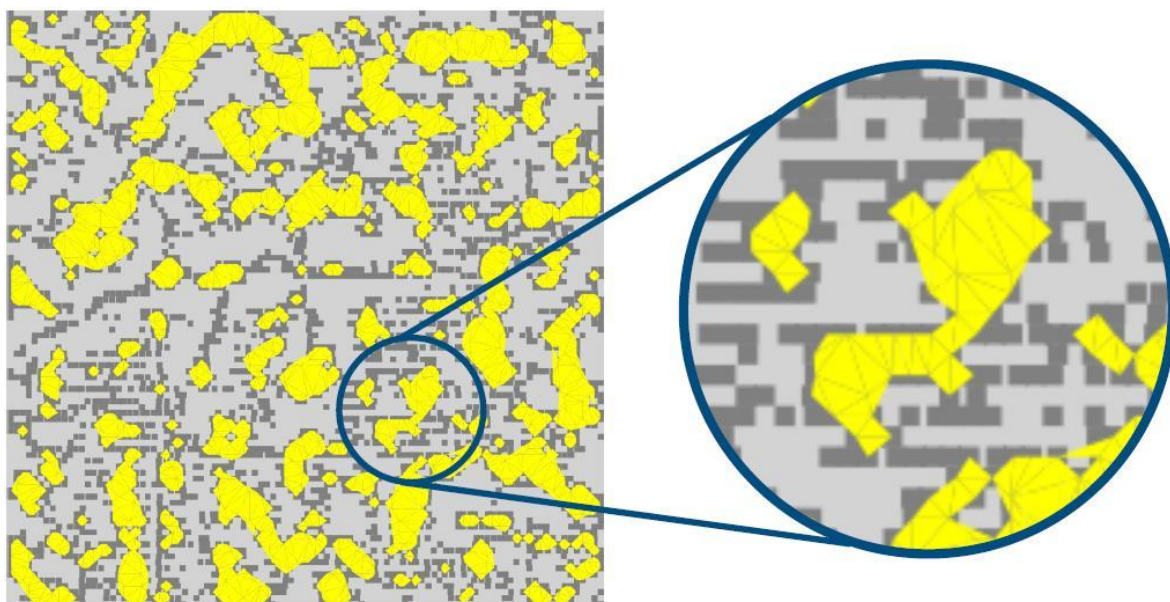
Para cada região, a partir dos seus pontos de borda, é computado um diagrama de *Voronoi*, e executada triangulação pelo método de *Delaunay*, e assim é possível montar o polígono que envolve a área da região de análise. Dos triângulos que formam o polígono que envolve a região, é computada a área da região, somando a área dos triângulos. O somatório de áreas das regiões da superfície (Δ_s) é a base para calcular o parâmetro de índice de área superficial (Δ_T).

Para fins de comparação na avaliação das áreas, também foram computados o valor médio de áreas de vales (Δ_{avg}), o desvio-padrão das áreas dos vales (Δ_{sdv}), menor área (Δ_{min}) e maior área (Δ_{max}).

Após a detecção e o cálculo de todas as regiões, é realizada a modelagem geométrica de cada região analisada. O objetivo é criar uma representação poligonal

para cada região, para calcular a sua área e, conseqüentemente, calcular a área total de regiões de uma superfície. Destaca-se que o valor total de área de lagos da superfície é utilizado para determinar os parâmetros de índice de área de vales (Δ_T) e área média de vale (Δ_{avg}), é utilizada para representar parâmetros relacionados a área de contato. A Figura 28 é a representação da área de vale da superfície e mostra em destaque, um exemplo de geometria associada a uma área de vale.

Figura 28 - Classificação das regiões de área de vale

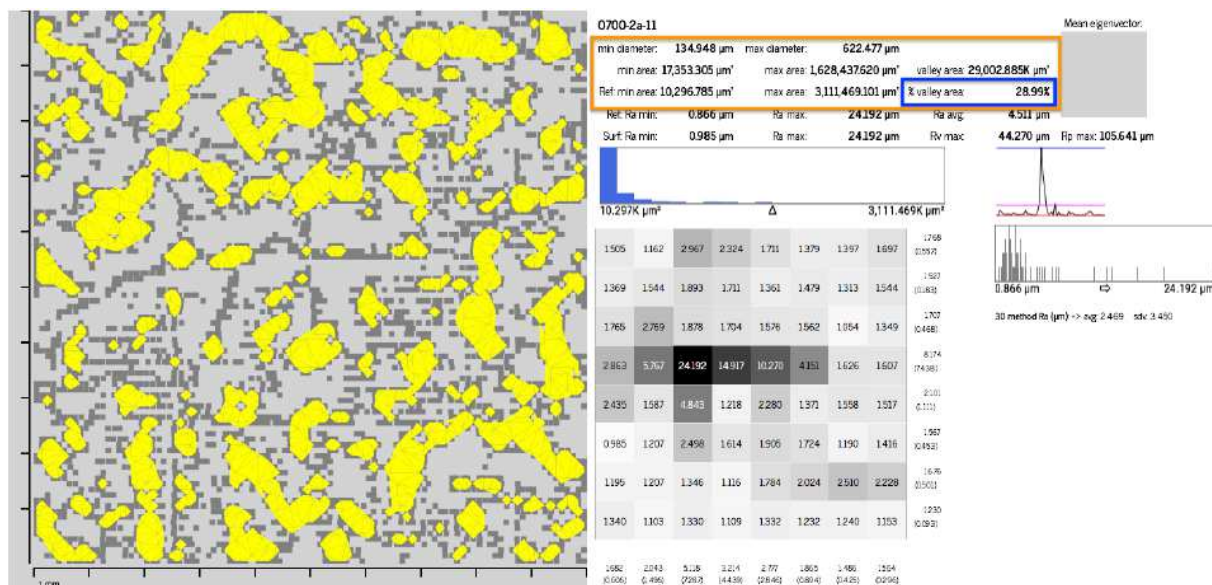


Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Por fim, é computado o histograma das áreas, no qual é possível verificar a distribuição das mesmas, numa relação de tamanho de área e a frequência ao longo da superfície. Para este histograma, foram determinadas 20 níveis de representação de área, começando na menor área dentre todas as amostras ($\Delta_{ref\ min}$) até a maior área dentre todas as amostras ($\Delta_{ref\ max}$), definidos previamente sobre todos os valores Δ_{min} e Δ_{max} de todas as superfícies.

Com o método desenvolvido na ETAPA 3 do estudo, chegou-se na Figura 29, que é um exemplo de todas as informações computadas para uma amostra, contendo resultados desenvolvidos nas ETAPAS 1 e 2, e publicados nos trabalhos de Tonietto *et al.* (2019) e Arnold *et al.* (2021), além da contribuição importante do estudo de Tonietto (2021), e as adaptações e implementações do método propostos neste trabalho para determinação e avaliação de rugosidade.

Figura 29 - Classificação das regiões de área de vale



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Conforme a Figura 29, na metade à esquerda são exibidas as informações visuais sobre as áreas de vales da superfície (*pixels* amarelos). Na metade à direita, são exibidas medidas de rugosidade (R_a) da amostra e de referência (R_{amin} , R_{amax} e R_{aavg}), além das medidas de área da amostra (Δ_s e Δ_T) e de referência (Δ_{min} e Δ_{max}). As informações gráficas apresentadas na ETAPA 1 (assinatura de rugosidade, gráficos de comportamento de R_a e distribuição de valores de R_a) são mostradas no canto inferior direito. Em destaque laranja, os parâmetros relacionados à área de vales e em azul, o índice de área de vales (Δ_T) da superfície.

Para validar o método e demonstrar seu funcionamento, foram elaborados testes sobre 500 amostras de substratos cerâmicos. O objetivo do teste é verificar a eficiência do método proposto para análise de rugosidade, e demonstrar como utilizar os parâmetros de índice de área de vales (Δ_T) e área média de vales (Δ_{avg}). Para testar a eficácia do método também foram analisados os parâmetros de rugosidade, da mesma forma que é realizado na ETAPA 1. Para validar o método proposto, foram realizadas 4 etapas:

1- análise comparativa direta utilizando o índice de área de vales (Δ_T) e área média de vale (Δ_{avg}), para determinar a diferença deste parâmetro entre os substratos das diferentes olarias;

2- teste de hipóteses, mais especificamente o teste-Z, sobre os dados de área média de vale (Δ_{avg}), a um nível de significância de 5%, para verificarse os dados

de área média de vale são significativamente diferentes entre as olarias. Dessa forma, é possível indicar estatisticamente as olarias com maior ou menor área média de vale (Δ_{avg}) e, por conseguinte, as que produzem blocos que favorecem a área de contato;

3- análise comparativa de Δ_T para verificar a distribuição de valores das áreas de vales nos substratos cerâmicos das distintas olarias e indicar quais olarias favorecem a área de contato;

4- validação do método de múltiplos planos, proposto neste trabalho, para computar rugosidade de superfícies. O objetivo deste ensaio é comparar valores de R_a calculados para os blocos de cada olaria e indicar a olaria que possui maior rugosidade e que, teoricamente, favorece a área de contato;

5- relação entre os parâmetros de R_a e Δ_T , para determinar qual olaria favorece, com maior intensidade, a área de contato, relacionando os dados dos dois parâmetros e seguindo o critério de que, quanto maior o valor do parâmetro, maior a área de contato entre a superfície do bloco cerâmico e o revestimento.

Na ETAPA 4 serão correlacionados os dados de parâmetros de rugosidade e área superficial, obtidos na ETAPA 3, com as propriedades físicas e químicas das argilas utilizadas para confeccionar os substratos cerâmicos.

3.2.5 ETAPA 4: Caracterização multiescalar de rugosidade

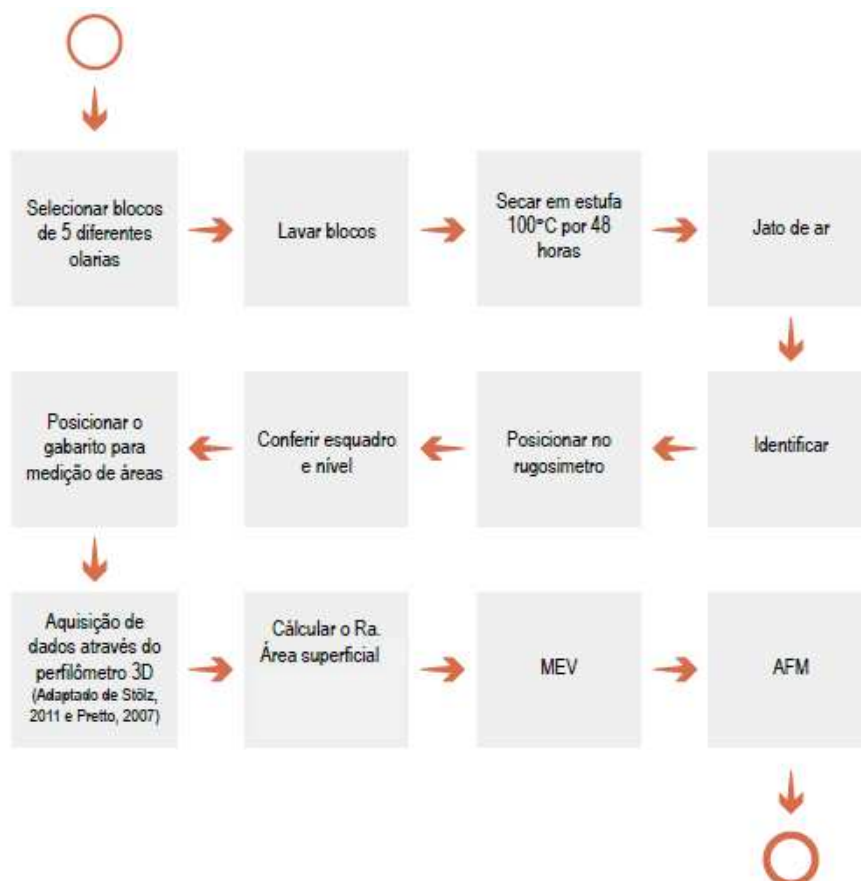
A ETAPA 4 tem a finalidade de complementar todas as outras etapas do estudo e concluir os objetivos elencados para esta pesquisa de desenvolver uma metodologia de quantificação dos parâmetros de rugosidade para blocos cerâmicos utilizados como substratos na construção civil.

Nesta etapa, foram correlacionados os parâmetros de rugosidade em diferentes métodos de análise a fim de criar uma caracterização multiescalar de rugosidade para os blocos cerâmicos de vedação utilizados no estudo, com o objetivo de avaliar a similaridade entre os diferentes métodos de obtenção de dados de rugosidade e validar o método de determinação de rugosidade de blocos cerâmicos proposto no estudo.

3.2.5.1 Obtenção e Caracterização dos substratos cerâmicos

Para a realização da ETAPA 4 da pesquisa, foram analisados blocos oriundos de 5 diferentes olarias da região, caracterizados na ETAPA 3. A Figura 30 mostra o processo para preparação e caracterização das superfícies dos blocos cerâmicos.

Figura 30 - Processo de preparação e caracterização dos substratos cerâmicos



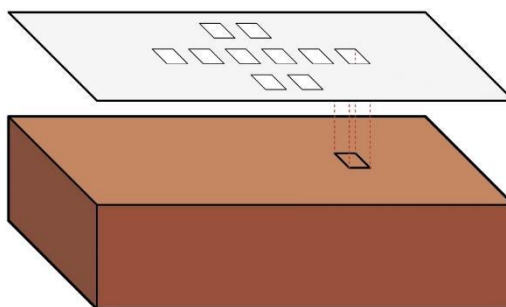
Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Os substratos cerâmicos foram os mesmos utilizados na ETAPA 3, que foram adquiridos sinterizados, na sequência foram lavados, secos em estufa, a temperatura de 100°C, limpos com jato de ar e identificados, para posterior análise no perfilômetro 3D, MEV e MFA.

Para posicionar os substratos no perfilômetro 3D, foram observados o esquadro e o nível dos blocos cerâmicos, após é utilizado um gabarito polimérico com identificação de 10 áreas com dimensões de 1cm x 1cm para definição das áreas de

aquisição de dados (Figura 31). Essas áreas foram analisadas no perfilômetro 3D, MEV e MFA.

Figura 31 - Posicionamento do gabarito sobre o bloco cerâmico e identificação da área de medição de rugosidade



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

O equipamento utilizado para determinar rugosidade 3D é um perfilômetro a laser da marca Starrett, modelo AV300+, com precisão X-Y (μm): $E2 = 1,9 \mu\text{m} + 5L / 1000$, Precisão Z (μm): $E1 = 2,5 \mu\text{m} + 5L / 1000$ e resolução da escala $0,1 \mu\text{m}$.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada com intuito de caracterizar a superfície do bloco cerâmico. O ensaio foi realizado no Laboratório de Estudos Avançados em Materiais da Universidade Feevale, utilizando o equipamento de marca JEOL, modelo JSM-6510LV. Sabendo-se que este é um estudo destrutivo, visto que é necessária uma redução no tamanho das amostras para a introdução no equipamento, ocorreu a remoção de uma amostra da superfície do substrato, de tamanho aproximado de $1\text{cm} \times 1\text{cm}$, atendendo assim este requisito.

Como preparo para o ensaio, estas amostras passaram por um processo de metalização da superfície de interesse, na metalizadora DESK V DENTON VACUUN, onde é aplicada uma camada de ouro e realizada ponte de ligação com cola prata. Em adição a este processo, também é colada uma fita de carbono na amostra a ser analisada.

Para as análises no microscópio de força atômica (MFA), é empregado um microscópio da marca *Solver Next*, modelo *SPM*. O modo de operação adotado é o de contato, com ponteira CGS-10, a velocidade de medição é 1Hz e a área de análise é de $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ com quantidade de pontos de 756×756 . As imagens foram

tratadas utilizando-se o *software* SPIP (*Scanning Probe Image Processor*). A rugosidade média (R_a) é calculada pelo programa através da média aritmética dos valores absolutos das alturas dos pontos que compõem o perfil, em relação à linha média (LM).

A linha média é uma linha de referência que divide o perfil de rugosidade, de forma que a soma das áreas superiores seja igual à soma das áreas inferiores. O parâmetro R_a é o mais utilizado na indicação da rugosidade superficial. Vale ressaltar, no entanto, que ele apresenta baixa sensibilidade para indicar a presença de picos e vales ao longo dos perfis de rugosidade.

3.2.5.2 Determinação dos parâmetros de rugosidade

Para determinação dos parâmetros de rugosidade para os blocos das diferentes olarias, utilizou-se os procedimentos da ETAPA 1 e da ETAPA 3, descritos anteriormente. Foram calculados os parâmetros de rugosidade associados a um local da superfície, em que os dados de rugosidade média e área média de vale foram avaliados com base em um plano local, assim como, a distância dos picos máximos e dos vales mínimos das regiões analisadas.

3.2.5.3 Criação de quatro diferentes níveis de rugosidade

Os blocos cerâmicos de vedação são utilizados em grande quantidade na construção civil. Contudo, as normas técnicas não estabelecem métodos de avaliação e quantificação de rugosidade para esse tipo de material, visto a importância que a rugosidade exerce sobre os fatores de aderência entre o substrato e a matriz cimentícia, através do intertravamento mecânico. Considera-se, neste estudo, que os parâmetros de rugosidade são uma característica importante do substrato, principalmente para definir o revestimento adequado para ser aplicado sobre o mesmo.

Tendo em vista a necessidade de padronização dos dados de rugosidade para classificar substratos cerâmicos, essa etapa do estudo objetiva o desenvolvimento de uma caracterização multiescalar de rugosidade.

3.2.5.4 Método para analisar rugosidade de blocos cerâmicos

Por fim, através de todas as etapas elaboradas no estudo, foi desenvolvido um procedimento técnico para caracterização de blocos cerâmicos através do método de perfilometria 3D.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento do programa experimental, com a intenção de responder os objetivos deste estudo. Os resultados serão apresentados em etapas, a fim de demonstrar e validar a evolução do trabalho.

4.1 ESTUDO PRELIMINAR: DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Nesta etapa serão expostos os resultados do ensaio proposto no método do experimento, que engloba a caracterização do substrato cerâmico. Buscou-se analisar qualitativamente a diferença de rugosidade superficial entre substratos queimados em diferentes temperaturas.

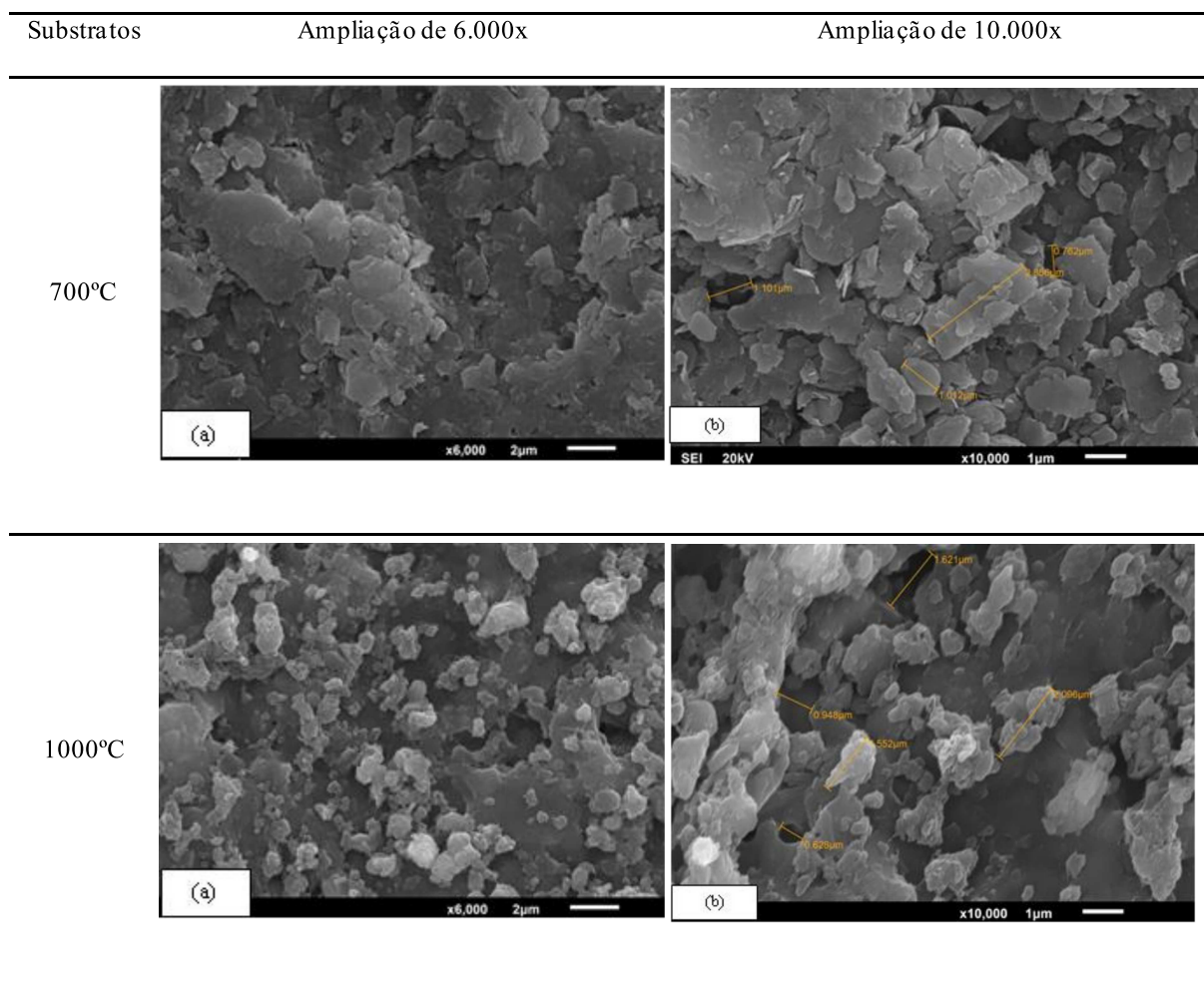
4.1.1 Substrato Cerâmico

Quanto ao substrato cerâmico, serão abordados os resultados obtidos no ensaio de MEV.

4.1.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura foi o método adotado para a caracterização da superfície, onde foi possível a obtenção de imagens relativas ao substrato cerâmico com ampliações de até 10.000x (Figura 32).

Figura 32 - MEV das amostras de 700°C e 1000°C (a) Amostra de 700°C e 1000°C com ampliação de 6.000x e (b) Amostra de 700°C e 1000°C com ampliação de 10.000x



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A avaliação das imagens obtidas com o MEV foi realizada em caráter qualitativo, a partir da observação e comparação entre elas. Entre os conjuntos visualizados na Figura (a) de cada um deles, já é possível a percepção de diferenças nas superfícies. As amostras queimadas a uma temperatura de 700°C demonstram uma formação de grãos com formatos mais lamelares nas imagens, enquanto as amostras de 1000°C demonstram um comportamento de grãos mais ásperos e granulares. Também é possível observar a existência de maior quantidade de reentrâncias na amostra de 1000°C, enquanto a amostra 700°C se apresenta de modo mais plano. Quando avaliadas as imagens (b), este padrão tem sequência, evidenciando vales ligeiramente mais largos e aparentemente mais profundos.

Desta forma, avaliando os resultados a respeito da superfície do substrato cerâmico, observa-se que a temperatura de sinterização afeta as características

superficiais, desta maneira, foi necessário desenvolver um método quantitativo para avaliar essa diferença na superfície dos blocos cerâmicos.

4.2 ETAPA 1: MÉTODO PARA MEDIR RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES DE BLOCOS CERÂMICOS

Partindo da análise do ESTUDO PRELIMINAR, na ETAPA 1 foi criado um método de quantificação de rugosidade de superfícies de blocos cerâmicos que será apresentado nos próximos tópicos do estudo, onde foram calculados e comparados os coeficientes de rugosidade dos blocos cerâmicos, e criada uma assinatura de rugosidade para cada superfície analisada.

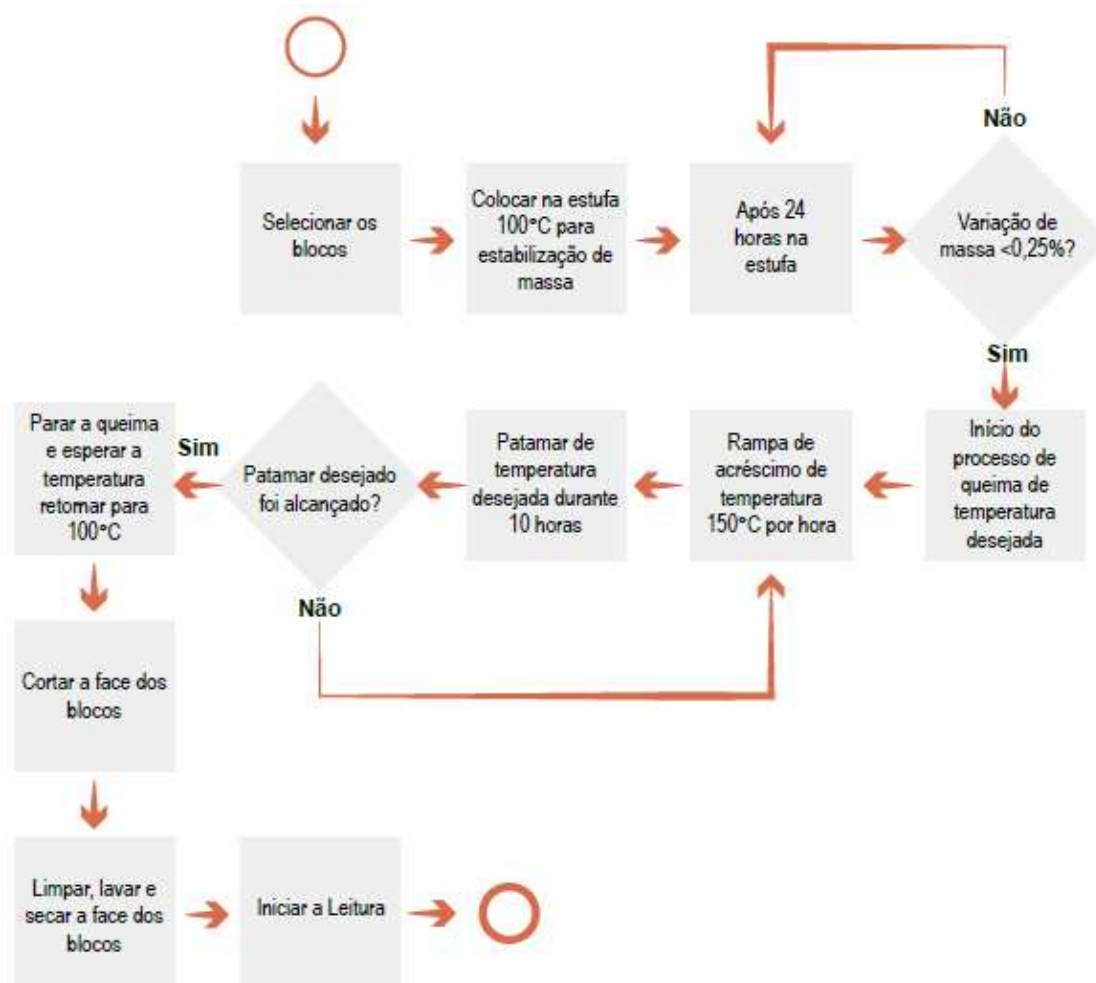
4.2.1 Proposição do método de quantificação de rugosidade de superfícies de blocos cerâmicos

Para quantificar a rugosidade de blocos cerâmicos, onde o material é heterogêneo, todo o processo de obtenção dos substratos, preparação dos substratos, definição do equipamento de aquisição dos dados, precisão do equipamento, posicionamento do substrato no equipamento, nuvem de pontos gerada e cálculos da rugosidade são importantes para obtenção da qualidade dos parâmetros de rugosidade. Com base nestes cuidados, uma sequência de processos foi desenvolvida no método e será apresentada nos tópicos seguintes.

4.2.1.1 Processo de preparação dos substratos cerâmicos

O processo de preparação dos substratos cerâmicos e padronização do mesmo é extremamente importante para a qualidade dos dados de rugosidade das superfícies. A Figura 33 demonstra o processo definido para preparação dos substratos cerâmicos, em que cada superfície é cuidadosamente preparada para o processo de leitura.

Figura 33 - Fluxo do processo de preparação dos substratos



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

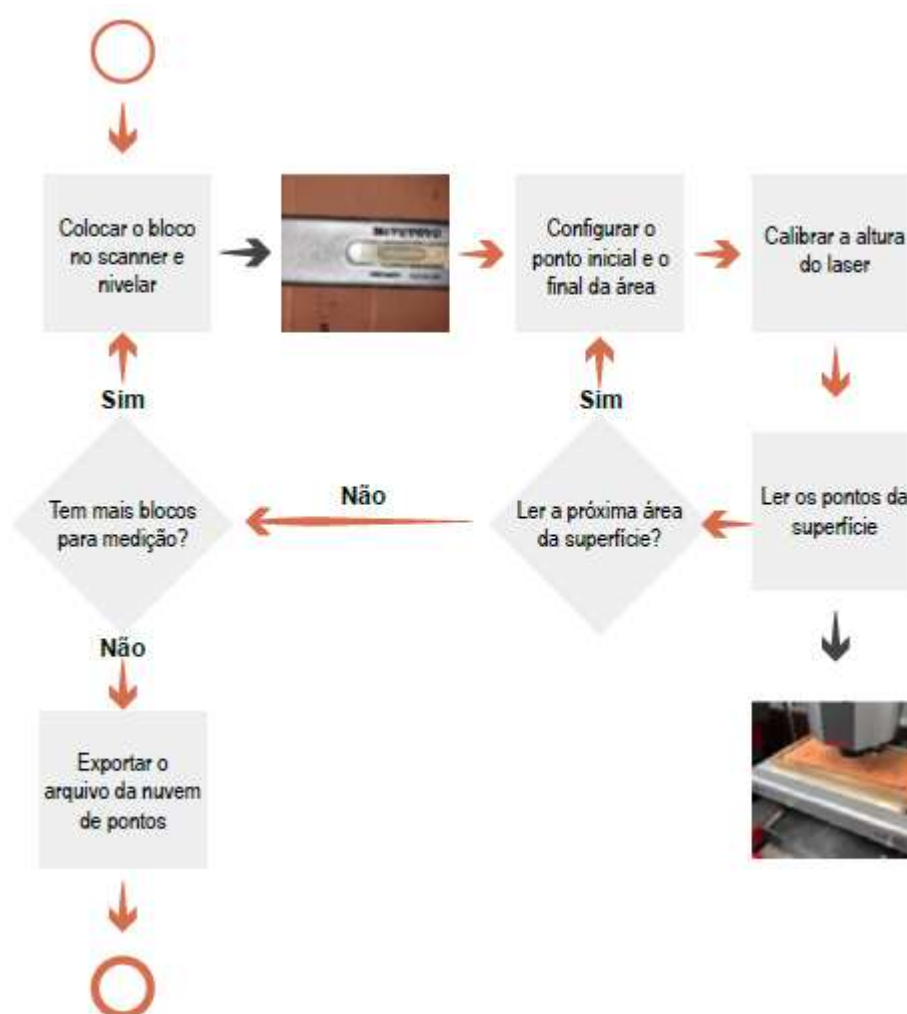
Em uma área de 1cm² a resolução do equipamento proporcionou uma melhor nuvem de pontos, com dados mais próximos, possibilitando melhor determinação dos picos e vales existentes na superfície do substrato. O sucesso da aquisição de uma nuvem de pontos está diretamente relacionado à qualidade dos dados de entrada, então, nessa etapa do estudo foram analisadas superfícies de 1cm², com uma nuvem de pontos pouco espaçada e com aproximadamente 10.000 pontos captados por área de amostragem.

4.2.1.2 Processo de leitura dos dados

O processo de leitura dos dados exige cuidados básicos para garantir um método de leitura eficaz. Primeiramente, é necessário definir a posição de medição

do bloco cerâmico no equipamento, o tamanho da região de interesse e o número de pontos a serem lidos, que foram ajustados com a precisão de leitura do equipamento. Quanto maior a precisão, melhor a qualidade das informações, por isso, é importante ajustar o equipamento para precisão máxima de leitura. A Figura 34 ilustra o processo para obter uma boa leitura de dados, evitando problemas com fatores associados a utilização do equipamento e, principalmente, com as áreas de medições de rugosidade dos substratos.

Figura 34 - Fluxo do processo de leitura de dados



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Os blocos foram centralizados e nivelados na mesa do equipamento de aquisição de dados, a fim de evitar erros na leitura. Após, foram definidos os locais de digitalização da superfície. Neste ponto, foram selecionados visualmente, áreas sem imperfeições observadas a olho nu, evitando regiões que contivessem arranhões,

relevos produzidos pelos materiais que constituem a superfície, pequenos orifícios, grandes depressões, ou seja, imperfeições em geral, pois o material é heterogêneo e de difícil definição dos parâmetros de rugosidade. Esse procedimento é adotado, com o intuito de eliminar variáveis externas e focar apenas nos dados de rugosidade microestruturais.

Utilizou-se um gabarito com a dimensão da superfície desejada para marcar a posição inicial de uma região de interesse e, em seguida, foi definida manualmente a posição final de digitalização no equipamento. Desta forma, o equipamento leu uma região retangular e alinhada com os eixos X e Y do plano da base da superfície. Na sequência, o equipamento é ajustado para melhor precisão de leitura, dependendo da altura do bloco em relação ao laser do equipamento.

Após definido o número de pontos a serem lidos, foi verificado o número final de pontos que podem ser lidos e se a precisão da leitura (distância mínima entre os pontos em X e Y) estava de acordo com a precisão do equipamento. Em seguida o processo de leitura foi iniciado, salientando a necessidade de repetição de conferência e ajustes para cada superfície amostrada. Ao final do processo, a nuvem de pontos gerada no equipamento foi exportada para processamento no *software* de cálculo de rugosidade.

4.2.1.3 Configurações e problemas relacionados à leitura dos dados

Uma das configurações de maior relevância neste processo é a precisão da leitura da altura, definida como eixo Z. Este ajuste é realizado no *software* do equipamento, onde a altura para leitura dos dados é avaliada, com a intenção de se obter uma maior precisão dos pontos analisados. Este cuidado de ajuste de altura é realizado, pois se a altura do laser for inadequada, o equipamento pode não ler todos os pontos que foram configurados para a análise da superfície, podendo gerar erros no processo de leitura.

Esses problemas de aquisição de dados podem estar relacionados com altura e alcance do sensor, alta absorção de luz e oclusões no processo de digitalização, resultando em perda de leitura dos pontos que irão gerar a nuvem de pontos. É importante destacar que as superfícies dos blocos cerâmicos são heterogêneas e no processo apresentaram variações de altura, devido a fabricação e sinterização dos

blocos, então, o ajuste de altura é realizado individualmente para cada superfície que é digitalizada.

O posicionamento do bloco em relação à base do equipamento de aquisição de dados pode causar falhas e interferências no processo de leitura. Por isso, o correto alinhamento da superfície em relação aos eixos de medição do plano X e Y do equipamento favorece o processo de leitura, gerando padronização na aquisição dos dados, melhor compreensão das informações, para um ideal tratamento de dados finais, para conclusões precisas dos resultados.

Alguns problemas podem ocorrer durante a digitalização das superfícies, principalmente relacionados ao posicionamento do laser em relação ao plano da base do *scanner*. Neste sentido, se o bloco não estiver nivelado e as superfícies apresentarem muitas irregularidades, a calibração de altura do eixo Z do *scanner* pode não funcionar, pois com essas irregularidades do substrato a calibração não se adapta a nenhum local lido, uma vez que o laser é calibrado para uma altura global durante a leitura e está considerando apenas leves variações de altura ao longo da superfície.

Estas diferenças acentuadas de altura na superfície de aquisição dos dados podem levar a falha de legibilidade do equipamento, e ao efeito sombreamento dos pontos de leitura. O sombreamento ocorre quando um ponto impede a leitura de outro ponto, porque exerce uma oclusão na visão do feixe de laser.

As irregularidades e imperfeições nas superfícies dos blocos cerâmicos que foram utilizados neste estudo são causadas pelo processo de fabricação e falhas no corte dos blocos durante o processo de aquisição das superfícies. Para evitar o problema de irregularidades superficiais e favorecer a aquisição de dados com o maior número de pontos possíveis, foram realizados dois procedimentos antes do processo de leitura da superfície. Primeiro, o substrato cerâmico foi posicionado de forma alinhada com os eixos X e Y da base do *scanner* e na sequência foi desenvolvido um suporte para posicionamento e nivelamento do substrato cerâmico no equipamento.

O processo de nivelamento das superfícies é extremamente importante, uma vez que eliminou problemas de leitura do laser na região analisada. Para garantir um nivelamento eficiente, a superfície cerâmica foi posicionada sobre uma caixa de areia que permitiu a acomodação do substrato e o nivelamento para a leitura dos dados.

Finalmente, é importante notar que alguns problemas relacionados com desalinhamento dos pontos, falta de dados ou ruído, são causados por fatores inerentes as características do equipamento utilizado. Portanto, os resultados variam

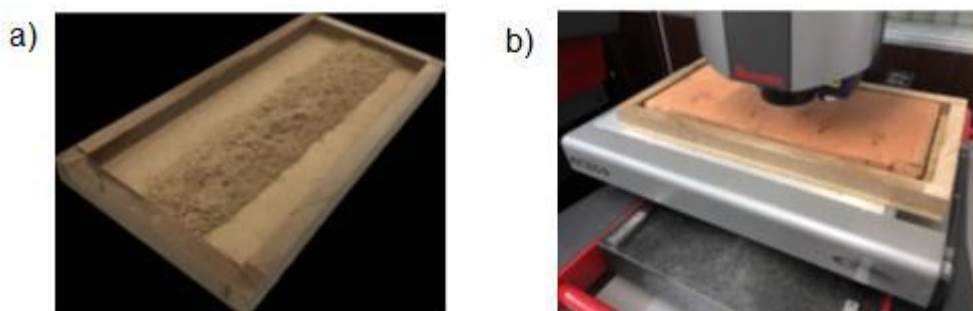
de acordo com o instrumento selecionado para o processo de aquisição dos dados, por isso, a escolha da ferramenta é importante para o estudo, já que se trabalhou com um dispositivo que apresentou precisão de leitura dentro dos padrões definidos para a pesquisa, de dados adquiridos em níveis micrométricos, com níveis de ruídos adequados em relação a nuvem de pontos gerada e com capacidade de configurar e ajustar os parâmetros de medição do equipamento.

4.2.1.4 Processo de nivelamento do substrato cerâmico no equipamento

Durante a realização dos ensaios, alguns desafios foram enfrentados para garantir a eficiência do processo de leitura das nuvens de pontos das superfícies. Ao digitalizar uma amostra, podem ocorrer problemas de ilegibilidade devido ao nivelamento incorreto do substrato que será avaliado. Para resolver os problemas de nível, um dispositivo foi desenvolvido para facilitar o manuseio e nivelamento dos substratos cerâmicos. Foi levado em consideração o peso total do sistema (dispositivo + substrato cerâmico), a fim de evitar o excesso de peso sobre a base de leitura do equipamento, visto que o *scanner* apresenta limites de peso para apoio em sua mesa de leitura de dados.

Na Figura 35, é possível observar o dispositivo criado para nivelamento dos substratos cerâmicos, executado em madeira, com 25mm de altura e as dimensões da base foram compatíveis com o tamanho do substrato, com folga de 10mm. É importante observar que as etapas do processo devem ser definidas de modo a não prejudicar o funcionamento do equipamento ou a leitura de dados.

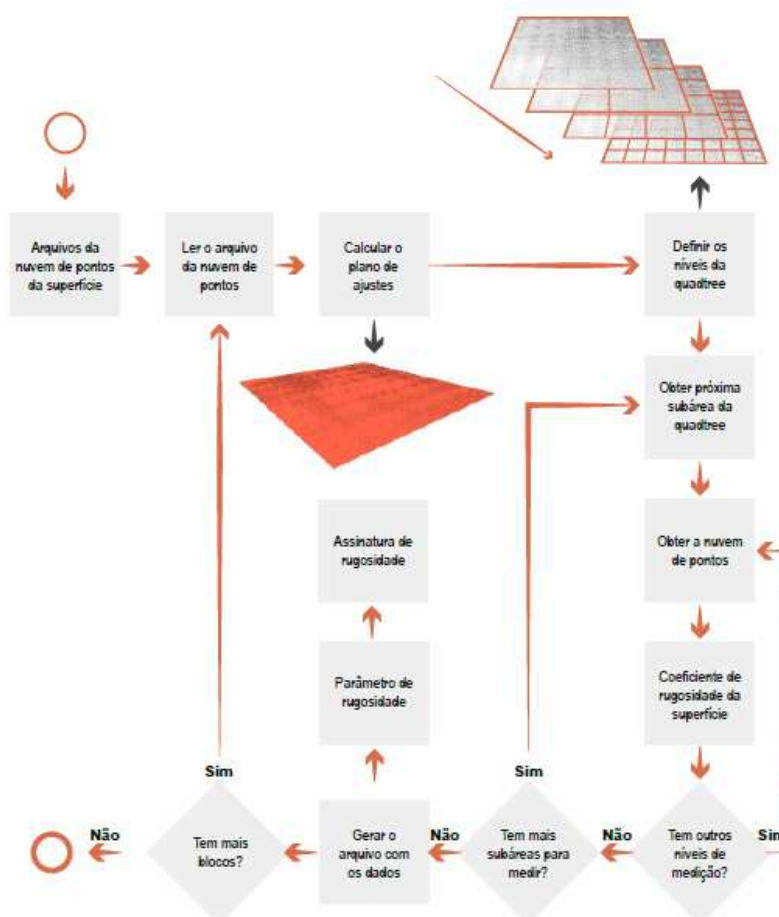
Figura 35 - Dispositivo criado para nivelamento e leitura de dados dos substratos: a) caixa de areia e b) dispositivo com substrato cerâmico



4.2.1.5 Definição dos critérios de cálculo para os parâmetros de rugosidade das superfícies

Após o processo de aquisição das nuvens de pontos, o cálculo e o processo de representação dos parâmetros de rugosidade de uma superfície foram desenvolvidos, através da aplicação dos conceitos de *quadtree*¹, em que as superfícies que originaram a nuvem de pontos foram divididas em quatro quadrantes e posteriormente foram divididos novamente em quatro quadrantes, e assim sucessivamente, até chegar na precisão de dados aceitável para o estudo. O processo computacional dos coeficientes de rugosidade pode ser visualizado na Figura 36.

Figura 36 - Fluxo do processo computacional de cálculo dos coeficientes de rugosidade



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

¹ Quadtree é uma estrutura amplamente utilizada para divisão espacial para representar cenários em computação gráfica e também para representações de estruturas com nível maior de detalhamentos, ou para manter informações hierárquicas sobre uma determinada localização

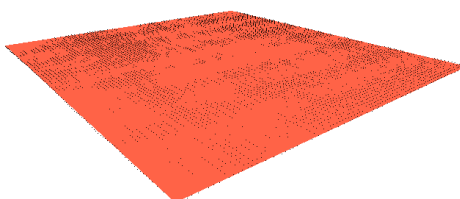
O processo de cálculo dos coeficientes de rugosidade é realizado para cada nuvem de pontos das superfícies lidas, individualmente. Então o método consistiu na leitura do arquivo da nuvem de pontos (um arquivo por superfície digitalizada). Na sequência, os dados foram exportados e traduzidos para uma estrutura 3D. Posteriormente, o *quadtree* é configurado de acordo com o número de níveis definidos para o estudo, quatro níveis diferentes, correspondendo a 64 regiões de aquisição de dados.

Os parâmetros de rugosidade são calculados por nível. Para cada nível de *quadtree* obteve-se os pontos pertencentes à região analisada, para posteriormente calcular os parâmetros de rugosidade. Os parâmetros de rugosidade calculados para cada superfície são escritos sobre a superfície para posterior visualização e processamento da informação, maiores detalhes sobre o processo computacional podem ser acompanhados na tese de Tonietto (2021), desenvolvida em parceria com esse estudo.

4.2.1.6 Cálculo do Plano de Adaptação

As medidas de rugosidade calculadas nessa etapa são basicamente diferenças de altura entre picos e vales de um determinado substrato. Para fazer este cálculo, é necessário definir um plano de ajustes que melhor represente a nuvem de pontos (Figura 37).

Figura 37 - Plano de ajuste (em vermelho) calculado em uma nuvem de pontos (em preto)



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Este plano considerou a orientação e inclinação da superfície, conforme a leitura realizada no equipamento. Por meio do plano calculado, é possível avaliar a diferença de altura de qualquer ponto da nuvem em relação à altura da superfície estimada.

4.2.1.7 Cálculo dos Parâmetros de Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade foram obtidos a partir dos coeficientes calculados para o plano, determinando a rugosidade média (R_a) e considerando que z é a altura. O z calculado para R_a é absoluto, no entanto, para calcular picos e vales, os valores positivos e valores negativos são considerados em relação ao z do plano. Este valor não absoluto é a base do cálculo dos outros parâmetros de rugosidade.

Outra questão importante de implementação é a divisão da área da superfície em regiões. Uma vez que se considerou um perfil 2D para cálculo, uma divisão de área para mensuração do parâmetro de rugosidade é considerada para gerar um número considerável de regiões.

4.2.1.8 Estrutura hierárquica para representação dos parâmetros de rugosidade

Os parâmetros de rugosidade normalmente são calculados sobre a superfície inteira, indicando valores médios para toda a região da amostra. No entanto, os cálculos localizados destes parâmetros não são considerados. É comum uma superfície apresentar um coeficiente de variação, de acordo com a amostragem local de rugosidade. A avaliação dos parâmetros em um local específico, respeitando um critério de localização, beneficia a comparação entre as diferentes regiões da superfície e entre as várias amostras de superfície de materiais maiores ou de várias peças produzidas com o mesmo material.

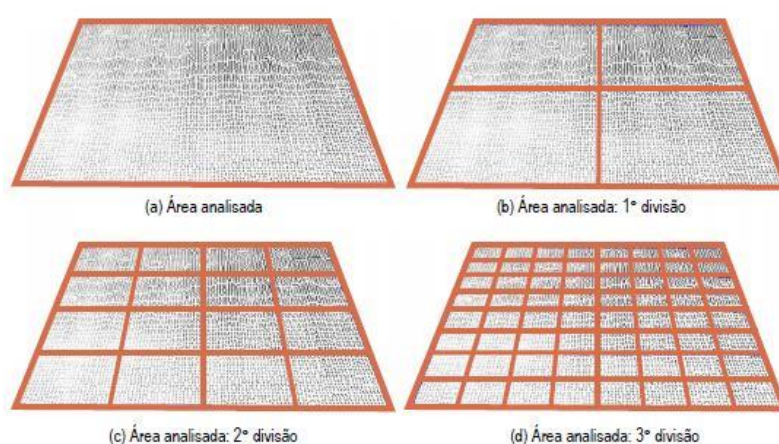
No entanto, entre diferentes amostras de mesma fabricação, um comportamento de similaridade é previsto entre os coeficientes de mesma localização ou dentro de uma variação esperada, devido as possíveis mudanças no processo de fabricação dos blocos cerâmicos.

A fim de avaliar os parâmetros de rugosidade em diferentes regiões de uma mesma amostra de material e também de amostras diferentes, a divisão espacial hierárquica de área amostrada foi realizada. Foi relevante para o estudo levar em consideração as dimensões das regiões de análise e a mesma localização das regiões em relação ao substrato analisado. A definição do padrão de localização facilita a comparação entre diferentes superfícies e o tamanho da região é importante para verificar a precisão na determinação da amostragem para posterior medição de rugosidade.

O tamanho de cada região pode variar significativamente entre diferentes tipos de materiais. Portanto, este é um parâmetro que foi definido no estudo. Em cada região determinada através da *quadtree*, calcularam-se os parâmetros de rugosidade respeitando a divisão espacial.

O último nível é o parâmetro definido como ideal para o mínimo de área de avaliação dos parâmetros de rugosidade. A Figura 38 é um exemplo de diferentes níveis de divisão da superfície usando uma *quadtree*.

Figura 38 - Subdivisão espacial hierárquica da *quadtree*: a) superfície original, b) primeira subdivisão, c) segunda subdivisão e d) terceira subdivisão



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

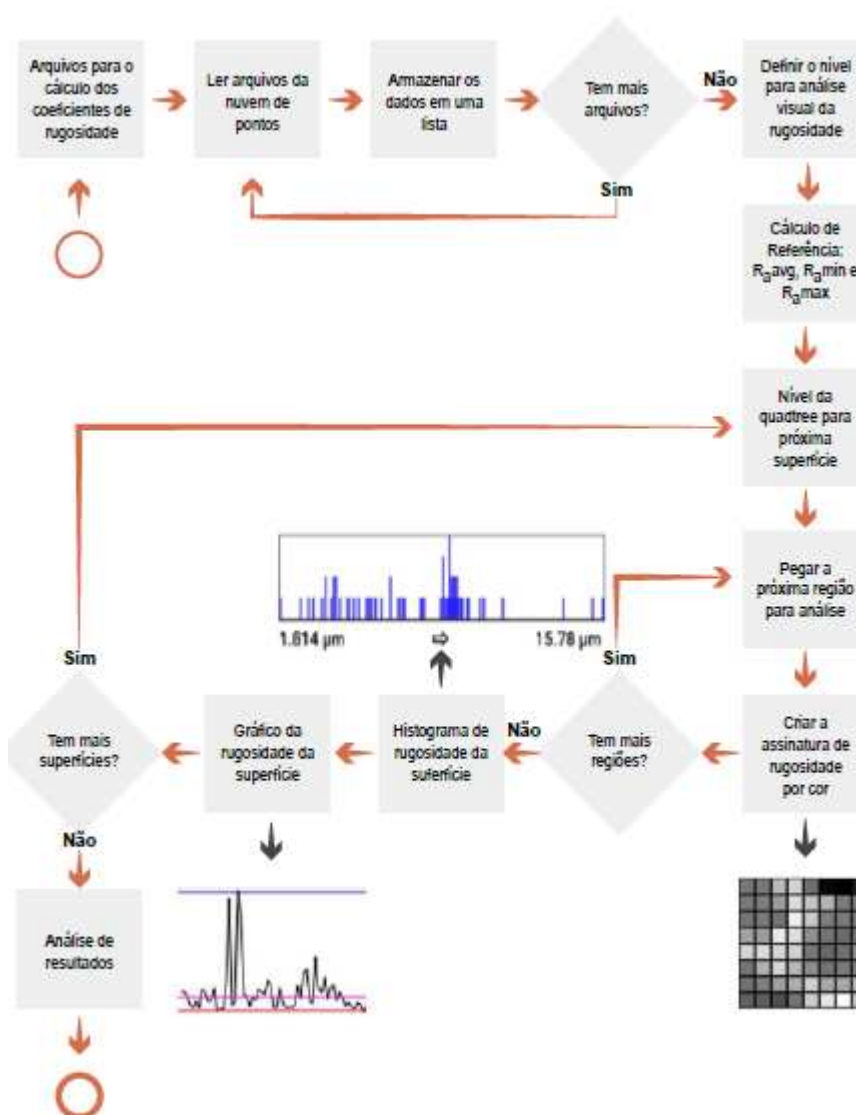
4.2.1.9 Cálculo dos parâmetros de rugosidade para as regiões da *quadtree*

Após a divisão espacial da superfície, de acordo com as coordenadas que formam o polígono de superfície, a classificação de pontos por região foi executada. É relevante notar que os parâmetros de rugosidade das diferentes regiões não são obtidos em média, eles são recalculados para cada região individualmente, o que determina a melhor precisão dos parâmetros. Para cada subdivisão espacial, os pontos de cada região são considerados para o cálculo dos parâmetros de rugosidade e os valores são escritos na superfície de medição. Desta forma, é possível avaliar os coeficientes de rugosidade nos vários níveis da subdivisão.

4.2.1.10 Método para determinação do coeficiente de rugosidade de superfícies cerâmicas

Após o cálculo dos parâmetros de rugosidade em diferentes regiões, é realizado o tratamento das informações para representação e análise dos resultados. A Figura 39 apresenta o cálculo das informações geradas por este novo *software* para análise e avaliação da rugosidade das superfícies amostradas.

Figura 39 - Processo para cálculo de ferramentas de avaliação e análise de coeficientes de rugosidade



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

O processo de geração de informações gráficas para análise e avaliação de rugosidade é definido como: todos os arquivos de parâmetros de rugosidade (um por superfície) são lidos pelo *software* para análise; as superfícies são mantidas em uma lista para processamento em conjunto; de acordo com o nível do *quadtree* definido para análise, todas as regiões de todas as superfícies são percorridas para determinação dos valores de referência R_a médio (R_{aavg}), R_a mínimo (R_{amin}) e R_a máximo (R_{amax}); para cada região de cada superfície e de acordo com o nível do *quadtree* selecionado geram-se assinaturas de rugosidade. Após, calcula-se o histograma de cada região.

Uma tabela é elaborada a partir dos dados de R_a da região e plotada em um gráfico comparando com os valores de referência. Dessa forma, uma página com todos os objetos gráficos gerados é exibida, facilitando a avaliação e a análise da rugosidade medida em cada superfície. Dados mais detalhados sobre o software podem ser encontrados na tese de Tonietto (2021).

4.2.1.11 Assinatura de rugosidade da superfície

Criou-se uma assinatura da superfície, composta pelos valores de R_a de cada região definida pela subdivisão do *quadtree*. Desta forma, é possível identificar visualmente o padrão da superfície amostrada e compará-la com outra superfície, através de sua assinatura de rugosidade. Na Figura 40, um exemplo de código visual, gerado a partir dos coeficientes de rugosidade e o nível de detalhe usado. As assinaturas de rugosidade foram geradas por Tonietto (2021), os valores aparecem no formato americano.

Figura 40 - Exemplo de código de rugosidade superficial (assinatura)

4.281	4.238	2.731	2.386	5.073	14.963	15.78	12.809
4.118	3.72	3.092	2.289	2.622	2.794	3.898	3.592
4.504	4.091	4.463	2.024	2.524	3.588	4.137	3.992
3.03	3.09	2.104	2.248	3.262	4.4	5.473	4.7
2.359	2.287	2.338	2.391	4.161	5.6	4.945	3.281
4.409	2.815	2.367	2.757	3.307	4.551	4.104	3.616
4.769	3.478	3.045	2.859	2.428	2.948	2.947	2.703
6.395	6.704	8.137	4.67	2.513	2.156	1.814	2.567

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Cada R_a calculado por região, está representado na Figura 40, com unidade de medida em μm . Para gerar as cores da assinatura visual, uma escala de cinza é usada, com o valor de R_a local sendo comparado com os valores médios ($R_{a\text{avg}}$), mínimo ($R_{a\text{min}}$) e máximo ($R_{a\text{max}}$) de referência. Para fins de comparação e na ausência de um valor de referência padrão na literatura, definiu-se a média de R_a ($R_{a\text{avg}}$), bem como o mínimo valor ($R_{a\text{min}}$) e máximo ($R_{a\text{max}}$) de R_a calculado em todas as superfícies amostradas em cada região da quadtree, como valores de referência.

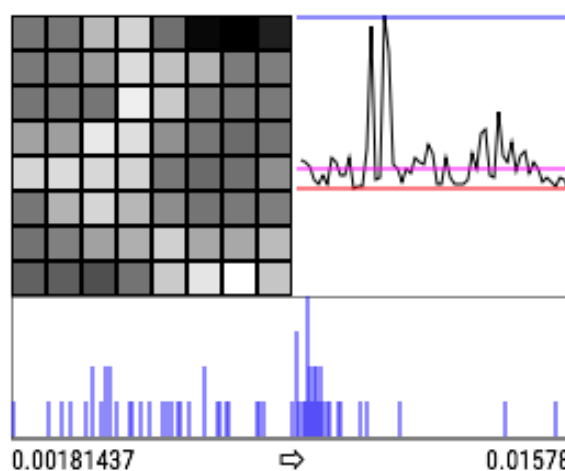
A partir desses valores de referência, quanto mais próximo o R_a da região estiver do $R_{a\text{min}}$, mais próxima do branco será a cor. E quanto mais perto a localização do R_a da região estiver do $R_{a\text{max}}$, mais próxima do preto será a cor. Conseqüentemente, quando o R_a da região estiver mais perto de $R_{a\text{avg}}$, mais perto do cinza médio será sua cor.

O nível de subdivisões máximo definido para o quadtree é uma parametrização do estudo. Para os ensaios executados, foi definido utilizar o quarto nível de subdivisão ($1,5625\text{mm}^2$) para exemplificar a geração de assinatura do bloco cerâmico, uma vez que a aquisição de 10.000 pontos nessa área não está muito longe do passo de leitura do equipamento ($0,1\text{mm}$) e com quantidade 256 pontos para os cálculos de R_a .

4.2.1.12 Ferramentas complementares para avaliação de rugosidade

Além da assinatura visual de rugosidade, também foram utilizadas outras métricas para avaliar e comparar a R_a entre superfícies. A Figura 41 exemplifica um conjunto métrico usado para avaliação e comparação de rugosidade de blocos cerâmicos.

Figura 41 - Exemplo de avaliação de rugosidade de superfície



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Primeiro, a partir da composição de cores do código visual, é executado um histograma para verificar a frequência das cores e comparar a dispersão ou concentração de R_{amin} (branco) e R_{amax} (preto) dentro dos níveis de valores. O eixo x do histograma é formado pelos 256 valores possíveis de tons de cinza, branco e preto. O eixo y é formado pela frequência que certa tonalidade de cinza aparece no código. O histograma pode ser usado para verificar a dispersão dos coeficientes de R_a em relação ao R_{avg} para cada superfície. A assinatura da superfície permite avaliação visual da dispersão dos coeficientes, enquanto o histograma permite uma avaliação quantitativa desta dispersão.

O R_a de cada região é calculado a partir do 4º nível dos parâmetros de rugosidade da *quadtree*. Outra forma de avaliação que é utilizada é a comparação dos coeficientes de superfície com os parâmetros de referência, por meio de um gráfico de linha. É possível verificar o comportamento e distribuição dos coeficientes das superfícies em relação aos parâmetros de referência. Para construir o gráfico, a matriz bidimensional dos coeficientes de superfície é transformada em uma superfície unidimensional. Além dos coeficientes, os valores de referência (R_{avg} - linha de cor

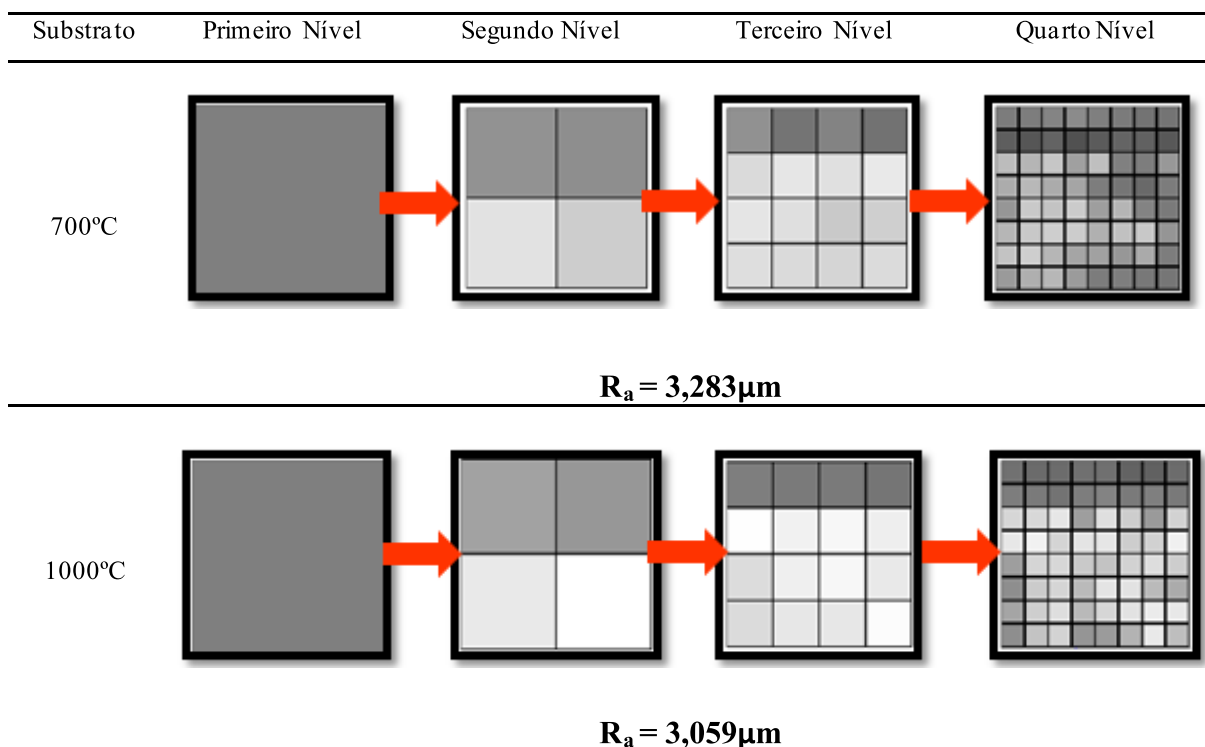
rosa, R_{amin} - linha de cor vermelha e R_{amax} - linha cor azul) também foram plotados no gráfico e, de forma geral, avaliaram-se as variações dos coeficientes de rugosidade das superfícies. Com isso, é possível comparar uma superfície com as outras, verificando aquelas que possuem maior ou menor variação dos coeficientes em relação a R_{aavg} .

No centro da Figura 41, está descrito o código visual da superfície. Ao lado, o histograma calculado a partir do código visual e abaixo o gráfico comparando os coeficientes R_a da superfície com o R_{aavg} e os valores de referência de R_{amin} e R_{amax} .

4.2.2 Resultados da aplicação do método proposto para substratos cerâmicos queimados em distintas temperaturas

Para o cálculo das assinaturas de rugosidade dos substratos cerâmicos, o quarto nível da subdivisão da hierarquia da *quadtree* é usado, por representar uma melhor resolução para o cálculo da rugosidade, uma vez que se aproxima do nível de precisão de leitura do laser do perfilômetro 3D e permite a verificação de diferenças significativas entre as superfícies. A Figura 42 permite observação da assinatura de rugosidade dos substratos, em que é definida uma versão reduzida, sem os valores dos coeficientes R_a , porque facilita a interpretação visual e comparação dos resultados.

Figura 42 - Versão reduzida da assinatura de rugosidade para os níveis da *quadtree* dos diferentes substratos cerâmicos



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Ao analisar as imagens apresentadas na Figura 42, as diferentes temperaturas de sinterização produzem superfícies com diferentes rugosidades, pois avaliando visualmente é possível observar no quarto nível que as superfícies em análises são distintas.

Para avaliar os resultados, as assinaturas visuais de todas as superfícies foram comparadas, e o histograma e o gráfico de rugosidade foram usados para auxiliar na análise do comportamento dos dados calculados. Assim, além dos valores de R_a calculados, quantitativamente, para cada localização, na superfície, de cada nível de precisão da divisão da superfície, computados como realizado nos trabalhos de Santos e Julio (2013) e Moreau, Roudet e Gentil (2014), este trabalho apresenta uma nova ferramenta, que permite uma avaliação mais precisa da rugosidade ao longo de uma superfície e também compara as assinaturas de rugosidade entre superfícies.

Em relação à avaliação local, ou seja, a visualização das informações de rugosidade dentro da superfície, com a separação espacial das regiões dentro das divisões das superfícies, a assinatura de rugosidade do método desenvolvido nesta etapa do estudo, permite uma melhor interpretação da rugosidade calculada em cada

local das superfícies, o que difere a proposta dos métodos utilizados como referência, descritos em Santos e Julio (2013) e Moreau, Roudet e Gentil (2014). Com isso, tem-se uma melhor definição da rugosidade e sua distribuição ao longo da superfície.

A partir da análise da assinatura de rugosidade, é possível visualizar superfícies com maior variação dos coeficientes de rugosidade, e com maior ou menor nível de rugosidade. Em comparação com os métodos apresentados em Santos e Julio (2013) e Moreau, Roudet e Gentil (2014), há um ganho considerável a este respeito, uma vez que os métodos apresentam apenas coeficientes de rugosidade globais para as superfícies, portanto, sem uma análise local ou detalhada.

Em comparação com os métodos de reconstrução de superfície apresentados por Berger *et al.* (2014), Kazhdan, Bolitho e Hoppe (2006), Kazhdan e Hoppe (2013), Taubin (2012), Schall e Samozino (2005) e Nan e Wonka (2017), o método proposto apresenta vantagem, pois as informações contidas nos estudos utilizados como referência são suavizadas em relação à superfície original, já que fazem uma análise global da superfície, e também, nenhum trabalho citado tem como objetivos analisar os coeficientes de rugosidade, uma vez que visam apenas a reprodução das superfícies e não calcular e analisar o parâmetro de rugosidade. Os métodos desenvolvidos pelos autores citados permitem apenas uma avaliação qualitativa da rugosidade das superfícies.

A assinatura de rugosidade, proposta nesta etapa do estudo, também permite uma avaliação global da superfície, possibilitando a comparação de uma superfície com as outras superfícies do mesmo bloco e com todas as superfícies amostradas na mesma temperatura de sinterização. Isso permite avaliar o comportamento das superfícies dentro do próprio bloco, indicando diferentes padrões de rugosidade dentro da mesma superfície analisada e o comportamento global da rugosidade em relação a blocos de mesma temperatura de sinterização.

A fim de avaliar os coeficientes de rugosidade da superfície, foi realizada a análise de ambos os níveis de divisão da superfície e a comparação entre superfícies por meio da análise da assinatura, histograma e gráfico de rugosidade.


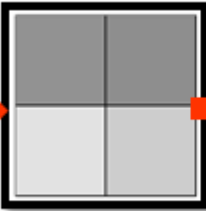
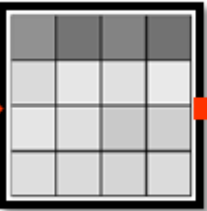
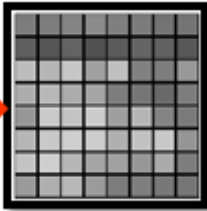

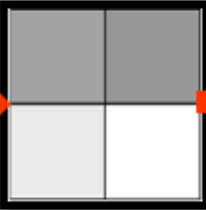
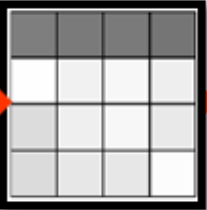
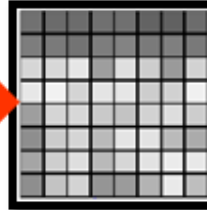
4.2.3 Avaliação por nível de detalhe

A primeira forma de avaliação proposta é a hierárquica e a análise local dos coeficientes de rugosidade. Nesta forma de avaliação, é possível analisar e comparar

as assinaturas de rugosidade de cada superfície em diferentes níveis de detalhe. Quanto maior o nível de divisão da superfície avaliada, maior será o nível de precisão desta avaliação, justamente porque os níveis anteriores são de valores globais ou médios em relação a uma determinada região da superfície. Considera-se nessa análise que no nível inicial da *quadtree* o coeficiente que é calculado é o global da superfície, portanto, o mesmo padrão de resultado dos trabalhos apresentados por Santos e Julio (2013) e Moreau, Roudet e Gentil (2014).

A Figura 43 apresenta uma comparação nos níveis iniciais da divisão das superfícies de duas amostras para os testes realizados. No exemplo, os coeficientes nos níveis 1, 2 e 3 apresentam resultados muito semelhantes, devido aos valores médios de R_a . No entanto, no nível 4, a diferença entre as rugosidades das superfícies são mais significativas.

Figura 43 - Versão reduzida da assinatura de rugosidade para os níveis da *quadtree* dos diferentes substratos cerâmicos

Substrato	Primeiro Nível	Segundo Nível	Terceiro Nível	Quarto Nível
700°C				
	$R_a = 3,283\mu\text{m}$	$R_{aavg} = 3,283\mu\text{m}$ $R_{amin} = 2,772\mu\text{m}$ $R_{amax} = 3,698\mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0,394\mu\text{m}$	$R_{aavg} = 3,283\mu\text{m}$ $R_{amin} = 2,595\mu\text{m}$ $R_{amax} = 5,003\mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0,677\mu\text{m}$	$R_{aavg} = 3,705\mu\text{m}$ $R_{amin} = 2,453\mu\text{m}$ $R_{amax} = 7,978\mu\text{m}$ $R_{asdv} = 1,020\mu\text{m}$
1000°C				
	$R_a = 3,059\mu\text{m}$	$R_{aavg} = 3,059\mu\text{m}$ $R_{amin} = 2,454\mu\text{m}$ $R_{amax} = 3,602\mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0,482\mu\text{m}$	$R_{aavg} = 3,059\mu\text{m}$ $R_{amin} = 2,207\mu\text{m}$ $R_{amax} = 4,890\mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0,826\mu\text{m}$	$R_{aavg} = 3,046\mu\text{m}$ $R_{amin} = 2,001\mu\text{m}$ $R_{amax} = 6,404\mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0,844\mu\text{m}$

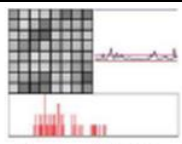
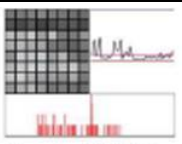
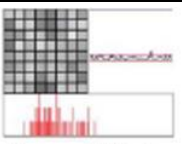
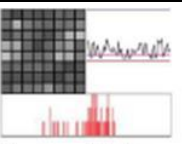
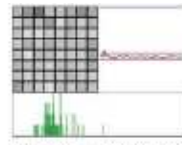
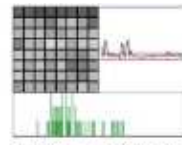
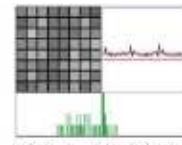
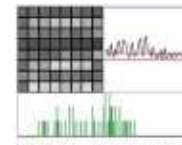
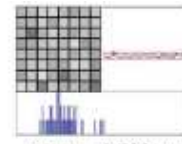
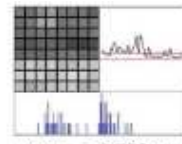
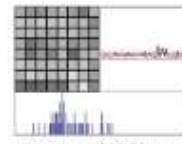
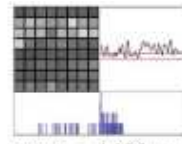
Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A partir da avaliação visual, conclui-se que o estudo permite que sejam utilizados diferentes padrões de análises em diferentes níveis de precisão, com isso, pode-se usar o nível de subdivisão que melhor se adaptar ao propósito do trabalho que está sendo desenvolvido, já que é possível com essa análise criar apenas os padrões de semelhança entre blocos, ou analisar com mais detalhes suas diferenças.

4.2.4 Avaliação comparativa da rugosidade

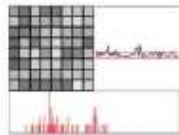
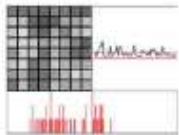
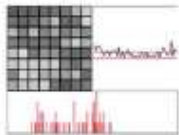
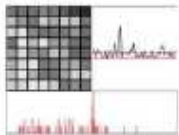
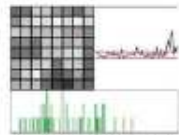
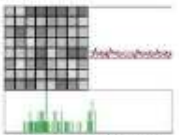
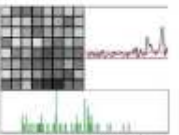
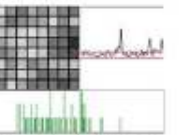
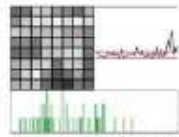
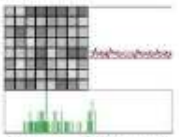
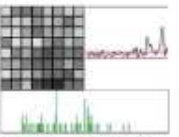
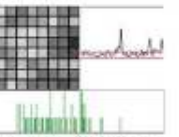
A outra forma de análise utilizada no trabalho foi a comparação de dados através das novas ferramentas, que são propostas nessas etapas do estudo. A combinação do uso de três gráficos pode ser inferida a vários comportamentos, padrões e análises das superfícies amostradas. As Figuras 44 e 45 apresentam os resultados obtidos nos testes realizados para validação do modelo.

Figura 44 - Resultados das assinaturas de rugosidade para cada superfície a 700°C

Substrato	Primeiro Nível	Segundo Nível	Terceiro Nível	Quarto Nível
Bloco1 700°C	 $R_a\text{avg} = 2.922 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.316 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 5.308 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 0.419 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 3.705 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.453 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 7.978 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 1.020 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 2.831 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.214 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 4.394 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 0.296 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 4.841 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.629 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 7.714 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 1.212 \mu\text{m}$
Bloco2 700°C	 $R_a\text{avg} = 2.640 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.229 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 4.177 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 0.180 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 3.266 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.283 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 6.957 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 0.767 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 3.436 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.614 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 5.761 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 0.457 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 4.050 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.219 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 7.980 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 1.238 \mu\text{m}$
Bloco 3 700°C	 $R_a\text{avg} = 2.733 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.261 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 3.845 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 0.216 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 3.790 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.277 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 8.134 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 1.045 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 2.973 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.169 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 5.268 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 0.391 \mu\text{m}$	 $R_a\text{avg} = 4.296 \mu\text{m}$ $R_a\text{min} = 2.300 \mu\text{m}$ $R_a\text{max} = 6.885 \mu\text{m}$ $R_a\text{sdv} = 1.138 \mu\text{m}$

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Figura 45 - Resultados das assinaturas de rugosidade para cada superfície a 1000°C

Substrato	Primeiro Nível	Segundo Nível	Terceiro Nível	Quarto Nível
Bloco 1 1000°C	 $R_{aavg} = 3.003 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.139 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 5.381 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.504 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 3.298 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.259 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 6.214 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.711 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 3.391 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.285 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 6.145 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.724 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 3.355 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.049 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 10.037 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.854 \mu\text{m}$
Bloco 2 1000°C	 $R_{aavg} = 3.277 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 1.986 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 8.985 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.901 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 2.901 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.192 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 4.488 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.448 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 3.532 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.227 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 9.966 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.993 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 3.333 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.233 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 9.467 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.761 \mu\text{m}$
Bloco 3 1000°C	 $R_{aavg} = 3.277 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 1.986 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 8.985 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.901 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 2.901 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.192 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 4.488 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.448 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 3.532 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.227 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 9.966 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.993 \mu\text{m}$	 $R_{aavg} = 3.333 \mu\text{m}$ $R_{amin} = 2.233 \mu\text{m}$ $R_{amax} = 9.467 \mu\text{m}$ $R_{asdv} = 0.761 \mu\text{m}$

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Para calcular as assinaturas, os valores mínimos (R_{amin}), máximo (R_{amx}) e médio (R_{aavg}) foram calculados para todas as superfícies amostradas para as duas temperaturas de queima. Os valores encontrados foram: para R_{amin} 1,714 μm , para R_{amax} o valor 15,78 μm .

A assinatura de rugosidade auxilia na avaliação de rugosidade entre os blocos sinterizados em diferentes temperaturas, uma vez que, notadamente, há um comportamento diferenciado entre blocos de diferentes amostras.

Conforme demonstrado nas Figuras 44 e 45, algumas superfícies têm maior variação de rugosidade do que outras. Isso é melhor percebido pela variação de cor da assinatura de rugosidade. No entanto, outros comportamentos também podem ser identificados, por exemplo, nos testes realizados, é possível verificar um comportamento equivalente entre as superfícies de regiões semelhantes de todos os blocos (coluna "Superfície A" das Figuras 44 e 45). Verifica-se que nesta região dos

blocos não há elevada variação dos coeficientes de rugosidade, em geral, os mesmos apresentam valores próximos ou abaixo da rugosidade média (R_{aavg}).

Outra ferramenta é utilizada na avaliação dos resultados, o histograma, que permite comparar a variação dos valores de rugosidade entre blocos de diferentes temperaturas de sinterização. É verificado que as superfícies dos blocos com temperatura de queima de 700°C concentraram os coeficientes mais próximos do centro do histograma (ou mais perto do valor R_{aavg}). Nas superfícies dos blocos de 1000°C, há uma maior variação ou dispersão dos valores em relação à rugosidade média (R_{aavg}).

Por meio dos resultados apresentados quando se utilizou ferramentas para análise de rugosidade de substratos cerâmicos, foi possível verificar de forma quantitativa e qualitativa que os blocos com uma temperatura de sinterização de 1000°C tem variação de rugosidade em relação aos blocos de 700°C.

Por fim, as ferramentas propostas permitem uma maior análise dos critérios de avaliação da rugosidade superficial em relação as análises quantitativas apresentadas nas obras de referência Santos e Julio (2013) e Moreau, Roudet e Gentil (2014) e critérios subjetivos avaliados por Berger *et al.* (2014), Kazhdan Bolitho Hoppe (2006), Kazhdan e Hoppe (2013), Taubin (2012), Schall e Samozino (2005) e Nan e Wonka (2017). O método proposto na ETAPA 1 do estudo permite realizar análises em vários níveis de detalhamentos, comparações e suposições que não são facilmente determinadas pela análise simples de coeficientes globais.

A partir dos resultados obtidos na ETAPA 1, o trabalho seguiu para a ETAPA 2, onde os parâmetros de rugosidade são comparados, através das assinaturas de rugosidade e dos métodos 2D e 3D de aquisição de dados para análise de rugosidade.

4.3 ETAPA 2: MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE DADOS 2D E 3D PARA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE DE BLOCOS CERÂMICOS

Nos resultados apresentados pelo método criado para analisar rugosidade de substratos cerâmicos (ETAPA 1), é possível identificar regiões com mais ou menos rugosidade ao longo da superfície gerada pela mesma nuvem de dados. A Figura 45 apresenta o resultado obtido com o método proposto na ETAPA 1 deste trabalho, para uma área de 100mm², cuja nuvem de pontos é obtida neste estudo.

Na assinatura de rugosidade, pode-se notar visualmente que a rugosidade não é homogênea ao longo da superfície, pois há diferenças entre os valores de R_a determinados para cada uma das 64 regiões de 100 mm² analisadas. O método de avaliação de rugosidade, proposto na ETAPA 1 do estudo, permite observar o comportamento da rugosidade em toda a superfície.

Na linha do gráfico e nas regiões mais escuras das linhas, abaixo da assinatura de rugosidade (Figura 46), um diferente comportamento relacionado aos valores de rugosidade é observado. Provavelmente, esses ruídos são gerados durante o processo de fabricação, pelo manuseio ou pela sinterização dos blocos cerâmicos. O histograma mostra a distribuição dos valores de R_a (linha rosa) entre o R_a mínimo (linha vermelha) e o R_a máximo (linha azul), indicando onde está a maior concentração de R_a na amostra. As assinaturas de rugosidade foram geradas por Tonietto (2021), os valores aparecem no formato americano.

Figura 46 - Assinatura da rugosidade de uma área de 10mm x 10mm gerada pelo método apresentado na ETAPA 1 do estudo, com média e desvio padrão por linha e por coluna

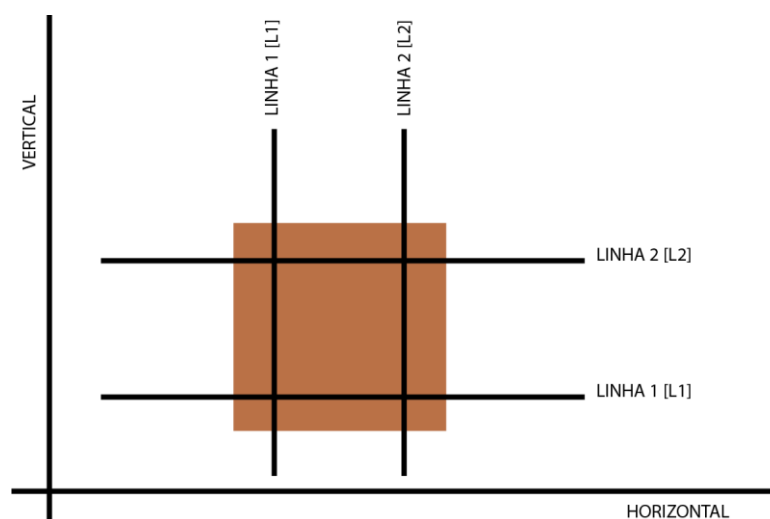


Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A fim de comparar os dois métodos de medição de rugosidade, foram realizadas análises estatísticas que serão apresentadas neste tópico. A primeira análise avaliou se há diferença significativa na direção de medição pelo método 2D.

A representação das orientações de aquisição dos dados pode ser visualizada na Figura 47, tendo sido realizadas duas medidas na horizontal e duas na vertical.

Figura 47 - Representação da orientação da aquisição dos dados pelo método 2D



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

O teste F de hipóteses, a partir dos desvios padrão, foi usado. Os valores médios de R_a por amostra, obtidos pela captura de dados bidimensionais, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Desvio padrão dos dados 2D R_a

(continua)

Superfícies	Horizontal		Vertical	
	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 1
0700_2a_03	0,8471	1,1258	0,9308	0,8634
0700_2a_04	1,6931	0,9978	0,9809	0,9298
0700_2a_08	0,8628	0,8525	0,7837	1,1122
0700_2a_11	0,9806	0,9134	0,6992	0,9292
0700_3a_05	0,9853	1,1663	1,6398	0,9165
0700_3a_06	1,0962	0,8276	1,0415	1,0203
0700_3a_08	0,9987	0,8439	1,0053	1,1583
0700_3a_14	1,2594	0,7634	0,9022	0,7164

Tabela 6 - Desvio padrão dos dados 2D R_a

(continuação)

Superfícies	Horizontal		Vertical	
	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 1
0700_4a_03	1,0350	0,8634	1,4271	0,8987
0700_4a_06	0,7552	1,2059	0,5871	0,8109
0700_4a_13	0,9096	0,9328	1,3053	0,9864
0700_4a_15	0,8006	1,0205	1,3849	0,6109
0800_2a_06	0,7744	1,3646	0,9613	1,1366
0800_2a_08	0,6939	0,7635	0,9697	1,0487
0800_2a_12	0,9187	0,8118	1,1226	1,3678
0800_2a_15	0,9316	0,9052	0,9327	1,0162
0800_3a_05	1,2767	1,4049	0,9913	1,5418
0800_3a_08	0,9438	0,8784	1,2217	1,0552
0800_3a_11	1,2789	0,8376	0,9805	4,1996
0800_3a_13	0,9912	1,2367	1,2521	0,8468
0800_4a_05	1,0500	1,0534	0,6556	1,0615
0800_4a_06	0,8659	1,2937	1,1739	1,2836
0800_4a_11	1,2937	1,1556	1,3699	4,5555
0800_4a_13	1,1755	0,9769	1,3883	0,9521
0900-1a-04	0,9132	1,1904	1,1377	0,7836
0900-1a-08	0,7536	0,8788	0,8143	0,9617
0900-1a-13	0,7578	1,1306	1,3255	1,0329
0900-1a-14	0,8573	1,4417	1,0500	0,9345
0900_2a_08	1,1240	1,6671	1,5400	1,5633
0900_2a_09	1,1453	1,5682	1,8174	1,2779
0900_2a_14	1,9432	1,6190	1,6532	0,9649
0900_2a_17	1,2351	1,1890	1,3075	1,5521
0900_3a_05	1,0739	0,9791	0,9382	0,9536
0900_3a_08	1,5049	0,9696	1,2109	1,0469
0900_3a_11	1,8797	1,2049	1,2735	0,7708
0900_3a_13	0,9582	1,1871	1,4655	1,3510
1000_1a_06	1,5987	1,6958	1,6192	1,8935
1000_1a_07	2,2042	1,8078	1,4420	1,3821
1000_1a_09	1,6568	2,0279	1,7739	1,4617
1000_1a_14	1,9309	1,7018	1,4297	1,4723

Tabela 6 - Desvio padrão dos dados 2D R_a

(conclusão)

Superfícies	Horizontal		Vertical	
	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 1
1000_2a_01	1,2393	1,5095	1,3744	1,7013
1000_2a_06	1,7790	2,2622	2,4506	2,2834
1000_2a_09	1,9592	1,9522	2,3270	2,4435
1000_2a_15	1,7772	2,3364	2,0537	1,7560
1000_3a_06	1,6724	1,7581	2,3468	2,3246
1000_3a_08	2,0832	1,1354	2,2943	1,7291
1000_3a_17	1,8999	1,8123	1,8078	1,3682
1000_3a_19	1,7233	1,6697	1,8490	1,9687

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Os resultados do teste F, comparando os dados do desvio padrão da análise 2D, estão representados na Tabela 7, assim como todas as combinações testadas.

Tabela 7 - Resultados do teste F

Substratos 1	Substratos 2	F	F-Crítico	<i>p</i> -Valor	Diferente
H1	V1	1,1382	1,6238	0,32955	Não
H2	V2	3,5025	1,6238	0,00002	Sim
H1	V2	3,2246	1,6238	0,00005	Sim
H2	V1	1,2363	1,6238	0,23498	Não
H1	H2	1,0862	1,6238	0,38902	Não
V1	V2	2,8331	1,6238	0,00026	Sim
H1H2	V1V2	2,2731	1,4038	0,00004	Sim

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Ao comparar as linhas verticais e horizontais obtidas na análise 2D, há evidências suficientes, no nível de significância de 5%, para confirmar que as variâncias do desvio padrão de R_a nas direções horizontal e vertical são diferentes entre si, dependendo da posição de amostragem.

Ao comparar duas medidas de rugosidade paralelas entre si, também há evidência suficiente, ao nível de significância de 5%, para confirmar que a variação do desvio padrão da R_a para grupos de duas linhas na mesma direção de amostragem são diferentes entre si, dependendo da posição de análise.

Neste contexto, verificou-se que a orientação em que ocorre a medição (vertical ou horizontal) sugere significativamente o parâmetro R_a em todos os blocos. Então, esse resultado confirma a ideia de Contardi, Cornaglia e Tarditi (2017), em que atestam que os materiais constituintes e o processo de fabricação influenciam na rugosidade superficial, já que os blocos cerâmicos utilizados no presente trabalho são produzidos com o uso de uma extrusora no sentido horizontal, dessa forma, a direção de extrusão da massa cerâmica pela boquilha da maromba gera alterações superficiais que resultam em diferenças de rugosidade quando medidas linearmente entre os dois sentidos do bloco. Essa variação tende a ser significativa, conforme constatado na pesquisa.

Portanto, após verificar que em uma mesma superfície ocorrem variações significativas de rugosidade ao analisar determinadas regiões da mesma, e em distintas orientações de medição, conclui-se que uma única linha de medição pelo método 2D pode gerar erros e distorções na determinação do parâmetro de rugosidade da superfície de materiais heterogêneos, não sendo recomendado a utilização desse método como parâmetro único para determinar rugosidade de toda a superfície de um bloco cerâmico.

Para determinar se há diferença significativa entre a estimativa de R_a na superfície de blocos cerâmicos pelo método de determinação de rugosidade 2D e aquele obtido pelo método 3D, é realizado o cálculo do plano de ajuste dos dados de R_a para as amostras 2D. Uma vez que o método 3D analisa pontos sem uma direção específica, a análise estatística de comparação direta entre os métodos 2D e 3D não é apropriada.

Portanto, é necessário ajustar os valores adquiridos pelo rugosímetro 2D, com o intuito de considerar os dados como uma nuvem de pontos contendo informações nas direções horizontal e vertical, ou seja, independente da direção. Então, para análise 2D foram usadas quatro linhas, sendo duas paralelas entre si e perpendiculares às outras duas (Figura 47), deste modo o efeito da direção de medição foi excluído da análise e o que se avalia é se o uso de apenas 4 linhas para gerar a nuvem de pontos resulta num R_a equivalente ou não ao obtido pela medição 3D.

O objetivo é determinar qual é o método mais adequado para aquisição de dados para superfícies de blocos cerâmicos. Para este efeito, é realizado o teste Z em um nível de significância de 5%, para confirmar se as médias de R_a usando o método

3D são semelhantes as médias de R_a usando o método 2D. A Tabela 8 mostra os dados usados no método 3D e no método 2D com os ajustes realizados para o teste.

Tabela 8 - R_a médio de dados 3D e 2D

(continua)

Superfícies	Avg 3D	Avg 2D
0700_2a_03	1,415	1,0985
0700_2a_04	1,558	1,3732
0700_2a_08	1,413	1,2196
0700_2a_11	2,469	1,1864
0700_3a_05	1,498	1,5196
0700_3a_06	2,023	1,1962
0700_3a_08	2,999	1,3237
0700_3a_14	1,355	1,2079
0700_4a_03	1,646	1,4056
0700_4a_06	2,95	1,1206
0700_4a_13	3,437	1,3825
0700_4a_15	1,579	1,1433
0800_2a_06	1,634	1,4159
0800_2a_08	2,65	1,1831
0800_2a_12	1,625	1,3282
0800_2a_15	1,528	1,1555
0800_3a_05	1,753	1,7402
0800_3a_08	3,927	1,1943
0800_3a_11	2,441	1,8456
0800_3a_13	4,336	1,3783
0800_4a_05	1,935	1,2251
0800_4a_06	1,944	1,3304
0800_4a_11	2,04	2,2207
0800_4a_13	4,189	1,4706
0900-1a-04	1,903	1,3244
0900-1a-08	1,638	1,0718
0900-1a-13	1,581	1,3139
0900-1a-14	1,571	1,4881
0900_2a_08	2,016	1,6662
0900_2a_09	2,106	1,8648
0900_2a_14	2,037	2,0247
0900_2a_17	1,948	1,8738
0900_3a_05	1,636	1,2874
0900_3a_08	1,556	1,4292
0900_3a_11	1,666	1,6039
0900_3a_13	1,712	1,6227

Tabela 8 - R_a médio de dados 3D e 2D

	(conclusão)	
Superfícies	Avg 3D	Avg 2D
1000_1a_06	1,836	2,2859
1000_1a_07	1,648	2,372
1000_1a_09	4,66	2,4646
1000_1a_14	1,697	2,2834
1000_2a_01	2,596	2,0842
1000_2a_06	2,506	2,8958
1000_2a_09	2,526	2,5435
1000_2a_15	2,845	2,5091

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A Tabela 9 mostra o resultado do teste Z, realizado a partir dos dados da Tabela 8.

Tabela 9 - Resultados do teste Z, comparando os dados médios de amostras 2D e 3D

3D média	2,2701
2D média	1,6697
3D variância	0,5814
2D variância	0,2543
Z valor	4,5501
Z-crítico	1,96

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Conforme mostrado na Tabela 9, o resultado do teste Z para verificação de similaridade resultou em $F = 4,5501$ e $F\text{-crítico} = 1,96$, o que indica que há uma diferença significativa entre os dois métodos para determinar a rugosidade de blocos cerâmicos.

Além dessa determinação, realizada com base nas variações do grupo, uma comparação também é realizada entre as médias, a fim de verificar quantitativamente as diferenças de R_a das amostras, a partir dos dois métodos de análise.

As análises com contato podem gerar dados suavizados da superfície real (como já relatado por Pour (2016)), por não medirem toda a extensão da área em questão, o que traz a necessidade de adoção de métodos tridimensionais como efeito de complementação dos resultados, assim como realizado por Bissonnette e Courard

(2009). Os métodos tridimensionais executam medições com sensores sem contato direto com a superfície, e na escala utilizada tendem a apresentar valores superiores aos obtidos por métodos de aquisição de dados por contato.

Nos substratos de cerâmica vermelha estudados, um R_a significativamente maior é observado usando o método 3D quando comparado ao método 2D (o R_a médio encontrado na amostra 2D é 73,6% menor do que o valor médio encontrado pelo método 3D, de acordo com os dados observados na Tabela 8). Para mostrar esse comportamento, os valores de R_a foram organizados em intervalos entre o maior e o menor valor de R_a dos substratos analisados. A Tabela 10 é montada com base no histograma dos valores de R_a dos métodos 2D e 3D. A partir de todos os valores das amostras 2D e 3D foram selecionados o menor valor de R_{aavg} e o maior valor de R_{aavg} , foram definidos 5 níveis de representação com intervalos uniformes.

Tabela 10 - Intervalos para agrupar valores de R_a

Níveis	Menor R_{aavg} (μm)	Maior R_{aavg} (μm)
Nível 1	1,0718	1,7247
Nível 2	1,7247	2,3775
Nível 3	2,3775	3,0304
Nível 4	3,0304	3,6832
Nível 5	3,6832	4,3361

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

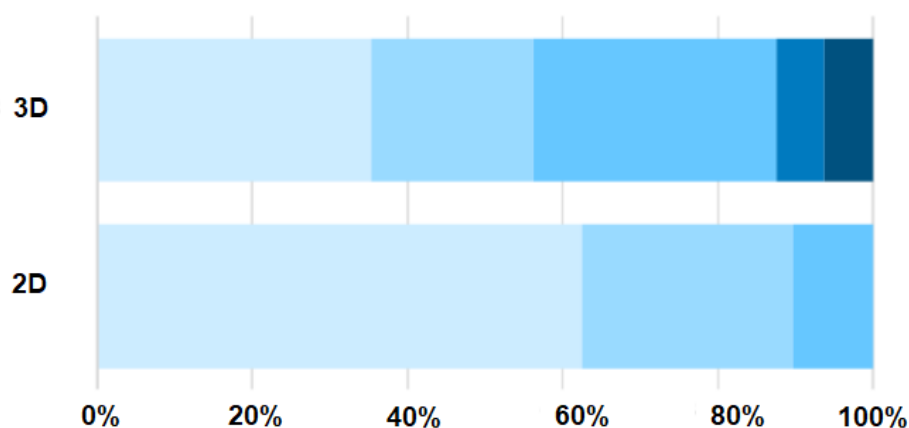
A Tabela 11 e a Figura 48 demonstram os resultados do R_a separado por método de aquisição de dados e por níveis de R_a , referente a 48 amostras de cada método. Em cada linha da Tabela 11, os valores dos resultados (2D e 3D) são contabilizados de acordo com o nível de representação conforme os intervalos definidos na Tabela 10. Observa-se a diferença entre os níveis de distribuição, onde no método 2D a maior concentração de valores está nos níveis iniciais (valores de R_a mais baixos), e no método 3D, os valores são melhor distribuídos em todas os níveis, corroborando com a afirmação que o R_a no método 3D é significativamente maior.

Tabela 11 - Valores de R_a agrupados por método e faixa de valor

Níveis	2D AVG	3D AVG
Nível 1	30	17
Nível 2	13	10
Nível 3	5	15
Nível 4	0	3
Nível 5	0	3

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Na Figura 48, é possível verificar as variações de rugosidade entre os diferentes métodos de aquisição de dados. Nota-se que os valores de R_a obtidos no método 3D são valores maiores ao método 2D, pois, com o uso do equipamento tridimensional e sem contato, é possível analisar toda a superfície e alcançar os picos mais altos e vales mais extremos, conforme explicado por Santos e Júlio (2013).

Figura 48 - Comparação dos métodos 2D e 3D dentro dos níveis de valores de R_a 

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Ainda analisando a Figura 48 e os demais resultados encontrados nesta etapa da pesquisa, é possível entender que os blocos analisados não apresentaram rugosidade uniforme em sua extensão, fato já constado por Ek *et al.* (2016) e Pour (2016), quando afirmam que um material não apresenta a mesma rugosidade em sua extensão. Portanto, a padronização do sistema de revestimento pode ser comprometida, já que não foram encontradas rugosidades semelhantes na extensão de uma mesma superfície, o que pode prejudicar adoção do revestimento adequado.

Com os resultados obtidos na ETAPA 2 do estudo conclui-se que, no método 2D a direção de leitura resultada em valores diferentes de R_a . Mesmo quando se realiza diversas leituras utilizando o método 2D, visando compensar o efeito da direção da medição, o valor médio de R_a resulta inferior ao determinado pelo método 3D, visto que o sistema de medição (por contato e sem laser) atenua os valores de leitura no eixo z, em relação às medidas por laser encontradas nos sistemas 3D.

Portanto, recomenda-se que as determinações de rugosidade em substratos de cerâmica vermelha sejam realizadas com equipamentos 3D, uma vez que gera mais precisão de leitura e maior nível de detalhe para avaliação dos coeficientes de rugosidade de superfícies.

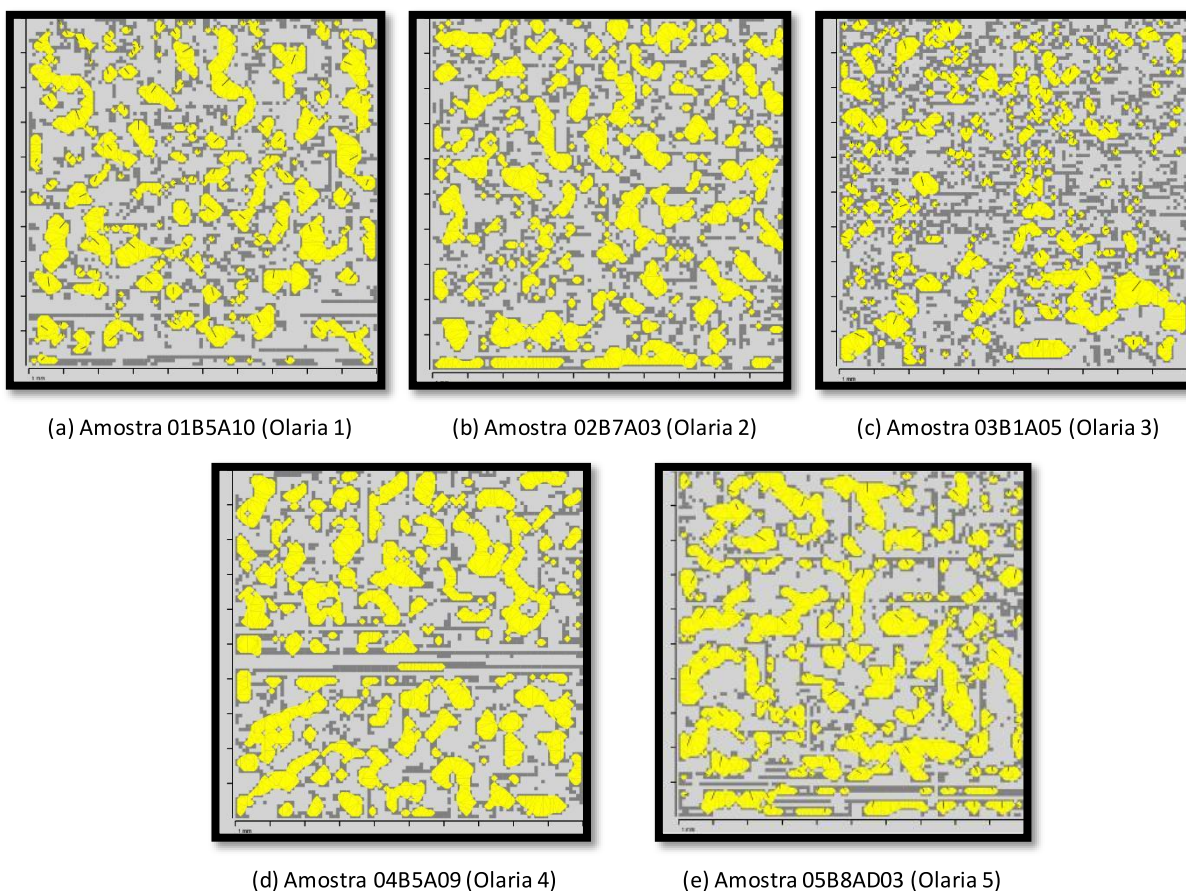
4.4 ETAPA 3: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE TRIDIMENSIONAL

Nessa etapa, a metodologia desenvolvida foi utilizada para a avaliação de diferenças de rugosidade entre blocos produzidos em diferentes olarias. Além da determinação da rugosidade a partir do parâmetro de rugosidade R_a , foi desenvolvida uma segunda ferramenta visando a avaliação das áreas dos vales observados na superfície do substrato em análise (ao longo do plano definido pelos eixos x e y) e criados os parâmetros de índice de áreas de vales (Δ_T) e média de área de vales (Δ_{avg}).

Para demonstrar a aplicação dos parâmetros de índice de áreas de vales (Δ_T) e a média de área de vales (Δ_{avg}), obtidos a partir da análise das nuvens de pontos determinadas por aquisição 3D via laser, são analisados os resultados apresentados na Tabela 12 e Figura 49 e, posteriormente, são discutidas as análises estatísticas.

Nesta análise foram selecionados 5 substratos considerados representativos, um para cada olaria. De todos os substratos de uma mesma olaria, é considerado o mais significativo aquele que possui valor Δ_T , com maior proximidade do valor médio de Δ_T da respectiva olaria ($\Delta_{T\ avg}$).

Figura 49 - Resultados que demonstram as áreas calculadas para cada substrato. Em (a) substrato da olaria 1, em (b) substrato da olaria 2, em (c) substrato da olaria 3, em (d) substrato da olaria 4 e em (e) substrato da olaria 5



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Na Figura 49, os *pixels* em amarelo representam as áreas de vales de cada amostra. Visualmente, não é possível avaliar quantitativamente os resultados, mas é perceptível que alguns substratos possuem áreas de vale maiores do que outros, enquanto outros possuem maior quantidade de áreas de vale, porém com tamanhos menores, o que impacta nos parâmetros relacionados a áreas de vale. Aqueles substratos cerâmicos com áreas maiores, como pode ser visualizado na Figura 49, para as olarias 4 e 5, apresentam valor Δ_{avg} maior do que os substratos das olarias 1, 2 e 3 na mesma Figura. Uma análise quantitativa desses parâmetros é apresentada na Tabela 11, tanto na coluna Δ_{avg} , como na coluna Δ_T .

Tabela 12 - Valores Δ_{avg} , Δ_T e $\Delta_{T\ avg}$ dos substratos de cada uma das cinco olarias

Olaria	Substrato	Δ_{avg} do Substrato	Δ_T do Substrato	$\Delta_{T\ avg}$ da Olaria
Olaria 1	01B5A10	0,1509 mm ²	27,62%	27,60%
Olaria 2	02B7A03	0,1272 mm ²	30,02%	30,01%
Olaria 3	03B1A05	0,0799 mm ²	22,85%	22,87%
Olaria 4	04B5A09	0,2129 mm ²	33,43%	33,43%
Olaria 5	05B8AD03	0,2040 mm ²	34,06%	34,00%

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

As olarias 4 e 5 possuem valores próximos nos dois critérios, mas dependendo do parâmetro adotado para análise de área de contato entre essas duas olarias, uma ou outra olaria seria definida como a que fornece os melhores resultados em relação a extensão de aderência.

Em relação aos parâmetros Δ_T e Δ_{avg} , é realizada a análise conjunta dos parâmetros, uma vez que o tamanho e formato das áreas dos vales tem variação entre os substratos. Estima-se que o parâmetro de área média de vales (Δ_{avg}) possa indicar melhor o favorecimento da área de contato do que o parâmetro de índice de área de vales (Δ_T), pois permite uma relação melhor com a extensão de aderência, uma vez que analisa a área de vale em todo o substrato, e não apenas em regiões isoladas.

No entanto, se dois substratos, A e B, possuem valores de Δ_{avg} muito próximos, o substrato que possuir o maior valor Δ_T indica um favorecimento maior a extensão de aderência.

4.4.1 Análise das áreas média de vales

Nesta avaliação são utilizados os valores de área média de vale (Δ_{avg}), com o objetivo de demonstrar que as áreas médias de vale dos substratos cerâmicos de uma olaria, a um nível de significância de 5%, são significativamente maiores que as áreas médias dos substratos cerâmicos produzidos pela outra olaria.

O resultado do teste permite avaliar a olaria que produz os blocos cerâmicos com maior índice de área média de vales (Δ_{avg}) e, por conseguinte, blocos cerâmicos que, teoricamente, favorecem a extensão de aderência. A Tabela 13 apresenta os valores de (Δ_{avg}) utilizados para o teste, separados por olaria, por blocos cerâmicos e por substratos.

Tabela 13 - Valor de médias de área de lagos dos substratos cerâmicos para os blocos 01 a 10 das 5 diferentes olarias

(continua)

Substrato	Olaria 1 (mm²)	Olaria 2 (mm²)	Olaria 3 (mm²)	Olaria 4 (mm²)	Olaria 5 (mm²)
B1A01	0,1513	0,1258	0,0846	0,1961	0,1912
B1A02	0,1441	0,1496	0,1066	0,1808	0,2069
B1A03	0,1519	0,1281	0,0702	0,1911	0,2043
B1A04	0,1272	0,1406	0,0680	0,1763	0,2206
B1A05	0,1440	0,1245	0,0799	0,1636	0,2251
B1A06	0,1327	0,1583	0,0866	0,1821	0,2400
B1A07	0,1372	0,1254	0,0735	0,1656	0,1822
B1A08	0,1058	0,1361	0,1049	0,1682	0,2506
B1A09	0,1208	0,1341	0,0896	0,1878	0,2534
B1A10	0,1312	0,1764	0,0864	0,1916	0,2825
B2A01	0,1029	0,1598	0,1227	0,2075	0,1919
B2A02	0,1178	0,1489	0,0765	0,2008	0,1798
B2A03	0,1073	0,1531	0,1319	0,1793	0,2272
B2A04	0,1271	0,1489	0,1134	0,1758	0,1901
B2A05	0,1201	0,1323	0,0990	0,2072	0,1459
B2A06	0,1206	0,1277	0,0906	0,1603	0,1390
B2A07	0,1158	0,1490	0,0839	0,1906	0,2168
B2A08	0,1306	0,1688	0,0763	0,1642	0,1926
B2A09	0,1232	0,1391	0,0640	0,1922	0,2083
B2A10	0,1331	0,1521	0,0906	0,1379	0,2370
B3A01	0,1336	0,1475	0,2252	0,2048	0,2078
B3A02	0,1117	0,1561	0,0874	0,1939	0,1984
B3A03	0,1118	0,1515	0,1109	0,1622	0,2568
B3A04	0,1166	0,1394	0,1028	0,1904	0,1751
B3A05	0,1175	0,1210	0,1018	0,1710	0,1788
B3A06	0,1388	0,1348	0,1068	0,1950	0,2331
B3A07	0,1248	0,1497	0,1288	0,1673	0,1891
B3A08	0,1218	0,1885	0,1703	0,1576	0,2476
B3A09	0,1386	0,1583	0,0910	0,1497	0,2104

Tabela 13 - Valor de médias de área de lagos dos substratos cerâmicos para os blocos 01 a 10 das 5 diferentes olarias

(continuação)

Substrato	Olaria 1 (mm²)	Olaria 2 (mm²)	Olaria 3 (mm²)	Olaria 4 (mm²)	Olaria 5 (mm²)
B3A10	0,1174	0,1564	0,0905	0,1854	0,2442
B4A01	0,1239	0,1684	0,1848	0,1978	0,2008
B4A02	0,1555	0,1628	0,0872	0,1945	0,2654
B4A03	0,1177	0,1654	0,0816	0,2010	0,2074
B4A04	0,1147	0,1415	0,0802	0,1644	0,2145
B4A05	0,1413	0,1461	0,1348	0,1869	0,2586
B4A06	0,1265	0,1302	0,1179	0,1496	0,2414
B4A07	0,1259	0,1502	0,0887	0,1920	0,2785
B4A08	0,1309	0,1670	0,0734	0,1917	0,2499
B4A09	0,1075	0,1543	0,1321	0,1869	0,1833
B4A10	0,1014	0,1424	0,0822	0,2137	0,2233
B5A01	0,1068	0,1614	0,1524	0,1760	0,1887
B5A02	0,1176	0,1766	0,1016	0,2353	0,2083
B5A03	0,1133	0,1335	0,0881	0,2068	0,2015
B5A04	0,1317	0,1749	0,0669	0,1519	0,1932
B5A05	0,1053	0,1633	0,1069	0,1848	0,2228
B5A06	0,1236	0,1706	0,1804	0,2379	0,2404
B5A07	0,1406	0,1747	0,0865	0,1914	0,1787
B5A08	0,1384	0,1571	0,0962	0,2045	0,1984
B5A09	0,0980	0,1584	0,0795	0,2129	0,1820
B5A10	0,1509	0,1646	0,1356	0,1908	0,2100
B6A01	0,1358	0,1674	0,0830	0,2039	0,2162
B6A02	0,1027	0,1140	0,0904	0,2157	0,2169
B6A03	0,1093	0,1478	0,0790	0,1833	0,2432
B6A04	0,0938	0,1626	0,1001	0,1734	0,2559
B6A05	0,1103	0,1399	0,0940	0,1611	0,2458
B6A06	0,1132	0,1551	0,0950	0,2110	0,2590
B6A07	0,1131	0,1525	0,0972	0,1697	0,2823
B6A08	0,1198	0,1511	0,1079	0,1946	0,2415
B6A09	0,1014	0,1485	0,0853	0,1630	0,2353
B6A10	0,1282	0,1561	0,0728	0,1762	0,2612
B7A01	0,1296	0,1361	0,1020	0,1690	0,2045
B7A02	0,1129	0,1513	0,0988	0,1656	0,2795

Tabela 13 - Valor de médias de área de lagos dos substratos cerâmicos para os blocos 01 a 10 das 5 diferentes olarias

(continuação)

Substrato	Olaria 1 (mm²)	Olaria 2 (mm²)	Olaria 3 (mm²)	Olaria 4 (mm²)	Olaria 5 (mm²)
B7A03	0,1103	0,1272	0,1207	0,2061	0,2190
B7A04	0,1223	0,1559	0,0818	0,1876	0,2111
B7A05	0,1343	0,1282	0,1060	0,2016	0,2225
B7A06	0,1167	0,1686	0,0832	0,1838	0,1968
B7A07	0,1377	0,1461	0,0881	0,2081	0,2346
B7A08	0,1453	0,1118	0,1014	0,2000	0,2457
B7A09	0,1317	0,1623	0,0727	0,1622	0,1930
B7A10	0,1457	0,1674	0,0791	0,1754	0,2370
B8A01	0,1258	0,1342	0,0892	0,1683	0,1977
B8A02	0,1375	0,1634	0,1164	0,1840	0,1804
B8A03	0,1312	0,1377	0,1032	0,1648	0,2040
B8A04	0,1297	0,1244	0,1202	0,1409	0,2196
B8A05	0,1428	0,1336	0,0856	0,1816	0,2163
B8A06	0,1056	0,1255	0,1201	0,1791	0,2252
B8A07	0,1202	0,1299	0,1399	0,1944	0,1822
B8A08	0,1131	0,1554	0,1120	0,1768	0,3125
B8A09	0,1006	0,1316	0,1042	0,1996	0,2011
B8A10	0,1230	0,1350	0,0987	0,2098	0,1961
B9A01	0,0986	0,1344	0,0820	0,2055	0,2202
B9A02	0,1214	0,1663	0,1096	0,1812	0,1666
B9A03	0,1403	0,1680	0,0839	0,2117	0,2347
B9A04	0,1061	0,1538	0,0981	0,1754	0,2908
B9A05	0,1246	0,1714	0,0975	0,1980	0,2451
B9A06	0,1196	0,1891	0,1172	0,2263	0,2094
B9A07	0,1361	0,1238	0,1163	0,1629	0,1992
B9A08	0,1123	0,1809	0,1344	0,1678	0,2311
B9A09	0,1130	0,1647	0,1213	0,2036	0,1968
B9A10	0,0916	0,1929	0,1255	0,1642	0,2655
B10A01	0,1131	0,1516	0,1028	0,1675	0,2515
B10A02	0,1334	0,1385	0,1058	0,1546	0,2488
B10A03	0,1443	0,1284	0,0900	0,2163	0,2214
B10A04	0,1189	0,1293	0,0852	0,2063	0,2301
B10A05	0,1301	0,1135	0,0930	0,2439	0,2175

Tabela 13 - Valor de médias de área de lagos dos substratos cerâmicos para os blocos 01 a 10 das 5 diferentes olarias

(conclusão)

Substrato	Olaria 1 (mm²)	Olaria 2 (mm²)	Olaria 3 (mm²)	Olaria 4 (mm²)	Olaria 5 (mm²)
B10A06	0,1312	0,1119	0,0998	0,1910	0,2317
B10A07	0,1385	0,1299	0,1128	0,1740	0,2496
B10A08	0,1545	0,1303	0,0829	0,2276	0,2401
B10A09	0,1032	0,1511	0,0862	0,2024	0,2074
B10A10	0,1335	0,1224	0,0918	0,1762	0,2975

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A Tabela 14 apresenta os resultados dos testes realizados, comparando as áreas dos substratos cerâmicos de uma olaria em relação as áreas dos demais substratos cerâmicos das outras olarias, para determinar se é possível afirmar, em um nível de significância de 5%, que os dados de índice de área média de vales (Δ_{avg}) de uma olaria são significativamente maiores que das outras olarias. Então, quando o valor de Z for maior que o valor $Z_{crítico} = 1,959963985$, indica que o valor Δ_{avg} é significativamente maior do que o valor Δ_{avg} de outra olaria.

Tabela 14 - Resultado do teste-Z para os dados de média de área (Δ_{avg})

	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
Olaria 1			7,469695041		
Olaria 2	10,55273669		14,79163222		
Olaria 3					
Olaria 4	24,47185306	13,69900065	25,43899564		
Olaria 5	27,86465433	19,94408906	29,20062951	22,15775325	

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Considerando os valores da Tabela 14 é possível afirmar que os valores da Olaria 5 são significativamente maiores que os valores de área média (Δ_{avg}) das demais olarias. Considerando exclusivamente a análise do teste-Z e a hipótese de quanto maior a área de contato, maior a extensão de aderência, estima-se que os blocos da olaria 5 favorecem uma maior extensão aderência do que os blocos das demais olarias estudadas.

4.4.2 Comparativo de Índices de Área de Vales

Para esta análise, foram considerados os valores de índice de área de vales (Δ_T), separados por olaria, por bloco e por substrato analisado. A Tabela 15 apresenta os dados de média e desvio-padrão sobre os dados de comparação de índices de áreas de vales (Δ_T) e a Tabela 16 apresenta uma análise visual do comportamento das áreas médias de vales através da intensidade de cores, da tonalidade mais intensa para menos intensa, representando respectivamente maior e menor área média de vales.

Tabela 15 - Média e desvio-padrão dos índices de área de vales (Δ_T)

	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
Média	27,60	30,01	22,87	33,43	34,00
Desvio-padrão	3,56	3,39	3,13	2,28	3,11

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

De acordo com as informações da Tabela 15, as olarias 4 e 5 apresentam média de Δ_T significativamente maior que as médias de Δ_T das demais olarias. Considerando ainda os dados de desvio-padrão, verifica-se ainda que os valores Δ_T destas duas olarias são similares.

Outra forma de avaliação do parâmetro Δ_T em relação aos substratos das olarias é a separação em níveis de valores. Tal como um histograma, o objetivo é visualizar a distribuição dos valores por ordem de relevância (maior valor, mais relevante). Para tanto, são determinados os valores de Δ_T mínimo (Δ_{\min}) e máximo (Δ_{\max}) de todas as amostras (Tabela 16). Os valores de Δ_T mínimo (Δ_{\min}) e de Δ_{\max} definem o intervalo do histograma de Δ_T e, dentro desse intervalo, são definidos cinco níveis uniformemente distribuídos (Tabela 16). Os blocos da olaria com maior quantidade de índices de área de vales Δ_T elevados (em azul escuro) é classificada como a olaria com vales de maior área.

Tabela 16 - Índice de área de vales (Δ_T) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica o índice de área de vales, e a cor classifica os índices desde o menor Δ_T (em azul claro) até o maior Δ_T (em azul escuro)

(continua)

Olaria	Olaria 01	Olaria 02	Olaria 03	Olaria 04	Olaria 05
B1A01	19,81%	25,53%	20,45%	36,65%	34,98%
B1A02	18,43%	33,34%	24,32%	34,33%	32,48%
B1A03	23,24%	32,01%	21,21%	34,21%	32,27%
B1A04	29,89%	32,76%	20,20%	34,55%	33,52%
B1A05	30,52%	30,88%	22,85%	34,50%	32,41%
B1A06	30,90%	28,17%	22,69%	35,31%	34,31%
B1A07	31,38%	32,22%	22,18%	31,78%	33,69%
B1A08	27,26%	28,44%	20,23%	33,81%	36,08%
B1A09	29,46%	31,77%	22,93%	33,81%	32,68%
B1A10	32,26%	28,23%	26,53%	34,29%	36,71%
B2A01	16,36%	33,07%	20,48%	34,86%	31,27%
B2A02	24,49%	32,59%	21,58%	31,32%	30,56%
B2A03	27,67%	32,00%	22,41%	33,52%	36,12%
B2A04	28,72%	35,12%	23,47%	34,09%	33,64%
B2A05	28,22%	30,69%	22,37%	35,01%	33,40%
B2A06	29,31%	30,65%	22,73%	33,34%	31,82%
B2A07	29,28%	29,80%	21,57%	32,77%	33,38%
B2A08	30,30%	33,07%	21,34%	30,87%	33,12%
B2A09	28,94%	31,56%	17,97%	35,56%	30,20%
B2A10	30,75%	29,81%	19,47%	29,79%	36,02%
B3A01	28,86%	32,15%	25,89%	28,24%	33,45%
B3A02	26,46%	30,12%	23,75%	33,53%	29,35%
B3A03	27,49%	30,90%	26,61%	31,62%	36,97%
B3A04	29,61%	31,77%	23,13%	33,68%	28,02%
B3A05	25,14%	31,93%	24,62%	34,18%	31,82%
B3A06	30,95%	30,85%	25,52%	33,52%	37,52%
B3A07	29,33%	32,61%	24,98%	27,58%	32,33%
B3A08	27,89%	32,41%	18,21%	24,56%	35,15%
B3A09	31,05%	33,24%	20,76%	32,32%	32,76%

Tabela 16 - Índice de área de vales (Δ_T) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica o índice de área de vales, e a cor classifica os índices desde o menor Δ_T (em azul claro) até o maior Δ_T (em azul escuro)

(continuação)

Olaria	Olaria 01	Olaria 02	Olaria 03	Olaria 04	Olaria 05
B3A10	28,77%	33,00%	20,82%	34,35%	32,23%
B4A01	27,13%	26,76%	22,73%	32,42%	34,32%
B4A02	30,15%	31,09%	13,34%	35,97%	35,82%
B4A03	29,77%	25,63%	25,22%	32,76%	34,84%
B4A04	29,02%	26,74%	23,98%	29,74%	36,88%
B4A05	32,34%	27,90%	23,85%	30,82%	38,01%
B4A06	26,43%	31,76%	26,98%	34,09%	36,44%
B4A07	25,92%	30,30%	24,39%	34,56%	37,31%
B4A08	29,57%	33,06%	20,61%	35,64%	37,72%
B4A09	29,14%	29,93%	28,54%	33,45%	34,38%
B4A10	25,56%	30,89%	22,28%	35,03%	35,28%
B5A01	25,31%	32,28%	25,75%	34,14%	21,12%
B5A02	30,57%	26,12%	26,10%	35,28%	35,19%
B5A03	25,82%	20,70%	21,23%	35,78%	31,43%
B5A04	24,62%	30,60%	17,20%	31,59%	30,13%
B5A05	26,74%	33,46%	25,54%	36,21%	36,31%
B5A06	27,32%	29,67%	21,28%	35,43%	37,25%
B5A07	22,64%	33,36%	20,50%	35,60%	32,88%
B5A08	26,71%	32,36%	23,76%	38,03%	33,92%
B5A09	26,74%	29,62%	20,83%	33,43%	20,75%
B5A10	27,62%	31,27%	17,22%	33,00%	30,45%
B6A01	28,92%	30,95%	20,37%	35,87%	32,19%
B6A02	25,47%	30,09%	20,96%	32,77%	32,31%
B6A03	27,33%	26,89%	21,63%	29,32%	35,74%
B6A04	27,11%	33,65%	29,11%	34,51%	29,93%
B6A05	28,13%	33,00%	24,24%	32,87%	37,11%
B6A06	29,88%	33,19%	24,98%	34,17%	37,29%
B6A07	27,92%	32,77%	28,26%	34,27%	34,99%
B6A08	28,02%	33,69%	22,22%	34,04%	33,80%

Tabela 16 - Índice de área de vales (Δ_T) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica o índice de área de vales, e a cor classifica os índices desde o menor Δ_T (em azul claro) até o maior Δ_T (em azul escuro)

(continuação)

B6A09	21,70%	32,36%	19,37%	30,96%	35,52%
B6A10	30,11%	26,22%	22,57%	32,59%	34,99%
B7A01	30,31%	31,01%	20,69%	30,41%	35,57%
B7A02	29,24%	27,22%	23,91%	35,09%	36,61%
B7A03	27,36%	30,02%	20,03%	36,07%	35,47%
B7A04	28,50%	27,43%	24,61%	35,25%	34,62%
B7A05	31,69%	27,68%	25,64%	32,25%	36,70%
B7A06	27,66%	32,69%	22,95%	31,57%	35,81%
B7A07	28,35%	30,53%	21,41%	32,34%	36,59%
B7A08	31,23%	21,78%	25,74%	34,00%	37,10%
B7A09	27,78%	23,53%	19,99%	34,22%	35,32%
B7A10	30,59%	27,62%	20,32%	35,59%	37,68%
B8A01	26,28%	31,93%	19,54%	33,65%	30,64%
B8A02	28,72%	34,62%	30,25%	29,62%	31,74%
B8A03	27,94%	18,86%	25,06%	29,98%	34,06%
B8A04	24,64%	21,27%	26,55%	30,24%	34,24%
B8A05	28,41%	31,38%	15,24%	34,00%	35,24%
B8A06	28,50%	23,59%	32,40%	35,82%	36,02%
B8A07	26,81%	27,27%	28,40%	34,41%	32,23%
B8A08	25,32%	22,22%	22,83%	32,35%	40,92%
B8A09	23,13%	30,92%	26,25%	33,73%	31,16%
B8A10	29,02%	32,39%	23,87%	32,16%	33,73%
B9A01	12,32%	30,64%	22,12%	36,76%	35,00%
B9A02	28,64%	32,91%	23,55%	33,88%	26,15%
B9A03	24,54%	26,71%	23,08%	35,35%	36,84%
B9A04	26,74%	33,83%	17,17%	29,29%	36,64%
B9A05	25,91%	28,78%	23,88%	30,48%	36,01%
B9A06	28,56%	20,98%	22,97%	35,52%	34,96%
B9A07	30,63%	25,12%	26,39%	34,04%	32,26%
B9A08	30,31%	34,55%	21,64%	31,36%	34,65%
B9A09	28,01%	33,42%	18,32%	30,94%	28,14%

Tabela 16 - Índice de área de vales (Δ_T) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica o índice de área de vales, e a cor classifica os índices desde o menor Δ_T (em azul claro) até o maior Δ_T (em azul escuro)

(conclusão)

B9A10	11,81%	32,98%	25,60%	33,00%	36,90%
B10A01	28,27%	30,76%	18,29%	31,98%	34,95%
B10A02	29,20%	31,57%	25,69%	31,05%	35,57%
B10A03	30,16%	30,05%	22,67%	36,12%	32,99%
B10A04	31,51%	30,37%	25,54%	36,30%	34,74%
B10A05	28,26%	30,41%	25,94%	36,82%	34,57%
B10A06	27,94%	26,51%	21,95%	33,79%	35,43%
B10A07	30,60%	29,10%	20,85%	34,45%	35,93%
B10A08	32,74%	29,18%	22,11%	36,86%	34,31%
B10A09	27,33%	32,79%	22,41%	35,82%	32,14%
B10A10	28,30%	29,61%	24,76%	34,17%	37,48%

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Tabela 17 - Níveis para agrupamento de valores de Δ_T

Níveis	Menor (%)	Maior (%)
Nível 1	11,81	17,63
Nível 2	17,63	23,46
Nível 3	23,46	29,28
Nível 4	29,28	35,10
Nível 5	35,10	40,92

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A partir dos valores Δ_T (Tabela 17), é realizada a composição do histograma, contabilizando o valor Δ_T de cada substrato na respectiva faixa de representação. A Tabela 18 apresenta a distribuição percentual de Δ_T por faixa, para cada olaria. As linhas estão na ordem da olaria com menor média Δ_T até a olaria com maior média de Δ_T . A última coluna da Tabela 18 apresenta o valor médio de Δ_T para cada olaria.

Tabela 18 - Distribuição percentual de valores de Δ_T por olaria e por faixa de representação. As linhas estão ordenadas pela média de Δ_T da olaria

Olaria	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5	Δ_T médio
Olaria 3	5	53	40	2	-	22,87%
Olaria 1	3	6	60	31	-	27,60%
Olaria 2	-	6	24	69	1	30,01%
Olaria 4	-	-	3	73	24	33,43%
Olaria 5	-	2	3	54	41	34,00%

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Os resultados indicam a maior distribuição de áreas com maior Δ_T para as olarias 4 e 5, pois concentram maior parte de valores nos níveis 4 e 5. Já a olaria 3 apresenta a menor quantidade de áreas com maior nível de representação (níveis 4 e 5) e concentra maior quantidade de valores Δ_T nos níveis de representação 2 e 3. Além disso, como demonstrado na comparação da Tabela 15, a olaria 3 possui, em média, valores de Δ_T menores. Na mesma Tabela, pode-se verificar que as olarias 4 e 5 possuem, em média, os maiores valores de Δ_T .

De acordo com o que é apresentado nas Tabelas 15, 16 e 18, a olaria 5 possui a maior frequência de maiores valores de índice de área total. A olaria 4 apresenta valores semelhantes e com um desvio-padrão menor, indicando que também tem uma boa distribuição e padronização de índices de área de contato (Δ_T). Nesta análise e de acordo com a hipótese de que, quanto maior o índice de área de vales (Δ_T), melhor será a extensão de aderência, é possível afirmar que as olarias 4 e 5 possuem melhor Δ_T e tendem a favorecer a maior extensão de aderência.

Conseqüentemente, como a olaria 3 possui menor frequência de valores Δ_T nos níveis de maior representação, conclui-se, pelo mesmo critério, que os blocos produzidos pela olaria 3 tendem a possuir uma extensão de aderência menor quando comparado as demais olarias.

4.4.3 Comparativo de R_{aavg}

Nesta etapa de testes são comparados os dados de rugosidade média R_{aavg} para todos os blocos de todas as olarias, com o objetivo de determinar qual das olarias favorece uma possível aderência por intertravamento mecânico. A hipótese utilizada nesta verificação é de que a olaria que apresentar o maior valor R_{aavg} favorece melhor

aderência por intertravamento mecânico, possibilitando uma maior absorção de água inicial e uma possível entrada dos grãos da matriz cimentícia na rugosidade dos substratos. Os dados de R_{aavg} são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Rugosidade média (R_{aavg}) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica a Rugosidade média, e a cor classifica os índices desde o menor R_{aavg} (em verde claro) até o maior R_{aavg} (em verde escuro)

(continua)

Olaria	1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)	4 (μm)	5 (μm)
B1A01	3,7969	2,6136	1,0580	2,4589	2,3914
B1A02	3,7867	2,0829	1,7089	2,3361	3,1607
B1A03	4,8226	1,8348	0,9159	2,6666	2,6554
B1A04	1,9252	1,9240	0,8804	2,1236	2,6260
B1A05	1,9107	1,8784	0,8841	2,2838	2,1653
B1A06	1,6984	3,6141	0,8785	2,1440	2,7057
B1A07	1,7305	1,8933	0,8615	2,3962	2,5135
B1A08	1,8226	2,7740	1,5335	2,0842	2,2519
B1A09	1,6214	1,9920	1,4318	2,9378	2,5582
B1A10	1,8513	3,8562	0,8167	2,5108	2,7269
B2A01	4,3095	2,6141	2,5716	2,4392	2,5118
B2A02	2,5327	2,1916	0,9794	2,7460	2,8201
B2A03	2,0421	2,3173	1,7663	2,2359	2,0744
B2A04	1,7583	2,0758	1,4889	2,2307	1,9585
B2A05	1,9237	2,0526	2,2030	2,1576	1,9138
B2A06	1,8268	1,9772	1,2258	2,1106	2,2413
B2A07	1,8794	2,4692	0,8137	2,4532	1,9592
B2A08	1,9325	2,3011	0,8448	4,0135	2,3340
B2A09	1,8975	1,9837	1,3470	2,2728	2,6598
B2A10	1,9654	3,1189	2,1561	2,7293	2,0997

Tabela 19 - Rugosidade média (R_{avg}) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica a Rugosidade média, e a cor classifica os índices desde o menor R_{avg} (em verde claro) até o maior R_{avg} (em verde escuro)

(continuação)

Olaria	1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)	4 (μm)	5 (μm)
B3A01	2,8134	2,2288	3,4128	2,9268	2,3939
B3A02	2,1432	3,0649	0,7300	2,9032	2,9316
B3A03	2,7123	2,2297	0,9677	2,7823	1,8025
B3A04	2,1236	1,9416	0,9721	2,0670	2,9315
B3A05	2,2111	1,8454	1,0206	2,1561	2,7348
B3A06	2,4258	1,8116	0,8645	2,3292	1,8669
B3A07	2,3527	1,8769	2,3603	3,4849	2,3954
B3A08	2,5561	3,1536	3,5523	3,5678	2,7307
B3A09	2,4122	1,9939	1,5378	2,1778	2,5284
B3A10	2,2821	2,1804	1,7534	2,2185	2,6339
B4A01	2,5621	3,8846	4,2065	2,8643	2,1578
B4A02	2,2774	2,7583	3,3717	2,6614	2,4596
B4A03	2,3853	4,1620	0,8534	2,9735	1,8388
B4A04	2,3575	2,9671	0,8391	2,5566	1,9930
B4A05	2,3203	3,1659	3,5645	3,0526	1,8675
B4A06	2,7411	2,1189	2,3169	2,4046	2,1361
B4A07	2,7666	2,2498	0,9056	2,4721	2,1387
B4A08	2,2014	2,2419	0,9609	2,4639	1,9043
B4A09	2,3119	2,3113	2,1190	2,5818	1,8950
B4A10	2,4999	1,9918	1,0668	3,1659	2,1292
B5A01	2,3925	2,3143	2,7409	2,5302	4,3248
B5A02	1,8873	4,2430	1,2866	2,8817	2,1939
B5A03	2,3466	4,1806	2,3389	2,1783	2,6844
B5A04	3,0479	2,9220	0,8029	2,1236	3,0257

Tabela 19 - Rugosidade média (R_{avg}) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica a Rugosidade média, e a cor classifica os índices desde o menor R_{avg} (em verde claro) até o maior R_{avg} (em verde escuro)

(continuação)

Olaria	1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)	4 (μm)	5 (μm)
B5A05	1,9966	2,0416	1,1030	2,1415	2,0668
B5A06	2,5645	3,2145	3,0708	2,2007	2,5360
B5A07	3,5258	2,0875	1,2115	2,1605	2,2409
B5A08	3,0075	2,7190	0,8542	2,2376	2,2390
B5A09	1,7269	3,6269	1,0038	2,6180	4,4271
B5A10	2,0616	2,2988	3,3425	2,5617	3,6763
B6A01	2,2755	2,8077	0,8803	2,3438	2,9747
B6A02	2,2410	2,0473	0,8896	2,5875	3,9067
B6A03	2,1343	3,4230	0,8777	3,6071	2,9835
B6A04	2,0017	2,0446	0,8588	2,2446	3,4644
B6A05	1,9720	2,0521	0,8689	2,2772	2,7667
B6A06	1,9874	2,0636	1,0244	2,2995	3,0730
B6A07	1,9626	2,0187	0,9168	2,0828	2,8628
B6A08	1,9820	1,9757	1,0325	2,3219	4,0278
B6A09	3,0862	1,9646	1,6475	2,8761	2,8867
B6A10	2,2501	4,1092	0,8695	2,7135	3,5133
B7A01	1,9582	1,9521	2,0151	3,2743	2,0736
B7A02	1,9639	2,7180	1,0661	2,2522	2,1976
B7A03	1,9510	1,9940	2,8367	2,2460	1,9913
B7A04	1,9738	3,8314	0,8376	2,2207	2,0003
B7A05	2,0667	2,4320	0,8793	2,8491	1,9712
B7A06	2,0147	1,9499	0,8652	2,7074	2,2244
B7A07	2,7952	1,8204	0,8762	3,1341	2,2957
B7A08	2,6055	3,2822	0,8676	2,6884	2,6389
B7A09	2,9465	4,3705	0,8971	2,2763	2,1079

Tabela 19 - Rugosidade média (R_{avg}) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica a Rugosidade média, e a cor classifica os índices desde o menor Raavg (em verde claro) até o maior Raavg (em verde escuro)

(continuação)

Olaria	1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)	4 (μm)	5 (μm)
B7A10	2,3790	3,6376	0,8775	2,3455	2,3462
B8A01	2,4736	2,1581	2,0998	2,5465	2,8456
B8A02	3,2684	2,0091	0,8838	2,9597	2,6284
B8A03	3,0444	4,8773	0,9418	2,5663	2,5701
B8A04	3,9078	3,8998	2,0872	2,4452	2,3141
B8A05	2,9223	2,2638	2,8235	2,0694	2,0796
B8A06	1,9419	3,5537	1,2623	2,0106	2,4874
B8A07	2,2991	2,5285	1,7715	1,9262	2,7747
B8A08	2,0245	4,6793	1,9950	2,5209	2,3275
B8A09	3,1956	1,8184	1,2207	2,2912	3,0380
B8A10	2,1495	1,9709	1,5888	2,6028	2,3705
B9A01	5,4101	2,0664	1,3081	2,5209	2,0192
B9A02	2,2325	2,3891	1,6079	2,2722	3,4578
B9A03	3,7225	3,5503	1,0892	2,2391	1,9592
B9A04	2,1900	1,8479	3,1151	2,8468	2,6025
B9A05	2,5037	3,2083	1,6347	2,9275	1,9554
B9A06	2,0867	6,0016	2,7945	2,6056	1,9358
B9A07	2,7699	2,6979	2,0678	2,4168	2,8644
B9A08	2,0774	2,3004	2,2538	2,5646	2,8182
B9A09	2,0371	1,8867	3,2116	2,9611	3,1526
B9A10	5,4485	3,3927	2,4647	2,4014	2,2702
B10A01	1,7030	2,6462	3,2483	2,4430	2,0796
B10A02	1,7775	1,8249	1,2882	2,5122	2,2848
B10A03	2,1212	2,0138	0,9371	2,3411	2,1835
B10A04	1,8783	1,7356	0,9118	2,1365	1,8243

Tabela 19 - Rugosidade média (R_{aavg}) de todas as amostras. A primeira coluna indica o local de análise, em cada bloco. A primeira linha indica a olaria. O valor percentual indica a Rugosidade média, e a cor classifica os índices desde o menor R_{aavg} (em verde claro) até o maior R_{aavg} (em verde escuro)

Olaria	(conclusão)				
	1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)	4 (μm)	5 (μm)
B10A05	1,9272	1,7309	1,0583	2,0580	1,8815
B10A06	2,0000	1,8233	1,1561	2,0857	1,9788
B10A07	2,2383	1,8651	2,4155	1,9727	2,6204
B10A08	2,5096	1,8173	1,1126	1,9198	4,1286
B10A09	1,8471	1,8975	1,1156	2,2177	2,4241
B10A10	2,5724	1,8497	0,9440	2,3052	1,9737

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Como os mesmos princípios de análises realizados para as áreas superficiais, também são comparados os dados de R_{aavg} entre as diferentes olarias. A Tabela 20 apresenta os dados de média e desvio-padrão de R_{aavg} sobre os dados apresentados na Tabela 19.

Tabela 20 - Média e desvio-padrão da rugosidade média (R_{aavg}) dos substratos

	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
Média	2,1439	2,3314	1,3886	2,2869	2,3892
Desvio - padrão	0,6656	0,8339	0,8991	0,4195	0,5746

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Os dados de R_{aavg} foram agrupados e contabilizados em níveis de valores, com o objetivo de visualizar a distribuição das rugosidades médias por ordem de relevância (maior valor, mais relevante). Para tanto, foram determinados os valores de R_{aavg} mínimo (R_{amin}) e R_{aavg} máximo (R_{amax}) de todos os substratos (Tabela 19). Os valores de R_{amin} e de R_{amax} definem o intervalo do histograma de R_{aavg} e, dentro desse intervalo, são definidos cinco níveis uniformemente distribuídos (Tabela 21).

Tabela 21 - Níveis para agrupamento de valores de R_{aavg}

Níveis	Menor R_{aavg} (μm)	Maior R_{aavg} (μm)
Nível 1	0,5668	1,5644
Nível 2	1,5644	2,5619
Nível 3	2,5619	3,5595
Nível 4	3,5595	4,5570
Nível 5	4,5570	5,5546

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A partir dos valores R_{aavg} (Tabela 19), é realizado a composição do histograma, contabilizando o valor R_{aavg} de cada substrato na respectiva faixa de representação. A Tabela 22 apresenta a distribuição percentual de R_{aavg} por faixa de representação.

Tabela 22 - Níveis para agrupamento de valores de R_{aavg} e as linhas estão ordenadas pela média (R_{aavg})

Olaria	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	Média (R_{aavg}) (μm)
Olaria 3	59	25	11	5	0	1,3886
Olaria 1	0	75	18	6	1	2,1439
Olaria 4	0	61	37	1	1	2,2869
Olaria 2	0	64	23	11	1	2,3314
Olaria 5	0	53	41	5	1	2,3892

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

As linhas estão na ordem da olaria com menor média de R_{aavg} até a olaria com maior média de R_{aavg} . Os resultados indicam a maior distribuição de áreas com maior R_{aavg} para as olarias 2, 4 e 5, pois concentram maior parte de valores de R_{aavg} nos níveis 3 e 4. Já a olaria 3 apresenta a menor quantidade de áreas com maior nível de representação (níveis 3, 4 e 5) e concentra maior quantidade de valores R_{aavg} no nível 1. Além disso, como mostrado na comparação da Tabela 22, a olaria 3 possui em média valores de R_{aavg} menores. Na mesma Tabela, pode-se verificar que as olarias 2, 4 e 5 possuem, em média, os maiores valores de R_{aavg} .

De acordo com o que é apresentado nas Tabelas 19, 20 e 22, as olarias 5 e 2 possuem a maior frequência de maiores valores de rugosidade média. A olaria 4

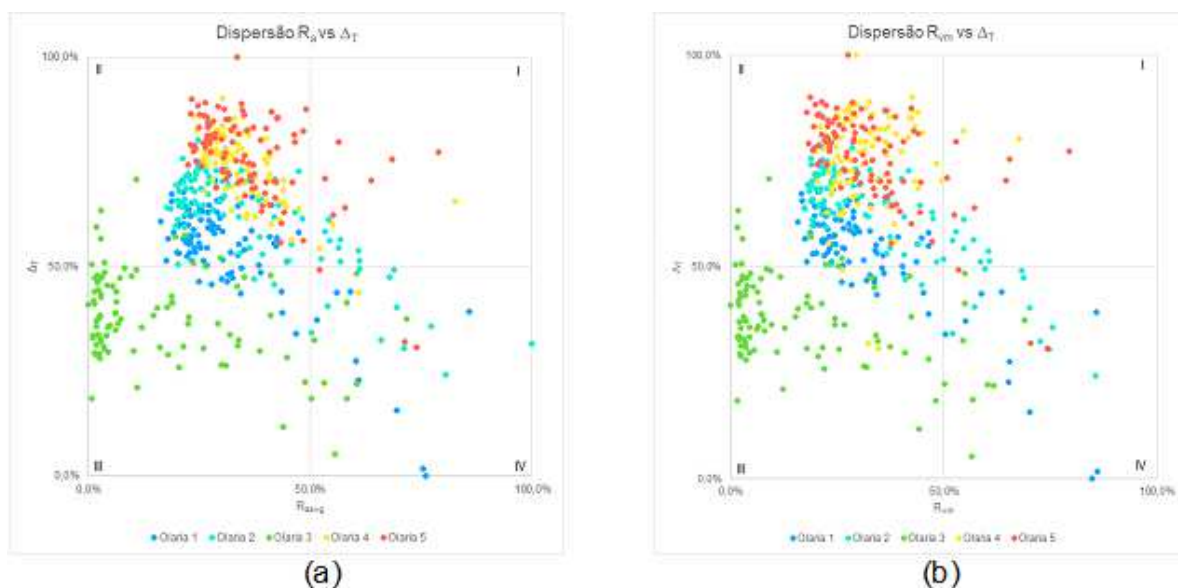
apresenta valores semelhantes e com um desvio-padrão menor, indicando que também tem uma boa distribuição e padronização de rugosidade média. Nesta análise, e de acordo com a hipótese de que quanto maior a rugosidade média, maior a absorção de água inicial e mais favorável à aderência por intertravamento mecânico, é possível afirmar que as olarias 2, 4 e 5 possuem maior R_{aavg} e, por consequência, podem favorecer a aderência entre o substrato e a matriz cimentícia por intertravamento mecânico, pois pode permitir uma maior penetração de grãos na rugosidade do substrato. Logo, como a olaria 3 possui menor frequência de valores R_{aavg} nos níveis de maior representação, conclui-se, pelo mesmo critério, que os blocos produzidos pela olaria 3 não favoreçam com a mesma intensidade a aderência por intertravamento mecânico entre o substrato e a matriz cimentícia.

4.4.4 Comparativo entre Rugosidade Média, Rugosidade Média de Vale e Índice de Área de Vales

Para comparar Δ_T com R_{aavg} e com o R_{vm} é utilizado um gráfico de quadrantes, em que os parâmetros foram relacionados. Para determinar a posição de um dado quadrante, a coordenada X é associada ao valor de R_{aavg} ou R_{vm} do substrato cerâmico e a coordenada Y é associada ao valor de Δ_T do substrato em análise. O valor de R_{aavg} é aferido em função do maior valor de R_{aavg} dentre todas as amostras, assim como o R_{vm} e o valor de Δ_T pelo maior valor de Δ_T de todas as amostras.

Na Figura 50 são apresentadas as dispersões de dados de todas as olarias em conjunto. Possibilitando a comparação de comportamento entre os dados de R_{aavg} em relação a Δ_T e R_{vm} em relação a Δ_T .

Figura 50 - Distribuição dos valores por R_{aavg} e R_{vm} por Δ_T . Em (a) distribuição de R_{aavg} em relação Δ_T e (b) distribuição de R_{aavg} em relação a Δ_T



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Conforme os gráficos dos quadrantes (Figura 50), os parâmetros analisados apresentam semelhança de comportamento, demonstrando que R_{aavg} e R_{vm} , são simétricos. Os dados das olarias se posicionam, em sua maioria, no quadrante II, dessa maneira a correlação é nula e as variáveis são independentes, isto é, a variação de uma não influencia a variação de outra. Tal resultado mostra que os espaçamentos entre as áreas de vales de uma olaria não são dependentes do R_{aavg} e nem do R_{vm} .

Corroborando com a análise, foi realizado a verificação dos coeficientes de variação entre R_{aavg} e Δ_T , e R_{vm} e Δ_T (Tabela 23), onde a olaria 3 se mostra relevante, por apresentar coeficiente de variação alto, em detrimento das demais em virtude do R_{aavg} e R_{vm} , a Olarias 1 e 2 apresentam coeficientes de variação médios e as Olarias 4 e 5 coeficientes de variação baixos e médios. O parâmetro Δ_T variou apenas 5% entre as olarias classificando todas com baixo coeficiente de variação em relação ao Índice de área de vales. A heterogeneidade das superfícies dos blocos cerâmicos é mais expressiva quando se analisa rugosidades médias e vales médios demonstrando maiores coeficientes de variação entre os dados analisados. Já na análise dos dados de índice de vales esse coeficiente é baixo representando que a heterogeneidade da superfície dos blocos cerâmicos influenciou nos dados de maneira mais branda.

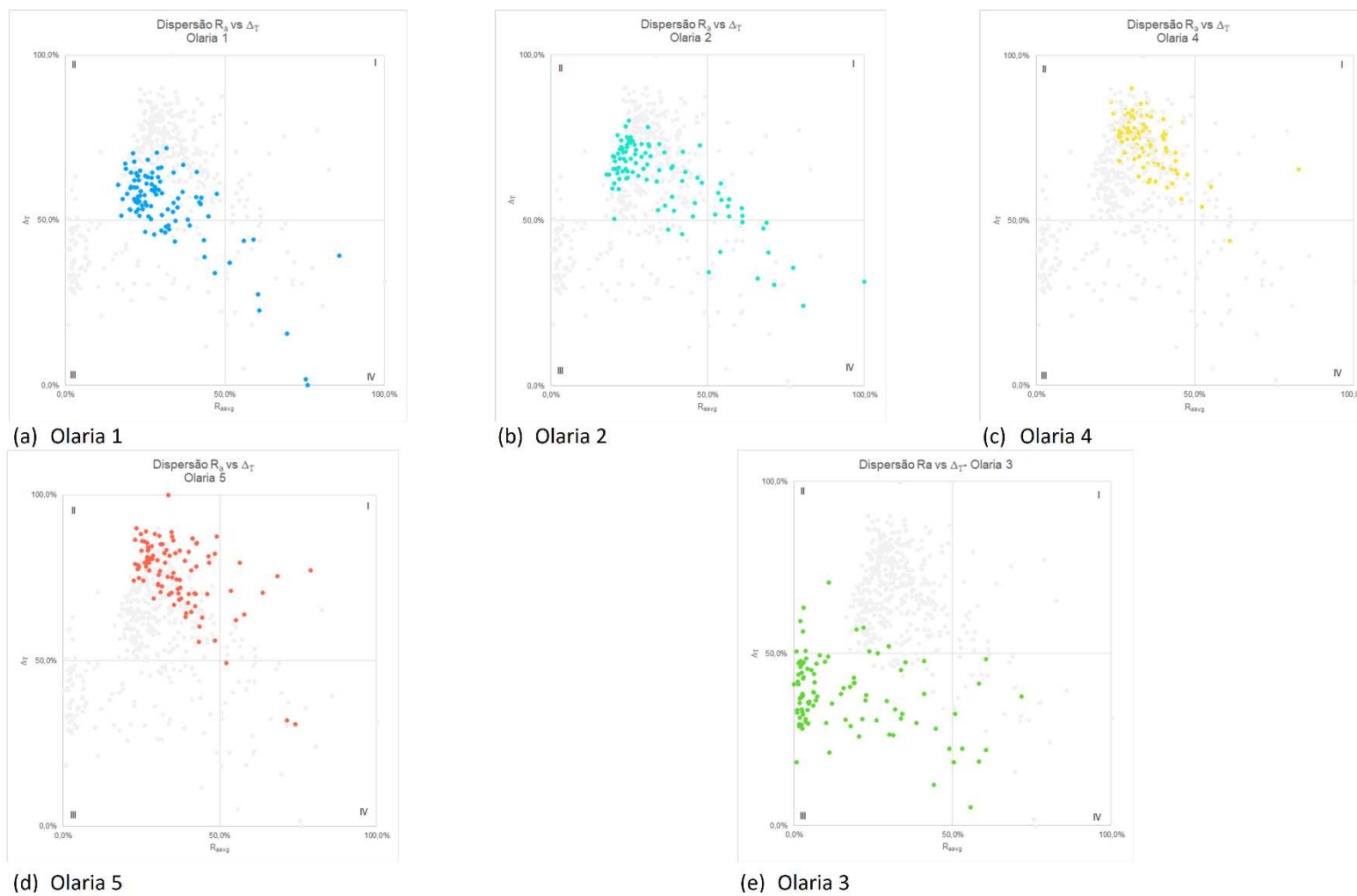
Tabela 23 - Coeficientes de variação R_{aavg} vs ΔT e R_{vm} vs ΔT

	Olaria 01		Olaria 02		Olaria 03		Olaria 04		Olaria 05	
	R_{aavg}	ΔT	R_{aavg}	ΔT	R_{aavg}	ΔT	R_{aavg}	ΔT	R_{aavg}	ΔT
CV	31%	13%	36%	11%	65%	14%	18%	9%	24%	9%
	R_{vm}	ΔT	R_{vm}	ΔT	R_{vm}	ΔT	R_{vm}	ΔT	R_{vm}	ΔT
	32%	13%	37%	11%	58%	14%	25%	9%	27%	9%

Fonte: Elaborada pela Autora (2021)

Na Figura 51 são apresentadas as dispersões de dados de cada olaria separadamente. Percebe-se que as olarias 4 e 5 possuem tendência de padrão similar de distribuição dos dados e que as olarias 1 e 2 também apresentam tendência de comportamento similar. Já a olaria 3 possui um padrão de distribuição diferente das demais.

Figura 51 - Distribuição dos valores por R_a e por Δ_T . Em (a), (b), (c), (d) e (e) valores de uma olaria em destaque, respectivamente, 1, 2, 4, 5 e 3



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Analisando os gráficos e considerando as duas variáveis (R_{aavg} e Δ_T) envolvidas, conclui-se que as olarias 5 e 4 possuem os maiores valores de rugosidade média e áreas de vales médios. Com base apenas nestes dados, pode-se afirmar que essas duas olarias apresentam critérios de rugosidade que favorecem uma maior extensão de aderência em relação às outras olarias estudadas. Também é possível observar que as olarias 2 e 1 apresentam valores combinados de R_{aavg} e Δ_T , que são superiores aos dados calculados da olaria 3, mas são inferiores aos parâmetros de rugosidade média e área de vale médios das olarias 4 e 5.

Desta forma, e considerando as análises individuais dos parâmetros apresentadas nas Figuras 50 e 51 e nas Tabelas 16 e 19, é possível afirmar que a olaria 5 apresenta as maiores rugosidades médias e também as maiores áreas de vale médio, com isso, entende-se que os blocos cerâmicos produzidos por essa olaria tendem a favorecer uma maior área de contato entre o substrato e a matriz cimentícia, produzindo uma maior extensão de aderência quando comparada com as demais olarias em estudo.

Analisando todos os substratos e relacionando a rugosidade e as áreas superficiais com a extensão de aderência, acredita-se que em ordem crescente teremos a olaria 5, 4, 2, 1 e 3, resultando na olaria 3 com os menores parâmetros de rugosidade tendendo, a menor extensão de aderência entre todas os blocos produzidos pelas diferentes olarias.

Para relacionar extensão de aderência com a aderência entre substratos e a matriz cimentícia, muito fatores deverão ser relacionados a estudos, entre eles características físicas, químicas e mecânicas dos substratos, incluindo rugosidade, área superficial, além da reologia da matriz cimentícia, compreendendo um estudo aprofundado sobre dimensões e formato de grãos dessa matriz e as características da aplicação da argamassa.

Em continuidade ao estudo dos substratos cerâmicos produzidos por diferentes olarias, é desenvolvida a ETAPA 4, em que serão relacionados os parâmetros de rugosidade, área de contato e propriedades químicas das argilas utilizadas na confecção dos substratos pelas diferentes olarias em estudo.

4.5 ETAPA 4: CARACTERIZAÇÃO MULTIESCALAR DE RUGOSIDADE

Na ETAPA 4 do estudo, o método de quantificação de rugosidade de substratos cerâmicos criado para utilização de dados do perfilômetro 3D, foi aplicado e seus resultados foram confrontados com dados coletados por microscópio eletrônico de varredura e microscópio de força atômica. As análises de rugosidade utilizando diferentes equipamentos permitiram uma caracterização multiescalar da superfície dos blocos cerâmicos.

4.5.1 Estudo dos parâmetros de rugosidade analisados com o perfilômetro 3D

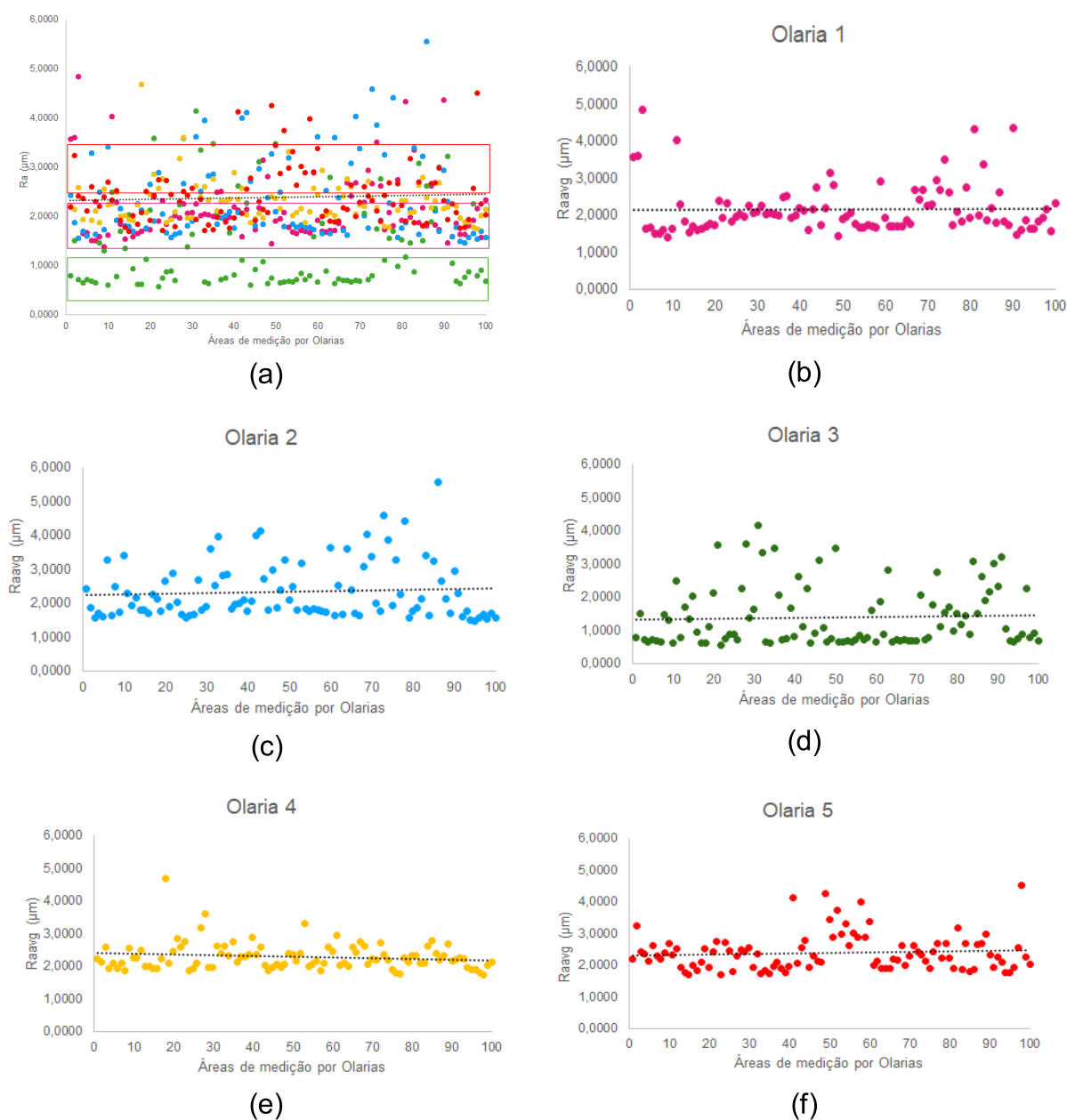
Primeiramente foi realizada uma avaliação estatística dos dados obtidos pelo perfilômetro 3D, a fim de entender o comportamento dos parâmetros de rugosidade da superfície. Posteriormente foi analisada a similaridade com os dados obtidos nos demais equipamentos utilizados para análise.

4.5.1.1 Análise estatística de correlação linear e dispersão da influência dos parâmetros de rugosidade

A análise dos substratos utilizando-se o método 3D gerou nuvens de dados a partir das quais foram calculados os parâmetros de rugosidade R_a , R_{avg} , R_v , R_p , R_{pm} , R_{vm} e áreas de vales. A seguir é realizada uma análise da correlação entre esses parâmetros, para todos os blocos provenientes das olarias amostradas, de modo a verificar se há coerência entre os parâmetros calculados e definir que parâmetros são os mais adequados para a caracterização de um substrato cerâmico.

A Figura 52 mostra a dispersão de R_{avg} e a Tabela 24 os coeficientes de variação, por olarias. Percebe-se que a olaria 3 apresenta coeficiente de variação muito alto (65%), as olarias 1 e 2, coeficientes de variação médios (31% e 36%) respectivamente. Já as olarias 4 e 5 apresentam coeficientes de variação baixos (18 e 24), demonstrando menor variação entre os parâmetros de rugosidade analisados nos blocos destas olarias.

Figura 52 - Distribuição dos valores de R_{aavg} por Olarias. Em (a) dispersão de todas as olarias, (b), (c), (d), (e) e (f) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Tabela 24 - Coeficiente de variação do Raavg das olarias

	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
AVG	2,1439	2,3314	1,3886	2,2869	2,3892
SDV	0,6656	0,8339	0,8991	0,4195	0,5746
VAR	0,4430	0,6953	0,8084	0,1760	0,3301
CV	31%	36%	65%	18%	24%

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Analisando os gráficos (Figura 52 e a Tabela 24), conclui-se que as olarias 4 e 5 possuem os maiores valores de R_{aavg} e os menores coeficientes de variação. É possível observar, que as olarias 1 e 2, apresentam valores superiores R_{aavg} aos dados calculados para olaria 3. Estes dados corroboram os apresentados na ETAPA 3.

Em complementação as demais ETAPAS do estudo, nesse item são analisadas as correlações lineares dos parâmetros de rugosidade utilizados no estudo. Foram avaliadas as correlações entre os parâmetros R_{pm} (média entre os 5 maiores picos) e R_a (rugosidade média). Primeiro é analisada cada superfície de $1,5625\text{mm}^2$ na mesma posição na grade de assinatura de rugosidade, entre as amostras de um mesmo bloco. Na sequência avaliou-se comparativamente as superfícies de $1,5625\text{mm}^2$ na mesma posição na grade de assinatura de rugosidade de todos os blocos de todas as olarias (Figura 53).

Figura 53 - Análise de correlação linear entre R_a e R_{pm} das superfícies de $1,5625\text{mm}^2$ de cada bloco cerâmico, das diferentes olarias

(continua)

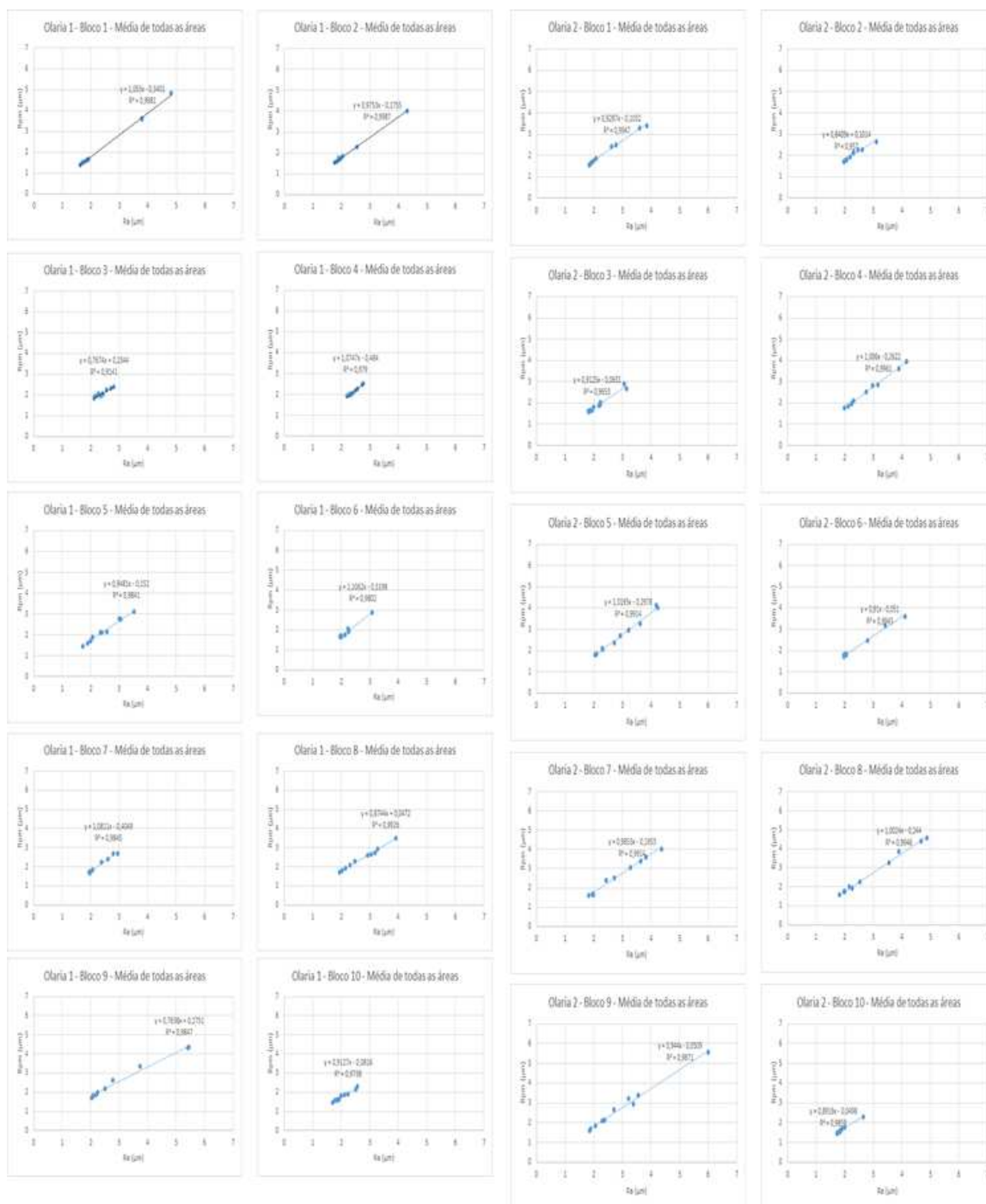


Figura 53 - Análise de correlação linear entre R_a e R_{pm} das superfícies de $1,5625\text{mm}^2$ de cada bloco cerâmico, das diferentes olarias

(continuação)

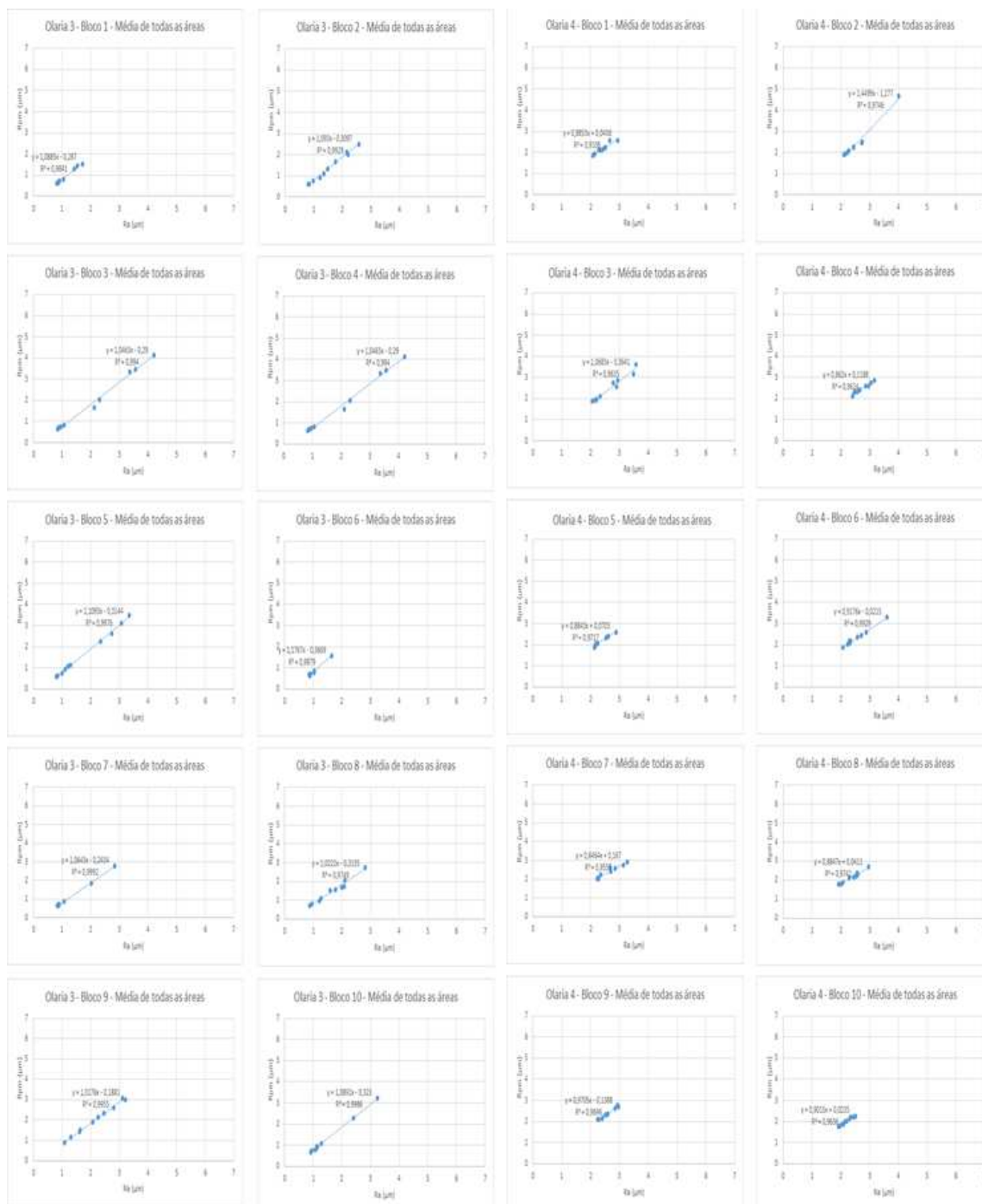
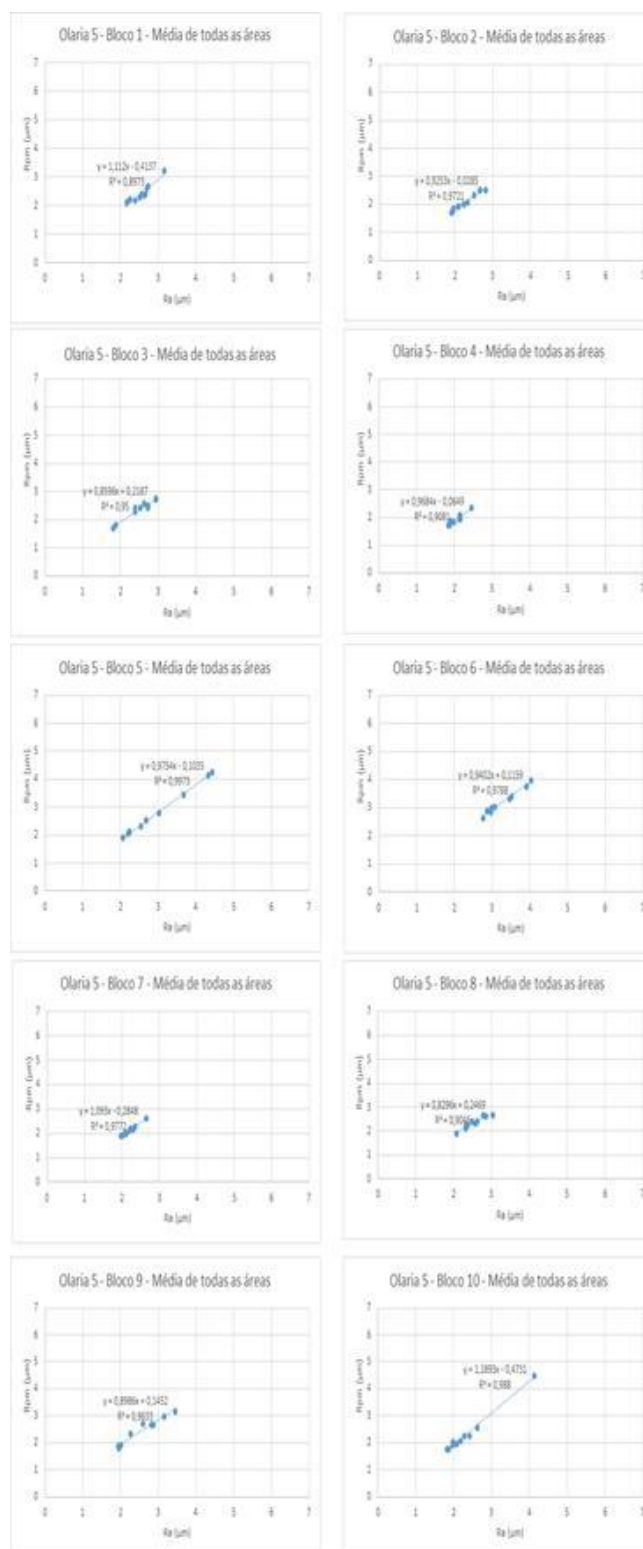


Figura 53 - Análise de correlação linear entre R_a e R_{pm} das superfícies de $1,5625\text{mm}^2$ de cada bloco cerâmico, das diferentes olarias

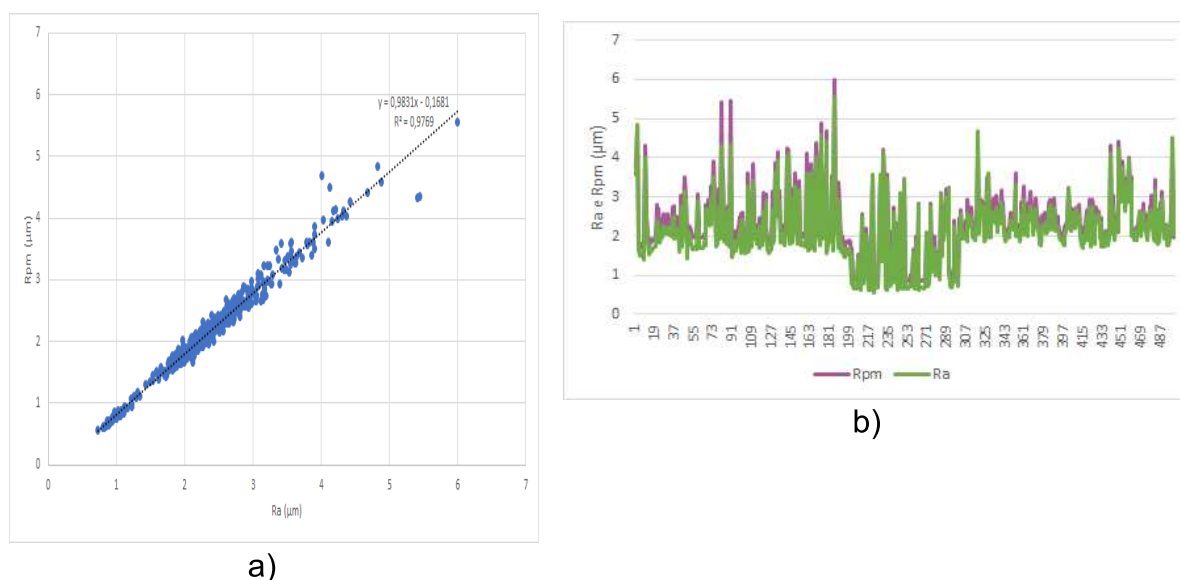
(conclusão)



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Percebe-se nos gráficos da Figura 53 que o R_a apresenta uma correlação linear positiva com o R_{pm} e que os parâmetros são associados, uma vez que, ao aumentar o R_{pm} o R_a também sofre aumento, proporcional e simétrico entre os dados analisados. Essa correlação linear pode ser observada quando a análise ocorre entre os dados das superfícies dos diferentes blocos cerâmicos das diferentes olarias. Mesmo os substratos de olarias diferentes, a correlação linear entre R_a e R_{pm} continua com a mesma tendência de comportamento (Figura 54-a). Também é desenvolvido um gráfico comportamental com os dados de R_a e R_{pm} , para melhor visualização da simetria existente entre R_a e R_{pm} (Figura 54-b).

Figura 54 - a) Análise de correlação linear e (b) visualização comportamental entre R_a e R_{pm} dos blocos cerâmicos, das diferentes olarias



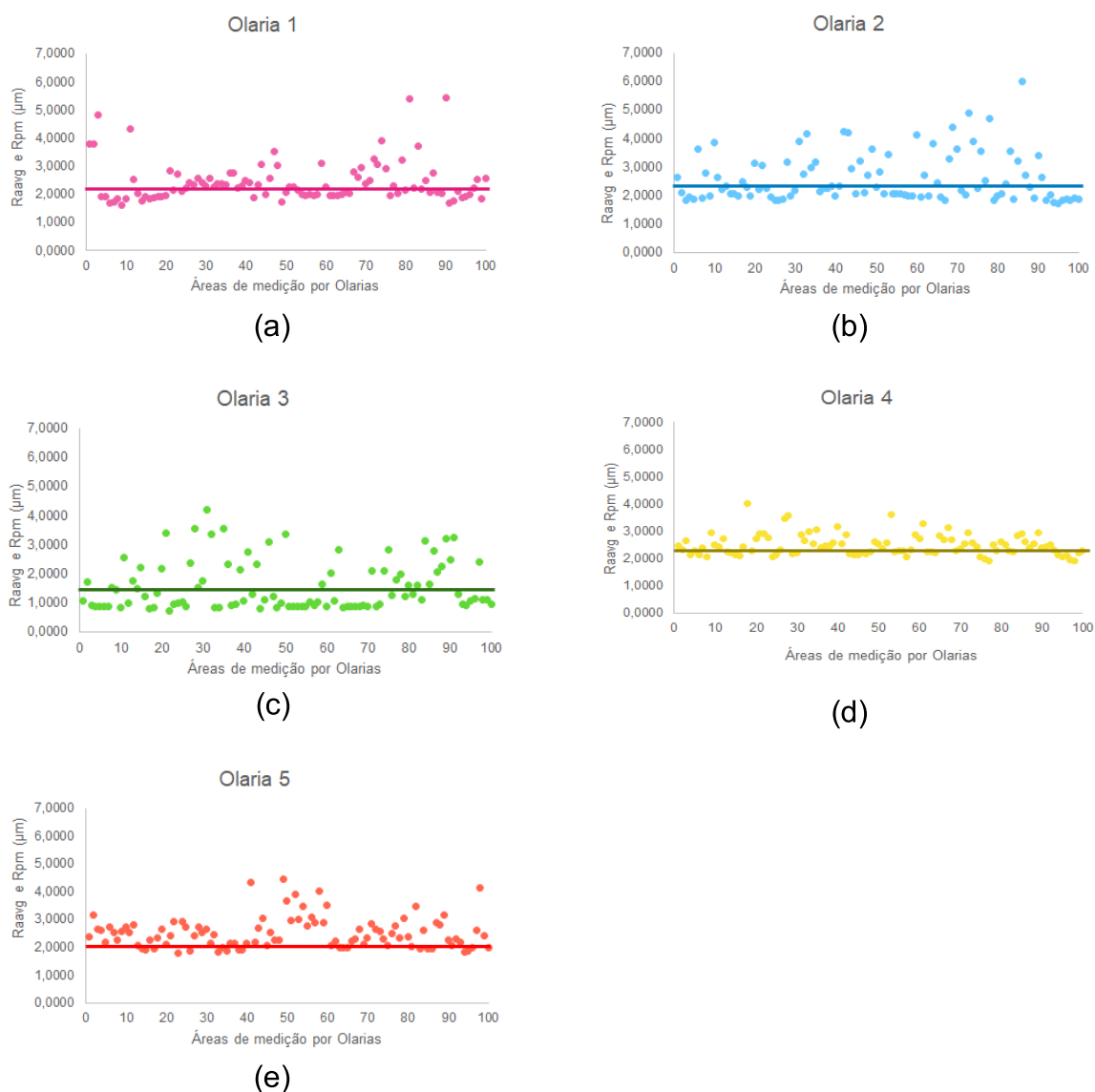
Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Em todos os níveis de análise a correlação entre os parâmetros foi linear. O coeficiente linear 0,98, obtido na análise simultânea de todos os blocos, indica uma expressiva similaridade entre os dois parâmetros, concluindo-se que o R_a pode ser utilizado em substituição de R_{pm} , sendo um parâmetro de rugosidade que representa a média dos cinco maiores picos da superfície em análise.

A Figura 55 representa a dispersão de resultados de R_{pm} em relação ao R_{aavg} médio de todos os substratos de blocos e a Tabela 25; os coeficientes de variação de cada olaria. Os resultados apontam que as olarias 4 e 5 apresentam coeficientes de variação baixos de 16% e 23% respectivamente; a olaria 1 e a olaria 2 têm coeficiente

de variação médios 30% e 33%, respectivamente. Já a olaria 3 apresenta coeficiente de variação muito alto, 54%, demonstrando com isso a grande variação entre os dados de rugosidade analisados para os blocos cerâmicos dessa olaria.

Figura 55 - Dispersão entre R_{pm} e R_{aavg} médio de todos os blocos de cada olaria. Em (a),(b), (c), (d) e (e) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Tabela 25 - Coeficiente de variação do R_{pm} em relação ao R_{aavg} das olarias

	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
AVG	2,4287	2,5819	1,5579	2,4981	2,5137
SDV	0,7271	0,8478	0,8414	0,3877	0,5672
VAR	0,5287	0,7187	0,7080	0,1503	0,3217
CV	30%	33%	54%	16%	23%

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

O mesmo procedimento de análise foi realizado para os dados de R_a e R_{vm} , onde primeiramente foram analisadas todas as áreas de $1,5625\text{mm}^2$ na mesma posição, dentro da mesma área de $1\text{x}1\text{cm}^2$ do mesmo bloco da mesma olaria. Na sequência avaliou-se a superfície de cada bloco da mesma olaria (Figura 56).

Figura 56 - Análise de correlação linear entre R_a e R_{vm} das superfícies de 1,5625mm² de cada bloco cerâmico, das diferentes olarias

(continua)

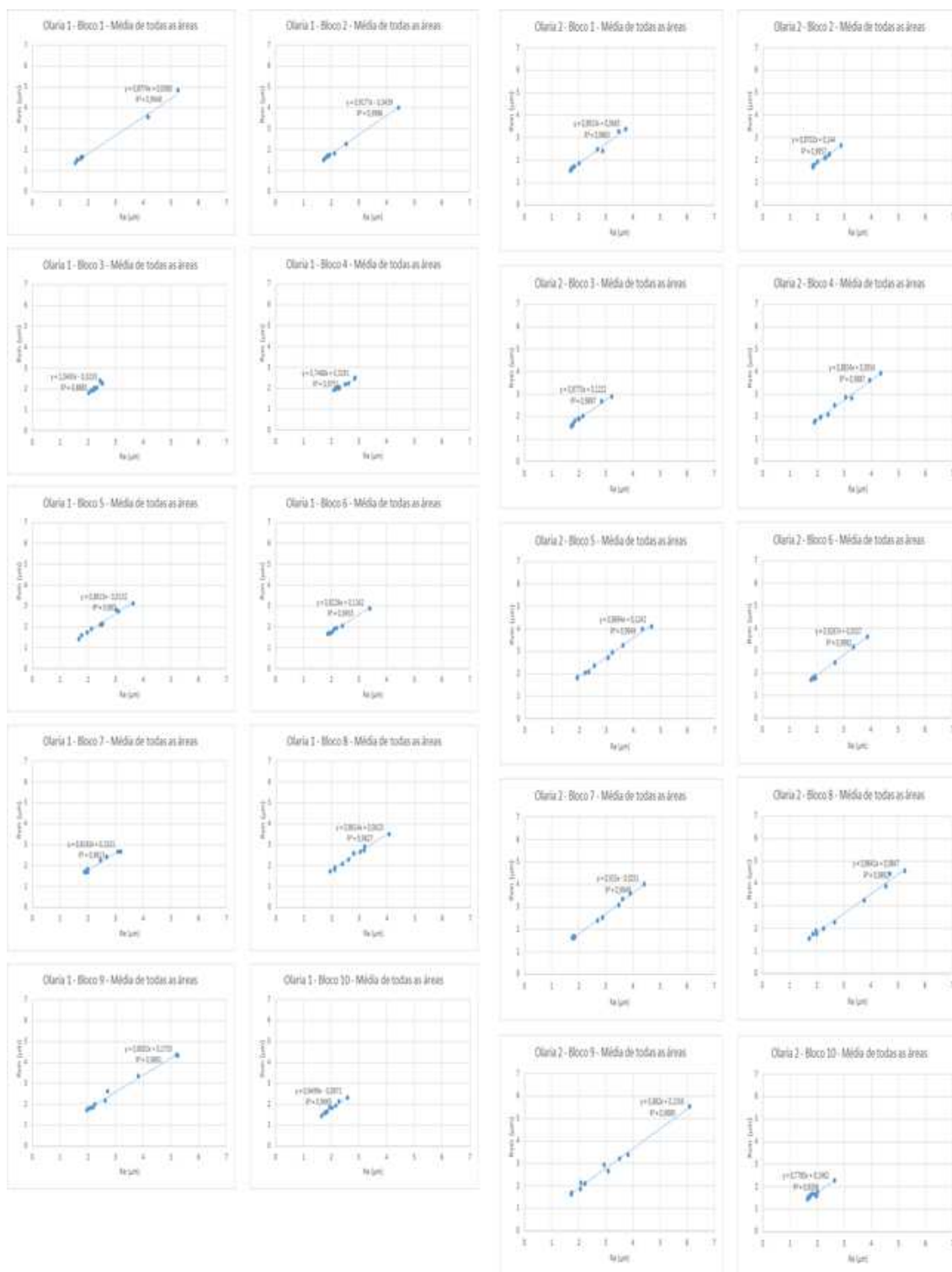


Figura 56 - Análise de correlação linear entre R_a e R_{vm} das superfícies de $1,5625\text{mm}^2$ de cada bloco cerâmico, das diferentes olarias

(continuação)

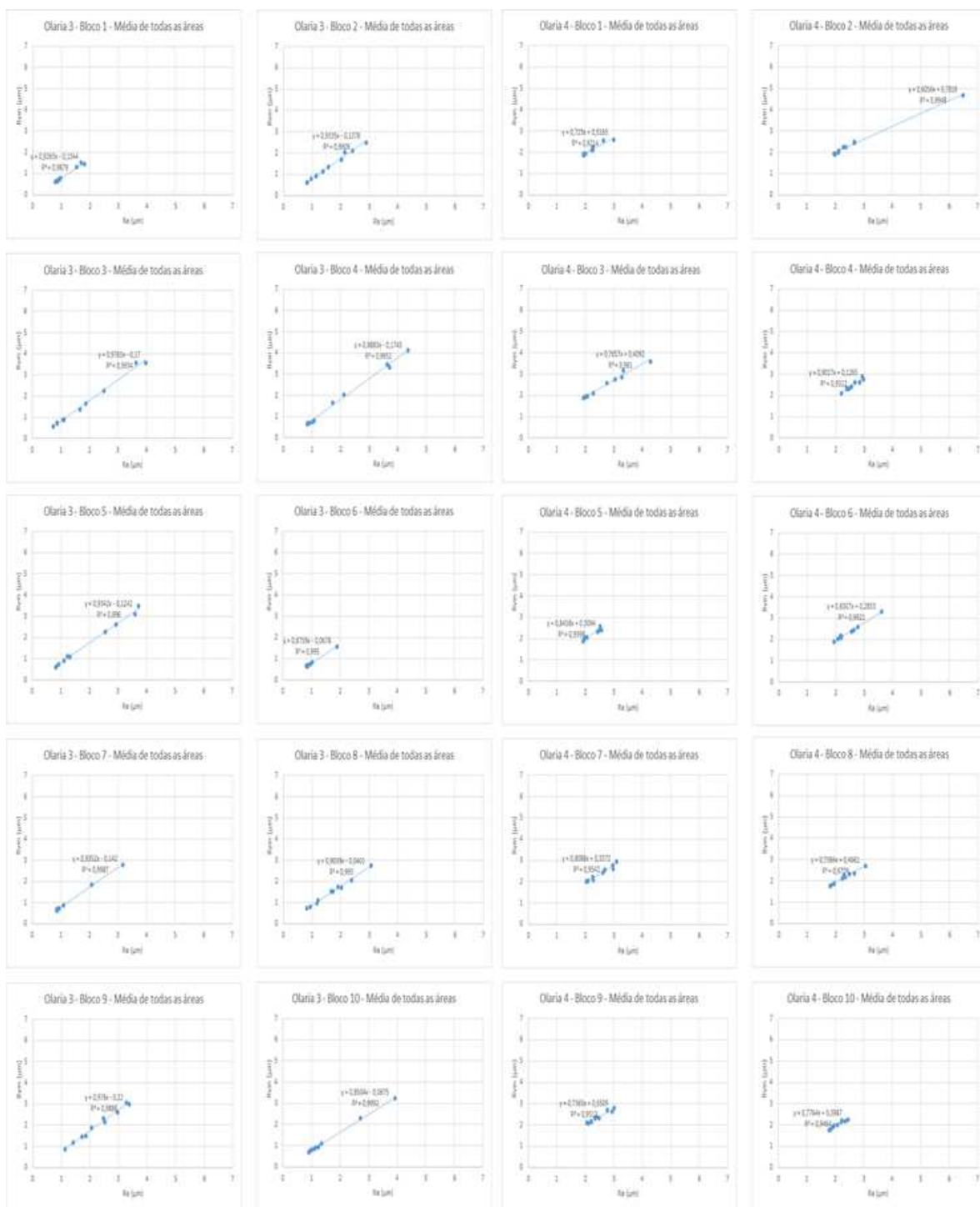
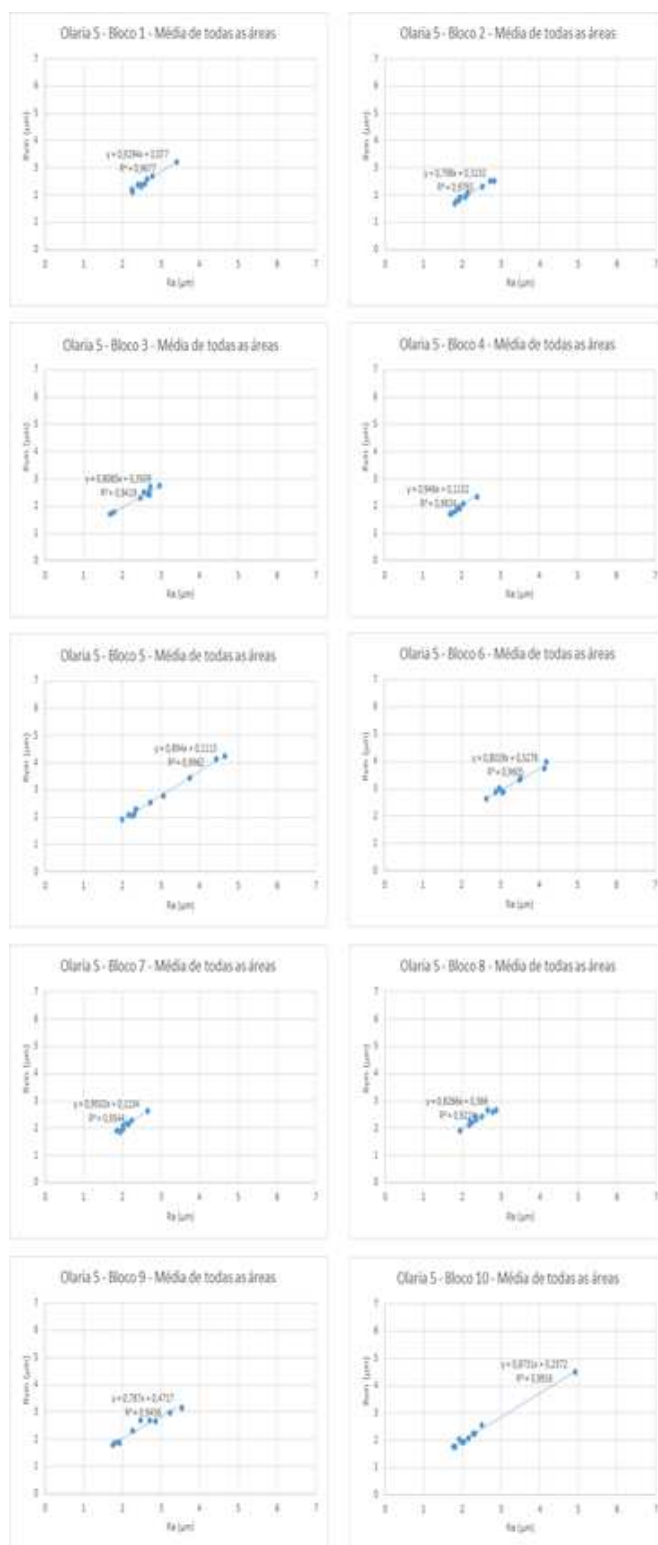


Figura 56 - Análise de correlação linear entre R_a e R_{vm} das superfícies de $1,5625\text{mm}^2$ de cada bloco cerâmico, das diferentes olarias

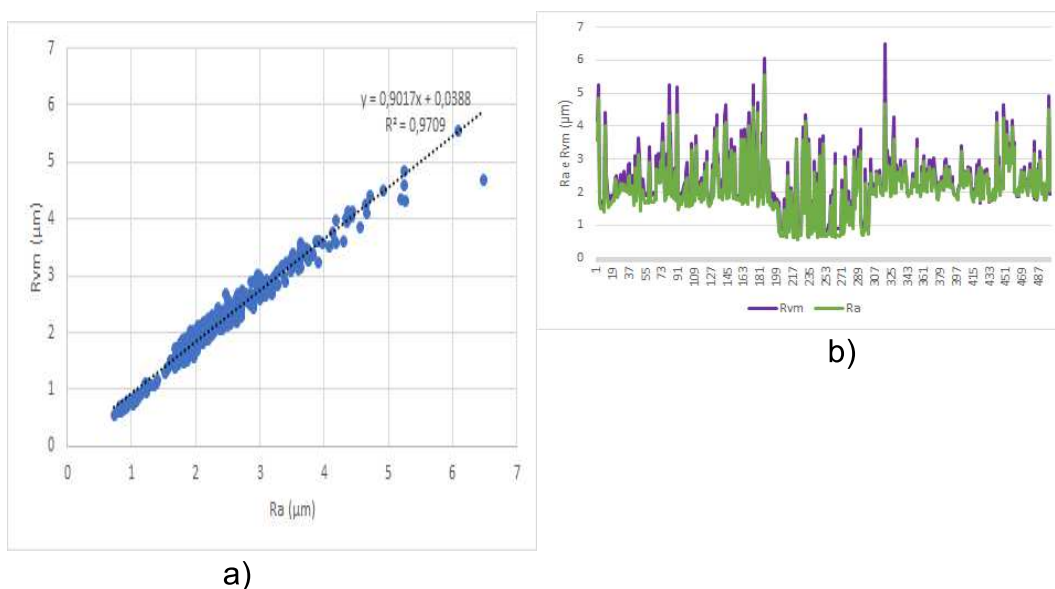
(conclusão)



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Percebe-se nos gráficos da Figura 56 que o R_a apresenta uma correlação linear positiva com o R_{vm} e que os parâmetros são associados, uma vez que, ao aumentar o R_{vm} o R_a aumenta. Essa correlação linear também pode ser observada quando a análise ocorre entre os dados dos diferentes blocos das diferentes olarias (Figura 57-a). Também foi desenvolvido um gráfico comportamental com os dados de R_a e R_{vm} , para melhor visualização da simetria existente entre R_a e R_{vm} (Figura 57-b).

Figura 57 - (a) Análise de correlação linear e (b) comportamental entre R_a e R_{vm} dos blocos cerâmicos, das diferentes olarias

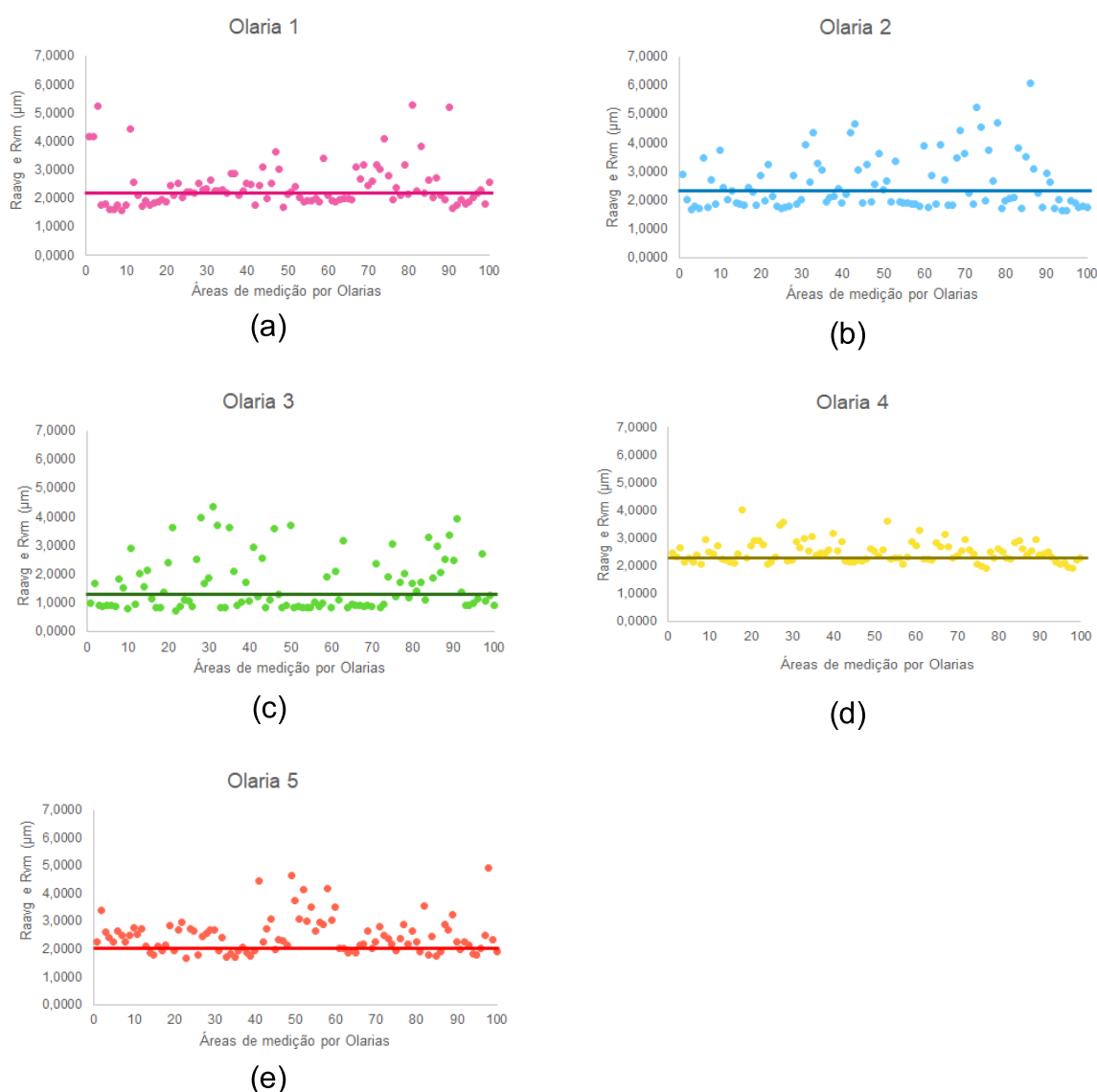


Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Em todos os níveis de análise a correlação entre os parâmetros foi linear. O coeficiente linear 0,90, obtido na análise simultânea de todos os blocos, indica uma boa similaridade entre os dois parâmetros concluindo-se que o R_a é um parâmetro de rugosidade que representa a média dos cinco maiores vales da superfície em análise.

A dispersão de resultados de R_{vm} em relação ao R_{aavg} de todas as superfícies dos blocos cerâmicos de cada olaria, visualizada na Figura 58, mostra a mesma tendência de comportamento já observada na análise de R_{pm} em relação ao R_{aavg} .

Figura 58 - Dispersão entre R_{vm} e R_{aavg} médio de todos os blocos de cada olaria. Em (a),(b), (c), (d) e (e) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Perez, Bissonnette, Courard (2009); Bagherifard; Ghelichi; Guagliano (2012); EK et al. (2016) afirmam que no estudo de rugosidades há necessidade de se avaliar mais de um parâmetro e não apenas a R_a para indicar a rugosidade de uma superfície. As análises realizadas permitem concluir que, em blocos cerâmicos, o R_a determinado a partir de uma captura de dados tridimensional pode ser utilizado para representar o R_{vm} e o R_{pm} , descartando a necessidade de se calcular estes outros parâmetros.

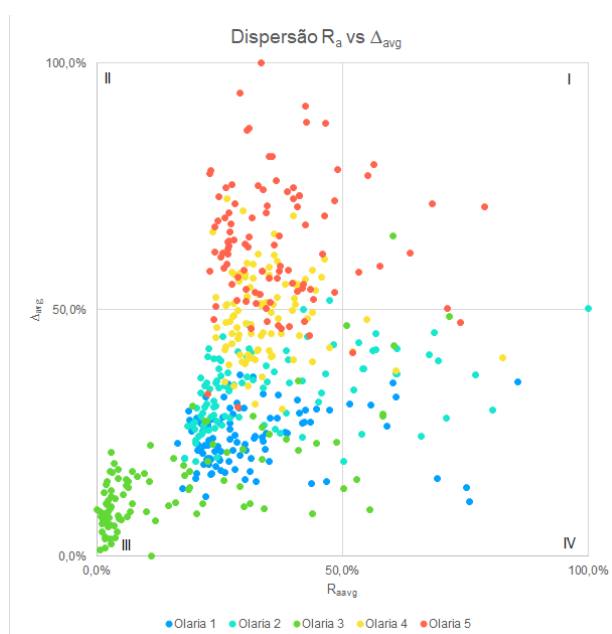
Também foram avaliadas as correlações entre R_a , R_p , R_{pm} , R_v e R_{vm} entre cada região de $1,5625\text{mm}^2$, dentro de cada bloco. Concluiu-se que o R_a , não representa o

maior pico e nem o menor vale de uma região, em nenhuma superfície de bloco cerâmico de nenhuma olaria analisada, pois não existe correlação linear entre esses dados. Então, o maior pico ou o menor vale, não podem ser utilizados para representar o R_a , com isso descarta-se a utilização do R_v e do R_p como parâmetros de rugosidade, quando analisados isoladamente.

4.5.1.2 Análise estatística dos quadrantes para verificar a influência dos parâmetros de rugosidade nas superfícies

Ao se dispor os valores dos parâmetros de rugosidade em um gráfico de quadrantes (Figura 58), os dados das diferentes olarias amostradas localizam-se, em sua maioria, nos quadrantes II (olarias 4 e 5) e III (olarias 1, 2 e 3). Dessa maneira a correlação entre os dados é nula e as variáveis são independentes, isto é, a variação de uma não influencia a variação de outra. A análise demonstra que os espaçamentos entre as áreas de vales de uma olaria não são dependentes do R_a (Figura 59).

Figura 59 - Análise de dispersão através de quadrantes para todos os blocos cerâmicos de todas olarias, correlação entre R_a e Δ_{avg}



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Em complemento foi analisado os coeficientes de variação dos parâmetros R_a e Δ_{avg} por olaria (Tabela 26).

Tabela 26 - Coeficiente de variação do R_a em relação ao Δ_{avg} das olarias

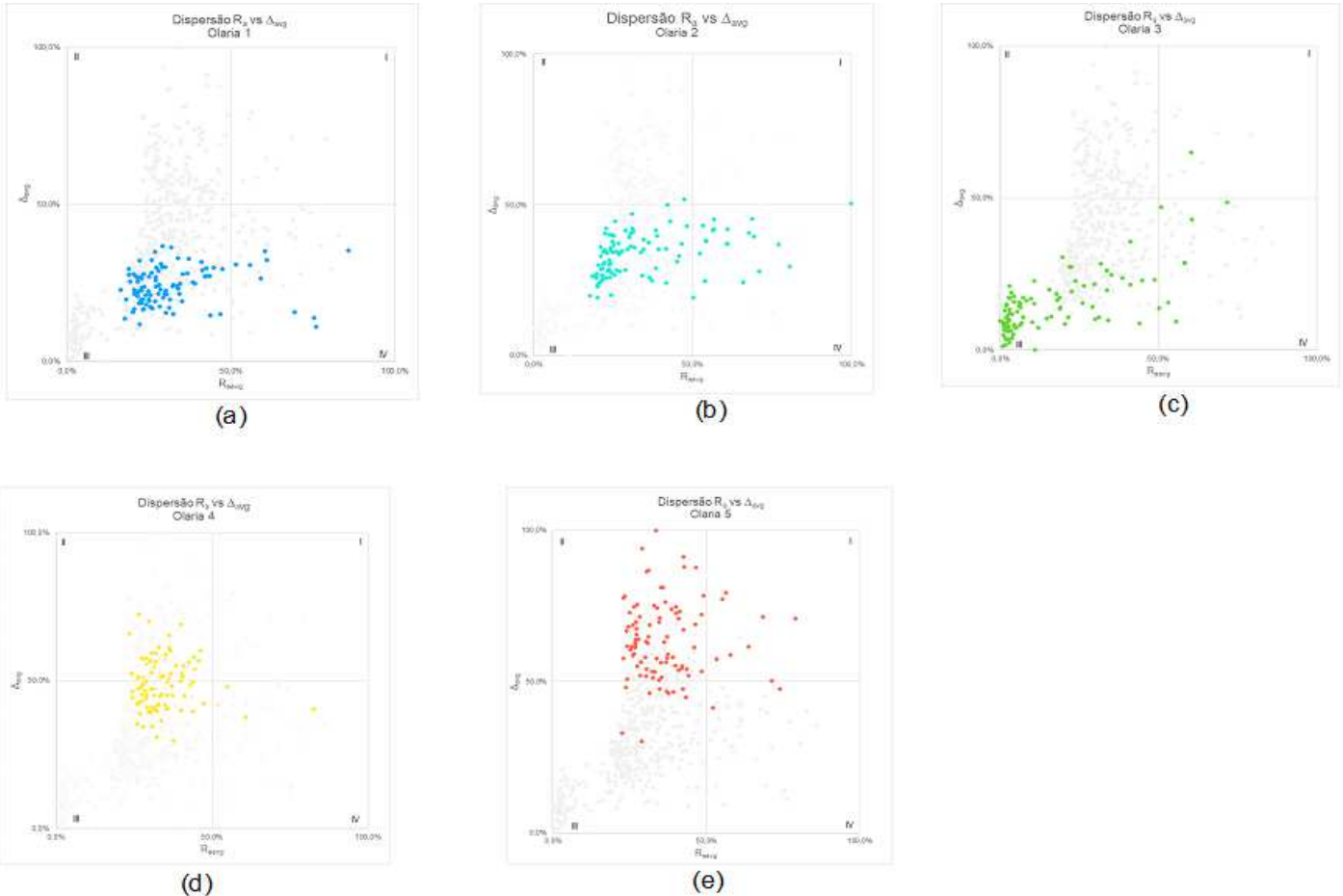
CV	Olaria 1		Olaria 2		Olaria 3		Olaria 4		Olaria 5	
	R_a	Δ_{avg}	R_a	Δ_{avg}	R_a	Δ_{avg}	R_a	Δ_{avg}	R_a	Δ_{avg}
	31%	12%	36%	12%	65%	26%	18%	11%	24%	14%

Fonte: Elaborada pela Autora (2021)

Os coeficientes de variação demonstram maiores valores provenientes da olaria 3 sendo classificado como coeficientes de variação altos. A Olaria 1 e a Olaria 2 apresentaram coeficientes de variação médios. E as olarias 4 e 5 apresentaram baixos coeficientes de variação. Essa variação entre os dados de coeficiente de variação está diretamente relacionada com as diferentes propriedades das argilas, além da variação dos diferentes processos de produção e das diferentes temperaturas de queima utilizados na produção dos blocos cerâmicos, que tornam as superfícies do material heterogêneas.

O gráfico dos quadrantes foi realizado individualmente para cada olaria, a fim de melhorar a análise e interpretação dos dados, conforme apresentado na Figura 60.

Figura 60 - Dispersão através de quadrantes entre R_a e Δ_{avg} de todos os blocos de cada olaria. Em (a),(b), (c), (d) e (e) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Quando a análise de dispersão através dos quadrantes ocorre por olarias individualmente, todas as olarias apresentam correlação nula.

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 59 e 60, conclui-se que a olaria 5 apresenta a maior R_a e a maior Δ_{avg} , seguida da olaria 4, 2, 1 e 3, respectivamente, o que é coerente com a análise realizada na ETAPA 3 deste estudo.

Pode-se afirmar que a olaria 5 apresenta rugosidade e área superficial que favorecem maior extensão de aderência, em relação às outras olarias estudadas, conforme já mencionado na ETAPA 3.

Para uma melhor visualização dos parâmetros de rugosidade analisados no estudo, definiu-se um mapa de cores, apresentado na Figura 61. A assinatura de rugosidade apresentada (Figura 61) se refere a uma única área de um único bloco, que foi considerada representativa do comportamento médio daquela olaria analisada.

Este mapa apresenta simultaneamente as rugosidades R_a e as área de vale, plotadas em uma mesma figura. As áreas de vales estão demarcadas na superfície e cada distância z é identificada com uma cor, que varia conforme a profundidade medida. Quanto maior for o valor de z , mais escura a tonalidade da cor.

Figura 61 - Mapa de cores das superfícies dos blocos cerâmicos relação entre Δ_{avg} e Z

(continua)

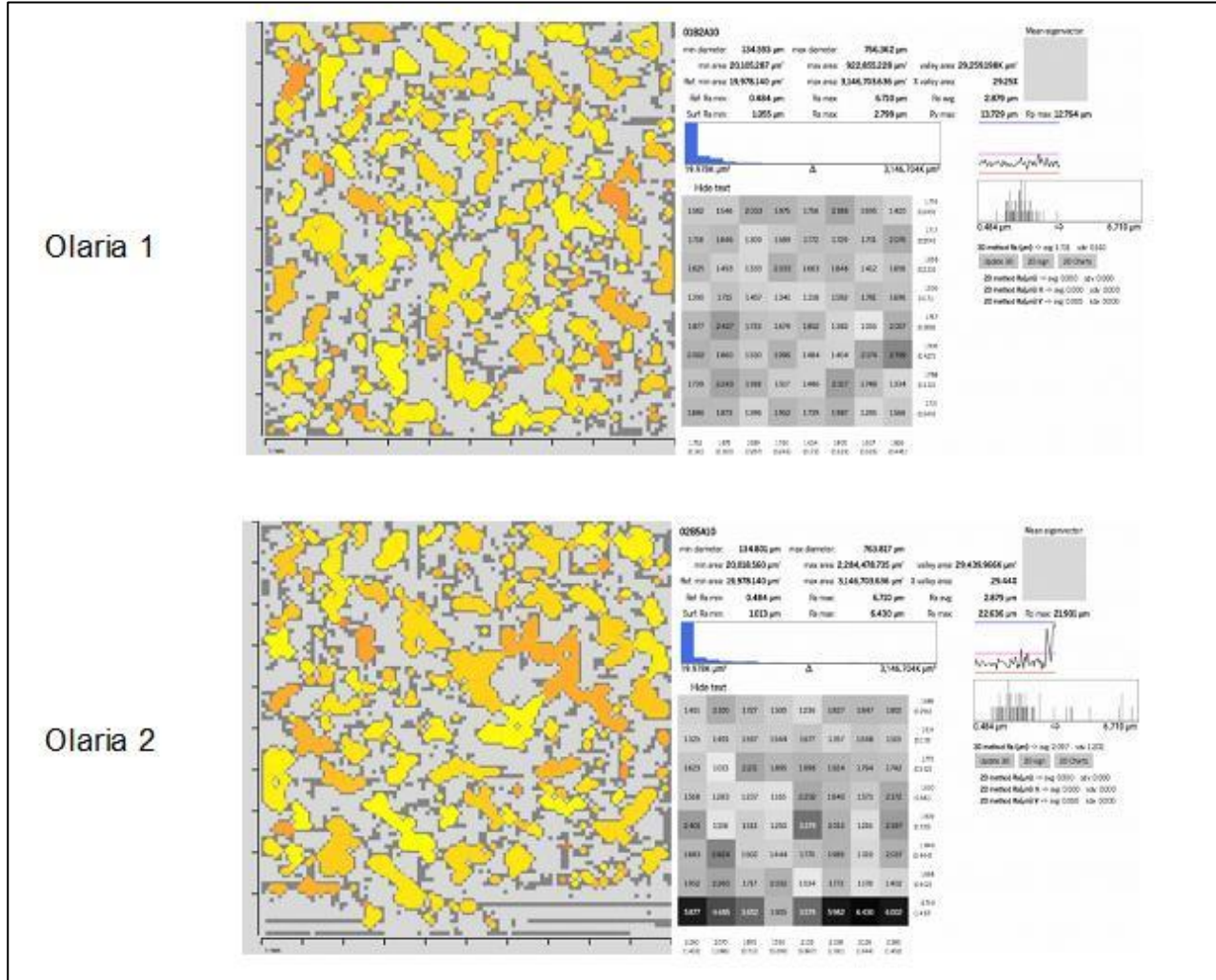


Figura 61 - Mapa de cores das superfícies dos blocos cerâmicos relação entre Δ_{avg} e Z

(continuação)

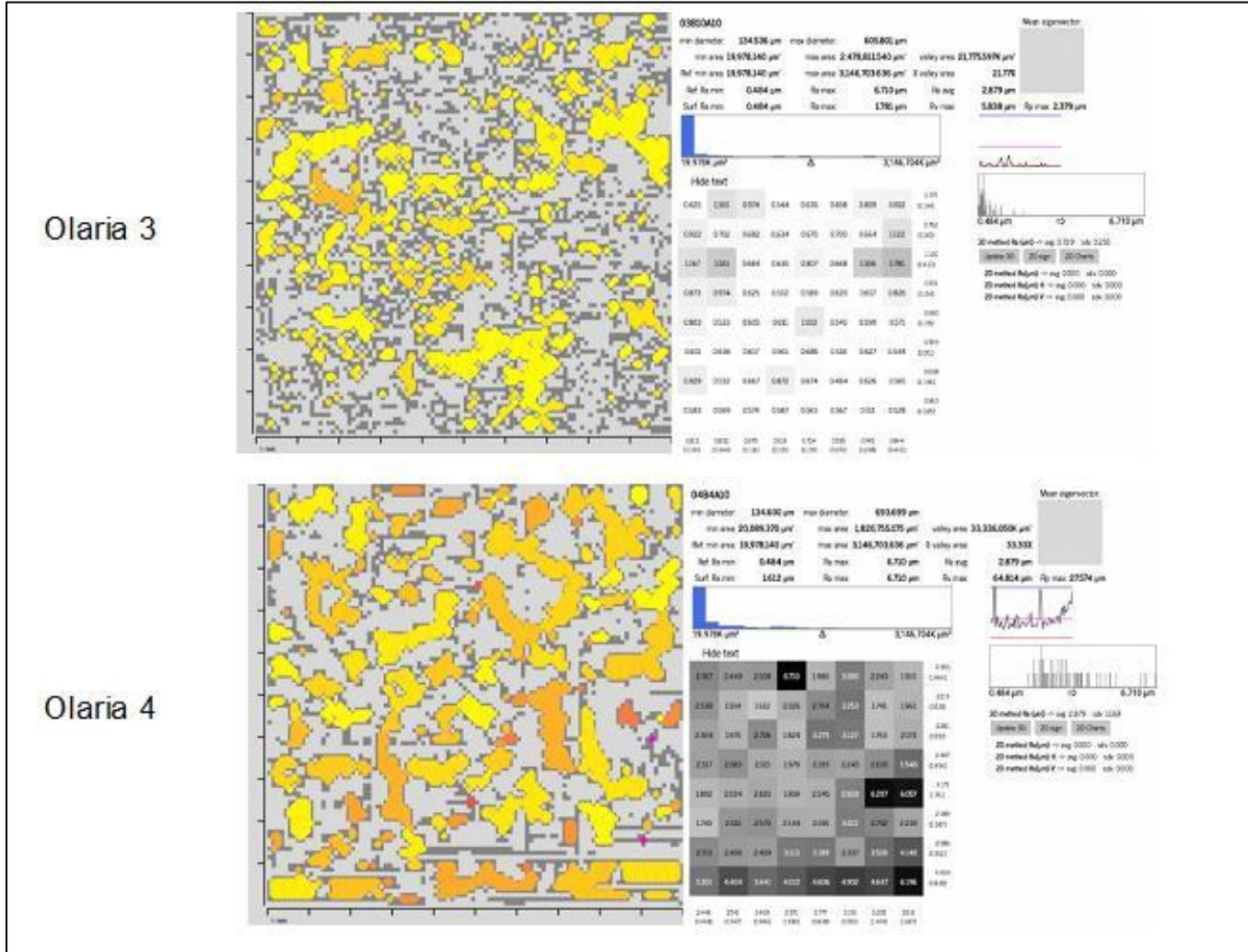
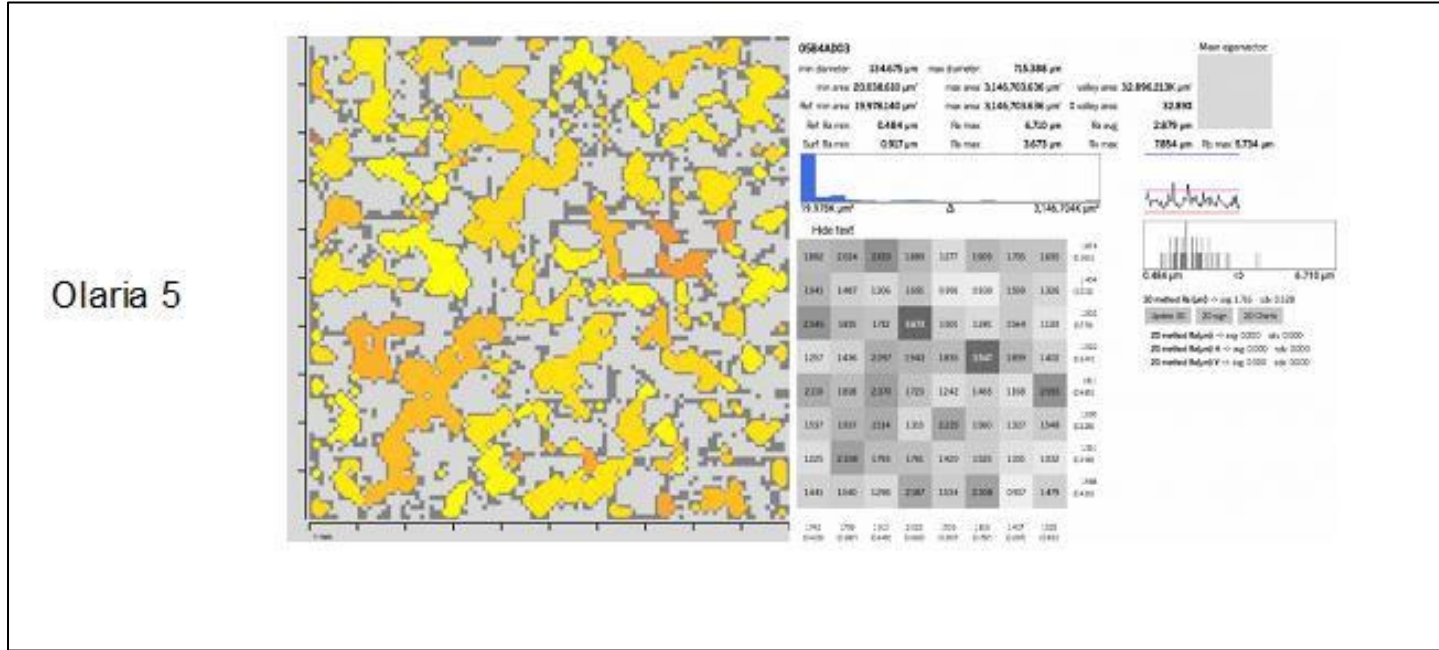


Figura 61 - Mapa de cores das superfícies dos blocos cerâmicos relação entre Δ_{avg} e Z

(conclusão)



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Analisando os mapas de cores das olarias em estudo (Figura 61), conclui-se que a olaria 3 apresenta as menores profundidades de vales e as menores áreas de vales. Também se verifica maior incidência de áreas de vales na superfície de menores dimensões. Pode-se afirmar que as demais olarias apresentam critérios de rugosidade e área superficial mais amplos, que favorecem maior extensão de aderência, em relação à olaria 3, conforme já mencionado anteriormente nas demais análises.

4.5.2 Parâmetros de rugosidade analisados a partir de captura de dados por meio de microscopia eletrônica de varredura - MEV

A visualização das superfícies dos substratos cerâmicos por meio de microscopia eletrônica de varredura – MEV foi o segundo método adotado para a caracterização da superfície, nessa ETAPA 4 do estudo, sendo observadas imagens com ampliações de até 10.000x. Porém para comparação da análise dos dados obtidos pelo MEV com os dados obtidos pelo perfilômetro 3D, foi utilizada uma ampliação de 2.000x (Figura 62), para aproximar as escalas de obtenção das informações, a fim de validar o método de determinação de rugosidade de blocos cerâmicos propostos no estudo.

Uma limitação das medições por MEV diz respeito às pequenas regiões de análise, o que limita a extrapolação das características observadas nessas imagens para o restante da superfície. Ao usar o MEV para medições quantitativas, é necessário determinar a dependência angular real do sinal gravado e combinar com métodos complementares de imagens para o processamento que levem em consideração as especificidades do sistema detector usado pelo equipamento (MYSHKIN, GRIGORIEV & KHOLODILOV, 2001). Contudo, Cultrone et al. (2004) citam que análises que empregam MEV possibilitam verificar a forma dos poros dos blocos cerâmicos, bem como a textura das amostras que passam por mudanças significativas que dependem da temperatura de queima e da composição da argila crua.

A verificação das superfícies por meio de MEV visou a realização de uma análise comparativa entre essas imagens e as assinaturas de rugosidade determinados a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser.

Figura 62 - Análise comparativa entre as imagens obtidas por MEV e as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser, das diferentes olarias

(continua)

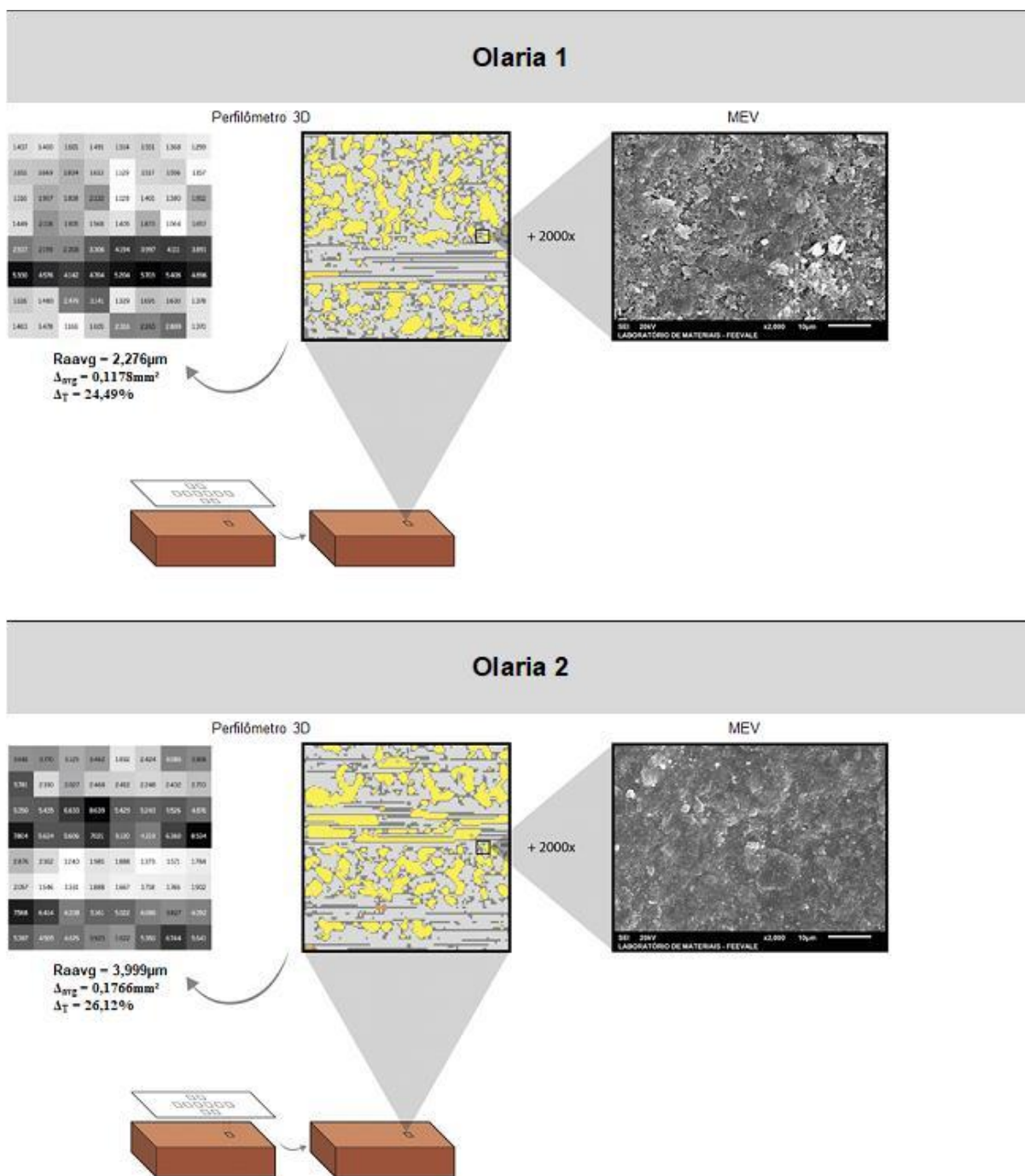


Figura 62 - Análise comparativa entre as imagens obtidas por MEV e as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser, das diferentes olarias

(continuação)

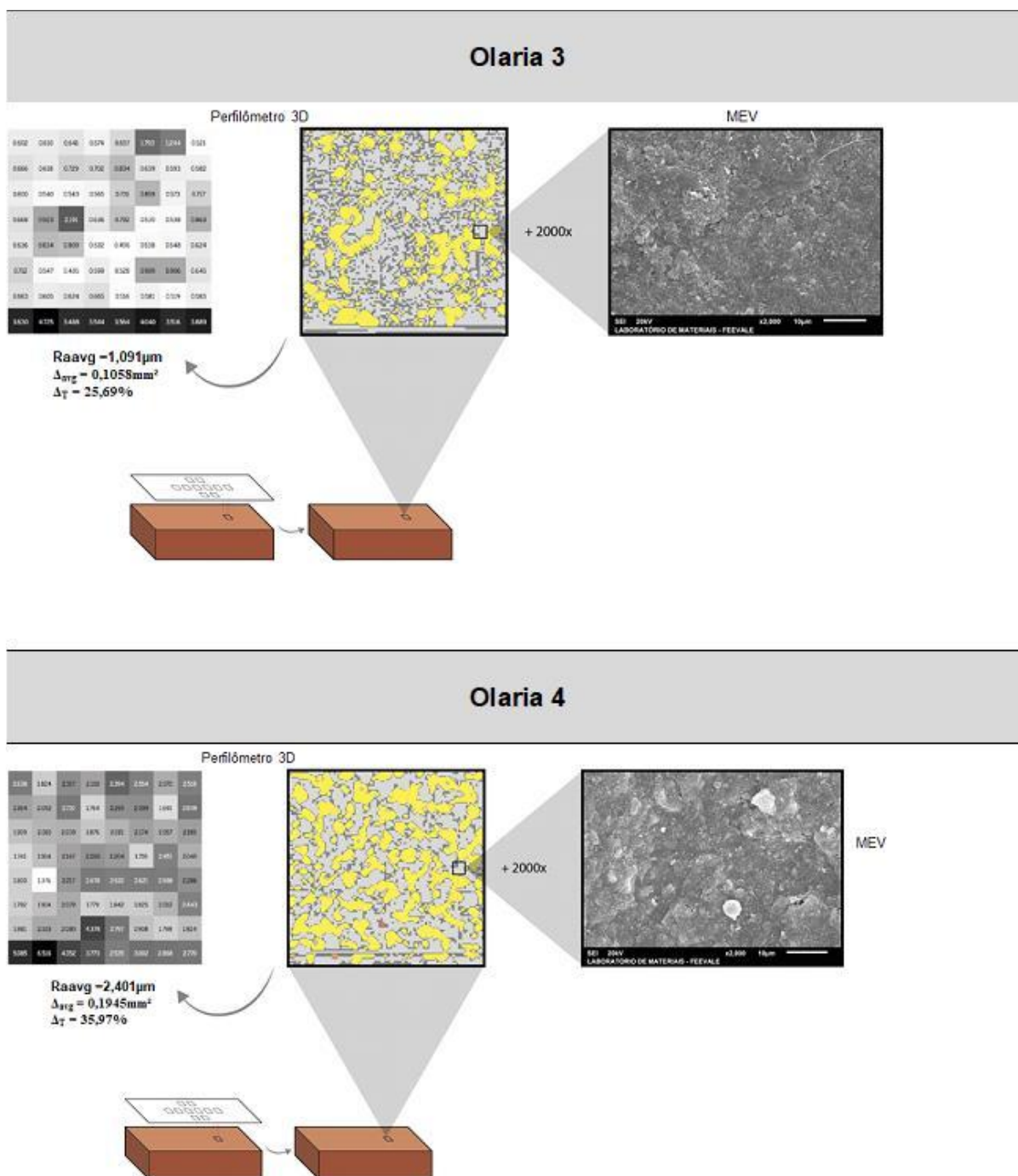
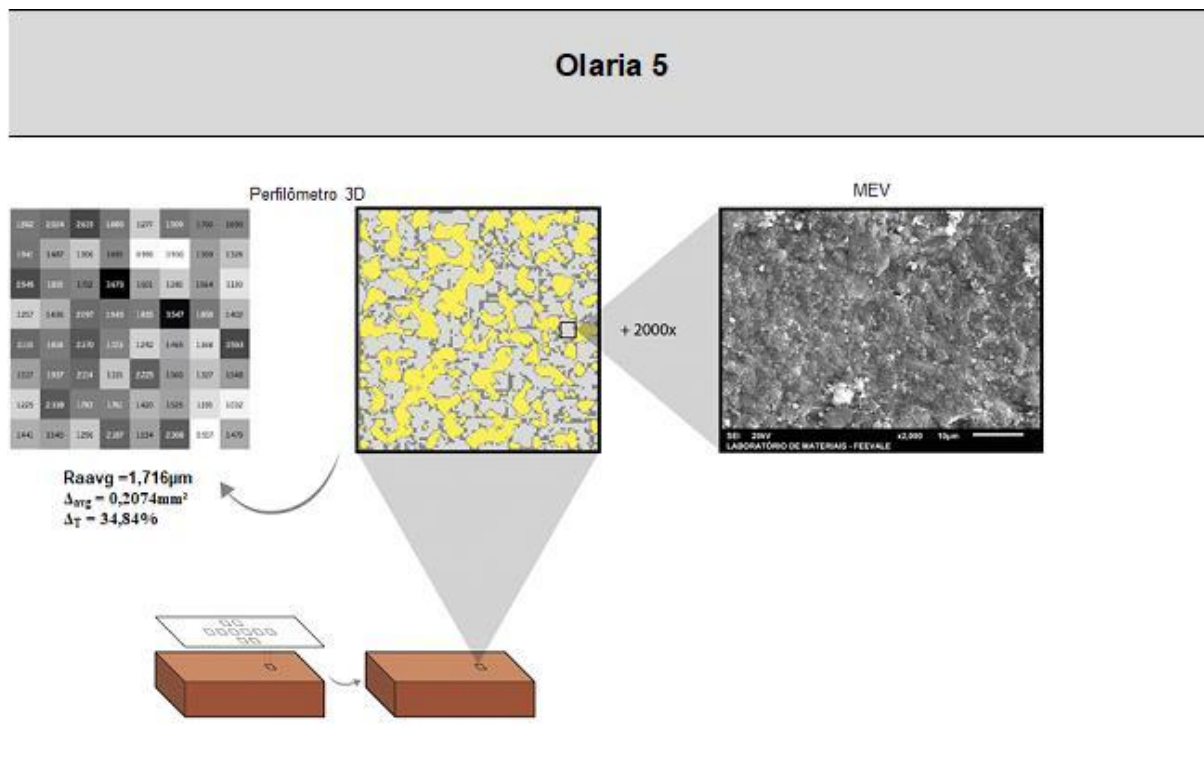


Figura 62 - Análise comparativa entre as imagens obtidas por MEV e as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser, das diferentes olarias

(conclusão)

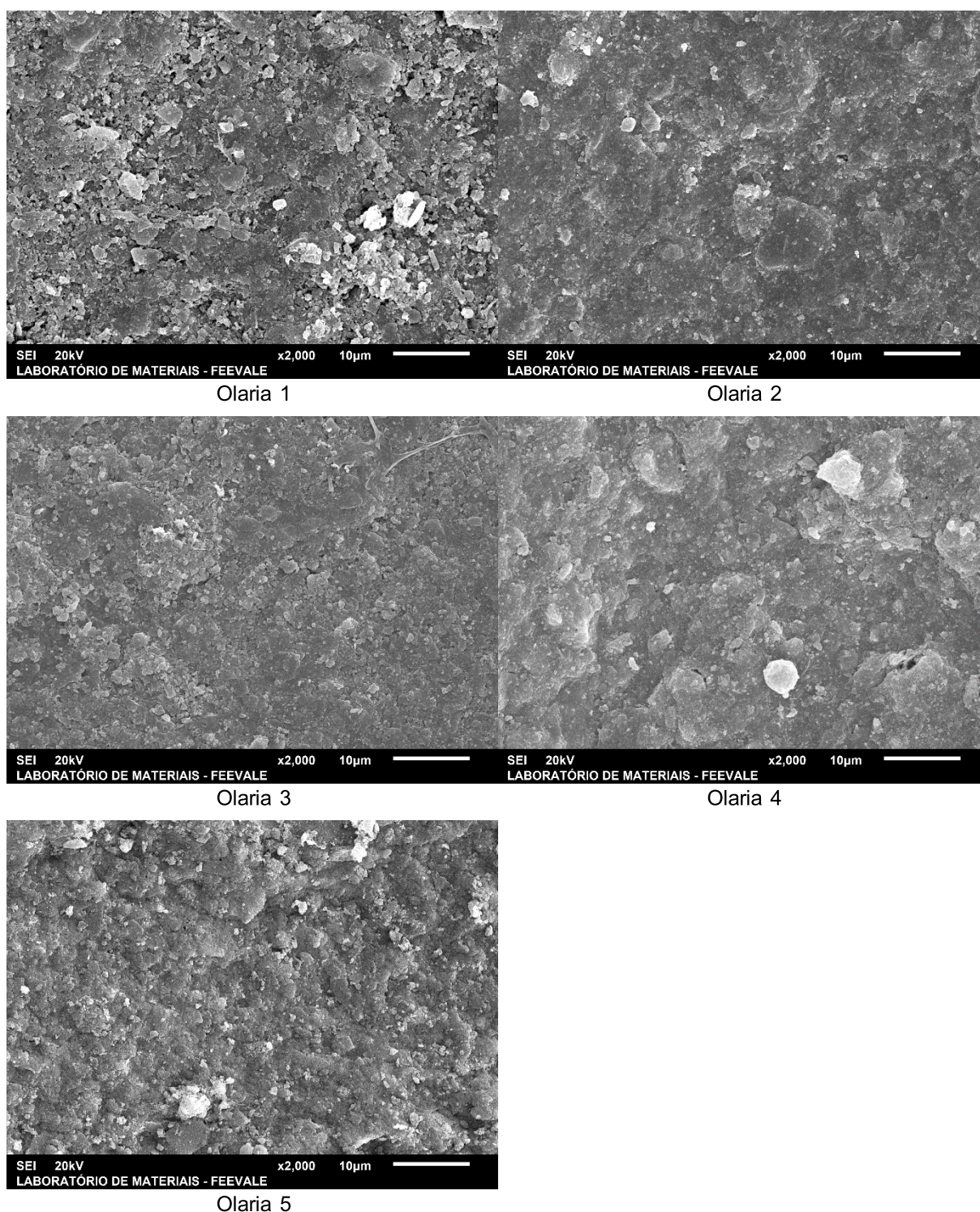


Fonte: Própria Autora (2021)

Na Figura 62 é possível observar as imagens obtidas com as diferentes técnicas de medição de rugosidade. Após a demarcação da área de análise os blocos foram medidos pelo perfilômetro 3D, gerando as superfícies com as áreas demarcadas na colocação amarela e a assinatura de rugosidade (diversas regiões demarcadas e quantificadas nas colorações que variam de branco a preto dependendo do valor de R_a). A imagem obtida pelo MEV é representada na Figura 61 com a ampliação de 2.000x (imagem da superfície em preto e branco). Nessa mesma imagem, pode-se visualizar que a análise do MEV é realizada em uma pequena área (demarcação meramente ilustrativa) dentro da superfície de $1cm^2$ avaliada pelo perfilômetro 3D.

A avaliação das imagens obtidas com o MEV foi realizada em caráter qualitativo, a partir da observação e comparação entre elas (Figura 63). A Figura 63 apresenta as imagens em uma maior dimensão para facilitar a análise e comparação.

Figura 63 - Imagens da superfície dos blocos das diferentes olarias através do MEV



Fonte: A autora (2021)

Entre os blocos visualizados nas Figuras 62 e 63, é possível a percepção de diferenças nas superfícies. As olarias 1 e 5 na ampliação de 2.000x apresentam, aparentemente, as maiores irregularidades, concluindo que essas superfícies tendem

a apresentar maiores rugosidades. A olaria 3, visualizada na Figura 63, aparentemente apresenta a superfície com menor variação de irregularidades, tendendo a apresentar as menores rugosidades.

Com as imagens analisadas no MEV (Figura 63), percebe-se uma melhor adequação para avaliação de áreas de vales do que de rugosidade média (R_a), em função da dificuldade de estimar profundidade na amostra analisada pelo MEV. Relacionando as imagens com área de vales, pode-se afirmar que a Olaria 3 é condizente com a menor área de vales e, com o menor R_a . Essa olaria se destaca claramente das demais em todos os parâmetros e nas duas formas de avaliação (perfilometria 3D e MEV).

Ao observar a olaria 5, nas imagens do MEV (Figura 63) pode-se afirmar que é condizente com os dados calculados pelo método 3D que apresenta a maior área de vales para essa amostra. A observação com o MEV para a olaria 2 é condizente com área de vales intermediária calculada pelo método 3D, proposto no estudo. Nas demais olarias não foi possível identificar um comportamento similar entre as observações com MEV e as avaliações quantitativas através do método 3D.

A análise através do MEV fornece dados qualitativos de uma superfície em uma escala microestrutural, que permite a identificação de tendências de comportamento. Entretanto, devem-se avaliar cuidadosamente as informações obtidas, pois as imagens podem não representar a real rugosidade da superfície do bloco cerâmico, pois abrangem uma área pequena de visualização, o que, sem cruzamento com dados obtidos por outras técnicas, pode levar a erros em relação a avaliação da rugosidade de uma superfície.

4.5.3 Parâmetros de rugosidade analisados a partir de aquisição de dados por meio de microscopia de força atômica - MFA

Neste item é realizada uma análise de dados utilizando-se microscopia de força atômica (MFA), em áreas de 50x50 micrometros, de forma a verificar se os parâmetros de rugosidade determinados a partir da captura de dados via perfilômetro 3D apresentam comportamento similar. A escala de obtenção dos dados de rugosidade é outro fator importante no estudo.

Os resultados dos dados obtidos pelo MFA serão analisados estatisticamente, qualitativamente e discutidos nos tópicos seguintes.

4.5.3.1 Comparativo de R_{aavg} a partir de nuvem de pontos adquirida por MFA

Nesta etapa de resultados foram comparados os dados de rugosidade média R_{aavg} para todos os blocos de todas as olarias, com o objetivo de verificar a similaridade entre os valores obtidos no Perfilômetro 3D e no MFA. Os dados de R_{aavg} obtidos por MFA são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Rugosidade média (R_{aavg}) de todas as amostras, com escala do menor (em branco) até o maior (em verde mais escuro) R_{aavg}

	Olaria	R_{aavg} (μm)
Olaria 1	B2A10a	0,1602129
	B2A10b	0,1842644
	B2A10c	0,1501178
Olaria 2	B5A10a	0,1472147
	B5A10b	0,1408864
	B5A10c	0,1602129
Olaria 3	B10A10a	0,1684733
	B10A10b	0,1186208
	B10A10c	0,1134412
Olaria 4	B4A10a	0,1711454
	B4A10b	0,1826757
	B4A10c	0,1649968
Olaria 5	A101	0,1577714
	A201	0,1873143
	A301	0,1417012

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Percebe-se que as menores rugosidades médias encontram-se nos blocos da olaria 3, assim como constatado no ensaio realizado com o perfilômetro 3D. Há uma tendência de comportamento, porém como as áreas são muito pequenas é difícil estimar a rugosidade da superfície inteira com essas amostras, necessitando para confirmação dos dados de rugosidade um número maior de amostras para uma análise mais precisa.

Como os mesmos princípios de análises realizados para as R_{aavg} entre as diferentes olarias no método de perfilometria 3D, foram analisados os dados obtidos pelo MFA. Os dados de R_{aavg} foram agrupados e contabilizados em níveis de valores, com o objetivo de visualizar a distribuição das rugosidades médias por ordem de

relevância (maior valor, mais relevante). Para tanto, foram determinados os valores de R_{aavg} mínimo (R_{amin}) e R_{aavg} máximo (R_{amax}) de todos os substratos. Os valores de R_{amin} e de R_{amax} definem o intervalo do histograma de R_{aavg} e, dentro desse intervalo, são definidos cinco níveis uniformemente distribuídos (Tabela 28).

Tabela 28 - Níveis para agrupamento de valores de R_{aavg}

Níveis	Menor R_{aavg} (μm)	Maior R_{aavg} (μm)
Nível 1	0,053707	0,1138854
Nível 2	0,1138854	0,1740638
Nível 3	0,1740638	0,2342422
Nível 4	0,2342422	0,2944206
Nível 5	0,2944206	0,354599

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

A partir dos valores R_{aavg} (Tabela 28), é realizado a composição do histograma, contabilizando o valor R_{aavg} de cada substrato na respectiva faixa de representação. A Tabela 29 apresenta a quantidade de R_{aavg} por faixa de representação, a média de R_{aavg} por olaria e o desvio padrão.

Tabela 29 - Níveis para agrupamento de valores de R_{aavg} e as linhas estão ordenadas pela média (R_{aavg})

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	Média (R_{aavg}) (μm)	Sdv
Olaria 3	78	81	22	9	2	0,133512	0,046405
Olaria 2	54	93	32	9	4	0,147336	0,048272
Olaria 5	22	106	53	9	2	0,162262	0,04465
Olaria 1	38	79	53	16	6	0,164865	0,055387
Olaria 4	27	73	66	23	3	0,172939	0,054193

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

As linhas estão na ordem da olaria com menor média de R_{aavg} até a olaria com maior média de R_{aavg} . Os resultados indicam a maior distribuição de áreas com R_{aavg} no nível 2 para todas as olarias. As olarias 2 e 3 concentram as maiores quantidades de R_{aavg} no nível 1 e 2, ou seja, R_{aavg} com valores baixos. Já as olarias 1, 4 e 5 apresentam a maior quantidade de áreas nos níveis de representação 2 e 3. Além disso, a olaria 3 possui em média valores de R_{aavg} menores, dados coerentes com o

observado na análise 3D do perfilômetro, comprovando a eficiência do método da análise quantitativa desenvolvida no estudo.

Na mesma Tabela 29, pode-se verificar que as olarias 1, 4 e 5 possuem, em média, os maiores valores de R_{aavg} . Também, percebe-se que os dados obtidos com o MFA apresentam baixo desvio padrão.

Ressalta-se que como o método MFA analisa áreas muito pequenas (superfícies quadradas com $50\mu\text{m}$ de aresta ou menor), seu uso na análise da rugosidade de substratos cerâmicos fica muito limitado, podendo gerar valores que não representam a rugosidade real da superfície dos blocos cerâmicos. A influência na escala dos parâmetros de rugosidade também é contatada nos estudos de Bagherifard; Ghelichi; Guagliano (2012); Ge et al. (2014); Moreau; Roudet; Gentil, (2014); Santos e Júlio (2013); Ma et al. (2016); Gurau et al. (2017).

4.5.3.2 Análise estatística dos quadrantes para verificar a influência dos parâmetros de rugosidade nas superfícies

Para análise da dispersão entre os dados de R_a e Δ_{avg} foram realizados gráficos de quadrante para todas as olarias em conjunto e para cada olaria individualmente (Figura 64). Quando a análise de dispersão, através dos quadrantes, ocorre por olarias individualmente, todas as olarias apresentam correlação nula.

Figura 64 - Dispersão através de quadrantes entre R_a e Δ_{avg} de todos os blocos de cada olaria (a). Em (b),(c), (d), (e) e (f) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5

(continua)

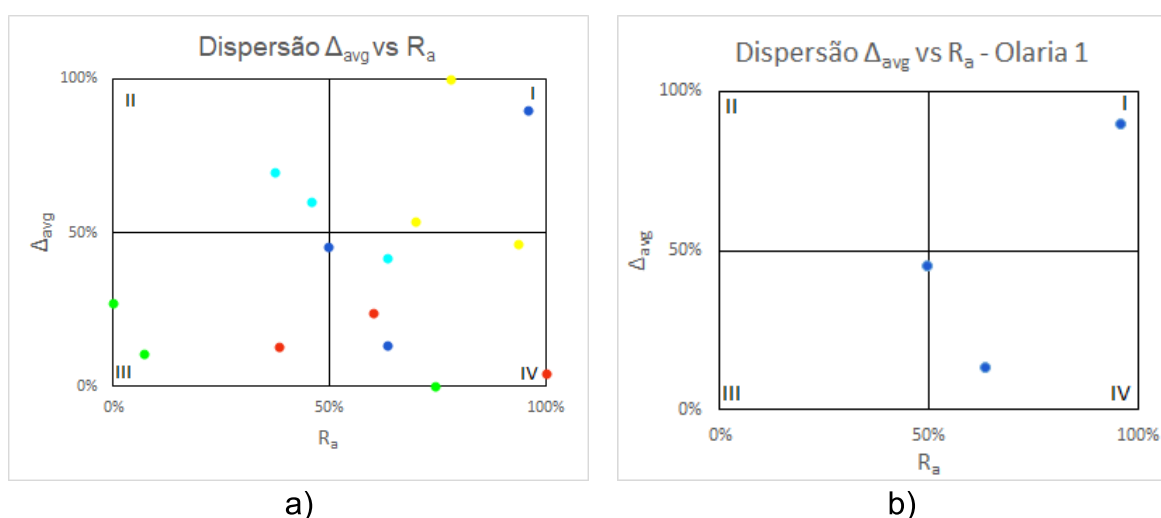
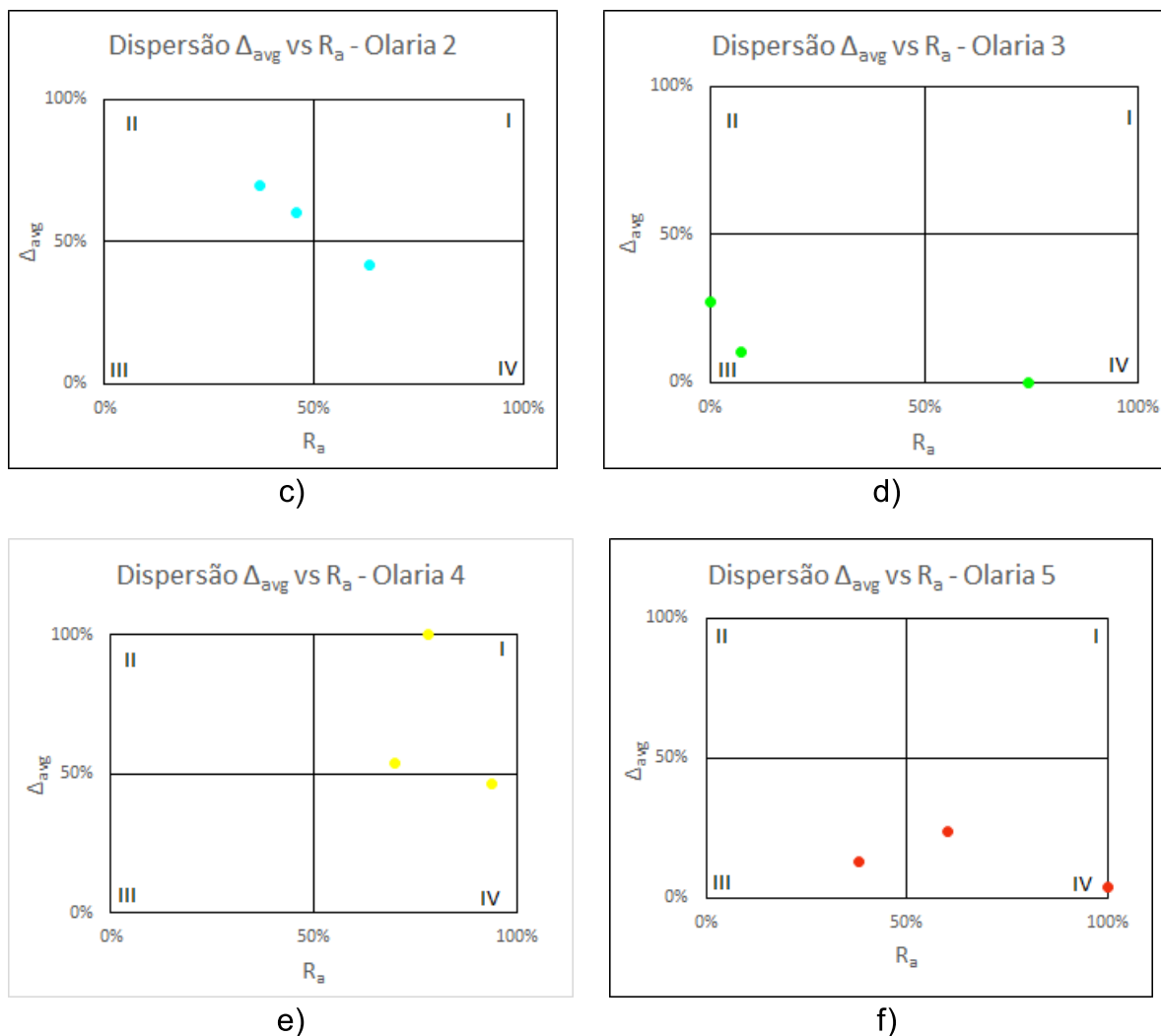


Figura 65 - Dispersão através de quadrantes entre R_a e Δ_{avg} de todos os blocos de cada olaria
(a). Em (b),(c), (d), (e) e (f) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5

(conclusão)



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Analisando os gráficos e considerando as duas variáveis (R_a e Δ_{avg}) envolvidas, conclui-se que a olaria 4 possui os maiores valores de rugosidade média e de área de vale médio, pode-se afirmar que essa olaria apresenta critérios de rugosidade e área superficial que favorecem maior extensão de aderência, em relação às outras olarias estudadas. Também é possível observar que as olarias 1 e 2, apresentam valores similares de R_a e Δ_{avg} , sendo que a olaria 1 apresenta maiores R_a e menores Δ_{avg} quando comparada com a Olaria 2. A olaria 5 apresenta R_a similar a olaria 1 e superior a olaria 2, e Δ_{avg} menor que as olarias 1,2 e 4. A olaria 3 apresenta o menor R_a e a menor Δ_{avg} quando comparada as demais olarias em estudo.

A fim de comparar os valores calculados pelos dois métodos de aquisição de dados (perfilômetro 3D e MFA) foi elaborada a Tabela 30.

Tabela 30 - Valores de R_a e Δ_{avg} das diferentes olarias calculados com os diferentes métodos de aquisição de dados - perfilometria 3D e MFA

Olarias	R_{aavg} 3D (μm)	Δ_{avg} 3D (mm^2)	R_a MFA (μm)	R_{aavg} MFA (μm)	Δ MFA (mm^2)	Δ_{avg} MFA (mm^2)
1	1,9654	0,1331	0,1602129	0,16486503	$5,3894 \times 10^{-6}$	$7,77053333 \times 10^{-6}$
			0,1842644		$10,4283 \times 10^{-6}$	
			0,1501178		$7,4939 \times 10^{-6}$	
2	2,2988	0,1646	0,1472147	0,149438	$8,4694 \times 10^{-6}$	$8,28146667 \times 10^{-6}$
			0,1408864		$9,1031 \times 10^{-6}$	
			0,1602129		$7,2719 \times 10^{-6}$	
3	0,944	0,0918	0,1684733	0,13351177	$4,5166 \times 10^{-6}$	$5,34243333 \times 10^{-6}$
			0,1186208		$5,2096 \times 10^{-6}$	
			0,1134412		$6,3011 \times 10^{-6}$	
4	3,1659	0,2137	0,1711454	0,1729393	$11,0894 \times 10^{-6}$	$8,90406667 \times 10^{-6}$
			0,1826757		$7,5607 \times 10^{-6}$	
			0,1649968		$8,0621 \times 10^{-6}$	
5	1,8388	0,2074	0,1577714	0,1622623	$6,0765 \times 10^{-6}$	$5,41346667 \times 10^{-6}$
			0,1873143		$4,7826 \times 10^{-6}$	
			0,1417012		$5,3813 \times 10^{-6}$	

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Ao analisar os dados obtidos pelos dois métodos de aquisição de dados (perfilometria 3D e MFA), percebe-se que a olaria 3 e a olaria 4 apresentaram similaridade no comportamento dos parâmetros, uma vez que a olaria 3 apresenta os menores valores de R_a e Δ_{avg} para ambos os métodos de aquisição de dados (3D e MFA). A olaria 4 apresenta os maiores valores de R_a e Δ_{avg} para os dois métodos de aquisição de dados. Esses resultados indicam uma provável coerência de comportamento entre as duas escalas de medição. Entretanto, entre as demais olarias analisadas não foi possível identificar uma tendência de comportamento entre os métodos de aquisição de dados, exceto por todas ficarem posicionadas entre os maiores valores (olaria 4) e os menores valores (olaria 3) dos parâmetros de rugosidade R_{aavg} e Δ_{avg} .

O comportamento e os valores dos dados calculados com o MFA são distintos aos apresentados nos dados de perfilometria 3D, demonstrando que a escala de medição interfere nos dados de rugosidade média e na área média de vales, entendendo-se que áreas tão pequenas de aquisição de dados podem não representar a real rugosidade de um bloco cerâmico produzida por materiais heterogêneos.

Com a intenção de avaliar a dispersão entre os dados de R_{vm} e Δ_{avg} , foram realizados gráficos de quadrante para todas as olarias e para cada olaria individualmente (Figura 65). Quando a análise de dispersão através dos quadrantes ocorre por olarias individualmente, todas as olarias apresentam correlação nula.

Figura 66 - Dispersão através de quadrantes entre R_{vm} e Δ_{avg} de todos os blocos de cada olaria (a). Em (b),(c), (d), (e) e (f) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5

(continua)

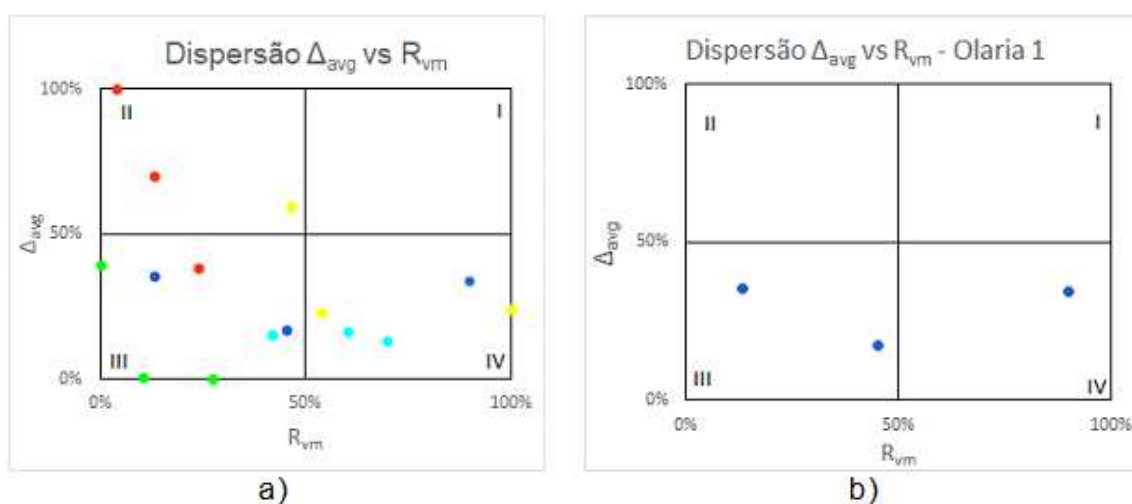
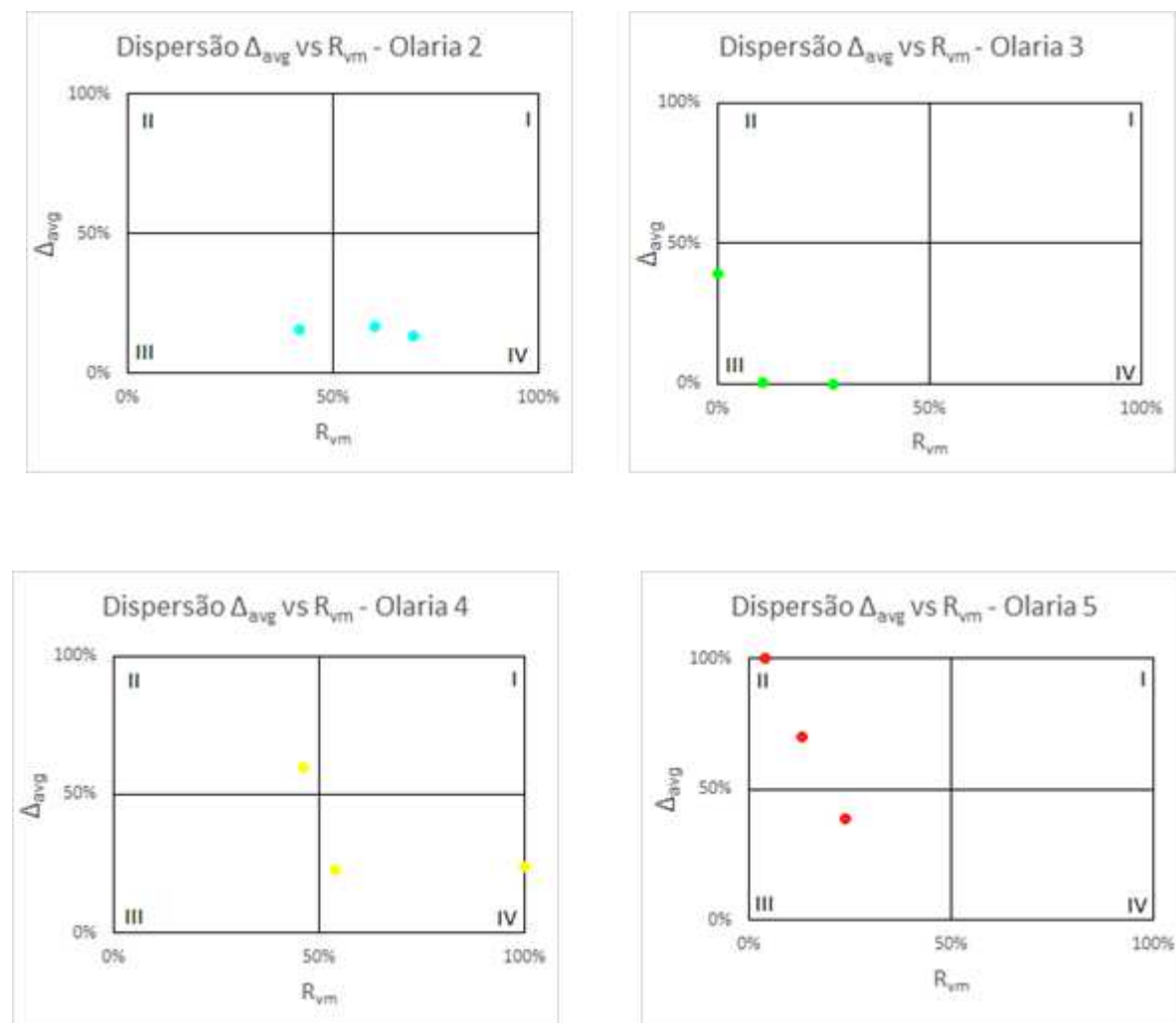


Figura 65 - Dispersão através de quadrantes entre R_{vm} e Δ_{avg} de todos os blocos de cada olaria
 (a). Em (b),(c), (d), (e) e (f) valores das olarias isoladamente, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5

(conclusão)



Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Analisando os gráficos e os resultados (Figura 65 e a Tabela 31) e considerando as duas variáveis (R_{vm} e Δ_{avg}) envolvidas, conclui-se que a olaria 3 possui os menores R_{vm} e as menores Δ_{avg} , em conformidade com os dois métodos de aquisição de dados indiferentemente das escalas de obtenção dos resultados. A olaria 4 apresenta maiores áreas de vale médio para ambos os métodos de aquisição de dados. A olaria 1 apresenta um valor intermediário de R_{vm} para os dois métodos de aquisição de dados (3D e MFA). A análise das demais olarias foram distintas nos dois métodos de aquisição de dados.

Tabela 31 - Valores de R_{vm} e Δ_{avg} das diferentes olarias calculados com os diferentes métodos de aquisição de dados perfilometria 3D e MFA

Olarias	R_{vm} 3D (μm)	Δ_{avg} 3D (mm^2)	R_{vm} MFA (μm)	Média R_{vm} MFA (μm)	Δ MFA (mm^2)	Δ_{avg} MFA (mm^2)
1	1,8839	0,1331	0,22710436	0,21511154	$5,3894 \times 10^{-6}$	$7,77053333 \times 10^{-6}$
			0,22472442		$10,4283 \times 10^{-6}$	
			0,19350584		$7,4939 \times 10^{-6}$	
2	2,3577	0,1646	0,19228888	0,1895096	$8,4694 \times 10^{-6}$	$8,28146667 \times 10^{-6}$
			0,18573289		$9,1031 \times 10^{-6}$	
			0,19050703		$7,2719 \times 10^{-6}$	
3	0,9274	0,0918	0,23470295	0,18628035	$4,5166 \times 10^{-6}$	$5,34243333 \times 10^{-6}$
			0,16239903		$5,2096 \times 10^{-6}$	
			0,16173908		$6,3011 \times 10^{-6}$	
4	2,9289	0,2137	0,20606448	0,22725244	$11,0894 \times 10^{-6}$	$8,90406667 \times 10^{-6}$
			0,27167441		$7,5607 \times 10^{-6}$	
			0,20401844		$8,0621 \times 10^{-6}$	
5	1,7007	0,2074	0,23288667	0,28985081	$6,0765 \times 10^{-6}$	$5,41346667 \times 10^{-6}$
			0,34616497		$4,7826 \times 10^{-6}$	
			0,2905008		$5,3813 \times 10^{-6}$	

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

Conclui-se com a análise que a escala de medição interfere nos dados de vale médio e na área média de vales. E que as diferenças nos resultados encontrados para os dois métodos de aquisição de dados (3D e MFA), podem ser decorrentes da falta de representatividade da região analisada com o MFA, pois seriam necessárias inúmeras análises para se fazer uma comparação estatisticamente representativa.

4.5.3.3 Análise qualitativa e quantitativa através das assinaturas de rugosidade obtidas por perfilometria 3D e MFA

A visualização das superfícies dos substratos cerâmicos por meio de microscopia de força atômica – MFA foi o terceiro método adotado para a caracterização da superfície. Para comparação das informações obtidas nos diferentes métodos de análises, os dados foram tratados a fim de proporcionar uma melhor comparação. Os dados gerados com o MFA foram analisados através da metodologia proposta na ETAPA 1 e para estes dados foram geradas assinaturas de rugosidade.

Pode-se afirmar que o método proposto (ETAPA 1) pode ser aplicado para diferentes equipamentos e diferentes materiais. Uma vez que a nuvem de pontos for adquirida, a metodologia proposta pode ser aplicada, gerando dados precisos e coerentes, conforme demonstrado na assinatura de rugosidade e nas imagens apresentadas (Figura 66).

As limitações das medições por MFA dizem respeito às pequenas regiões de análise, o que limita a extrapolação das características observadas nessas imagens para o restante da superfície, além do custo para análise das amostras.

A verificação das superfícies por meio do MFA visou a realização de uma análise comparativa entre as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser (Figura 66).

Figura 67 - Análise comparativa entre as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser e MFA, e as imagens de MEV das diferentes olarias

(continua)

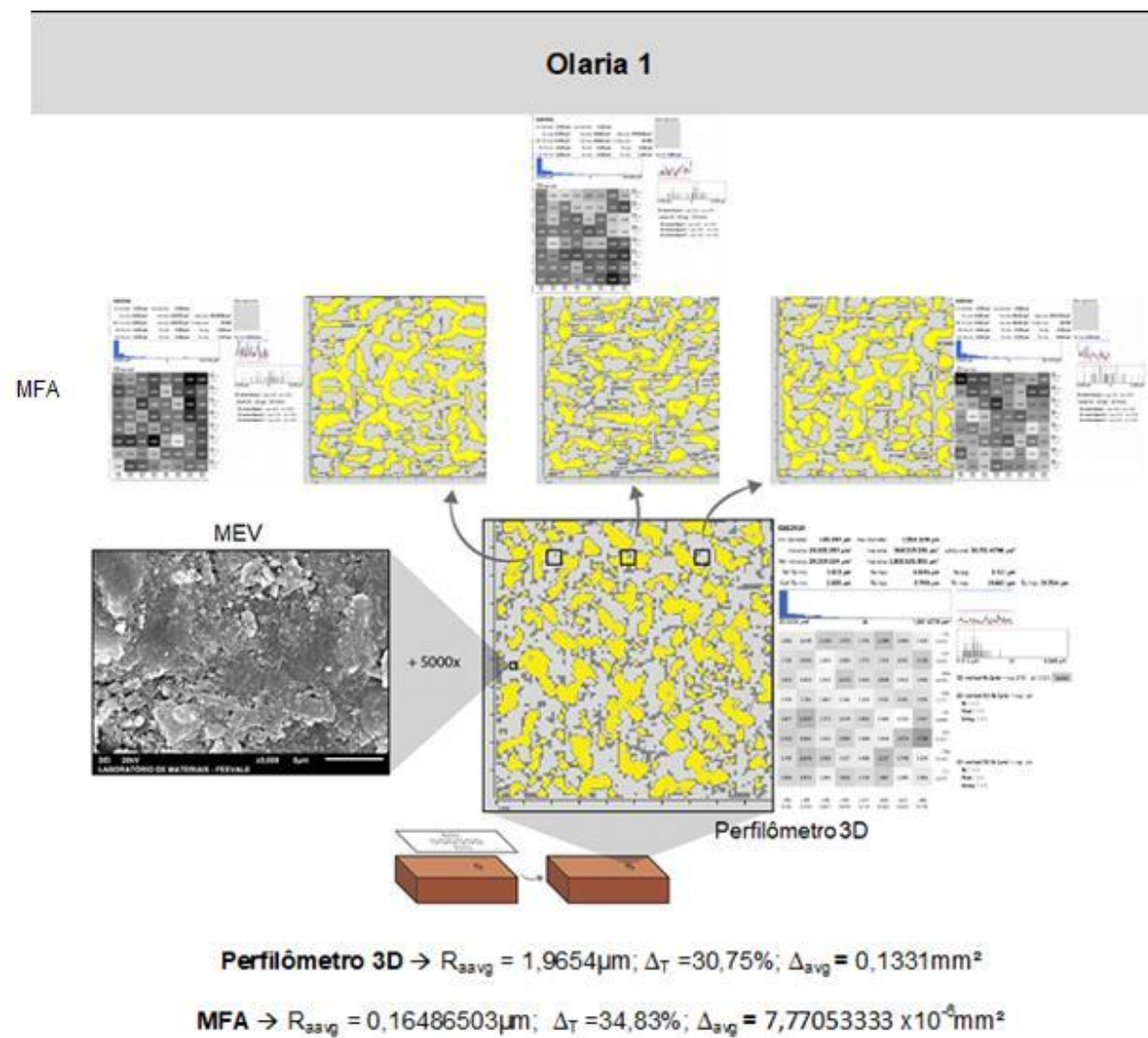


Figura 66 - Análise comparativa entre as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser e MFA, e as imagens de MEV das diferentes olarias

(continuação)

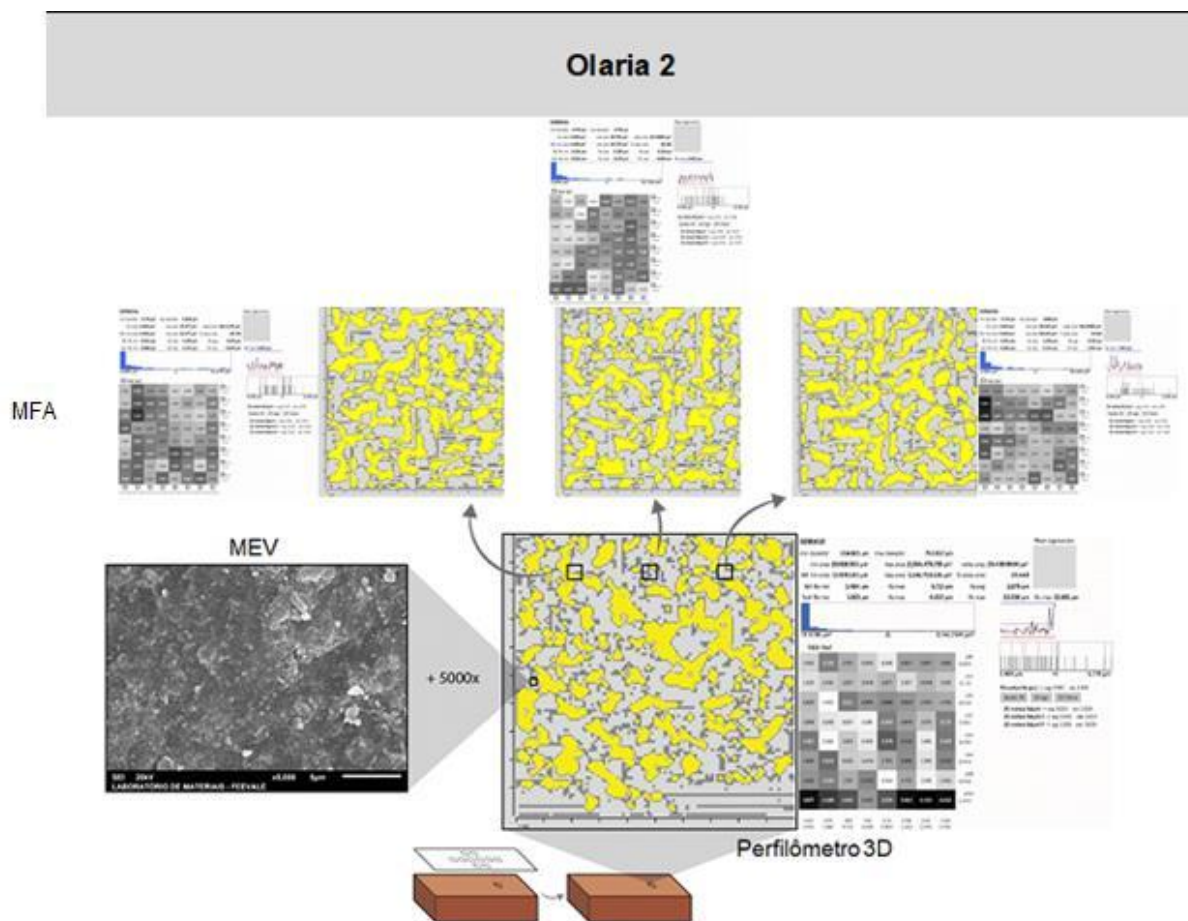


Figura 66 - Análise comparativa entre as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser e MFA, e as imagens de MEV das diferentes olarias

(continuação)

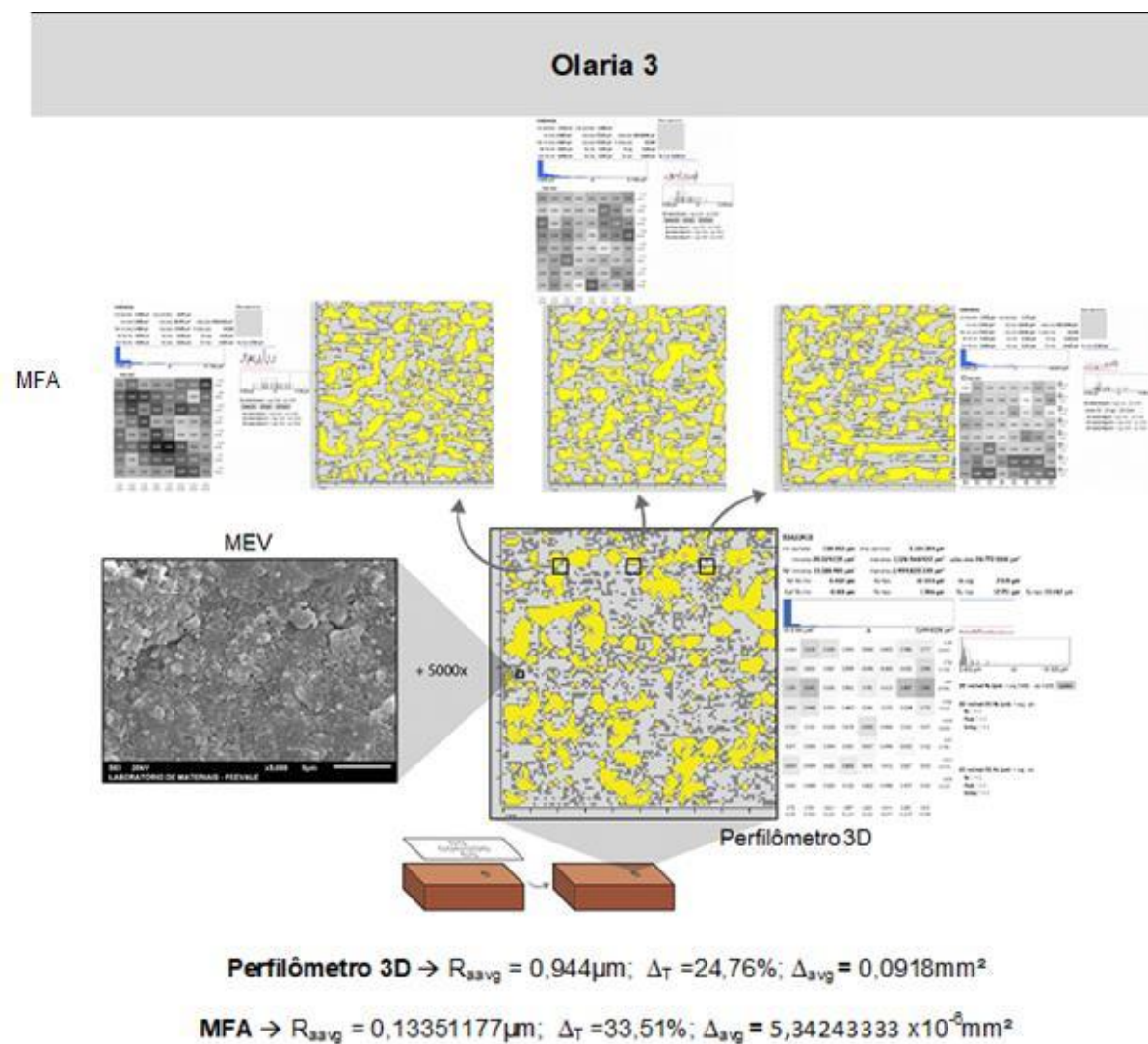


Figura 66 - Análise comparativa entre as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser e MFA, e as imagens de MEV das diferentes olarias

(continuação)

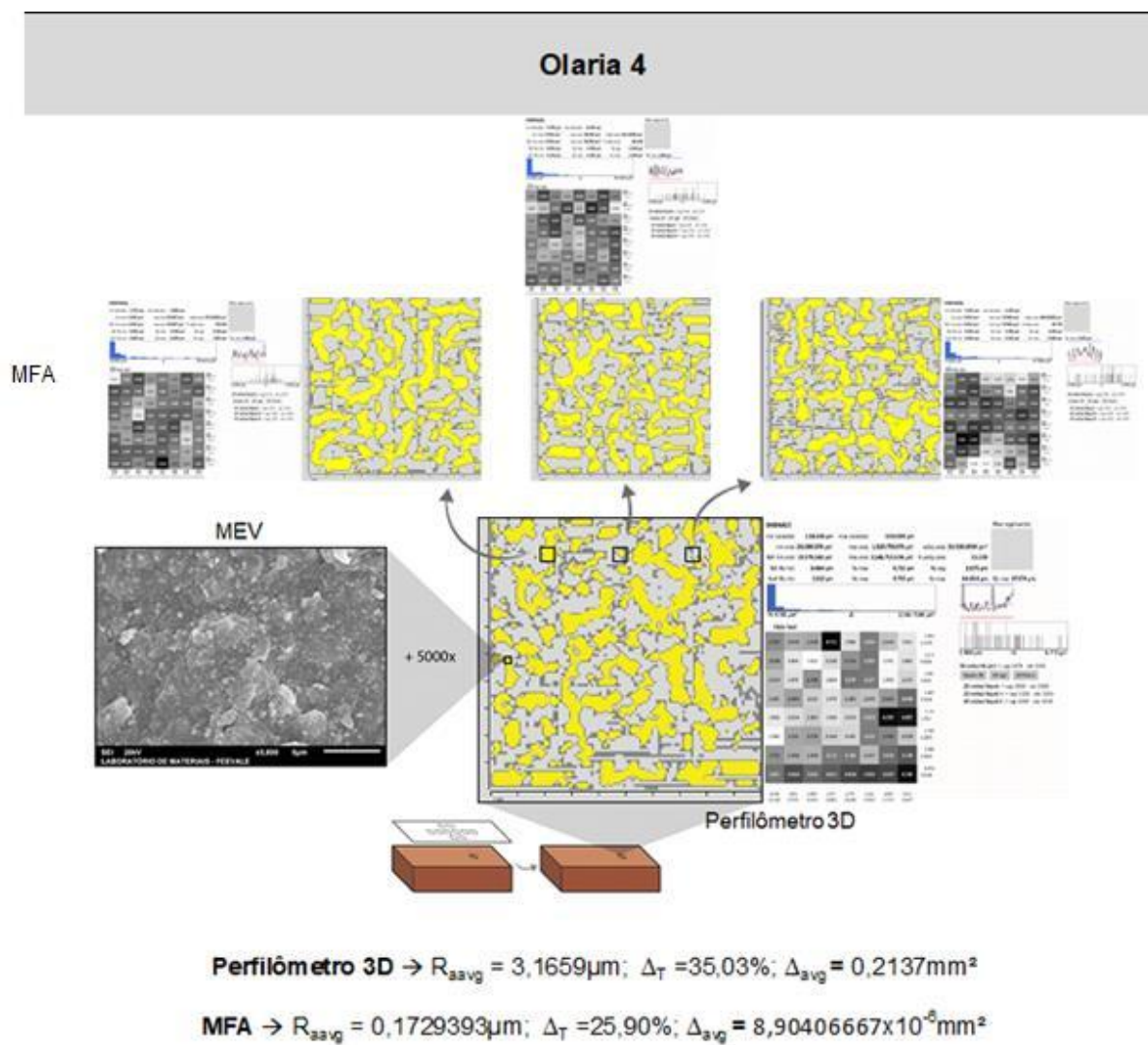
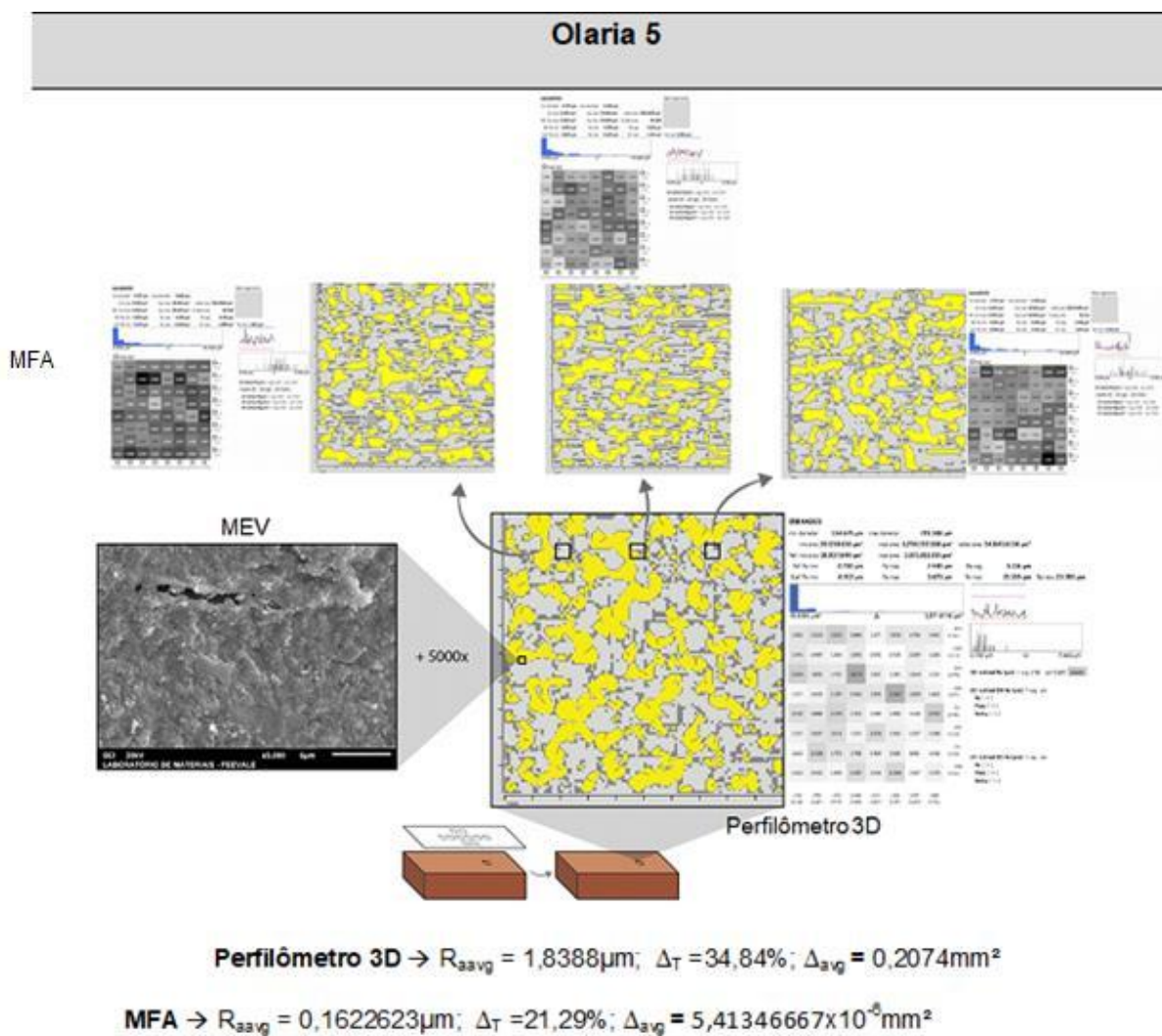


Figura 66 - Análise comparativa entre as assinaturas de rugosidade determinadas a partir das nuvens de pontos capturadas por perfilômetro tridimensional a laser e MFA, e as imagens de MEV das diferentes olarias

(conclusão)



Fonte: Própria Autora (2021)

Nas imagens obtidas na Figura 66, percebe-se claramente nos três métodos de aquisição de dados e imagens que os blocos cerâmicos apresentam diferenças de rugosidade, essa diferença é mais expressiva nos dados obtidos pelo perfilômetro 3D, uma vez que o método não utiliza contato para aquisição dos dados e o laser captura dados de profundidade com maior exatidão, além de proporcionar uma medição de área maior.

Uma limitação das medições por MEV e MFA diz respeito às pequenas regiões de análise, o que limita a extrapolação das características observadas nessas

imagens para o restante da superfície. As imagens obtidas com o MEV apresentam fortes indícios de similaridade com os dados obtidos na análise 3D.

Os resultados obtidos com o MFA apresentam valores inferiores aos obtidos no perfilometro 3D, porém, apresentam para algumas regiões comportamentos similares de coeficientes de rugosidade.

Conclui-se com os dados obtidos na Figura 66 que a análise gerada em 3 regiões de 50x50 μ m de um bloco cerâmico não são representativas para determinar a rugosidade da superfície, quando a intenção está em correlacionar os dados de rugosidade com a aderência entre substrato e revestimento. Além disso, o custo para realização do ensaio é alto e o procedimento de preparação das amostras é complexo, muitas vezes impossibilitando as pesquisas de analisarem números elevados de amostras.

Salientando que a escala nanométrica não é um fator interessante para representar a rugosidade de substratos cerâmicos e vincula-los com a aderência, pois muitas vezes os diâmetros dos grãos das matrizes cimentícias são superiores aos dados de rugosidade obtidos pelo MFA em escala nanométrica, impossibilitando qualquer relação entre aderência por intertravamento mecânico.

4.5.4 Caracterização multiescalar de rugosidade

Os parâmetros de rugosidade de blocos são definidos por vários fatores e sofrem influência de diversas causas combinadas desde a matéria prima, eficiência dos equipamentos de homogeneização, tipo de forno, capacidade do forno, ciclo de queima, processo de resfriamento, armazenamento, distribuição e comercialização e assim, faz-se importante a análise estatística aplicada aos resultados da medição da rugosidade possibilitando identificar a contribuição das variáveis no estudo.

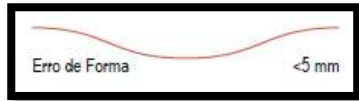
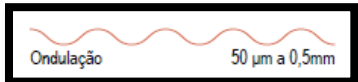
No estudo os parâmetros foram avaliados estatisticamente a fim de analisar a rugosidade da superfície dos blocos cerâmicos, além da realização de uma análise multiescalar, onde cada método buscou auxiliar no entendimento dos comportamentos das rugosidades dos substratos.

A abordagem multiescalar, deste estudo, compreendeu a diferença entre os métodos aplicados na determinação da rugosidade de superfícies e está associada à capacidade de análise de parâmetros e da utilização de perfis modificados.

O Quadro 2 apresenta a classificação multiescalar para blocos cerâmicos obtida com os resultados desta tese.



Quadro 3 - Classificação multiescalar de blocos cerâmicos

(continua)

Classificação Multiescalar	Princípio da obtenção dos dados	Classificação do Bloco cerâmico	Perfil de determinação
Macroescala	<p>O material é considerado homogêneo e a superfície pode ser considerada lisa ou estriada. Utilizou-se como parâmetro de dados a NBR ISO 8404 (ABNT, 1984);</p> <p>“Não recomendado para análise de parâmetro de rugosidade de blocos cerâmicos vinculado ao intertravamento mecânico do revestimento e do substrato”.</p>	<p>ERRO DE FORMA</p> <p>RUGOSIDADE <5mm</p>	
Mesoescala	<p>Permite analisar partículas de cada componente do material heterogêneo e a topografia depende do local analisado podendo ser lisa ou rugosa. Utilizaram-se como referência os dados da NBR ISO 8404 (ABNT, 1984) e também os dados de rugosidade média definidos no estudo;</p> <p>“Não recomendado para análise de parâmetro de rugosidade de blocos cerâmicos vinculado ao intertravamento mecânico do revestimento e do substrato”.</p>	<p>ONDULAÇÃO</p> <p>RUGOSIDADE 50µm a 5mm</p>	

Quadro 4 - Classificação multiescalar de blocos cerâmicos

(conclusão)

Classificação Multiescalar	Princípio da obtenção dos dados	Classificação do Bloco cerâmico	Perfil de determinação
Microescala	Apresenta topografia através dos picos e vales, rugosidade média, área de vales médios, picos máximos e vales mínimos para analisar através do perfilômetro 3D; <i>“Recomendado para análise de parâmetro de rugosidade de blocos cerâmicos vinculado ao intertravamento mecânico do revestimento e do substrato”.</i>	RUGOSIDADE 0,025µm a 50µm	
Nanoescala	Determina a microrugosidade do material através do MFA. <i>“Não recomendado para análise exclusiva do parâmetro de rugosidade de blocos cerâmicos vinculado ao intertravamento mecânico do revestimento e do substrato”.</i>	NANO RUGOSIDADE < 0,025µm	

Fonte: Própria Autora (2021)

A escolha do método pode ser relacionada com o erro introduzido na operação, além do número de amostras necessárias para a modelagem 3D dos blocos cerâmicos, dos custos de manutenção dos equipamentos e tempos de trabalhos para os processamentos dos dados. Diante disto, considera-se que as análises visuais são macroescalares e mesoescalares e não representam a rugosidade dos substratos cerâmicos, visto que não analisam picos e vales, apenas erro de forma e ondulação. Podem gerar dados imprecisos da rugosidade da superfície do substrato, causando distorção da análise dos fatores intervenientes a aderência entre substrato e revestimento. A análise em nanoescala onde a leitura da micro rugosidade é realizada em uma área de dimensões reduzidas (inferior a 50x50µm), não representa a real rugosidade de toda a superfície do substrato cerâmico, causando distorções nos parâmetros de rugosidade e impedindo a correlação com os fatores de aderência por intertravamento mecânico entre o substrato e a matriz cimentícia, visto que, a

superfície de análise utilizada nessa classificação é, muitas vezes, inferior aos diâmetros das partículas utilizadas nas matrizes cimentícias.

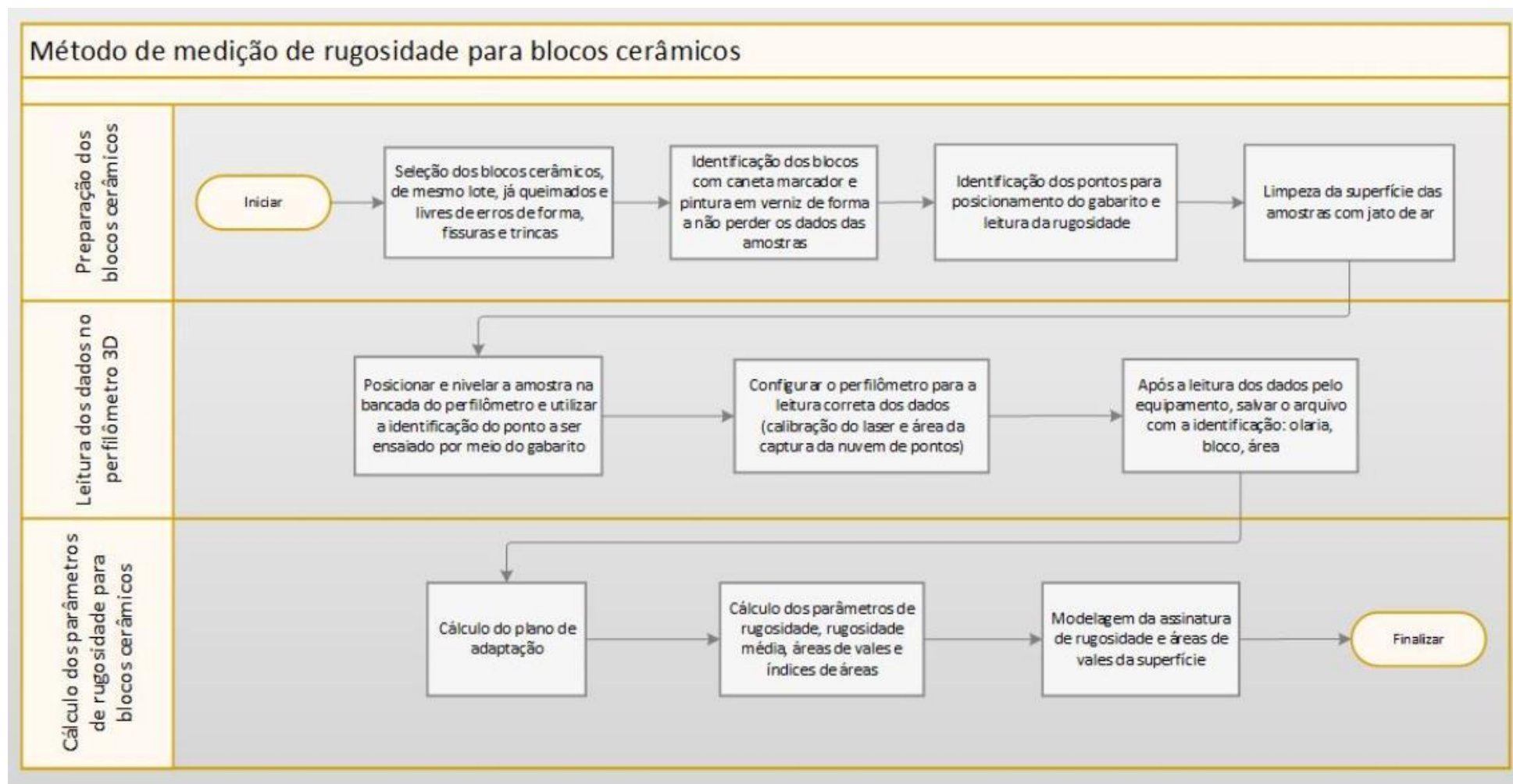
Por isso, após os diversificados métodos para análise de medição de blocos cerâmicos conclui-se que a rugosidade deve ser analisada com equipamentos que permitam as medições entre $0,025\mu\text{m}$ e $0,50\mu\text{m}$, considerada a faixa ideal para analisar os parâmetros de rugosidade de blocos cerâmicos e correlacionar com os fatores de aderência.

Com isso, finaliza-se o estudo com a proposição do método de determinação de rugosidade de blocos cerâmicos, apresentado no próximo tópico.

4.5.5 Metodologia proposta para quantificação e classificação de rugosidade de blocos cerâmicos

A determinação da rugosidade de blocos cerâmicos, segundo as avaliações realizadas neste estudo, deve ser realizada a partir da aquisição de dados por um perfilômetro 3D e a determinação dos parâmetros de rugosidade propostos. A Figura 66 descreve as etapas necessárias para determinar a rugosidade de blocos cerâmicos

Figura 68 - Proposta de método de medição de rugosidade para blocos cerâmicos



Fonte: Própria Autora (2021)

A definição da rugosidade de uma superfície é fundamental para avaliar a aderência de um adesivo a um determinado substrato. Na construção civil, deficiências de aderência geram inúmeros problemas de descolamentos localizados de argamassas de revestimento, diminuição da capacidade portante de alvenaria estrutural e desafios para especificação de reforços que exigem a aderência de novos materiais sobre elementos estruturais de concreto. Os custos associados à diminuição de durabilidade decorrentes de problemas patológicos são substanciais, chegando a superar o total de investimentos em novas construções na Europa (FLORES-COLEN; DEBRITO, 2010). As publicações voltadas à determinação da rugosidade ainda são, na absoluta maioria, qualitativas, e não permitem estimar a influência desta propriedade na aderência de um adesivo. Desta forma, o método desenvolvido, além de sua originalidade, pode impactar fortemente no estudo da aderência em materiais de construção civil, gerando uma substancial diminuição nos custos decorrentes dos problemas citados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais de cada etapa do estudo.

5.1 ESTUDO PRELIMINAR

Toda a análise realizada no Estudo Preliminar foi qualitativa. A visualização da topografia da superfície de blocos cerâmicos foi realizada com uso de microscopia eletrônica de varredura, sendo possível verificar que blocos sinterizados sob diferentes temperaturas de queima possuem diferentes rugosidades.

A conclusão obtida no ESTUDO PRELIMINAR, que direcionou a próxima etapa, foi que há necessidade do desenvolvimento de um método adequando para quantificação de rugosidade média de superfícies de blocos cerâmicos.

5.2 ETAPA 1

A avaliação da qualidade das superfícies dos materiais por meio de medições, e análise de parâmetros de rugosidade são conhecidos, conforme Santos e Júlio (2013), Moreau, Roudet e Gentil (2014), Berger *et al.* (2014), por ser uma forma eficaz de determinar a qualidade ou padronização das superfícies. A possibilidade de computar os resultados de forma localizada, e através da divisão dos substratos e organização hierárquica, possibilita uma ferramenta de controle precisa para comparação e avaliação da qualidade superficial dos substratos.

As ferramentas desenvolvidas seguindo os conceitos definidos pelos trabalhos de Santos e Júlio (2013) e Moreau, Roudet e Gentil (2014), se mostraram eficazes para análise e avaliação de rugosidade, e trazem uma nova e vantajosa visão sobre a análise da rugosidade superficial, uma vez que permitem localização e maior nível de detalhe para avaliação dos coeficientes de rugosidade de superfícies e facilitam a análise comparativa entre diferentes superfícies de amostra.

5.3 ETAPA 2

Em relação à metodologia de aquisição dos substratos realizada neste trabalho, é possível estabelecer padronização, repetitividade e manter a isenção de variáveis

que causam falhas no processo de leitura dos dados e, conseqüentemente, nos resultados obtidos. Com os resultados obtidos na pesquisa, recomenda-se padronização para posicionar os substratos no equipamento de aquisição de dados 3D, e também os cuidados com o substrato evitando avarias.

Observa-se, nos dados obtidos pelo equipamento 2D, que existe diferença em relação à posição de medição das amostras na mesma direção, em linhas paralelas entre si. Estimou-se que esta anisotropia dos blocos cerâmicos está relacionada com a alta variabilidade na composição da massa cerâmica utilizada para a fabricação dos substratos de cerâmica vermelha, gerando alterações na rugosidade em escala micrométrica, e não apenas devido às imperfeições geradas no processo de extrusão do bloco.

Pode-se observar que o local de medição 2D no substrato de cerâmica vermelha modifica o parâmetro de rugosidade porque, dependendo da posição de amostragem, existem diferenças em R_a , seja entre linhas na mesma direção ou em direções diferentes. Com isto, conclui-se que a rugosidade de um bloco de cerâmica vermelha não deve ser determinada a partir dos dados de medição 2D em um único local, concordando com as suposições de Sampaio e Augustin (2014) e Klingvall *et al.* (2016).

Ranuras geradas na fase da produção dos blocos, em função do contato entre a massa cerâmica (mistura das argilas com água) e as paredes do molde da extrusora durante o processo de extrusão, como menciona Sahoo (2011), geram diferentes valores de R_a para uma mesma cerâmica, quando determinada em diferentes direções de amostragem (vertical e horizontal) usando o método 2D.

Conclui-se que a rugosidade de um bloco de cerâmica vermelha não deve ser determinada a partir dos dados de medição 2D em um único local, comprovando as suposições de Sampaio e Augustin (2014) e Klingvall *et al.* (2016).

A determinação da rugosidade de blocos cerâmicos por meio de métodos bi e tridimensionais resulta em parâmetros de rugosidade diferentes. Nos substratos de cerâmica vermelha estudados, um R_a significativamente maior é observado usando o Método 3D, quando comparado ao método de aquisição de dados 2D. A diferença da R_a em função da medição por diferentes métodos, também é observado por Cristea *et al.* (2018) em substratos diferentes.

Além da heterogeneidade do substrato de cerâmica vermelha, um segundo motivo para a diferença na rugosidade, entre os dois métodos de medição, está na

resolução do equipamento 3D (que faz a aquisição de dados por feixe de laser), enquanto a aquisição de dados do equipamento 2D depende do tamanho da agulha podendo gerar valores de R_a menores, pois, muitas vezes, a agulha não consegue entrar nos picos e vales que têm uma configuração de alta amplitude e alta frequência, enquanto o laser usado no método 3D pode ler esses picos e vales com uma maior resolução de leitura, determinando parâmetros de rugosidade maiores do que os obtidos no método 2D. Estima-se que o menor desvio padrão, observado na análise 2D, ocorre porque com o método de contato apenas um perfil de superfície é capturado e vários vales foram atenuados, de acordo com as dimensões da agulha, enquanto no método tridimensional, além de capturar vales com maior amplitude e frequência, é analisada uma área maior, o que permite a captação de uma maior quantidade de dados de picos e vales para a determinação do parâmetro de rugosidade.

Diante da discussão dos resultados, salienta-se que a análise pelo método 2D não é adequada para determinar a rugosidade de blocos de cerâmica vermelha, uma vez que análise 2D gerou erros significativos, porque não apresentou sensibilidade suficiente para leitura adequada das profundidades dos vales existentes, desconsiderando, no processo, a heterogeneidade superficial dos blocos. O método 2D não quantifica adequadamente as listras de extrusão, rachaduras resultantes do processo de queima, fissuras e outras imperfeições ocasionadas na superfície.

Além disso, o método 2D, em sua forma convencional de análise, realizou a leitura de dados em uma única posição e orientação do rugosímetro 2D, que, conforme mostrado nos resultados, não é representativo para determinar a rugosidade da superfície, pois um único perfil de rugosidade não representa a rugosidade de uma superfície composta por materiais heterogêneos, como os blocos cerâmicos.

Existem diferenças significativas na determinação da rugosidade pelo método 3D, em comparação com o método 2D. Isso pode ser atribuído ao fato de que o método 3D analisa a superfície como um todo, e não apenas uma linha, portanto, não tem influência de posição e orientação.

Além disso, outro fator relevante é a resolução dos dados de leitura do equipamento. O perfilômetro a laser 3D tem maior alcance para medir picos e vales na superfície. Por fim, entende-se que a determinação da rugosidade em blocos cerâmicos deve necessariamente ser realizada com o uso de equipamentos de

aquisição de dados tridimensionais, devido à melhor resolução e precisão proporcionada pelo método 3D, o que permite a análise em diferentes escalas.

Tendo em vista as diferenças entre os métodos de determinação da rugosidade, conclui-se que o método que melhor representa a rugosidade da superfície de um bloco cerâmico é o método 3D.

Com a ETAPA 2 do trabalho, conclui-se que o estudo contribuiu para a determinação de parâmetros de rugosidade de blocos cerâmicos, validando a metodologia que é padronizada para a execução dos experimentos e garantindo qualidade na aquisição de dados e nos resultados obtidos.

5.4 ETAPA 3

Esta etapa do estudo apresentou uma proposta de computação de rugosidade de superfícies a partir de uma subdivisão de planos (um plano para cada região da *quadtree*) e a partir dos pontos que pertencem a cada região. O método também apresentou novos parâmetros para análise de áreas de adesão, relacionado à superfície de contato, com parâmetros que podem ser utilizados para avaliação quantitativa de área de adesão.

Os resultados demonstram que o método é eficaz na determinação de rugosidade, e que os parâmetros relacionados a área (Δ_T e Δ_{avg}) podem ser utilizados para comparar amostras em condições diferentes de produção, em relação a área de adesão entre o substrato cerâmico e a matriz cimentícia.

O método de computação de múltiplos planos permite uma modelagem geométrica mais próxima da topografia da superfície. Com isso, os valores de rugosidade calculados pelo método não consideram a ondulação da superfície e representam melhor microrugosidade, pois são uma evolução do método proposto na ETAPA 1 deste estudo, utilizado para o cálculo de R_a .

Os valores de rugosidade obtidos através da aplicação deste método são menores se comparados com os valores obtidos na ETAPA 1 do estudo, isto pode ser explicado pelo fato de que os planos mapeiam ondulações da superfície e como os planos foram ajustados em função do nível em que se encontram, os pontos ficaram mais próximos dos respectivos planos.

Os parâmetros de índice de área de vales (Δ_T) e área média de vales (Δ_{avg}) propostos para avaliação de área superficial de blocos cerâmicos, com intenção de

propor um coeficiente associado a superfície de contato, permitem avaliar e comparar amostras de superfícies, e também, indicar quais das superfícies favorecem a maior área de adesão, considerando a hipótese de que, quanto maior o valor do parâmetro analisado, maior a área de adesão proporcionada na superfície. Estima-se que o parâmetro (Δ_{avg}) possa indicar melhor a área de adesão da superfície, já que com esse fator há possibilidade de relacionar a dimensão e a quantidade de grãos da matriz cimentícia, que pode preencher regiões de área de vales da superfície, além de possibilitar uma possível correlação com a absorção de água inicial dos substratos. No entanto, o parâmetro Δ_t também, fornece características da capacidade de área de adesão da superfície do substrato cerâmico.

A suposição que é apresentada neste trabalho é que, se uma superfície apresenta um valor Δ_{avg} significativamente maior do que os parâmetros determinados na outra superfície, então esta superfície favorece a maior área de adesão e maior possibilidade de absorção de água inicial. Contudo, para superfícies com valores de Δ_{avg} similares, aquele que apresentar um valor médio de Δ_t maior favorece mais área de adesão e a absorção de água por capilaridade nos primeiros minutos de contato com o substrato. É relevante destacar que, apesar dos parâmetros realizarem uma avaliação matemática correta sobre a área das superfícies, é necessário a experimentação com testes físicos para se obter diagnósticos mais precisos e a validação destes parâmetros.

5.5 ETAPA 4

Analisando os parâmetros de rugosidade, conclui-se que a R_a pode ser utilizada para representar os cinco maiores picos e os cinco vales mais profundos de uma superfície de blocos cerâmicos. Um único pico máximo e um único vale mais profundo não devem ser utilizados para representar a real rugosidade de uma superfície de blocos cerâmicos.

A avaliação de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura demonstra que as superfícies que visualmente apresentam maior e menor quantidade de área de vales são as que apresentaram, a partir do método analítico desenvolvido, estas características.

Como as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura podem não representar a real rugosidade de uma superfície, uma vez que abrangem uma área

pequena de visualização, não se recomenda classificar rugosidades de superfícies de blocos cerâmicos exclusivamente por análises qualitativas de escalas microestruturais.

Os dados obtidos com o MFA de 3 regiões de 50x50 μ m de um bloco cerâmico, embora não sejam representativos para determinar a rugosidade da superfície, indicam uma provável coerência de comportamento com os resultados da análise de rugosidade com o perfilômetro 3D, uma vez que as olarias com os menores valores de R_a e Δ_{avg} e com os maiores valores de R_a e Δ_{avg} são as mesmas segundo ambos os métodos de aquisição de dados (3D e MFA). Entretanto, a escala nanométrica não é adequada para representar a rugosidade de substratos cerâmicos e vinculá-los com a aderência da argamassa, considerando-se que os diâmetros dos grãos das matrizes cimentícias são frequentemente superiores aos valores de rugosidade obtidos pelo MFA (que realiza medições em escala nanométrica).

Após a análise multiescalar com os métodos para análise de medição de blocos cerâmicos conclui-se que a rugosidade deve ser analisada com equipamentos que permitam as medições entre 0,025 μ m e 0,50 μ m, considerada a faixa ideal para analisar os parâmetros de rugosidade de blocos cerâmicos e correlacionar com os fatores de aderência.

Por fim, conclui-se que o método para determinação de rugosidade de blocos cerâmicos proposto neste estudo, com aquisição de dados pelo perfilômetro 3D, é adequado para a avaliação da rugosidade de um substrato cerâmico, sendo possível o mapeamento da superfície, a reprodução dos dados e a classificação da rugosidade do substrato cerâmico.

5.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verificou-se, durante a pesquisa, oportunidade de novas variáveis a serem analisadas, conforme as apresenta:

- a) Determinação dos diâmetros das áreas de vales e dos volumes dos vales analisados na pesquisa como complementação dos parâmetros de rugosidade;
- b) Aplicação de matrizes cimentícias sobre as superfícies dos blocos cerâmicos analisados na tese a fim de correlacionar os dados de rugosidade com a aderência entre substrato e matriz cimentícia;

- c) Análise da reologia de matrizes cimentícias e a relação com os parâmetros de rugosidade;
- d) Relação entre diâmetros de partículas dos aglomerantes e agregados das matrizes cimentícias e os parâmetros de rugosidade.
- e) Análise da composição mineralógica e da molhabilidade dos substratos cerâmicos;

REFERÊNCIAS

- ALNOUSH, Wajdi et al. Impacto da rugosidade da superfície da calcita na avaliação da molhabilidade: análise de interferometria e microscopia de força atômica. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 203, p. 108679, 2021.
- ALVES, Marcelo L.; FERREIRA, Bruno B.; LETA, Fabiana R. Evaluación de Parámetros de Rugosidad usando Análisis de Imágenes de Diferentes Microscopios Ópticos y Electrónicos. **Información Tecnológica**, v. 22, n. 4, p. 129-146, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C67**, Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile, Philadelphia, PA. 2003.
- ANTONOVA, Anna *et al.* Efeito da rugosidade da superfície da fibra de aço na molhabilidade e da pasta de cimento próxima à superfície da fibra. **Construção e Materiais de Construção**, v. 289, p. 123-139, 2021.
- ARNOLD, Daiana C.M.; OLIVEIRA, Valéria C de.; KAZMIERCZAK, Claudio d.S.; TONIETTO, Leandro; MENEGOTTO, Camila W.; GONZAGA, Luiz, Jr.; ANDRÉ DA COSTA, Cristiano; VERONEZ, Maurício R. A Critical Analysis of Red Ceramic Blocks Roughness Estimation by 2D and 3D Methods. **Remote Sensing**. v.13, no. 4: 789, 21 Feb. 2021
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404**: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos - Procedimento Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528-2**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2019
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528-2**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração Parte 2: Aderência ao substrato. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. **NBR 13529:** Revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749:** Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258:** Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1:** Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575.** Edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1** Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

BAGHERIFARD, Sara; GHELICHI, Ramin; GUAGLIANO, Mario. Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening. **Applied Surface Science**, v. 258, p. 6831-6840, jul. 2012.

BARBOSA, W. S.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Alteração do Comportamento Reológico de Pastas Devido à Presença de Base Porosa. VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologias de Argamassas. **Anais [...]**. Curitiba 2009, p.1-15.

BARRIOS-MURIEL; JORGE & SALGADO, D. & CAMBERO, I. & ALONSO, F. & GONZÁLEZ, A.G.. An approach for Surface Roughness Filtering as an alternative to ISO Standard. **Procedia Manufacturing**. 41. 674-681, 2019.

BAUER, E.(Org.) **Revestimentos de Argamassa:** Características e Peculiaridades. Brasília, DF. SINDUSCON, 2005.

BAUER, L. A. F (Org.). **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC: 2008.

BÉLAIR, Stéphane et al. **Boundary layer and shallow cumulus clouds in a medium-range forecast of a large-scale weather system**. Monthly weather review, v. 133, n. 7, p. 1938-1960, 2005.

BERGER *et al.* State of the art in surface reconstruction from point clouds. *In: Eurographics 2014 - State of the Art Reports*, Strasbourg, France, vol. 1, pp. 161–185, Apr. 2014.

BICO, J.. **Mécanismes d'imprégnation**: Surfaces texturées, bigouttes, pourex. Thèse de Doctorat Université de Paris VI, 2000.

BRITISH STANDARD INSTITUTE LONDON, BS 3921 **Structural use of concrete. Part 1**: Code of practice for design and construction, 1997.

CARAZEK, H. **Aderência de Argamassas à Base de Cimento Portland a Substratos Porosos** – Avaliação dos Fatores Intervenientes e Contribuição ao Estudo do Mecanismo da Ligação. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

CARAZEK, H. **Estudo Experimental em alvenaria estrutural**: Resistência à Compressão e Resistência de Aderência. Dissertação (Mestrado), CPGEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1990.

CARAZEK, H. Argamassas. *In: Isaia, G.C. (ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 892-944.

CARAZEK, H. Argamassas. *In: Isaia, G.C. (1 ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 863-904.

CIMENTO ITAMBÉ. **Resumo das especificações da ABNT, 2016**. Disponível em http://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/itambe2016/_assets/pdf/especificacoes_abnt.pdf. Acesso em: 9 de jun. 2018.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **NP EM 771-7**: Especificação para unidades de alvenaria - Parte 1: unidades de alvenaria de argila. Bruxelas, Bélgica, 2006.

CONTARDI, Ignacio; CORNAGLIA, Laura; TARDITI, Ana M. Effect of the porous stainless steel substrate shape on the ZrO₂ deposition by vacuum assisted dip-coating. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, p. 7986-7996, mar. 2017.

COSTA, E. B. C. **Análise de Parâmetros Influentes na Aderência de Matrizes Cimentícias**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

COSTA, E.B.C; KUROKAWA, F. A.; JOHN, V. M. Modelagem simplificada para estimativa do potencial de penetração de partículas em substratos porosos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 25-34, jan./mar, 2013.

CORTÉS-SANDOVAL, Gabriela; MARTÍNEZ-CASTAÑÓN, Gabriel A.; PATIÑO-MARÍN, Nuria; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, Pánfilo R.; LOYOLA-RODRÍGUEZ, Juan P. Surface roughness and hardness evaluation of some base metal alloys and denture base acrylics used for oral rehabilitation. **Materials Letters**, v. 144, p. 100-105, abr. 2015.

COURARD, L. NÉLIS, M. Surface analysis of mineral substrates for repair Works: roughness evaluation by perfilometry and surfometry analysis. **Magazine of Concrete Research**, v. 55, n. 4, p. 355-366, 2003.

COUVIGNOU, Eliana Macêdo. **Análise da conformidade e caracterização da matéria-prima empregada na fabricação de blocos cerâmicos na Região Metropolitana de Salvador**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

CRISTEA, G.C.; GEORGESCU, C.; SUCIU, C.; DELEANU, L. A 2D and 3D study of the texture of wear scars for soybean oil additivated with nano graphite. **Journal of Physics: Conference Series**, 2018.

CULTRONE, G. *et al.* Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. **Journal of the European Ceramic Society**, mar. 2004, v. 24, n. 3, p. 547-564.

CZARNECKI, S. *et al.* Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 67, p. 3-13, 2016.

DA FONSECA, Ariéli Daieny; FARIA, Glaucia Amorim; DOS SANTOS, Luiz Firmino. **Classificação de coeficientes de variação em experimentos suinícolas**, 2018.

DAPPER, S. T. H. **Desenvolvimento de textura bioinspirada no líquen parmotrema praesorediosum visando a adesão da argamassa de revestimento em painéis de concreto**. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em design, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2013.

DELAUNAY, B. N. “**Sur la sphère vide**”. *Izvestia Akademia Nauk SSSR*, VII Seria, Otdelenei Matematicheskii i Estestvennyka Nauk, vol. 7, p. 793-800, 1934.

DORNINGER, PETER; PFEIFER, NORBERT. Uma abordagem 3d automatizada abrangente para extração, reconstrução e regularização de edifícios a partir de nuvens de pontos de varredura a laser aerotransportadas. **Sensores**, v. 8, n. 11, pg. 7323-7343, 2008.

EK, Rebecca K.; RÄNNAR, Lars-Erik; BÄCKSTÖM, Mikael; CARLSSON, Peter. The effect of EBM process parameters upon surface roughness. **Rapid Prototyping Journal**, v. 22, p. 495-503, 2016.

FERNANDES, M. C. S.; PAULIN FILHO, P. I.; MORELLI, M. R. **Análise da superfície de grés porcelanato por microscopia de força atômica**. *Cerâmica*, v. 57, p. 173-179, 2011.

FIP MODEL CODE 2010. **First complete draft – volume 1. Bulletin 55**. In: Comité Euro-International du Béton. Secretariat permanent. Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland, 2010.

FLORES-COLEN, I.; DE BRITO, J. **A systematic approach for maintenance budgeting of buildings façades based on predictive and preventive strategies**. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 24, n. 9, p. 1718–1729, 2010.

FOUCHIER, Marc; PARGON, Erwine; BARDET, B. An atomic force microscopy-based method for line edge roughness measurement. **Journal of Applied Physics**, v. 113, 2013.

GADRI, Karima; GUETTALA, Abdelhamid. Evaluation of bond strength between sand concrete as new repair material and ordinary concrete substrate (The surface roughness effect). **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 1133-1144, dez 2017.

GARBACZ, Andrzej; COURARD, Luc; KOSTANA, Katarzyna. Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems. **Materials Characterization**, v. 56, p. 281-289, jun 2006.

GARBACZ, A.; COURARD, L.; BISSONETTE, B. A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, v.61, n.01, p. 73-84, 2013.

GAZULLA, M. Fernanda; SÁNCHEZ, E; GONZÁLEZ, J. M; PORTILLO, Maria. C; ORDUÑA, Mónica. Relationship between certain ceramic roofing tile characteristics and biodeterioration. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, p. 2753-2761, Dez. 2011.

GE, Qi *et al.* **Active origami by 4D printing**. **Smart materials and structures**, v. 23, n. 9, p. 094007, 2014.

GHUMATKAR, A., BUDHE, S., SEKHAR, R., BANEJA, M. & DE BARROS, S. **Influence of adherend surface roughness on the adhesive bond strength**. *Lat. Am. J. Solids Struct.* 16, 1–15 (2016). DOI 10.1590/1679-78253066.

GOMES, R. K. *et al.* An algorithm for automatic detection and orientation estimation of planar structures in lidar-scanned outcrops. **Computers & Geosciences**, v.90, 170 – 178, 2016.

GRIGORIADIS, Konstantinos. Use of laser interferometry for measuring concrete substrate roughness in patch repairs. **Automation in Construction**, v. 64, p. 27-35, abr. 2016.

GRZELKA, M., MAJCHROWSKI, R. & SADOWSKI, Ł. Investigations of concrete surface roughness by means of 3d scanner. **Prace Instytutu Elektrotechniki**, v. z 251, 97-108, 2011.

GURAU, Lidia; PETRU, Adrian; VARODI, Anca; TIMAR, Maria C. The Influence of CO2 Laser Beam Power Output and Scanning Speed on Surface Roughness and Colour Changes of Beech (*Fagus sylvatica*). **Bio Resources**, v. 12, n. 4, p. 7395-7412, 2017.

HAO, Pengfei; LV, Cunjing; ZHANG, Xiwen. Freezing of sessile water droplets on surfaces with various roughness and wettability. **Applied Physics Letters**, v. 104, abr. 2014.

HAMEED, Noor Ali; ALI, Inbethaq M.; HASSUN, Hanan K. **Calculating surface roughness for a large scale SEM images by mean of image processing**. Energy Procedia, v. 157, p. 84-89, 2019.

HE, Zhi-hai; DU, Shi-gui; CHEN, Deng. Microstructure of ultra-high performance concrete containing lithium slag. **Journal of Hazardous Materials**, v. 353, p. 35-43, mar. 2018.

HENAO LONDOÑO, Juan Camilo. **Surface roughness estimation by 3D stereo SEM reconstruction**. Departamento de Física y Química.

HOLA, Jerzy; SADOWSKI, Łukasz; REINER, Jacek; STACH, Sebastian. Usefulness of 3D surface roughness parameters for nondestructive evaluation of pull-off adhesion of concrete layers. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 111-120, jun. 2015.

HUANG, Ming-Fong; LIN, Tsann-Rong; CHIU, Huan-Chung. Effect of machining characteristics on polishing ceramic blocks. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, p. 999-1005, jan. 2005.

INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR INSTITUTE (ICRI). Selecting and specifying concrete surface preparation for sealers, coatings, polymer overlays, and concrete repair. **Technical Guideline**, n. 310.2R, out. 2013.

JEOL. **JSM – 6510 Series Scanning Electron Microscope**. Disponível em: <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-6510series.html>. Acesso em 13 de junho de 2017.

JIAN, Liu; ENHUI, Lu; ENHUI, Wang; PENG, Ao. A new surface roughness measurement method based on a color distribution statistical matrix. **Measurement**, v. 103, p. 165-178, jun. 2017.

KAMARTHI, Sagar; SULTORNSANEE, Sivarit; ZEID, Abe. Recurrence quantification analysis to estimating surface roughness in finish turning processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, p. 451-460, out. 2016.

KAZHDAN, M., and HOPPE, H. Screened Poisson surface reconstruction. **ACM Transactions on Graphics**, v.32, n.3, pp. 29, 2013.

KAZHDAN, Michael; BOLITHO, Matthew; HOPPE, Hugues. Poisson surface reconstruction. *In: Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing*, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2006, SGP '06, pp. 61–70, Eurographics Association.

KAZHDAN BBA, Michele; VICHI, Alessandro; VULTAGGIO, G.; PALLARI, S.; PARAVINA, Rade; FERRARI, Marco. Effect of Finishing and Polishing on the Surface Roughness and Gloss of Feldspathic Ceramic for Chairside CAD/CAM Systems. **Operative Dentistry**, v. 42, p. 175-184, mar/abr, 2017

KAZMIERCZAK, C. S.; BREZEZINSKI, D. E.; COLLATO, D. 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, jan./jun. 2007.

KIEFER, T.*et al.*A multi-scale material model for the estimation of the transversely isotropic thermal conductivity tensor of fired clay bricks. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 40, 6200–6217, Dec. 2020.

KIMYAI, Soodabeh; SAVADI-OSKOEI, Siavash; AJAMI, Amir-Ahmad; SADR, Alireza; ASDAGH, Saeedeh. Effect of three prophylaxis methods on surface roughness of giomer. **Med Oral Patol Oral Cir Bucal**, v. 16, jan. 2011.

KLEIN, N. S.; BACHMANN, J.; AGUADO, A.; TORALLES-CARBONARI, B. Evaluation of the wettability of mortar component granular materials through contact angle measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1611-1620, 2012.

KOZUBAL, J., WRÓBLEWSKI, R., MUSZYŃSKI, Z., WYJADŁOWSKI, M. & STRÓŻYK, J. Non-deterministic assessment of surface roughness as bond strength parameters between concrete layers cast at different ages. **Materials (Basel)**, 13(11): 2542, Jun. 2020.

KRAKOWIAK, K. J, LOURENÇO, P. B. & ULM, F. J. Multitechnique investigation of extruded clay brick microstructure. **Journal of the American Ceramic Society**, v.94, 3012–3022, 2011.

L. Nan; P. Wonka. PolyFit: Polygonal Surface Reconstruction from Point Clouds, 201. **IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)**, 2017, pp. 2372-2380.

LAWRENCE, S. J.; CAO, H. T. Microstructure of the interface between brick and mortar. *In: International brick and mortar. In: International brick/block masonry conference, 8., 1988, Dublin. Proceedings...* Dublin: Elsevier Applied Science. v.1, p. 194-204, 1988.

LEE, Hyo-Sung; AHN, Ki-Won. A prototype of digital photogrammetric algorithm for estimating roughness of rock surface. **Geosciences Journal**, v. 8, n. 3, p. 333-341, set. 2004.

LE ROUX, S.; DESCHAUX-BEAUME, F.; CUTARD, T.; LOURS, P. Quantitative assessment of the interfacial roughness in multi-Layered materials using image analysis: Application to oxidation in ceramic-based materials. **Journal of the European Ceramic Society, Elsevier**, 2015, 35(3), pp.1063-1079.

LEGLER, H.; VICENZI, J.; BERGMANN, C. Caracterização comparativa de fundentes para emprego na indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**, v.14, n.4, 14–23, 2009.

LIMANDRI, Silvina; JOSA, Víctor G.; VALENTINUZZI, María C.; CHENA, M.; CASTELLANO, Gustavo. 3D scanning electron microscopy applied to surface characterization of fluorosed dental enamel. **Micron**, v. 84, p. 54-60, mai. 2016.

LIN, Tsann-Rong. A comparative study between smaller-the-better and normal-the-best quality characteristics when lapping ceramic blocks. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 31, p. 155-163, abr. 2006.

LU, G; LU, G. Q. M.; XIAO, Z. M. Mechanical properties of porous materials. **Journal of Porous Materials**, v. 6, n. 4, p. 359-368, 1999.

LUNGISANSILU, R. T. **A gestão da qualidade aplicada aos materiais de construção nas obras de edificações**. Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Curso de Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MA, Zhiyuan; ZHANG, Wei; GAO, Jianying; LI Lin and KRISHNASWAMY, Sridhar. Characterization of the interface roughness of coatings based on ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum, **AIP Conference Proceedings**, v.1806, 090021, 2017.

MARCHIORI, M. M. **Estudo de um Sistema de Medição a Laser na Análise da Textura da Superfície Gerada por Torneamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

MARSHALL, S. J.; BAYNE, S. C.; BAIER, R.; TOMSIA, A.; MARSHALL, G. W. A review of adhesion science. **Dental materials**, v. 26, n. 2, p. e11-e16, 2010.

MELO, A., COSTA E SILVA, A., TORRES, S., DELGADO, J. & AZEVEDO, A. Influence of the contact area in the adherence of mortar – ceramic tiles interface. **Construcion and Building Materials**, v. 243, 118274, 20 May. 2020.

MIRÓ, M. Martinez, VEITH, M.; LEE, J.; SOLDERA, F.; MÜCKLICH, F.; BENNEWITZ, R.; AKTAS, C. 3D and 2D structural characterization of 1D Al/Al₂O₃ biphasic nanostructures. **Journal of Microscopy**, v. 258, p. 113-118, jan. 2015.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments**. 5ª Ed. New York: Wiley, 2002, 696p.

MORAES, Cicero; Rosa, Everton da; Bonatto, Cínthia Caetano; Paulino Silva, Luciano (2020): Microscopia de Força Atômica no OrtoGOnBlender 3D. Figshare. **Book**. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12881198.v1>

MORENO JUNIOR, R.; SELMO, S. M. S.. Aderência de Argamassas de Reparo de Estruturas de Concreto. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2007.

MOREAU, Natacha; ROUDET, Céline; GENTIL, Christian. Study and Comparison of Surface Roughness Measurements. **Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique**, set. 2014.

MYSHKIN, N. L.; GRIGORIEV, A. Y.; CHIZHIK, S. A.; CHOI, K. Y.; PETROKOVETS, M. I. Surface roughness and texture analysis in microscale. **Wear**, v. 254, n. 10, p. 1001- 1009, 2003.

MULLAN, Francesca *et al.* Medição de mudanças de rugosidade superficial de esmalte não polido e polido após erosão. **PLoS ONE**, v. 12, ago. 2017.

MUNIZ, R. C. **A análise de risco aplicada a gestão da qualidade em processos produtivos de uma indústria de blocos de concreto**. Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Curso de Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

NAN, Liangliang; WONKA, Peter. Polyfit: Polygonal surface reconstruction from point clouds. In: Proceedings of the **IEEE International Conference on Computer Vision**. 2017. p. 2353-2361.

N.K Myshkin, M.I Petrokovets, & S.A Chizhik,. Simulation of real contact in tribology. **Tribology International**, v. 31, no. 1-3, pp. 79–86, 1998.

NORMANDO, David; TJÄDERHANE, Leo; QUINTÃO, Cátia Cardoso Abdo. A escolha do teste estatístico-um tutorial em forma de apresentação em PowerPoint. **Dental Press Journal of Orthodontics**, v. 15, n. 1, p. 101-106, 2010.

PAES, I.N.L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, 260 p. Brasília, 2004.

PAGNUSSAT, Daniel; MASUERO, Angela Borges. Avaliação da aderência de revestimentos de argamassa aplicados em substratos cerâmicos com diferentes condições superficiais. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 9.,2011, Minas Gerais. **Anais [...]**. Minas Gerais: UFJFMG/GT ARGAMASSAS, 2011.

PATRICIO, I., SANZ-LOBERA, A. & LOZANO, F. Comparative analysis of software measurement standard according to iso 5436-2. **Procedia Eng**. 132, pg. 864–871, 2015.

PEDRO, M.; EDUARDO, N. B. S. J. **Assessment of the shear strength between concrete layers**. In: Proceedings of the 8th fib PhD Symposium in Kgs, Lyngby, Denmark. 2010. p. 20-23.

PEREZ, F.; BISSONNETTE, B.; COURARD, L. Combination of mechanical and optical profilometry techniques for concrete surface roughness characterization. **Magazine of Concrete Research**, v. 61, p. 389-400, ago. 2009.

PHAN, V. T. **Relationship between the adhesive properties and the rheological behaviour of fresh mortars**. 2012. Tese de Doutorado. École normale supérieure de Cachan – ENS, France.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 11a. São Paulo, Nobel, 1985.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, 56 (2010) 237-243.

POLITO, G., DE 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.

POUR, Masoud. Simultaneous application of time series analysis and wavelet transform for determining surface roughness of the ground workpieces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, p. 1793-1805, jul. 2016.

PRETTO, M. E. J. **Influência da Rugosidade Gerada pelo Tratamento Superficial do Substrato de Concreto na Aderência do Revestimento de Argamassa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

PRETTO, Márcia E. J.; JACONDINO, Daniel T.; BONIN, Luis C.; MASUERO, Angela B. Análise da rugosidade de substratos de concreto com diferentes tratamentos superficiais, utilizando scanner tridimensional a laser. In: VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. **Anais [...]**. Curitiba, PR, mai. 2009.

PULKER, H. K.; PERRY, A. J.; BERGER, R. Adhesion. **Surface Technology**, v. 14, n. 1, p.25-39, 1981.

QUÉRÉ, D. Wetting and roughness. **Annual Review of Materials Research**, v. 38, p. 71-99, 2008.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX. Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability – TC 116 - PCD. **Materials and Structures**. Vol. 32, p. 174-179, 1999.

- REITHMEIER, Eduard; VYNNYK, Taras; SCHULTHEIS, **Thanin. 3D-measurement using a scanning electron microscope**. Applied mathematics and computation, v. 217, n. 3, p. 1193-1201, 2010.
- RIELLA, H. G.; FRANJNDLICH, E. U. DE C.; DURAZZO, M. **Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas**. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 3, 2002.
- RIZZATTI *et al.* Tipologia de Blocos Cerâmicos Estruturais: Influência da Geometria dos Blocos no Comportamento Mecânico da Alvenaria. *Revista Matéria*. V. 16, n. 2, pp.730-746. Rio de Janeiro, 2011.
- ROCHA, Hermes S.; MARQUES, Patricia A. A.; CAMARGO, Antonio P.; FRIZZONE, José A.; SARETTA, Ezequiel. Internal surface roughness of plastic pipes for irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 143-149, fev. 2017.
- ROSA, L. C. **Acabamento de superfícies: rugosidade superficial. OMA – Oficina Mecânica para Automação**. Universidade Estadual Paulista - UNESP. Unidade Diferenciada- Sorocaba/lperó. Engenharia de Controle e Automação. 2007.
- RUSS, John C.; RUSS, J. Christian. **Feature-specific Measurement of Surface Roughness in SEM Images**. Particle & Particle Systems Characterization, v. 4, n. 1-4, p. 22-25, 1987.
- SADOWSKI, Lukasz; CZARNECKI, Slawomir; HOLA, J. Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, v. 67, p. 3-13, jun. 2016.
- SADOWSKI, L.; MATHIA, L.G. Multi-scale metrology of concrete surface morphology: Fundamentals and specificity. *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 613–621.
- SAHOO, P. 1 - surface topography. In Davim, J. P. (ed.) **Tribology for Engineers**, 1 – 32 (Woodhead Publishing, 2011).
- SALEIRO, G. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using a fast-firing cycle. *Cerâmica*, v. 58, n. 347, p. 393-399, jul/set. 2012.
- SAMYN, Pieter; VAN ERPS, Jürgen; THIENPONT, Hugo. Relação entre perfilometria óptica sem contato e parâmetros de rugosidade AFM em papéis revestidos com nanopartículas preenchidas com óleo. *Medição*, v. 82, p. 75-93, 2016.
- SAMPAIO, Tony V. M. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 1. 2014.
- SANTOS, Pedro M. D.; JÚLIO, Eduardo N. B. S. A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 912-923, jan. 2013.

SANTOS, Andrey Mello dos et al. **Preparação e caracterização de catalisadores metálicos suportados de níquel em substrato de alumina obtidos por processos térmicos e plasma**. 2020.

SASSONI, E.; ANDREOTTI, S.; BELLINI, A.; MAZZANTI, B.; BIGNOZZI, M.C.; MAZZOTTI, C.; FRANZONI, E. Influence of mechanical properties, anisotropy, surface roughness and porosity of brick on FRP debonding force. **Composites Part B** 108 (2017) 257-269.

SATO, H.; O-HORI, M. **Surface roughness measurement using scanning electron microscope with digital processing**. 1987.

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 DAS ARGAMASSAS, 2003. São Paulo. **Anais[...]** São Paulo, 2003. p. 569- 581.

SCHALL, Oliver; SAMOZINO, Marie. Surface from scattered points. In: A Brief Survey of Recent Developments. **1st International Workshop on Semantic Virtual Environments**. 2005. p. 138-147.

SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K. ; LAUGESSEN, P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, v. 12, n. 4, 411-421, 2004.

SIEWCZYNSKA, M. Method for determining the parameters of surface roughness by usage of a 3D scanner. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 12, p. 83-89, mar. 2012.

SOUSA, Sérgio Dias Inglês. **Estudo das Superfícies Técnicas**. São Paulo: Nobel, 1980.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B.; PAGNUSSAT, D. T.; KIRCHHEIM, A. P. Influence of substrate texture on the tensile and shear bond strength on rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 298-307, 2016.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Analysis of main parameters affecting substrate-mortar contact área through tridimensional laser scanner. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 455, p. 16-23, 2015.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B.; KIRCHHEIM, A. P. Dispositivo para ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento em revestimentos: desenvolvimento e validação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 185-196, out./dez. 2016.

STOLZ, C.M. **Influência da Interação entre os Parâmetros Reológicos de Argamassas e a Área Potencial de Contato de Substratos na Aderência de Argamassas de Revestimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011

STOLZ, C. M. **Análise dos Principais Parâmetros que Influenciam na Área de Contato Substrato/Argamassa de Revestimento**. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

STOLZ, Carina M; MASUERO, Angela B. Analysis of Main Parameters that Affect Contact Area Between Mortar Rendering and Substrate: Use of 3D Laser Scanning Technique. **Recent Developments in Building Diagnosis Techniques**, v. 5, p. 21-35, fev. 2016.

TAERWE, Luc *et al.* **Código do modelo Fib para estruturas de concreto 2010**. 2013.

TAUBIN, Gabriel. Smooth signed distance surface reconstruction and applications. **Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications**, pp. 38–45, 2012.

THAMBOO, J. A.; DHANASEKAR, M. Characterisation of thin layer polymer cement mortared concrete masonry bond. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 71-80, May. 2015.

TONIETTO, Leandro. ***Um Novo Método para Avaliar os Coeficientes de Rugosidade e Áreas de Vale de Superfícies Adquiridas por Scanner a Laser***. Prelo, 2021. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, Unisinos, São Leopoldo, Prelo, 2021.

TONIETTO, L., GONZAGA, L., VERONEZ, M.R. *et al.* New Method for Evaluating Surface Roughness Parameters Acquired by Laser Scanning. **Scientific Reports**, n. 9, Article number 15038, 21 Oct. 2019.

TYKHONIUK, R.; TOMASA, J.; LUDING, S.; KAPPLC, M.; HEIM, L.; BUTTC, H. Ultrafine cohesive powders: From interparticle contacts to continuum behaviour. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 11, p. 2843-2864, 2007.

VAZ, F.; 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 (374). Apr-Jun 2019.

VENKATARAMA REDDY, BV; LAL, Richardson; NANJUNDA RAO, KS Classificação ideal do solo para blocos de solo-cimento. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 2, pág. 139-148, 2007.

WANG, Huixia; SHI, Hui; LI, Yangyang; Wang, Yanhui. The Effects of Leaf Roughness, Surface Free Energy and work of Adhesion on Leaf Water Drop Adhesion. **PLoS ONE**, v. 9, set. 2014.

WANG, R; PEETHAMBARAN, J; CHEN, D. Lidar point clouds to 3D urban models: a review. **IEEE. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote. Sens** 11, pg 606-627, 2018.

ZHANG, Guangcheng; KARAKUS, Murat; TANG, Huiming; GE, Yunfeng; ZHANG, Lu. A new method estimating the 2D Joint Roughness Coefficient for discontinuity surfaces in rock masses. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 72, p. 191-198, dez. 2014.