



Programa de Pós-Graduação em

Computação Aplicada

Doutorado Acadêmico

Leandro Tonietto

Um Novo Método para Avaliar os Coeficientes de Rugosidade e
Áreas de Vale de Superfícies Adquiridas por Scanner a Laser

São Leopoldo, 2021

Leandro Tonietto

UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAR OS COEFICIENTES DE RUGOSIDADE E ÁREAS
DE VALE DE SUPERFÍCIES ADQUIRIDAS POR SCANNER A LASER

Tese apresentada como requisito parcial para a
obtenção do título de Doutor pelo Programa de
Pós-Graduação em Computação Aplicada da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos —
UNISINOS

Orientador:
Prof. Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Jr

Co-orientador:
Prof. Dr. Cristiano André da Costa

São Leopoldo
2021

T665n Tonietto, Leandro.

Um novo método para avaliar os coeficientes de rugosidade e áreas de vale de superfícies adquiridas por scanner a laser / por Leandro Tonietto. – 2021.

104 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, RS, 2021.

Orientador: Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Jr.

Co-orientador: Dr. Cristiano André da Costa.

1. Assinatura de rugosidade da superfície. 2. Parâmetros de rugosidade. 3. Índice de áreas de vales. 4. Nuvem de pontos. I. Título.

CDU: 004.352:62-4

AGRADECIMENTOS

Primeiro, agradeço aos meus pais pelo amor, apoio, incentivo e investimento na minha educação. Obrigado também a minha esposa e meus filhos, que também me incentivam a obter conquistas e ir em frente, que tiveram paciência e compreensão nos momentos em que precisei me dedicar aos estudos e ao trabalho e não pude dar a devida atenção a eles, na compreensão de que o investimento de tempo de hoje é para colher frutos no futuro. Agradecimento também aos meus irmãos, cunhados (as) e sobrinhos, por acreditarem em mim e pelas palavras de incentivo.

Agradecimento a Siemens Healthneers GmbH, Alemanha, pelo financiamento parcial deste estudo e pelo auxílio financeiro para as publicações que foram originadas das pesquisas deste trabalho.

À UNISINOS pelo financiamento parcial recebido, bem como a seu corpo docente, colegas e mestres, que me proporcionaram oportunidades de pesquisa.

Agradeço ao pessoal do Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem (GMat), em especial o prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak, pela parceria nas pesquisas e artigos desenvolvidos em conjunto com este trabalho. Renderam bons artigos e temos a expectativas de outros mais.

Agradeço ao prof. Dr. Maurício Roberto Veronez por me apresentar uma oportunidade de estudo e que se tornou o assunto desta Tese.

Ao meu orientador, o prof. Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Jr. pelo apoio, pelo incentivo e por oportunizar o meu doutorado junto a Unisinos e a Siemens Healthneers, da Alemanha. Muito obrigado!!

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A avaliação da qualidade da superfície de um material é realizada através da análise de rugosidade de amostras de superfície. Diversas técnicas foram apresentadas para atingir esse objetivo, incluindo análise geométrica e análise de rugosidade de superfícies. A análise geométrica permite uma avaliação visual e subjetiva da rugosidade (uma avaliação qualitativa), enquanto o cálculo dos parâmetros de rugosidade é uma avaliação quantitativa e permite uma análise padronizada das superfícies. Este trabalho propõe um novo método para avaliar a rugosidade de superfícies, a partir da geração de uma assinatura visual de rugosidade da superfície, que é calculada através dos parâmetros de rugosidade calculados em regiões organizadas hierarquicamente. Também são propostos novos parâmetros para análise de favorecimento à aderência por área de contato, o índice de área de vales e a média de área de vale. O método proposto é comparado com o método convencional (2D) de determinação de rugosidade para demonstrar a vantagem deste novo método, que apresenta resultados com maior resolução e exatidão. As ferramentas de avaliação apresentadas neste novo método fornecem uma avaliação local e com maior nível de detalhe dos coeficientes computados, o que beneficia a avaliação e comparação das superfícies amostradas se comparados aos demais métodos de determinação de rugosidade. Os resultados apresentados utilizando os novos parâmetros demonstram que o método é eficaz para análise de extensão de aderência por área de contato.

Palavras-chave: Assinatura de Rugosidade da Superfície. Parâmetros de Rugosidade. Índice de Áreas de Vales. Nuvem de Pontos.

ABSTRACT

Quality evaluation of a material's surface is performed through roughness analysis of surface samples. Several techniques have been presented to achieve this goal, including geometrical analysis and surface roughness analysis. Geometric analysis allows a visual and subjective assessment of roughness (a qualitative assessment), whereas computation of the roughness parameters is a quantitative assessment and allows a standardized analysis of the surfaces. This work proposes a new method to evaluate surface roughness, starting from the generation of a visual surface roughness signature, which is calculated through the roughness parameters computed in hierarchically organized regions. New parameters for analysis of favoring adherence by contact are also proposed, the valley area rate and average valley area. The proposed method is compared with the conventional (2D) roughness determination method to demonstrate the advantage of this new method, which presents results with higher resolution and accuracy. The evaluation tools presented in this new method provide a local and more accurate evaluation of the computed coefficients, which benefit the evaluation and comparison of the sampled surfaces when compared to other roughness determination methods. The results presented using the new parameters demonstrate that the method is effective for analyzing the extent of adhesion by contact area.

Keywords: Surface Roughness Signature. Roughness parameters. Valley Areas Rate. Point Cloud.

LISTA DE FIGURAS

1	Escalas para de estudo de rugosidade.	21
2	Ilustração de uma função implícita tal como definido em (WANG; PEETHAM-BARAN; CHEN, 2018). Em (a) nuvem de pontos e (b) a curva implícita. . .	22
3	Perfil de superfície baseado nos parâmetros apresentados em (SANTOS; JÚLIO, 2013), com picos e vales. (a) O valor do parâmetro R_a e (b) dividindo a superfície em partes para calcular R_a	24
4	Esquema que representa o funcionamento do equipamento de leitura 2D, o rugosímetro 2D (a) e o equipamento de varredura laser para 3D (b).	26
5	Equipamento de leitura de contato: rugosímetro 2D.	26
6	Exemplo de amostras de um mesmo bloco cerâmico. Em a) temos bloco sem artefatos de relevo na amostra. Em b) a amostra apresenta artefatos que, estima-se, sejam decorrentes do processo de extrusão (SAHOO, 2011; SASSONI et al., 2017). Já c) e d) são amostras 2D de linhas horizontais e verticais das amostras, respectivamente, de a) e b). Pontos vermelhos em a) e b) representam falhas de leitura.	30
7	Equipamento de leitura laser utilizado nos experimentos deste trabalho. . . .	31
8	Tipos de falhas encontradas em nuvem de pontos, de acordo com (BERGER et al., 2014). Nos testes realizados, foram encontrados problemas mais frequentes com (b) amostragem não uniforme, (d) Pontos externos indesejados, (e) dados lidos desalinhados e (f) dados faltantes. Esses problemas são abordados com mais detalhes em (BERGER et al., 2014).	33
9	Processo de produção de blocos. Cada bloco deve ser cuidadosamente preparado para o processo de leitura.	34
10	Processo de leitura das superfícies.	35
11	Caixa de suporte (a) para ajuste de posicionamento e rotação do bloco. Processo de leitura (b) com caixa de suporte.	37
12	Processo para computação dos coeficientes de rugosidade das superfícies. . .	38
13	Exemplo de plano de ajuste (laranja) computado sobre uma nuvem de pontos (em preto).	40
14	Subdivisão espacial hierárquica com <i>quadtree</i> . (a) elemento da raiz; (b–d) são subdivisões sucessivas.	42
15	<i>Quadtree</i> com subdivisão parcial.	43
16	R_a calculado para diferentes níveis da <i>quadtree</i> da superfície. Quanto mais escura a cor do quadrado, maior o R_a associado. Em destaque nodos de um mesmo ramo da árvore.	44
17	Processo para computação das ferramentas para avaliação e análise dos coeficientes de rugosidade.	45
18	Em (a) exemplo de assinatura de rugosidade da superfície. Calculado a partir do 4º nível (3ª divisão) dos parâmetros de rugosidade da <i>quadtree</i> (R_a). (b) Exemplo de métricas de avaliação de rugosidade da superfície. Centro: assinatura visual minificada da superfície. Abaixo: histograma calculado a partir da assinatura visual. À direita: gráfico comparando os coeficientes R_a da superfície com os valores de referência $R_{a\,avg}$ (linha rosa), $R_{a\,min}$ (linha vermelha) e $R_{a\,max}$ (linha azul).	46
19	Organização de nodos-folha em uma <i>quadtree</i> . Organização dos nodos no 2º nível (a) e organização dos nodos no 3º nível (b).	47

20	Resultado da ordenação dos nodos. Em (a) ordenação para os nodos do 2º nível. Em (b) a ordenação para os nodos no 3º nível.	49
21	Assinatura de rugosidade original (a) e valores associados. Assinatura de rugosidade modificada (b) e seus valores associados. Em destaque as linhas que foram removidas do cálculo dos valores $R_{a\,avg}$ e $R_{a\,sdv}$	50
22	Planos calculados sobre uma mesma nuvem de pontos. Em (a), (b), (c), (d), (e) e (f) o plano médio calculado com primeiro método. Já em (g) os planos calculados com segundo método e ajustados à geometria da amostra.	51
23	Novo processo para cálculo dos planos de ajuste para cada local da superfície, em todos os níveis de divisão hierárquica.	52
24	PCA computado para um conjunto de pontos.	54
25	Cálculo de distância do ponto ao plano, no sistema de componentes definido para o plano.	55
26	Processo geral para computação de áreas de vales.	57
27	Processo de segmentação e classificação de regiões de vales.	59
28	Classificação de regiões de vales em lagos.	60
29	Resultados gerados a partir dos métodos propostos.	62
30	Resultados que demonstram o cálculo das áreas. Em (a) um resultado da olaria 1, em (b) da olaria 2, em (c) da olaria 3, em (d) da olaria 4 e em (e) da olaria 5.	71
31	Índice de área de vales (Δ_T) de todas as amostras, com escala do menor (em branco) até o maior (em azul mais escuro) (Δ_T).	79
32	Distribuição de Δ_T por olaria e por faixa de representação. As linhas do gráfico estão ordenadas pela média de Δ_T , do maior para o menor valor.	81
33	Dispersão de Δ_T por olaria. Em cinza a linha de média de Δ_T das olarias.	81
34	Rugosidade média ($R_{a\,avg}$) de todas as amostras, com escala do menor (em branco) até o maior (em verde mais escuro) ($R_{a\,avg}$).	83
35	Distribuição de $R_{a\,avg}$ por faixa de representação e por olaria.	84
36	Distribuição de rugosidade média por olaria. Em cinza a linha de média $R_{a\,avg}$ de todas as olarias.	85
37	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. Em (f) a junção dos dados de todas as olarias. Em todos os gráficos, o eixo X representa valores normalizados (percentual) para R_a e o eixo Y representa valores normalizados para Δ_T	87
38	Assinatura de rugosidade para uma amostra 2D, com a média e o desvio-padrão por linha e por coluna. Todos os valores em μm	91
39	Linha de referência e planos de ajuste para computação de distâncias / rugosidade nos métodos estudados. Em (a) a linha de referência no método 2D, alinhada eixo X . Em (b) o plano de ajustes único, que considera todos os pontos da nuvem e em (c) os múltiplos planos, calculados com os pontos de cada local.	96
40	Exemplo dos vetores para análise de direção de áreas de vale. Resultado obtido sobre a nuvem de pontos da Figura 22.	98

LISTA DE TABELAS

1	Demais parâmetros relacionados com rugosidade, descritos em (SANTOS; JÚLIO, 2013) e adaptados para duas dimensões.	25
2	Desvio-padrão dos dados associados ao R_a da leitura 2D	28
3	Resultados do teste F, comparando os dados de desvio-padrão das amostras 2D.	29
4	Assinaturas de rugosidade das superfícies em quatro níveis de detalhe. Na primeira coluna, o R_a geral é mostrado abaixo de cada figura. Nas demais colunas são mostradas a média (R_{aavg}), mínimo (R_{amin}), máximo (R_{amax}) e desvio-padrão (R_{asdv}) para cada conjunto de R_a	66
5	Comparação da rugosidade da superfície por grupo de temperatura. A primeira coluna mostra os valores calculados de todos os blocos no mesmo grupo de temperatura. As demais colunas mostram os valores de média (R_{aavg}), mínimo (R_{amin}), máximo (R_{amax}) e desvio padrão (R_{asdv}) de cada bloco.	67
6	Tabela de resultados para o teste de comparação de grupos de temperatura. Os resultados foram gerados utilizando método de computação de um único plano para superfície. Nos gráficos de linhas nos resultados, as linhas coloridas representam os valores de referência. A linha rosa é a média geral ($R_{aavg} = 3,484$), a linha vermelha é o valor mínimo geral ($R_{amin} = 1,814$) e a linha azul é o máximo geral ($R_{amax} = 15,78$)	69
7	Valores Δ_{avg} , Δ_T e Δ_{Tavg} da Olaria da amostra de cada uma das cinco olarias apresentadas na Figura 30	72
8	Desvio-padrão das áreas de lagos computadas para os blocos 01 a 05 das 5 olarias do teste	73
9	Desvio-padrão das áreas de lagos computadas para os blocos 06 a 10 das 5 olarias do teste	74
10	Resultado do teste-F para os dados de desvio-padrão de área (Δ_{sdv}). O valor do $F_{crítico}$ para referência é 1,394061257.	75
11	Valor de médias de área de lagos computadas para os blocos 01 a 05 das 5 olarias do teste	76
12	Valor de médias de área de lagos computadas para os blocos 06 a 10 das 5 olarias do teste	77
13	Resultado do teste-Z para os dados de média de área (Δ_{avg})	78
14	Média e desvio-padrão dos índices de área de vales (Δ_T)	78
15	Faixas para agrupamento de valores de Δ_T	80
16	Quantidade de valores de Δ_T por olaria e por faixa de representação. Linhas estão ordenadas pela média de Δ_T da olaria.	80
17	Média e desvio-padrão da rugosidade média (R_{aavg}) das amostras. Todos os valores em μm	82
18	Faixas para agrupamento de valores de R_{aavg}	82
19	Faixas para agrupamento de valores de R_{aavg} . Linhas estão ordenadas pela média (R_{aavg}).	84

20	Tabela de resultados para o teste de comparação de grupos de temperatura utilizando o método de computação de rugosidade por múltiplos planos. Nos gráficos de linha dos resultados, as linhas coloridas representam os valores de referência. A linha rosa é a média geral ($R_{avg} = 2,809$), a linha vermelha é o valor mínimo geral ($R_{min} = 1,761$) e a linha azul é o máximo geral ($R_{max} = 8,098$)	88
21	Comparação de médias e desvios-padrão de rugosidade pelos métodos de plano único (método 1) e múltiplos planos (método 2). Na coluna “M1 vs M2” mostra que todos os valores de R_a são menores pelo método 2 do que pelo método 1.	89
22	Média e desvio-padrão de R_a calculados em 3D e 2D	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Questão de Pesquisa e Hipóteses	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Discussão sobre Aplicabilidade do Método	17
1.3	Organização do Texto	18
1.4	Materiais	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Rugosidade	20
2.2	Análise de Rugosidade por Geometria Superficial	20
2.3	Parâmetros Quantitativos de Análise de Rugosidade	23
2.4	Análise de Rugosidade de Substratos Cerâmicos	24
2.5	Aquisição de Dados por Equipamento Laser 3D	29
2.6	Considerações sobre trabalhos relacionados	30
3	UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES	32
3.1	Aquisição da Nuvem de Pontos	32
3.1.1	Processo de Produção de Blocos	32
3.1.2	Processo de Leitura da Superfície	34
3.2	Computação de Rugosidade de Superfícies a Partir de Um Único Plano	37
3.2.1	Cálculo do Plano de Ajuste	39
3.2.2	Computação dos Parâmetros de Rugosidade	40
3.2.3	Estrutura Hierárquica para Representação dos Parâmetros de Rugosidade	41
3.3	Avaliação de Rugosidade	43
3.3.1	Assinatura de Rugosidade da Superfície	44
3.3.2	Outras Ferramentas para Avaliação de Rugosidade	46
3.4	Computação de Rugosidade de Superfícies para Múltiplos Planos	48
3.4.1	Customização da Assinatura de Rugosidade	48
3.4.2	Cálculo de Múltiplos Planos de Ajuste	49
3.4.3	Uso de <i>Principal Component Analysis</i> para Computação de Planos	50
3.4.4	Cálculo de Áreas de Vales	55
3.4.5	Etapa de segmentação e classificação das regiões de vales	58
4	EXPERIMENTOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS	63
4.1	Testes e Análise sobre Método de Computação de Rugosidade para Um Único Plano	63
4.1.1	Condições de teste	63
4.1.2	Avaliação dos Resultados Obtidos	64
4.2	Testes e Análise sobre Método de Computação de Rugosidade para Múltiplos Planos	68
4.2.1	Condições de teste	68
4.2.2	Análise dos Parâmetros relacionados à Área de Vales	70
4.2.3	Análises Estatísticas sobre os Parâmetros de Área	72
4.2.4	Relação entre Parâmetros Rugosidade Média e Índice de Área de Vales	85
4.3	Plano Único versus Múltiplos Planos	86
4.4	Comparações entre métodos 2D e 3D	90

5 CONCLUSÃO	94
5.1 Limitações do Método	96
5.2 Aplicações em outros contextos	97
5.3 Trabalhos Futuros	98
REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

A técnica mais tradicional de fechamento vertical de edifícios é a alvenaria revestida com argamassa de revestimento. No entanto, as argamassas de revestimento frequentemente apresentam problemas patológicos, como falhas de aderência (MELO et al., 2020). Considerando essa situação, estudos foram realizados para compreender os fenômenos de adesão entre argamassas e substratos (MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; SANTOS; JÚLIO, 2013; MA et al., 2017; LE ROUX et al., 2015; GRIGORIADIS, 2016; KOZUBAL et al., 2020). Mas ainda há pouco conhecimento científico sobre os mecanismos de aderência entre a argamassa e o substrato (CARASEK, 2010; THAMBOO; DHANASEKAR, 2015; VAZ; CARASEK, 2019). A aderência depende das características da argamassa, do substrato (como porosidade e rugosidade, necessárias para um bom intertravamento interfacial), da técnica de aplicação e das condições climáticas durante e após a aplicação e o traço da argamassa (VAZ; CARASEK, 2019) que, quando inadequados, resultam em baixa área efetiva de contato entre a pasta e o substrato. (SARKER; COSTA; HADIGHEH, 2019).

Características de superfícies de estratificação de blocos cerâmicos, como tamanho de poro, distribuição de tamanho de poro e porosidade desempenham um papel crucial no controle do intertravamento. A textura superficial influencia no cisalhamento, sendo que uma superfície mais lisa apresenta menor aderência (VENKATARAMA REDDY; LAL; NANJUNDA RAO, 2007; BARRIOS-MURIEL et al., 2019). A força de adesão depende de fatores inter-relacionados que podem afetar diretamente o vínculo desenvolvido entre substrato e revestimentos (por exemplo, absorção de água superficial, estrutura de poros, composição de argamassa, retenção de água da argamassa e condições de cura) ou indiretamente (por textura superficial e mão de obra). Enquanto as características de absorção superficial definem a taxa e o volume de água para dar trabalhabilidade à argamassa, a qualidade da argamassa é definida pela quantidade de água disponível na interface e pela força dos produtos de hidratação depositados nos poros superficiais dos substratos. A qualidade exigida não é necessariamente representada pela resistência à compressão da argamassa, mas por outros critérios que podem, de fato, ser reduzidos em argamassas, como trabalhabilidade, retenção de água e plasticidade (TAHA; SHRIVE, 2001). Conhecer os parâmetros de superfície, como formato, densidade de contato e rugosidade são importantes para modelar a área de contato e compreender sua influência na aderência (KOZUBAL et al., 2020). No caso de substratos cerâmicos, os parâmetros de superfície são dependentes da composição das argilas e das condições de processamento e queima que foram empregados na fabricação.

Concorda-se que a rugosidade do substrato deve ser analisada em duas escalas: a macroescala (na ordem de milímetros), visualizada na forma de protuberâncias, recessos e imperfeições superficiais que permitem ancoragem mecânica na superfície e a microescala (na ordem dos micrômetros), onde a aderência ocorre, predominantemente, através de interações químicas entre os átomos ou moléculas da argamassa e o substrato (MYSHKIN; PETROKOVETS;

CHIZHIK, 1998; MARSHALL et al., 2010). Nessa escala, existem poucos trabalhos e várias lacunas de conhecimento. Não existe um parâmetro conhecido como ideal para cada tipo de superfície (SANTOS; JÚLIO, 2013). Uma das maiores dificuldades é a determinação quantitativa da rugosidade dos substratos. A maioria dos estudos faz uma determinação bidimensional da rugosidade, gerando assim, coeficientes de rugosidade que não estão bem correlacionados com a aderência por contato ou, pelo menos, não são representativos para a rugosidade de toda superfície. Isso, porque o processo de extrusão gera uma orientação paralela preferencial das lamelas de argila, que influencia notavelmente a anisotropia mecânica do tijolo, podendo apresentar grande diferença no índice de rugosidade dependendo da orientação de leitura (SASSONI et al., 2017).

Perez et al. (PEREZ; BISSONNETTE; COURARD, 2009) analisaram a influência de tratamentos superficiais na rugosidade de substratos de concreto. Os autores utilizaram um rugosímetro 2D e puderam constatar que o método 2D não foi suficiente para caracterizar a superfície analisada, pois conforme já ressaltado por Klingvall Ek et al. (KLINGVALL EK et al., 2016), um mesmo material pode apresentar rugosidades distintas dependendo da direção de medição. Nos métodos bidimensionais, são necessárias diversas medições de uma mesma superfície para garantir uma precisão adequada, visto que nesses métodos a leitura feita é de apenas um perfil da superfície e em uma direção (SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014). Vários autores recomendam que uma única medida de um perfil pelo método de análise 2D não deve ser adotada como valor absoluto de rugosidade (BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012; KLINGVALL EK et al., 2016). Garbacz et al. (GARBACZ; COURARD; KOSTANA, 2006) afirma que o perfilômetro laser gera uma imagem mais detalhada do que o método mecânico que é usado na medição 2D e que os parâmetros da perfilômetro laser são 1 a 7 vezes maiores do que amostragem mecânica. Já Sadowski et al. (SADOWSKI; CZARNECKI; HOŁA, 2016) adotaram o perfilômetro 3D para quantificar a rugosidade de superfícies de concreto, verificando que o método foi satisfatório, já que apresenta a leitura mais ampla da superfície quando comparado ao método 2D (MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014). A escassez de literaturas nesta área prejudica a análise dos resultados (MIRO et al., 2015), sendo que ainda não foi possível a estimativa de o quanto as superfícies variam em cada direção, como isso irá influenciar na aderência por contato do revestimento ao substrato e nem qual o melhor método para caracterizar cada substrato na construção civil. Grigoriadis (GRIGORIADIS, 2016) realiza calculo dos parâmetros de rugosidade de dados 3D, porém avaliando linhas isoladamente, tal como uma análise 2D. Sem uma análise da superfície como um todo.

As avaliações tridimensionais (3D) da rugosidade são incomuns e são tipicamente apresentadas como figuras representando a topografia da superfície (STOLZ; MASUERO, 2015), mas não são avaliações quantitativas, o que resulta na especificação empírica de um parâmetro que representa a rugosidade do substrato e gera um coeficiente de rugosidade que não pode ser utilizado para outras superfícies.

A forma mais comum de análise desses materiais é manual e subjetiva (SANTOS; JÚLIO,

2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014), portanto, a superfície é analisada e avaliada com base no conhecimento e habilidade de um profissional. No entanto, existem equipamentos e softwares que ajudam a inspecionar as superfícies dos materiais. A partir de uma técnica de detecção e alcance de luz (LiDAR - *Light Detection And Ranging*), por exemplo, com o uso de um scanner a laser 3D, é possível gerar uma nuvem de pontos com resolução suficiente para avaliar as irregularidades nas superfícies dos materiais a serem estudados. Com as irregularidades geradas a partir de pontos com coordenadas tridimensionais, é possível determinar as variações de relevo nas superfícies, possibilitando ao engenheiro civil determinar grau de área de contato com outros materiais. Esses artefatos de vales e picos (relevos) sobre uma superfície são chamados de rugosidade. Portanto, a rugosidade de uma determinada superfície é avaliada para determinar qualidade de interface da mesma com outros materiais, notadamente, conforme já mencionado, com matriz cimentícia.

Para realizar esta avaliação subjetiva assistida por *software* é realizada a reconstrução de superfície a partir da nuvem de pontos. Diversos trabalhos na área de reconstrução de superfícies (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006; LABATUT; PONS; KERIVEN, 2007; TAUBIN, 2012; KAZHDAN; HOPPE, 2013; BERGER et al., 2014; ZHOU; SHEN; HU, 2019; WANG et al., 2019) têm sido propostos, em geral, cada um com seu propósito ou contexto de aplicação. A reconstrução da superfície tem por objetivo analisar as informações individuais dos pontos e reconstruir o máximo de informações possíveis sobre os objetos digitalizados. Permite, assim, a análise visual do relevo da superfície.

No entanto, as medições baseadas em visualização usam técnicas puramente geométricas para manipulação de dados e são completamente subjetivas e, portanto, estão sujeitas à habilidade e experiência do profissional envolvido. Outro ponto importante é a falta de padronização das avaliações, justamente, por seu caráter subjetivo, um profissional poderia determinar uma avaliação e outro, ainda que com resultados semelhantes, poderia determinar um resultado diferente para a mesma superfície avaliada.

Para resolver essa questão, são adotadas técnicas de avaliação de coeficientes ou parâmetros de rugosidade no sentido de medir quantitativamente a qualidade de interface de uma superfície para aderência através da área de contato. Embora as medidas sugeridas na literatura sejam adequadas para medir a rugosidade dos materiais, elas são realizadas em uma determinada área da superfície e de forma geral sobre a superfície amostrada. Dessa forma, tem-se um valor médio ou suavizado sobre a superfície e nenhuma avaliação local é considerada. Nesse sentido, uma análise com subdivisão espacial da superfície poderia fornecer uma análise com informações mais detalhadas sobre o favorecimento da superfície para aderência através da área de contato em diferentes locais. Além disso, seria possível avaliar a padronização de superfícies similares, considerando que as superfícies amostradas do mesmo bloco devem ser semelhantes, por conta do material e das condições físicas em que o bloco foi submetido (temperatura, pressão e etc.).

Neste trabalho, é proposta uma técnica que realiza uma análise de uma nuvem de pontos adquirida por varredura a laser e calcula os parâmetros de rugosidade em diferentes escalas em

uma estrutura hierárquica da divisão espacial dos dados. A partir dos planos de ajuste que representam a nuvem de pontos e mantendo os dados em uma estrutura de dados hierárquica, mais especificamente uma árvore de divisão espacial (uma *quadtree*), os parâmetros ou coeficientes de rugosidade são calculados para todas os locais, em todos os níveis de divisão espacial. Dessa forma, pode-se medir a rugosidade da superfície tanto em nível global (nível superior da árvore) quanto em nível local (nível inferior da árvore).

O estudo de rugosidade e seu impacto na aderência de superfícies de cerâmica de argila vermelha é desenvolvido em conjunto com pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Unisinos, mais especificamente, em conjunto com o *Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem (GMat)*. Em paralelo e complementar a esta Tese está em andamento o trabalho de Tese de Doutorado da aluna Daiana Cristina Metz Arnold (ARNOLD, Prelo, 2021), que será expandido na Tese da Valéria Costa de Oliveira, a qual realizará um programa experimental para testes de aderência com substratos cerâmicos e matriz cimentícia, com objetivo de validar os métodos propostos neste trabalho e em (ARNOLD, Prelo, 2021).

Os seguintes artigos foram publicados com os resultados obtidos nesta Tese e nas pesquisas realizadas com o GMat:

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**. Scientific Reports. 2019, 9, 15038, <https://doi.org/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 Sensing. 2021, 13 (4), 789. <https://doi.org/10.3390/rs13040789>.

1.1 Questão de Pesquisa e Hipóteses

Utilizando como base o que foi apresentado anteriormente, a questão de pesquisa que esta Tese tem por objetivo responder é: **Como computar rugosidade de forma a permitir uma avaliação tanto quantitativa, quanto qualitativa e ainda favorecer o processo de análise da influência da rugosidade de uma superfície em diversas aplicações?**

Essa questão de pesquisa implica em outras questões mais específicas:

- Quais parâmetros da rugosidade representam adequadamente a superfície do substrato visando sua relação com a aderência?
- Os parâmetros indicados pela literatura de referência são suficientes para resolver esta avaliação de forma precisa?

- Quais outras formas de avaliação podem ser utilizadas para determinar um índice de aderência?

As seguintes hipóteses são definidas para o presente trabalho:

Hipótese 1: Aplicação de um método de leitura e computação 3D para determinação de rugosidade permite avaliar melhor a rugosidade da superfície como um todo, em comparação ao método convencional 2D.

Hipótese 2: Fazendo uma subdivisão da área amostrada tem-se uma avaliação localizada da superfície e com isso uma percepção melhor do comportamento dos parâmetros de rugosidade. Consequentemente, permite estimar com maior exatidão a aderência através da área de contato entre substrato cerâmico e a matriz cimentícia.

Hipótese 3: Além da medida de altura, uma medida de área superficial também deve ser considerada, uma vez que a dimensão dos grãos da matriz cimentícia podem não penetrar na rugosidade substrato. Portanto, parâmetros relacionados aos vales da superfície também indicam uma medida de favorecimento a aderência através da área de contato. Quanto maior área média de vale e a área total de vale, maior área de contato entre revestimento e o substrato, o que favorece a aderência por intertravamento mecânico.

Neste trabalho são propostos métodos para determinar e analisar rugosidade de superfícies e áreas de vale, com objetivo de comprovar hipóteses supracitadas.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a definição de um método de análise localizada e quantitativa de rugosidade de superfícies em multiescala, partindo da computação de informações tridimensionais (nuvem de pontos) e computando resultados que permitam, visual e analiticamente, determinar se superfícies adquiridas com características específicas favorecem a adesão com matriz cimentícia por contato. O método propõe ainda a computação de informações relacionadas à área de contato, utilizadas para estimar favorecimento da superfície para aderência entre o substrato cerâmico e a matriz cimentícia.

Para realizar este objetivo são calculados os parâmetros de rugosidade, que são representados em estrutura com divisão espacial e em nível de detalhes (*quadtree*), e organizados em uma assinatura de rugosidade da superfície. Também são definidos parâmetros para determinar *índice de áreas de vales* e *área média de vales* para avaliar área de contato entre substrato e revestimento de cimento.

Além disso, são propostas outras formas de análise do comportamento da rugosidade ao longo da superfície. Através da apresentação de informações quantitativas e qualitativas, é esperado que a análise do efeito da rugosidade ao longo da superfície possa ser realizada com mais exatidão, permitindo identificar padrões dentro da superfície e entre superfícies com características similares.

A fim de alcançar o objetivo geral, podem ser destacados os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um sistema para aquisição de nuvens de pontos de superfícies, cálculo de planos de ajuste dos pontos, cálculo de rugosidade e organização dos dados em estrutura hierárquica de representação espacial.
- Propor sistema de avaliação dos parâmetros calculados, montando uma assinatura de rugosidade, bem como outras formas de análise do comportamento da rugosidade ao longo da superfície.
- Definir um sistema de cálculo de áreas de vales indicando área concentração de massa, para determinar e avaliar parâmetros de superfície de contato e quanto podem favorecer a aderência por intertravamento mecânico.

Para contemplar os objetivos do trabalho, também são propostos procedimentos para aquisição, análise e comparação com método convencional 2D de determinação de rugosidade.

1.2.1 Discussão sobre Aplicabilidade do Método

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; DE BRITO, 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. Dessa 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.

Embora os experimentos de validação do método apresentado neste trabalho estejam no contexto da Engenharia Civil, também se mostra oportuna explicitar a aplicação em outros contextos. Mas especificamente, na área da Geologia, no estudo de formações de rochas em geomecânica e geodinâmica de rochas, a análise de rugosidade é importante para determinar a resistência ao cisalhamento, deformação e comportamento de infiltração de discontinuidades em superfícies rochosas (SCESI; GATTINONI, 2007; MAH et al., 2013; ZOU; JING; CVETKOVIC, 2015). É importante, no entanto, compreender a escala aplicação, ou seja, o nível de relevo ou topografia de superfície em que obtém a análise correta da rugosidade. No subcapítulo 5.2 este assunto é abordado com mais detalhes.

1.3 Organização do Texto

O texto da Tese está estruturado da seguinte forma: No Capítulo 2 são apresentados trabalhos diretamente relacionados à Tese, com suas funcionalidades, contribuições e limitações. O Capítulo 3 apresenta o novo método para computação de rugosidade, iniciando com o método para aquisição e leitura da nuvem de pontos de superfícies, onde o objetivo é evitar falhas de leitura dos dados. No subcapítulo 3.2 é apresentado o primeiro método para computação dos parâmetros de rugosidade e a estrutura das informações; além do ferramental matemático para obtenção das informações. Segue com o método para cálculo da assinatura de rugosidade e demais informações que auxiliam no processo de avaliação de rugosidade de superfícies. No subcapítulo 3.4, é definido o segundo método de computação de planos de ajuste e de rugosidade, apresentando alguns ajustes e alterações em relação ao primeiro método e a computação de novos parâmetros sobre áreas de contato. No Capítulo 4 são descritos testes realizados no contexto da engenharia civil, os resultados obtidos, comparações com método convencional e os comentários sobre os resultados. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais desta Tese, limitações do método e aplicações que podem ser beneficiadas com o uso dos métodos propostos e as implementações futuras.

1.4 Materiais

Para os experimentos realizados no trabalho, os seguintes equipamentos e materiais são utilizados:

- Equipamento para aquisição de dados 2D, rugosímetro mecânico 2D Mitutoyo SJ-210/178-561-02A, especificado e detalhado no subcapítulo 2.4.
- Equipamento para aquisição de dados 3D laser (LiDAR), Starrett AV300+, especificado e detalhado no subcapítulo 2.5.
- Para todos os experimentos para validação dos métodos propostos são utilizados blocos de cerâmica vermelha. No primeiro experimento, os blocos são adquiridos de uma mesma olaria da região do Vale do Rio dos Sinos e submetidos a ciclos de queima conforme método definido no subcapítulo 3.1.1, em laboratório de materiais de construção da Unisinos. Para os demais experimentos, os blocos foram coletados de diferentes olarias da região do Vale do Rio dos Sinos. No subcapítulo 4 as condições de teste são detalhadas.

Ainda que os métodos de cálculo propostos possam ser utilizados com amostras de tamanho qualquer, as amostras que foram adquiridas para os experimentos do trabalho, possuem dimensão de $10 \times 10 \text{ mm}$. No geral, com ≈ 100 pontos lidos no eixo X e ≈ 100 pontos lidos no eixo Y, totalizando ≈ 10.000 pontos. Embora o método possa ser aplicado em qualquer escala, a escala

de aplicação neste trabalho está na ordem dos micrômetros (μm , microescala), que é considerada pela literatura de referência (KOZUBAL et al., 2020) como a ideal para medir rugosidade em substratos cerâmicos. Mais detalhes sobre escala de análise de topografia de superfícies de cerâmica vermelha são descritos no subcapítulo 2.2.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Rugosidade

A rugosidade é um dos fatores mais importantes para favorecer a aderência através da área de contato entre matriz cimentícia e substrato cerâmico (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; KOZUBAL et al., 2020). A determinação deste parâmetro não está totalmente resolvida e alguns estudos apontam nesta direção (WANG et al., 2014; HOŁA et al., 2015). O parâmetro utilizado nos métodos convencionais é o da rugosidade média R_a , que é medido através da avaliação de alturas de um conjunto de pontos em relação à geometria de uma superfície lisa definida a partir do próprio conjunto de pontos.

A determinação da rugosidade está relacionada ao nível de topografia que se pretende avaliar, em uma escala que tem textura superficial (macroescala), ondulações ou macrorrugosidades (mesoescala), rugosidade (micro e nanoescala), além de características que podem ser observadas em macroescala, definidas por imperfeições e alterações de relevo que são produzidas durante o processo de produção (SAHOO, 2011). Segundo (KOZUBAL et al., 2020), a rugosidade da superfície pode ser determinada na escala de microrrugosidade, entre $1 \mu m$ a $0.5 mm$ e na escala das ondulações, entre $0.5 mm$ a $50 mm$. A Figura 1 ilustra esta definição de escala. Diversos equipamentos podem ser utilizados para obtenção de dados referentes a rugosidade. Dependendo da escala, faixas de medição e da técnica em uso (LE ROUX et al., 2015), podem ser utilizados perfilômetros mecânicos, ópticos, microscópios de sondagem por varredura (MEV) e microscopia de força atômica (AFM) (MA et al., 2017).

2.2 Análise de Rugosidade por Geométrica Superficial

Para calcular coeficientes (ou parâmetros) de rugosidade a fim de avaliar uma superfície, é necessário obter os pontos que formam a superfície amostrada. A análise da rugosidade e do relevo das superfícies amostradas é realizada para avaliar sua qualidade. Algumas obras (LEE; VARSHNEY; JACOBS, 2005; SCHALL; SAMOZINO, 2005; KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006; TAUBIN, 2012; KAZHDAN; HOPPE, 2013; NAN; WONKA, 2017) realizaram a avaliação visual de superfícies com base na análise geométrica para determinar as medidas de rugosidade e relevo. Neste tipo de avaliação, em geral, a superfície é reconstruída a partir de uma nuvem de pontos, gerando uma malha poligonal. A reconstrução de superfície a partir de pontos amostrados é um problema bem estudado em computação gráfica (BERGER et al., 2014). Essas abordagens podem obter bons resultados para a reconstrução de superfícies geométricas e para a avaliação qualitativa de superfícies.

As abordagens utilizadas são triangularização e métodos volumétricos. Na triangularização apresentada em (LABATUT; PONS; KERIVEN, 2007; ZHOU; SHEN; HU, 2019; WANG et al., 2019), os algoritmos buscam pontos vizinhos em uma determinada direção para formar

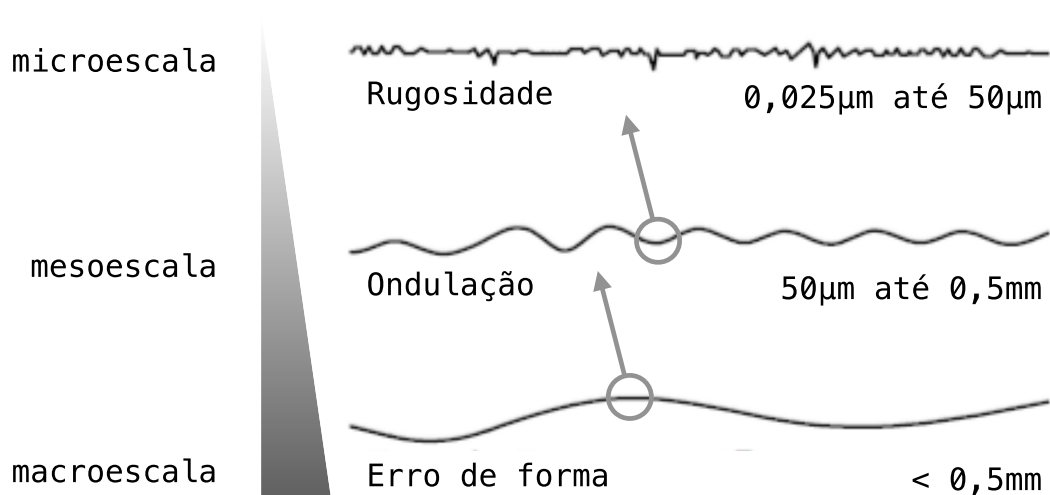


Figura 1: Escalas para de estudo de rugosidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

triângulos e, a partir do conjunto de triângulos, obtêm uma malha poligonal. Em (LABATUT; PONS; KERIVEN, 2007) os autores definem a triangulação de malha baseada em Delaunay como o dual geométrico do diagrama de Voronoi. A partir do diagrama de Voronoi, os *sites* (pontos de referência) são definidos como vértices de triângulos e células vizinhas são conectadas para formar triângulos. Em (ZHOU; SHEN; HU, 2019) os autores usam abordagem de triangulação inserindo um termo de energia para o problema dos tetraedros de Delaunay, garantindo maior robustez do método sobre o ruído da malha. Wang et al. (WANG et al., 2019) trabalha sobre uma nuvem de pontos não orientada usando o tetraedro de Delaunay e obtêm melhores resultados na reconstrução de superfície lisa. Após obter triângulos via triangulação 3D de Delaunay, um bom triângulo inicial é considerado a semente da malha e a partir dele outros triângulos apropriados são conectados às suas arestas frontais, aqueles que não estão conectados a nenhum outro triângulo. O triângulo inicial é aquele que forma a superfície mais plana possível com seus adjacentes. E assim a malha cresce iterativamente para todas as arestas frontais até que não haja mais triângulos candidatos adequados. Os triângulos adequados são aqueles que possuem bordas que se fecham com o triângulo atual e seus vizinhos nas bordas frontais e com um ângulo menor que um parâmetro de limite. Esses métodos geralmente reconstróem a superfície lisa e incorporam a rugosidade como um relevo de malha (não tratando-a como pontos que não pertencem à malha) ou a removem como um ruído dos pontos.

Os métodos volumétricos mais populares (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006; BOLITHO et al., 2007, 2009; TAUBIN, 2012; KAZHDAN; HOPPE, 2013) são usados em softwares comerciais. Esses métodos visam obter uma superfície S que é formada por N pontos ordenados de uma nuvem de pontos, onde o conjunto de pontos D é $D = (p_1, n_1), \dots, (p_N, n_N)$, cada p_i é um ponto específico amostrado, e cada n_i é sua respectiva normal. A definição formal

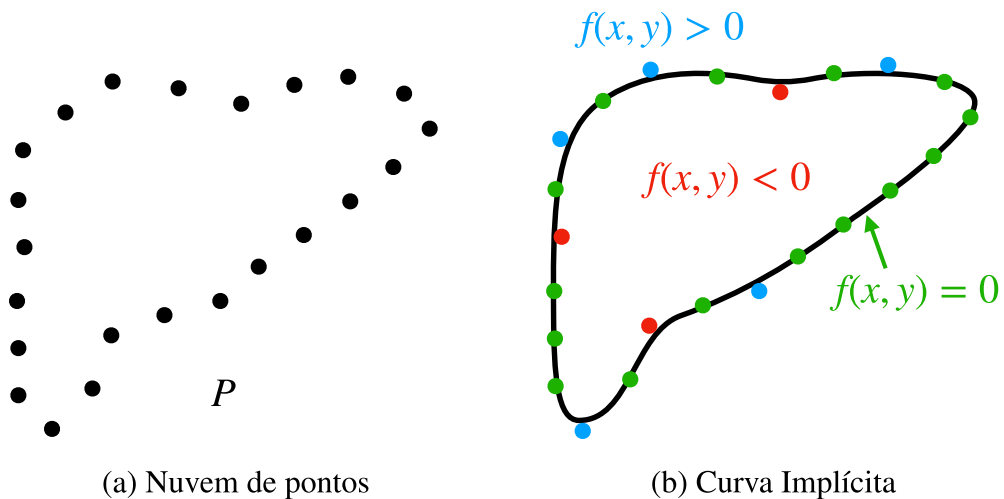


Figura 2: Ilustração de uma função implícita tal como definido em (WANG; PEETHAMBARAN; CHEN, 2018). Em (a) nuvem de pontos e (b) a curva implícita.

Fonte: Elaborado pelo autor

da superfície é $S = x : f(x) = 0$. Os principais algoritmos de geração de superfície através de métodos volumétricos são “Smooth Signed Distance” (SSD) (TAUBIN, 2012), “Poisson Surface Reconstruction” (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006) e (KAZHDAN; HOPPE, 2013).

O algoritmo “Poisson Surface Reconstruction” (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006) obtém uma função representativa do modelo (função implícita, como apresentado na Figura 2), onde o gradiente dessa função é um campo vetorial que é zero em quase todos os pontos, exceto os pontos próximos da superfície, cujo valor é igual à normal dos pontos amostrados. Assim, o algoritmo procura a função de gradiente que melhor se aproxima do campo de vetor local (direção), associado a cada ponto. Esse algoritmo é ideal para uso no contexto de nuvens de pontos simplificadas para visualização de superfícies, porque é uma solução global que envolve todos os dados, gera superfícies suavizadas e é consistente (robusto) para trabalhar com descontinuidades ou ruídos nos dados, o que acontece na nuvem de pontos após um processo de simplificação (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006). Trata-se de um dos métodos mais populares para reconstrução de superfície devido à sua escalabilidade e eficiência (WANG; PEETHAMBARAN; CHEN, 2018). Portanto, é adequado para reconstrução de superfície com foco na visualização e não favorece a análise da rugosidade da superfície.

Um problema conhecido do método (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006) é a suavização excessiva da superfície (KAZHDAN; HOPPE, 2013). Nesse sentido, o algoritmo SSD (TAUBIN, 2012) e Screened (KAZHDAN; HOPPE, 2013) lidam com esse problema usando restrições posicionais na otimização (KAZHDAN; HOPPE, 2013) e a função de gradiente (TAUBIN, 2012).

A partir desses dados geométricos, a rugosidade e o relevo são calculados. Em (LEE; VARSHNEY; JACOBS, 2005) o cálculo dos coeficientes de relevo é realizado comparando

a altura dos vértices em uma dada região em torno de um vértice (vértices vizinhos). Definir a qualidade do modelo pela forma da área bruta é uma tarefa de percepção subjetiva e relativa; por exemplo, o tamanho da área aproximada também depende da medição do tamanho do modelo. Natasha et al. (MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014) também descreve como é difícil distinguir rugosidade de relevo ao avaliar um modelo geométrico. Além disso, outros problemas estão relacionados à avaliação de superfícies geométricas, principalmente por serem aproximações poligonais (conforme ilustrado na Figura 2). Esses métodos são adequados para visualização e não para uma medição adequada da rugosidade.

2.3 Parâmetros Quantitativos de Análise de Rugosidade

Alguns trabalhos (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; LE ROUX et al., 2015; KOZUBAL et al., 2020) buscam principalmente a avaliação quantitativa da rugosidade das superfícies (chamados parâmetros de rugosidade). A partir do cálculo desses parâmetros, é possível padronizar a avaliação das superfícies dos materiais amostrados. Essas medidas são descritas na literatura (SANDER, 1991; MUMMERY, 1992; THOMAS, 1999; SANTOS; JÚLIO, 2013) e são usadas para medir o nível de aderência através da área de contato e qualidade das superfícies do material de acordo com a sua rugosidade.

Os principais parâmetros de rugosidade relatados em (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014) são *rugosidade média* (R_a) e *raiz média da rugosidade quadrada* (R_q). Essas medidas avaliam o desvio-padrão médio das alturas (vales e picos) em um perfil de superfície para calcular o grau de rugosidade. No entanto, para o cálculo desses parâmetros, primeiro é necessário calcular o plano de ajuste para os pontos adquiridos da superfície. A partir dos coeficientes do plano, é possível determinar a altura de um pico ou vale avaliando a coordenada de altura de cada ponto da nuvem. O cálculo do plano é descrito em mais detalhes no subcapítulo 3.2.1.

A *rugosidade média* R_a , é calculada conforme parâmetro descrito em (SANTOS; JÚLIO, 2013). No entanto, como é utilizada toda a área da amostra e não apenas um perfil, a formulação para cálculo do R_a é dada por:

$$R_a \approx \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |z_{ij}|$$

onde m define a quantidade de linhas (eixo Y) e n a quantidade de colunas (eixo X) da matriz de pontos. Portanto, z_{ji} é a coordenada de altura do ponto atual. A *rugosidade média quadrada* (R_q), também descrita em (SANTOS; JÚLIO, 2013), tem a fórmula adaptada para duas dimensões como:

$$R_q \approx \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n z_{ij}^2}$$

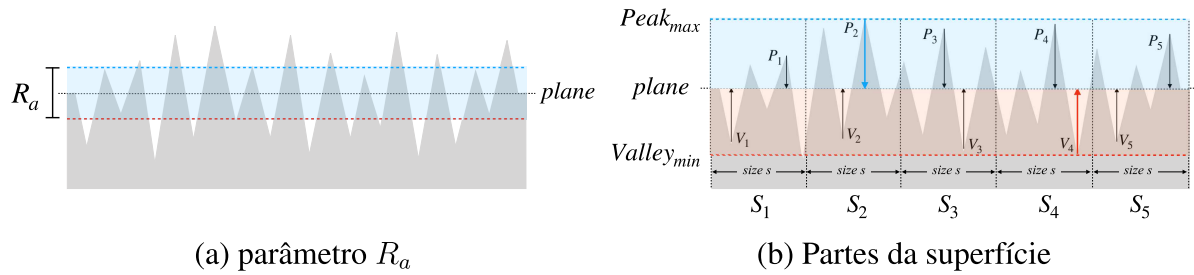


Figura 3: Perfil de superfície baseado nos parâmetros apresentados em (SANTOS; JÚLIO, 2013), com picos e vales. (a) O valor do parâmetro R_a e (b) dividindo a superfície em partes para calcular R_a .

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3, ilustra o comportamento do parâmetro em relação a um perfil de uma superfície amostrada.

No entanto, Santos et al. (SANTOS; JÚLIO, 2013) também destacam que os parâmetros R_a e R_q não fornecem nenhum tipo de avaliação da superfície local. Em (SANTOS; JÚLIO, 2013) outros parâmetros são descritos e estão relacionados com rugosidade. Esses parâmetros são calculados com base na discretização do perfil de superfície em partes menores e uniformemente espaçadas (S_{ij}), considerando informações sobre picos e vales separadamente. Na Tabela 1 apresenta os parâmetros descritos em (SANTOS; JÚLIO, 2013) e com fórmula adaptada para considerar dados em duas dimensões.

A principal característica envolvida no cálculo desses parâmetros é que eles são obtidos de amostras / partes de uma superfície, fornecendo um nível de controle local, porque os máximos e mínimos de cada parte são considerados. A Figura 3 (b), baseada no que foi apresentado em (SANTOS; JÚLIO, 2013), mostra a relação dos parâmetros calculados em picos e vales com amostras (ou partes) do perfil da superfície.

2.4 Análise de Rugosidade de Substratos Cerâmicos

Segundo apontam (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014) existem métodos que fazem a análise de topografia de superfície, em geral, em nível de ondulação. Primeiro passo é a aquisição de dados. Para fazer a captura de informações de rugosidade, tanto em nível de ondulação quanto rugosidade, podem ser utilizados equipamentos de profilometria 2D ou 3D. Não existe um consenso sobre o método mais adequado para determinação de rugosidade para substratos cerâmicos de argila vermelha (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014).

O método mais comum de determinação de rugosidade para blocos de cerâmica vermelha é pela aquisição de dados em duas dimensões, utilizando equipamento específico para este fim, o rugosímetro 2D (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014). Esse

Parâmetro	Fórmula	Descrição
R_{pm}	$\frac{1}{25} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 p(S_{ij})$	Média da altura dos picos (p) de todas as partes (S_{ij}).
R_{vm}	$\frac{1}{25} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 v(S_{ij})$	Média da profundidade dos vales (v) de todas as partes (S_{ij})
$R_{z(DIN)}$	$\frac{1}{25} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 p(S_{ij}) + v(S_{ij})$	Média da altura do pico (p) ao vale (v) de todas as partes (S_{ij})
$R_{z(ISO)}$	$\frac{1}{50} \left(\sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 p(S_{ij}) + \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 v(S_{ij}) \right)$	50 pontos de altura ou média da soma dos 25 maiores picos mais a soma dos 25 maiores vales
R_p	$\max(p(S_{ij}))$	Altura máxima de pico (p) de todas partes (S_{ij})
R_v	$\max(v(S_{ij}))$	Profundidade máxima de vale (v) de todas partes (S_{ij})
R_{max}	$\max(p(S_{ij}) + v(S_{ij}))$	Altura máxima de pico (p) a vale (v) de todas partes (S_{ij})
R_y	$\max(p(S_{ij})) + \max(v(S_{ij}))$	Altura total de rugosidade, que é a soma das alturas do pico mais alto (p) e o vale (v) mais profundo de todas as partes (S_{ij}).

Tabela 1: Demais parâmetros relacionados com rugosidade, descritos em (SANTOS; JÚLIO, 2013) e adaptados para duas dimensões.

Fonte: Elaborado pelo autor.

método, via de regra, trabalha com a aquisição de uma linha ao longo de uma amostra em uma direção (horizontal ou vertical) e posição de escolha por parte de um profissional, seguindo a percepção pessoal sobre qual linha pode representar melhor a rugosidade de uma amostra. Um problema associado com este método é a resolução do equipamento para leitura, visto que a varredura acontece por equipamento mecânico, que tem maior limitação de alcance. Além disso, o diâmetro da agulha para leitura também estabelece um limite horizontal de resolução, podendo impedir a leitura de estruturas de alta frequência e distorcer medição de picos e vales agudos. A Figura 4 ilustra os esquemas de funcionamentos do rugosímetro 2D e de leitura por equipamento laser 3D e suas limitações.

Para realizar a medição 2D, o primeiro passo é a definição de um ponto inicial para aferir a altura zero, o ponto inicial de ajuste. Depois é feita a leitura dos pontos em uma linha. Os equipamentos, em geral, retornam uma lista pontos (uma linha), onde a coordenada X é o passo da amostragem e a coordenada Y é a altura associada a um ponto de ajuste inicial. Valores positivos em Y representam picos e valores negativos representam vales da amostra. O parâmetro R_a é calculado com base na distância absoluta em Y do ponto atual em relação ao Y do ponto de ajuste inicial (altura zero). E o valor final da rugosidade é a média dessas distâncias absolutas. A Figura 5 ilustra o equipamento de leitura utilizado neste experimento, rugosímetro 2D Mitutoyo SJ-210/178-561-02A, com diâmetro da ponta da agulha de $5 \mu m$, com ângulo de

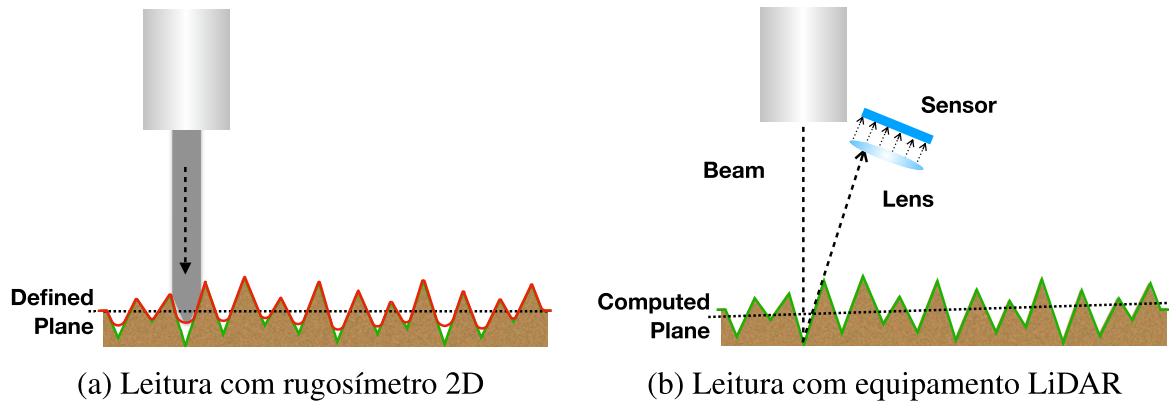


Figura 4: Esquema que representa o funcionamento do equipamento de leitura 2D, o rugosímetro 2D (a) e o equipamento de varredura laser para 3D (b).

Fonte: Elaborado pelo autor.

formato da ponta de 90° e força de medição de $4mN$. Dados fornecidos pelo fabricante ¹



Figura 5: Equipamento de leitura de contato: rugosímetro 2D.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O problema é que uma medição em uma dimensão pode não ser representativo para coeficiente de rugosidade uma amostra e vários autores já sugerem isso (BAGHERIFARD; GHELI-CHI; GUAGLIANO, 2012; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014; KLINGVALL EK et al., 2016; SASSONI et al., 2017).

Para demonstrar este problema de posição e orientação relacionados ao método de determinação de rugosidade em 2D, foram realizadas análises estatísticas sobre diversas amostras. Primeira questão é, considerando que a posição e direção são de escolha do operador (uma escolha subjetiva), é possível afirmar que uma linha é representativa para determinar a rugosidade de uma amostra? Para responder esta pergunta, a partir de dados amostrados no método 2D,

¹<https://www.mitutoyo.com.br/surfestest-sj-210-serie-178-rugosimetro-portatil-178-561-02.html>

é importante verificar se os dados possuem uma similaridade entre amostragens de diferentes posições e direções. A análise estatística de variância sobre o desvio-padrão das amostras, aplicando o teste de hipóteses, mais especificamente o teste F, a um nível de significância de 5%, determina se há uma diferença significativa entre as amostras. Se os dados são significativamente diferentes, então as amostras não são individualmente representativas para a superfície.

A partir da leitura de diversas amostras em duas direções (horizontal e vertical) e em duas posições relativamente próximas ao centro de cada amostra, são utilizados os valores de desvio-padrão dos valores de R_a destas amostras para verificar o quão diferentes são os dados, mais especificamente, qual é o comportamento de erro de altura (R_a) em relação a média (plano). Outra questão relacionada ao método 2D é se a representação de R_a na amostragem 2D é independente de direção. Portanto, se amostrar tanto horizontal quanto vertical, haverá um resultado similar. Novamente aplicando o teste F a um nível de significância de 5%, comparando o desvio-padrão dos R_a entre amostras horizontais e amostras verticais, pode-se comprovar, estatisticamente, que há diferença significativa entre as amostras, pois a dispersão de erro é significativamente diferente entre as direções.

A Tabela 2 apresenta as amostras e o seu respectivo desvio-padrão. Os dados para análise foram coletados e processados conforme procedimento definido em (ISO 4287, 2009). Para realizar o teste foram coletados 12 blocos de cerâmica vermelha com a mesma composição de argila, para que não se tenha variação de material, o que alteraria características da superfície na composição mineral, gerando uma variável que não é controlada nos testes. As amostras coletadas foram organizadas em quatro grupos de temperatura de sinterização (700, 800, 900 e 1000 °C), para obter uma variabilidade dos dados em relação a topografia da superfícies. Na Tabela 2, os grupos das amostras são identificados com os números 7, 8, 9 e 10 e um sequencial na ordem em que os pontos dos blocos foram lidos para o teste. No total foram utilizadas 48 amostras, sendo que 4 amostras foram selecionadas de cada bloco e 3 blocos foram produzidos em cada grupo temperatura de sinterização. Foi utilizado um critério qualitativo e visual de seleção de amostras. As amostras selecionadas para o teste foram aquelas que não apresentavam imperfeições por conta do processo de produção e nem problemas relacionados à leitura dos dados.

Para realizar o teste F foi computado o desvio-padrão para cada coluna de dados da Tabela 2. Também foi parametrizado que a hipótese de diferença como zero. O resultado do teste F, comparando duas linhas numa mesma direção e duas linhas em direções diferentes, é apresentado na Tabela 3.

De acordo com as análises realizadas é possível afirmar que, estatisticamente, as amostras são diferentes, visto que o valor F é maior do que o $F_{crítico}$. Logo, a aquisição de dados em uma linha, tanto na direção de amostragem interfere no resultado final, quanto na amostragem numa mesma direção, porém em diferentes posições, não é representativa para a rugosidade de uma amostra, o que torna o método instável ou dependente de escolha por parte de um profissional. Outros trabalhos já relatam esse problema de amostragem em uma linha (BAGHERIFARD;

Superfície	Horizontal		Vertical	
	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2
71-03	0,8471	1,1258	0,9308	0,8634
71-04	1,6931	0,9978	0,9809	0,9298
71-08	0,8628	0,8525	0,7837	1,1122
71-11	0,9806	0,9134	0,6992	0,9292
72-05	0,9853	1,1663	1,6398	0,9165
72-06	1,0962	0,8276	1,0415	1,0203
72-08	0,9987	0,8439	1,0053	1,1583
72-14	1,2594	0,7634	0,9022	0,7164
73-03	1,0350	0,8634	1,4271	0,8987
73-06	0,7552	1,2059	0,5871	0,8109
73-13	0,9096	0,9328	1,3053	0,9864
73-15	0,8006	1,0205	1,3849	0,6109
81-06	0,7744	1,3646	0,9613	1,1366
81-08	0,6939	0,7635	0,9697	1,0487
81-12	0,9187	0,8118	1,1226	1,3678
81-15	0,9316	0,9052	0,9327	1,0162
82-05	1,2767	1,4049	0,9913	1,5418
82-08	0,9438	0,8784	1,2217	1,0552
82-11	1,2789	0,8376	0,9805	4,1996
82-13	0,9912	1,2367	1,2521	0,8468
83-05	1,0500	1,0534	0,6556	1,0615
83-06	0,8659	1,2937	1,1739	1,2836
83-11	1,2937	1,1556	1,3699	4,5555
83-13	1,1755	0,9769	1,3883	0,9521
91-04	0,9132	1,1904	1,1377	0,7836
91-08	0,7536	0,8788	0,8143	0,9617
91-13	0,7578	1,1306	1,3255	1,0329
91-14	0,8573	1,4417	1,0500	0,9345
92-08	1,1240	1,6671	1,5400	1,5633
92-09	1,1453	1,5682	1,8174	1,2779
92-14	1,9432	1,6190	1,6532	0,9649
92-17	1,2351	1,1890	1,3075	1,5521
93-05	1,0739	0,9791	0,9382	0,9536
93-08	1,5049	0,9696	1,2109	1,0469
93-11	1,8797	1,2049	1,2735	0,7708
93-13	0,9582	1,1871	1,4655	1,3510
101-06	1,5987	1,6958	1,6192	1,8935
101-07	2,2042	1,8078	1,4420	1,3821
101-09	1,6568	2,0279	1,7739	1,4617
101-14	1,9309	1,7018	1,4297	1,4723
102-01	1,2393	1,5095	1,3744	1,7013
102-06	1,7790	2,2622	2,4506	2,2834
102-09	1,9592	1,9522	2,3270	2,4435
102-15	1,7772	2,3364	2,0537	1,7560
103-06	1,6724	1,7581	2,3468	2,3246
103-08	2,0832	1,1354	2,2943	1,7291
103-17	1,8999	1,8123	1,8078	1,3682
103-19	1,7233	1,6697	1,8490	1,9687

Tabela 2: Desvio-padrão dos dados associados ao R_a da leitura 2D

Fonte: Elaborado pelo autor.

Amostra 1	Amostra 2	F	$F_{crítico}$	Diferentes
H1	V1	1,1382	1,6238	N
H2	V2	3,5025	1,6238	S
H1	V2	3,2246	1,6238	S
H2	V1	1,2363	1,6238	N
H1	H2	1,0862	1,6238	N
V1	V2	2,8331	1,6238	S
H1H2	V1V2	2,2731	1,4038	S

Tabela 3: Resultados do teste F, comparando os dados de desvio-padrão das amostras 2D.

Fonte: Elaborado pelo autor.

GHELICHI; GUAGLIANO, 2012; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014; KLINGVALL EK et al., 2016; SASSONI et al., 2017). No presente trabalho, esta diferença é confirmada através das análises estatísticas.

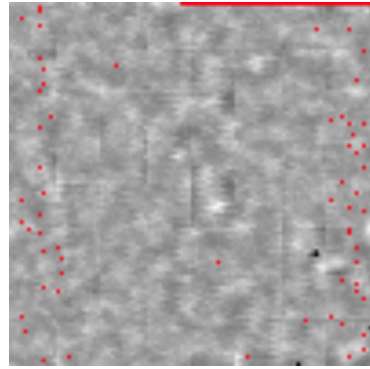
Em relação à anisotropia, entre sentido horizontal e vertical, estima-se (SAHOO, 2011; SASSONI et al., 2017) que tem origem na etapa de conformação do bloco cerâmico, mais especificamente no processo extrusão, justamente pelo contato entre a massa cerâmica e as paredes da boquilha da maromba. A Figura 6 é um exemplo de diferentes blocos e de como pode ser observada a anisotropia entre os sentidos de leitura dos dados. As linhas horizontais e verticais apresentam mais diferenças, comparando um sentido com outro, o que é comum para o processo de análise rugosidade 2D.

2.5 Aquisição de Dados por Equipamento Laser 3D

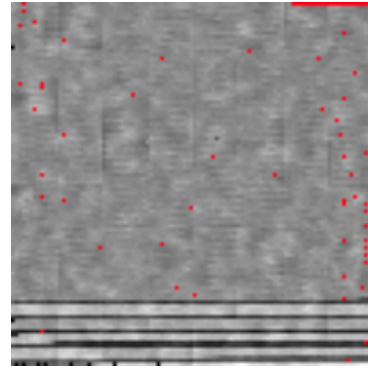
Equipamentos e sistemas de computador são usados para o cálculo da rugosidade da superfície. Uma maneira eficiente de obter informações de superfície é através do equipamento de varredura a laser (MAH et al., 2013; BERGER et al., 2014). Sistemas baseados em leitura laser são mais rápidos e fornecem uma melhor resolução e exatidão de leitura em comparação aos equipamentos mecânicos (rugosímetro 2D, por exemplo). No geral, os equipamentos têm resolução de leitura na ordem dos micrometros, partindo $1 \mu m$.

Nessa técnica, um raio emitido pelo equipamento atinge o alvo, e sua reflexão é lida pelo equipamento para medir a posição e a profundidade do ponto onde o raio colidiu com o alvo. Em alguns equipamentos, a cor associada ao ponto de lido é retornada. O resultado dessa amostragem é uma nuvem de pontos 3D. Na Figura 4 (b), é exemplificado o esquema de leitura a partir de equipamento laser 3D. A partir da nuvem de pontos calcula-se a geometria e as informações topográficas da superfície, para depois determinar a rugosidade via software.

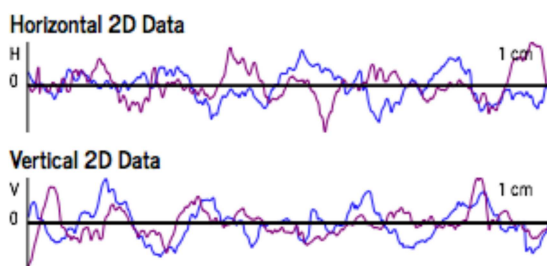
Cristea et al (CRISTEA et al., 2018) identificaram uma relação entre 2.5 a 3.5 vezes maior nos valores médios de amplitude da rugosidade medidos por métodos 3D em comparação com os medidos pelo método 2D. Os autores apontam que o intervalo de dispersão é menor na análise 3D do que na 2D e que o valor médio do mesmo parâmetro é maior para a avaliação 3D em



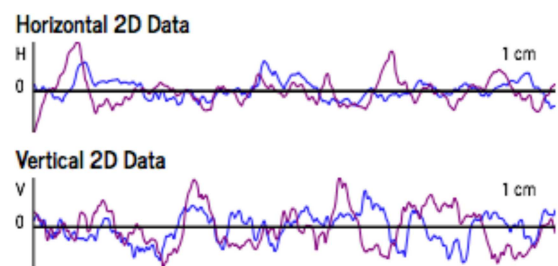
(a) Amostra sem artefatos de relevo



(b) Amostra com artefatos de relevo



(c) Linhas sem artefatos



(d) Linhas com artefatos

Figura 6: Exemplo de amostras de um mesmo bloco cerâmico. Em a) temos bloco sem artefatos de relevo na amostra. Em b) a amostra apresenta artefatos que, estima-se, sejam decorrentes do processo de extrusão (SAHOO, 2011; SASSONI et al., 2017). Já c) e d) são amostras 2D de linhas horizontais e verticais das amostras, respectivamente, de a) e b). Pontos vermelhos em a) e b) representam falhas de leitura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

comparação com o valor obtido em uma análise 2D.

Neste trabalho, utilizamos a leitura de dados a partir de equipamento laser 3D (LiDAR) para aferir a rugosidade de superfícies de substratos cerâmicos de argila vermelha. O equipamento utilizado é o Starrett AV300+ com resolução em X e Y de $E2 = 1,9 \mu m + 5L/1000$ e resolução em Z de $E1 = 2,5 \mu m + 5L/1000$, resolução de escala de $0.1 \mu m$. Dados fornecidos pelo fabricante ². A Figura 7 apresenta o equipamento utilizado no processo leitura laser. Mais detalhes sobre a utilização do equipamento e processo de leitura estão descritos no subcapítulo 3.1.2.

2.6 Considerações sobre trabalhos relacionados

Apesar do controle local fornecido no cálculo dos parâmetros, baseado na divisão do perfil em partes/amostras, em (MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014) os autores também indicam

²<https://www.starrett.com/metrology/product-detail/AV300+>



Figura 7: Equipamento de leitura laser utilizado nos experimentos deste trabalho.

Fonte: Site do fabricante. <https://www.starrett.com/metrology/product-detail/AV300+>

que a análise de superfície multirresolução produz os melhores resultados para computação de rugosidade a partir de geometria. Outros trabalhos como (LAVOUÉ, 2007, 2009; WANG; TORKHANI; MONTANVERT, 2012) não visam a medição quantitativa da rugosidade, mas usam uma medição da rugosidade como um critério de avaliação subjetivo da reconstrução da malha qualidade.

Por fim, considera-se que o método convencional de cálculo de rugosidade, chamado método 2D, não é suficiente para caracterizar a rugosidade de uma amostra. O método 3D pode ser utilizado para encontrar resultados com maior resolução e exatidão. Além disso, outras formas de avaliação de rugosidade e aderência através da área de contato se mostram oportunas a partir da amostragem 3D.

Uma discussão sobre a comparação entre diferentes métodos de determinação de rugosidade, mais especificamente limitações sobre método de aquisição 2D, avaliação em macroescala escala, análise dos parâmetros de rugosidade e sua relação com aderência através da área de contato com matriz cimentícia, é detalhada no trabalho que está sendo desenvolvido em conjunto (ARNOLD, Prelo, 2021).

Neste trabalho, é proposto um método para a medição de rugosidade utilizando dados tridimensionais, abrangendo toda área de uma amostra, com maior resolução e exatidão e a proposição de medição de áreas da superfície onde pode ocorrer um favorecimento à aderência por contato. Propõe-se, ainda, um controle de divisão espacial que permite analisar a superfície amostrada em níveis hierárquicos (descrito no subcapítulo 3.2.3).

3 UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES

O método proposto neste trabalho abrange vários aspectos relacionados à análise de favorecimento de superfícies à aderência através da área de contato. Primeiro, o método aborda aspectos relacionados a aquisição e leitura de dados, com objetivo de evitar falhas na aquisição da dados. A segunda parte trata de um algoritmo para cálculo de um único plano de ajuste e computação dos parâmetros de rugosidade de superfícies. A terceira parte apresenta um conjunto de informações processadas para avaliação da rugosidade. Por fim, a quarta parte traz uma técnica cálculo de múltiplos planos de ajuste e alterações no cálculo de distância do ponto ao plano, bem como novos parâmetros relacionados à área de contato para medir em favorecimento da superfície para aderência através da área de contato.

3.1 Aquisição da Nuvem de Pontos

O sucesso da computação sobre nuvem de pontos está diretamente relacionado à qualidade dos dados de entrada. É comum que equipamentos de leitura, no caso, o equipamento de varredura a laser (LiDAR), produzam nuvem de pontos com falhas (BERGER et al., 2014) (veja Figura 8), o que pode levar a erros de computação, tanto na reconstrução de superfícies 3D como no cálculo de rugosidade. No caso da reconstrução de superfícies, os principais trabalhos utilizam diversas técnicas para tratar as imperfeições das nuvens de pontos a fim de resolver ou diminuir o problema, com restrições aos dados de entrada, ao tipo de forma geométrica tratada ou relacionado ao tipo e forma dos dados de saída computados (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006; TAUBIN, 2012; KAZHDAN; HOPPE, 2013; BERGER et al., 2014; NAN; WONKA, 2017). Contudo, para computação de coeficientes de rugosidade, isso não é possível, pois todas as informações são consideradas válidas e são utilizadas (não há remoção de ruídos) e a quantidade de dados influencia na qualidade dos resultados.

Diversos fatores podem impactar o resultado final. Ao longo do processo podem ocorrer diversas falhas, desde a confecção do material até a leitura dos dados pelo LiDAR. São fatores causadores de problemas: imperfeições na confecção das superfícies, erros no processo de preparação e queima do material, erro na preparação da superfície para leitura, limpeza da superfície, artefatos produzidos por marcações nos blocos, orientação dos blocos, desnível da superfície e regulagem de equipamento (altura x acurácia) na leitura. Esses fatores de erro podem ser controlados ou evitados ao longo do processo.

3.1.1 Processo de Produção de Blocos

O processo de produção dos blocos é realizado em duas etapas: a conformação do bloco na linha de produção na olaria e o ciclo de queima da cerâmica em diferentes temperaturas. A aquisição de dados de bloco deve ser feita em amostras que não contenham imperfeições,

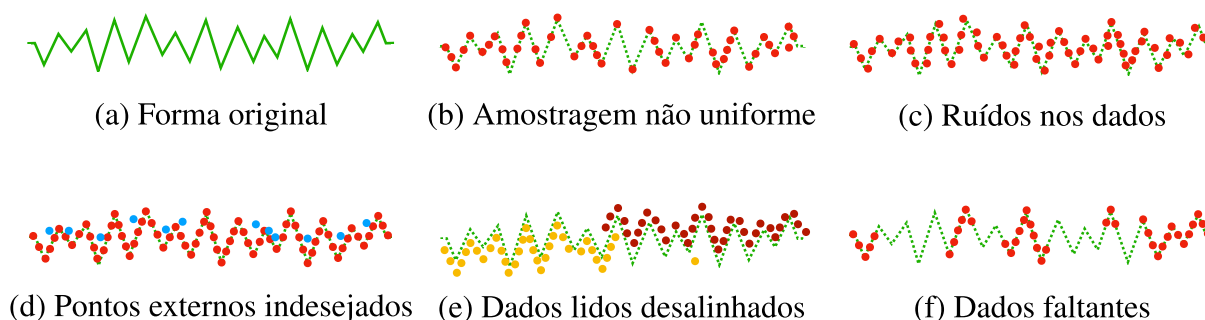


Figura 8: Tipos de falhas encontradas em nuvem de pontos, de acordo com (BERGER et al., 2014). Nos testes realizados, foram encontrados problemas mais frequentes com (b) amostragem não uniforme, (d) Pontos externos indesejados, (e) dados lidos desalinhados e (f) dados faltantes. Esses problemas são abordados com mais detalhes em (BERGER et al., 2014).

Fonte: Elaborado pelo autor.

tais como: ranhuras, blocos quebrados ou outras causadas por embalagem ou transporte. Caso não seja possível atender a esta premissa, recomenda-se seguir o processo de queima, conforme mostrado na Figura 9, visando garantir poucas imperfeições e homogeneidade entre os blocos, favorecendo o processo de leitura dos dados.

O processo de produção dos blocos é definido como:

1. Separar todos os blocos extrudados que serão usados para uma mesma temperatura de queima.
2. Os blocos devem ser colocados em estufa, em temperatura de 100 °C para secagem, o que é obtido quando a mudança de massa dentro de uma hora for inferior a 0,25%.
3. Quando a estabilização é atingida, inicia-se o processo de queima. A mufla é aquecida até a taxa projetada para o tijolo.
4. A cada hora, a temperatura deve ser aumentada na taxa projetada para o tijolo até atingir o pico de temperatura desejada.
5. Os blocos devem ser mantidos na temperatura de pico por um tempo determinado.
6. A mufla é desligada e o bloco pode esfriar.
7. Após o resfriamento total do bloco, uma face do bloco pode ser cortada para utilização no processo de leitura.

Nesse processo, é importante atentar para o manuseio dos blocos, a fim de evitar que artefatos sejam produzidos e causem falhas, conforme ilustrado na Figura 8, principalmente porque pontos externos indesejados podem ser produzidos ao longo do processo.

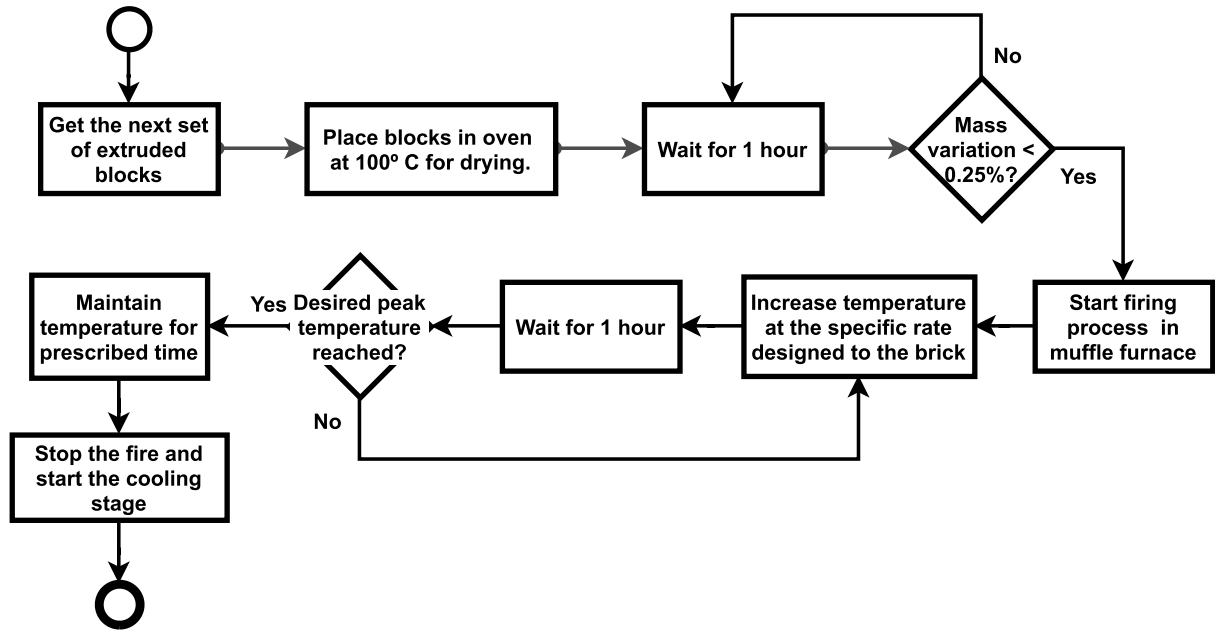


Figura 9: Processo de produção de blocos. Cada bloco deve ser cuidadosamente preparado para o processo de leitura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Processo de Leitura da Superfície

O propósito do processo de leitura é obviamente obter o máximo possível de pontos de uma superfície (BERGER et al., 2014). É um processo relativamente simples, mas requer alguns procedimentos básicos para garantir um método de leitura eficaz. É necessário definir a posição e tamanho da região de interesse e o número de pontos a serem lidos, ajustados com relação à acurácia de leitura do equipamento. Isso porque, em equipamentos LiDAR, como o utilizado neste trabalho, é possível obter a estimativa da quantidade de pontos a serem lidos e confrontar com a quantidade esperada. Quanto maior a acurácia, mais próximo da quantidade de pontos esperada será o resultado da leitura e isso representa uma medida de qualidade dos dados obtidos.

A Figura 10 ilustra um processo de leitura de dados com sucesso, evitando problemas devido a diversos fatores associados ao equipamento e, principalmente, aos objetos amostrados.

O foco do processo de leitura do método proposto, no entanto, é a descrição das atividades necessárias para a aquisição da nuvem de pontos para análise de rugosidade de superfície, e não contém etapas ou detalhes de atividades para processos que adquirem nuvens de pontos com outros objetivos. Por exemplo, foi considerado, neste processo, um scanner de mesa onde a parte a ser digitalizada repousa sobre uma mesa e o equipamento emite um feixe de laser de cima para baixo. Além disso, não foi considerada a aquisição de outras informações que possam ser relevantes para a reconstrução de superfícies, como cores ou normais, porque o

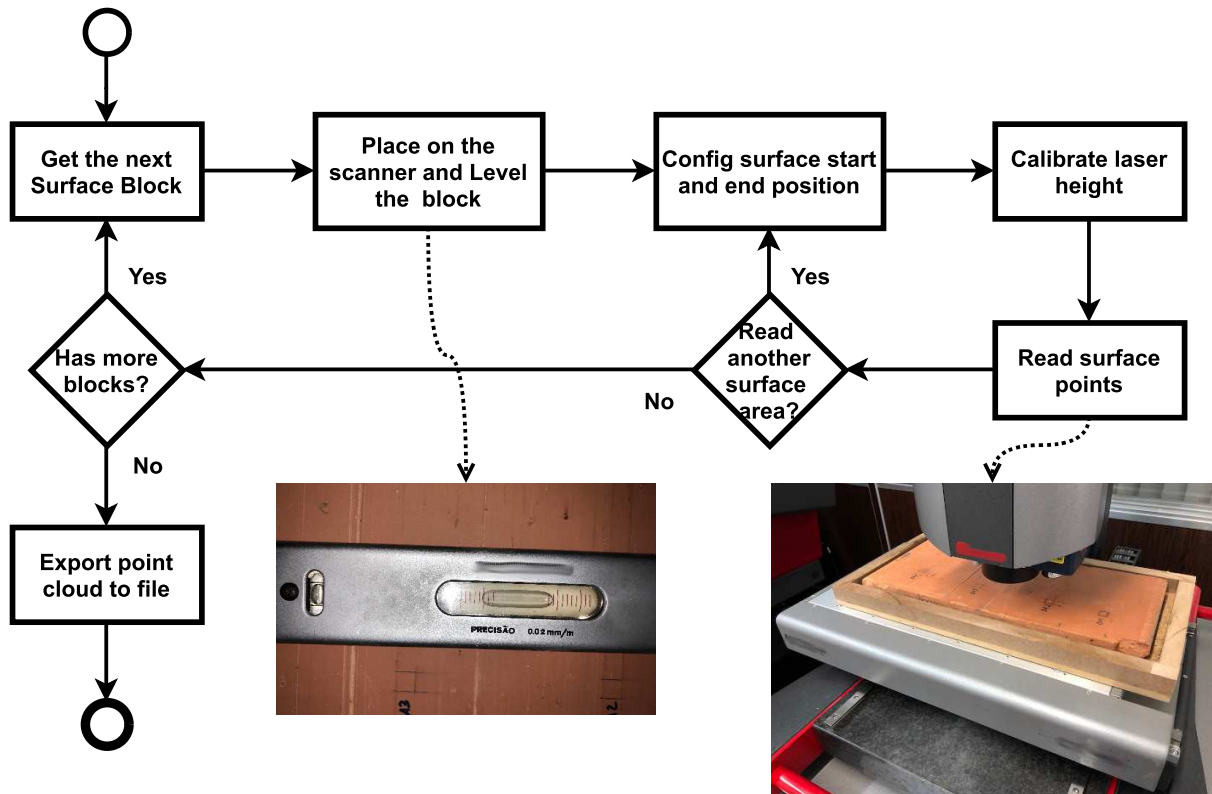


Figura 10: Processo de leitura das superfícies.

Fonte: Elaborado pelo autor.

processo se concentra justamente nas informações dos pontos e principalmente a altura (eixo Z) para calcular a rugosidade.

O processo que é executado após a produção e limpeza dos blocos (veja Figura 10) está definido como:

1. Para cada bloco de superfície adquirido, o nível do bloco no equipamento deve ser ajustado para evitar problemas causados pela orientação da amostra (no subcapítulo 3.1.2.1, são descritos os problemas relacionados à orientação do bloco).
2. Definir o local de digitalização da superfície. Nesse ponto, deve-se escolher locais que não possuam artefatos ou problemas na superfície do material. Deve-se evitar riscos, relevos produzidos pelos materiais que compõem a superfície, pequenos orifícios, grandes depressões e imperfeições em geral. Uma boa abordagem é usar um modelo com o tamanho de superfície desejado para marcar a posição inicial de uma região de interesse e, em seguida, definir manualmente a posição final de digitalização no *software* da máquina. Dessa forma, o equipamento irá ler uma região retangular alinhada com os eixos do plano da superfície de base (plano XY).
3. Ajustar o equipamento para maior acurácia de leitura dependendo da altura do bloco em

relação ao equipamento. O equipamento LiDAR geralmente permite o ajuste da altura do laser através de *software* e *hardware*, sendo possível definir manualmente a acurácia de leitura em relação à altura.

4. Configurar o número de pontos a serem lidos (número de linhas e colunas). Verificar o número final de pontos que podem ser lidos e se a resolução de leitura (distância mínima entre pontos nas direções X e Y) está de acordo com a resolução de leitura do equipamento. Iniciar o processo de leitura do equipamento LiDAR.
5. Para cada superfície amostrada, repetir os passos a partir do item 2.
6. Ao final do processo, exportar do *software* do equipamento as nuvens de pontos digitalizadas e para processamento no *software* de cálculo de rugosidade.

3.1.2.1 Configurações e problemas relacionados a leitura de dados

No processo de leitura do equipamento LiDAR, as falhas ocorrem principalmente por causa de artefatos ou imperfeições dos blocos. No entanto, problemas de leitura também podem ocorrer se a superfície não estiver bem posicionada e orientada. A configuração mais importante nesse processo é a acurácia da leitura na direção da altura (tratada como o eixo Z , por padrão). Esse ajuste é definido pelo *software* do equipamento, que deve ter um meio de ajustar a altura para a leitura dos dados, a fim de obter precisão e exatidão das informações lidas. Se a altura do laser estiver inadequada, o equipamento pode não ler tantos pontos quantos estiverem configurados para a superfície definida ou ter um erro de leitura (assim como exemplo na Figura 8). Além do problema de leitura da altura e alcance do sensor, a alta absorção de luz e as oclusões no processo de varredura podem resultar em uma grande perda de informações de leitura (BERGER et al., 2014).

É importante ressaltar que pelo fato dos blocos de superfície apresentarem variações de altura, devido ao processo de fabricação dos blocos e possível mente exacerbada no processo de queima, o ajuste de altura deve ser realizado para o bloco e também para cada superfície a ser digitalizada.

O problema de rotação vertical é causado por artefatos e uma falha no corte dos blocos durante o processo de aquisição. Para evitar o problema de rotação e beneficiar a aquisição do maior número possível de pontos na superfície, o bloco deve ser alinhado aos eixos da base do scanner e disposto em suporte que permita o nivelamento. Esse nivelamento remove quaisquer problemas de orientação vertical da superfície. Para garantir isso, o bloco deve ser colocado sob um material que permita a moldagem ou nivelamento no momento da leitura. No subcapítulo 3.1.2.2, é descrito como resolver o problema de nivelamento e rotação de blocos.

Por fim, é importante observar que muitos problemas que causam desalinhamento, falta de dados ou ruído são causados pelas características inerentes ao equipamento utilizado.

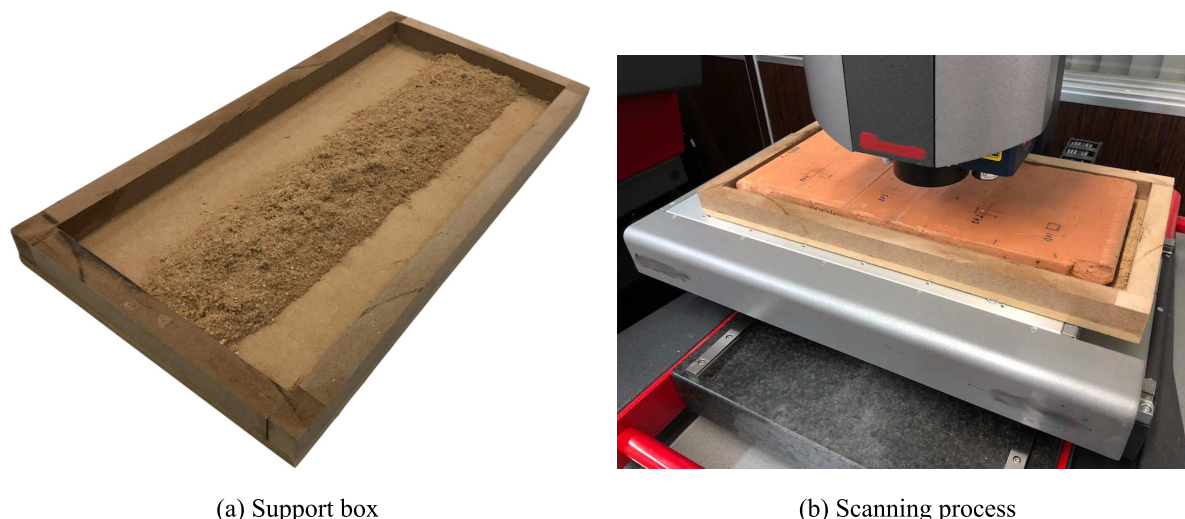


Figura 11: Caixa de suporte (a) para ajuste de posicionamento e rotação do bloco. Processo de leitura (b) com caixa de suporte.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2.2 Ajuste de nivelamento dos blocos

Durante os testes foram encontrados alguns desafios (conforme ilustrado em 8) para garantir a eficácia do processo de leitura das nuvens de pontos das superfícies.

Ao digitalizar uma amostra, podem ocorrer problemas de legibilidade devido ao nivelamento incorreto (consulte o subcapítulo 3.1.2.1). Para solucionar os problemas de rotação e nivelamento, foi desenvolvido um suporte para facilitar o manuseio e nivelamento dos blocos. O sistema deve suportar o bloco e permitir os ajustes de posição e nível. As dimensões devem ser adequadas para evitar sobrepeso e facilitar o manuseio do bloco. Deve-se garantir que a massa do conjunto não exceda o limite especificado para o equipamento LiDAR utilizado.

A figura 11 mostra a caixa de suporte utilizada nos testes, confeccionada em madeira, com 25 mm de altura e dimensões horizontais adequadas para a amostra, mais uma folga de 10 mm. É importante ressaltar que as configurações de leitura do equipamento devem ser feitas de acordo com as especificações do equipamento utilizado. As etapas do processo devem ser definidas de forma a não prejudicar o funcionamento do equipamento ou a leitura dos dados.

3.2 Computação de Rugosidade de Superfícies a Partir de Um Único Plano

Após processo de aquisição das nuvens pontos, é executado o processo de computação e representação dos coeficientes de rugosidade de um superfície como uma *quadtree*. O processo de computação dos coeficientes de rugosidade é ilustrado na Figura 12.

O processo de cálculo dos coeficientes de rugosidade deve ser executado para cada nuvem

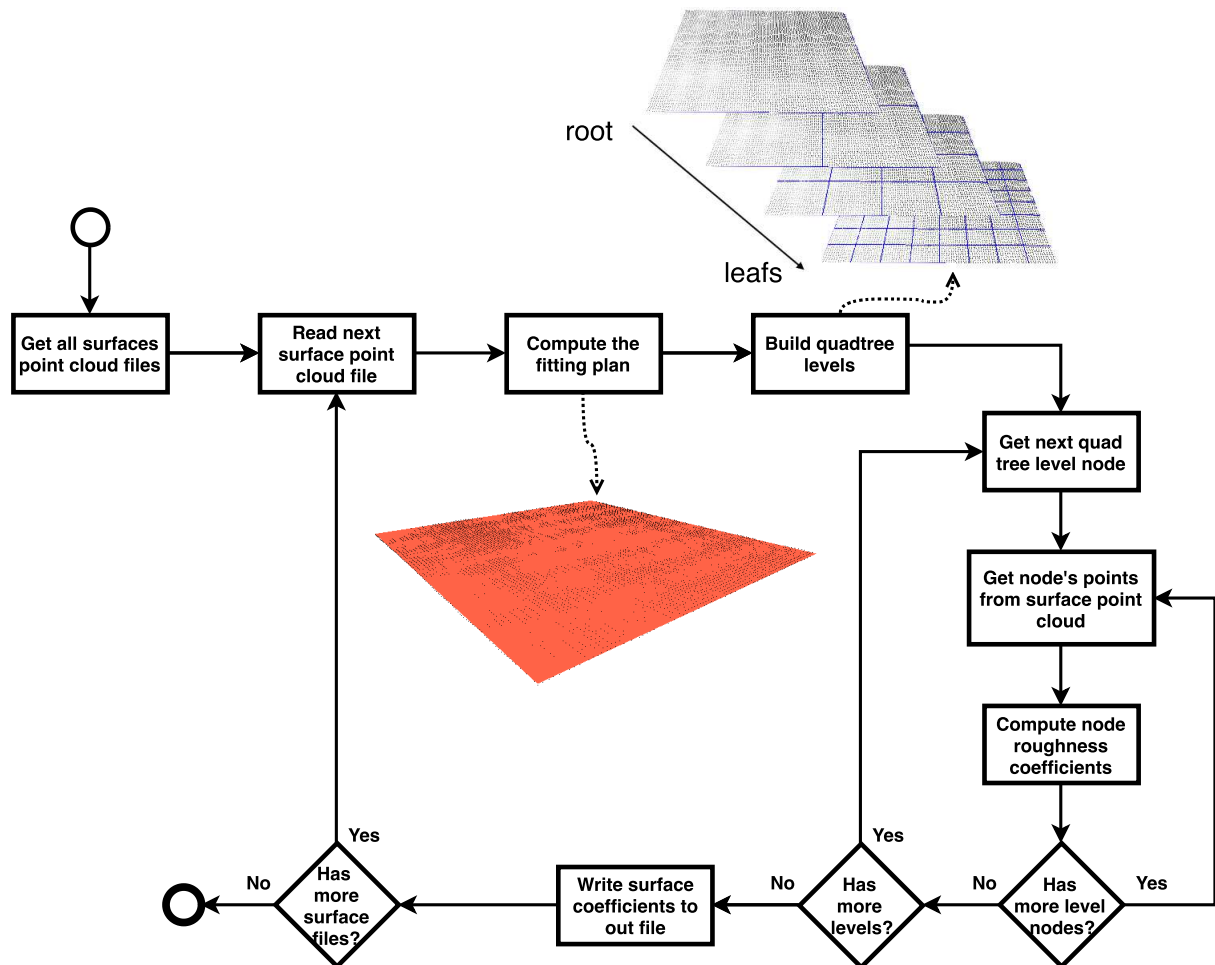


Figura 12: Processo para computação dos coeficientes de rugosidade das superfícies.

Fonte: Elaborado pelo autor.

de pontos das superfícies lidas no processo de leitura:

1. Ler o próximo arquivo de nuvem de pontos (um por superfície digitalizada). Os dados, que são exportados pelo *software* do equipamento laser, devem ser traduzidos em uma estrutura de vértice 3D.
2. O plano de ajuste deve computado, conforme descrito no subcapítulo 3.2.1.
3. A *quadtree* deve ser montada de acordo com a quantidade de níveis definidos para o programa. Ver mais detalhes no subcapítulo 3.2.3.
4. Os coeficientes são computados por nível e por nodo. Então, para cada nodo de cada nível da *quadtree*:
 - (a) Obter os pontos pertencentes a região do nodo atual.
 - (b) Calcular os coeficientes de rugosidade, conforme descrito subcapítulo 3.2.2

5. Os coeficientes rugosidade calculados para a superfície são gravados em arquivo de saída para posterior visualização e tratamento de informação.

3.2.1 Cálculo do Plano de Ajuste

As medições de rugosidade são essencialmente diferenças de altura dos pontos da nuvem em relação à altura do plano de ajuste (P) que representa essa nuvem de pontos. O plano de ajuste pode ser entendido como uma superfície lisa que representa a nuvem pontos. Esse plano está orientado e inclinado conforme a superfície que foi amostrada.

O plano de ajuste que melhor representa a nuvem de pontos pode ser obtido através do método dos mínimos quadrados (MMQ). No MMQ é feita uma regressão planar a partir da nuvem de pontos 3D para representação do plano (2D), através da regressão múltipla. O MMQ encontra os coeficientes do plano de ajuste minimizando o erro (resíduo) quadrado dos dados.

A equação do plano de ajuste P é definida como (BJÖRCK, 1990; FENG et al., 2001; FERNÁNDEZ, 2005):

$$Z = b_0 + b_1x + b_2y$$

Na regressão múltipla existem k variáveis que influenciam no valor de outra variável. Para solução analítica que resolve o mínimo quadrático temos $f(x) = \beta + b_1k_1 + \dots + b_nk_n$. Na forma matricial, que simplifica a resolução do problema:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \end{bmatrix}$$

O coeficientes do plano (b_0 , b_1 e b_2) são os elementos da matriz B que é definida como:

$$B = \begin{bmatrix} b_0 & b_1 & b_2 \end{bmatrix}$$

A matriz B é encontrada pela forma matricial de cálculo do plano a partir das matrizes de geometria da nuvem de pontos A e L :

$$B = A \times L$$

Onde A é a matriz formada pelos pontos da superfície sem a componente de altura (portanto, componentes x e y) e L é a matriz que representa os componentes de altura (z):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & y_0 \\ 1 & x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$$

Considerando que o número de incógnitas é diferente do número de soluções, pode-se reduzir a fórmula de cálculo para matriz B , para o seguintes sistema de multiplicação de matrizes:

$$B = (A^T \times A)^{-1} \times (A^T \times L)$$

Onde A^T é a matriz transposta de A e A^{-1} é a matriz inversa de A .

A rugosidade em um determinado ponto (p_{ij}) da nuvem de pontos será a distância ou diferença de altura deste ponto em relação ao plano de ajuste que representa a superfície, conforme descrito no subcapítulo 3.2.2.

A Figura 13 mostra um exemplo de um plano de ajuste que foi calculado através de seus coeficientes (matriz B) e dos pontos nos cantos da superfície.

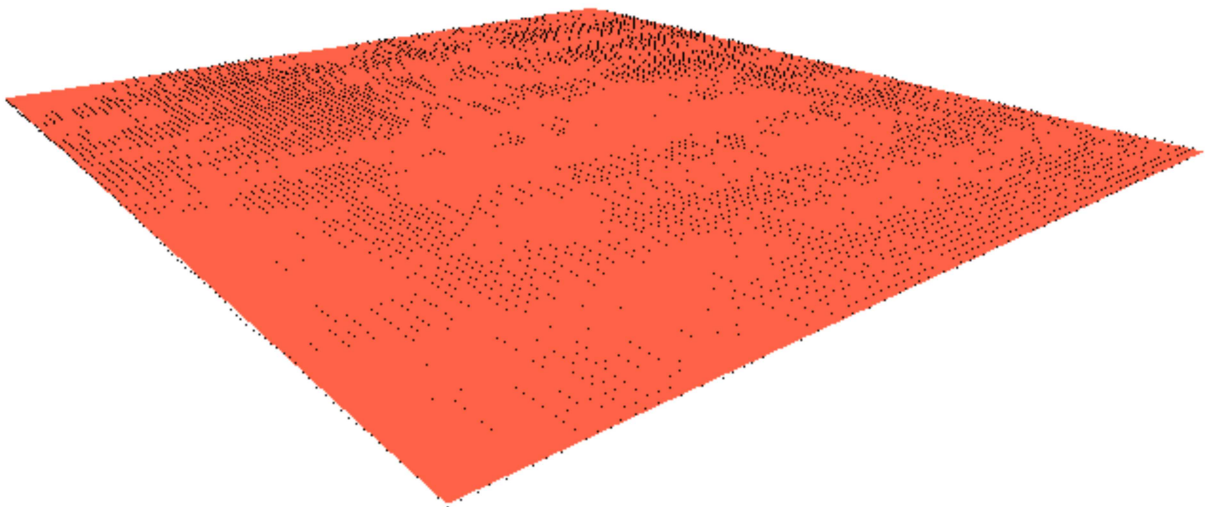


Figura 13: Exemplo de plano de ajuste (laranja) computado sobre uma nuvem de pontos (em preto).

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Computação dos Parâmetros de Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade são calculados a partir da matriz B de coeficientes do plano. No caso da rugosidade média (R_a), para cada ponto (p_{ij}) da matriz de pontos, considerando que z_{ij} é a altura do ponto (p_{ij}) em relação ao plano de ajuste: $z_{ij} = b_0 + b_1 \times p_{ij}x + b_2 \times p_{ij}y$. O z calculado para R_a é absoluto; no entanto, para calcular picos e vales, valores positivos e negativos são considerados. Os picos e vales base para o cálculo dos outros parâmetros de rugosidade, têm as formulações descritas em (SANTOS; JÚLIO, 2013) e adaptadas no capítulo 2.

Outra questão relevante de implementação é a divisão da área de superfície ou parte dela em partes. Como um perfil 2D (plano XY) é considerado para o cálculo, um parâmetro de divisão

de área é definido para considerar um número configurável de partes. Nos testes realizados, esse parâmetro foi definido como 5, conforme descrito em (SANTOS; JÚLIO, 2013). No entanto, para representar essas partes em uma área e não num perfil, a divisão ocorre nas direções XY (5×5), totalizando 25 partes para cada área da superfície analisa. Embora seja possível explorar outros valores, neste trabalho não foi considerado relevante realizar experimentos com outros valores.

3.2.3 Estrutura Hierárquica para Representação dos Parâmetros de Rugosidade

Os coeficientes ou parâmetros de rugosidade, calculados sobre toda a superfície, indicam os valores médios ou globais para toda a região da amostra. No entanto, a distribuição local desses valores não é considerada. É comum que uma superfície introduza uma variação de coeficiente de acordo com a amostragem local da rugosidade.

A avaliação dos parâmetros em um local específico, respeitando um critério de localização beneficia tanto a comparação entre as diferentes regiões da amostra, quanto entre as diversas amostras de materiais de uma superfície ou de vários blocos produzidos com um mesmo material. Espera-se, por exemplo, que diferenças significativas ocorram na superfície de uma amostra, tanto pela composição e diversidade de minerais presentes na massa do bloco, quanto pelo resultado do processo de fabricação, principalmente, pela etapa de extrusão. No entanto, entre diferentes amostras de uma mesma fabricação, espera-se um comportamento semelhante para os coeficientes do mesmo local ou dentro de uma variação esperada por conta de eventuais alterações no processo de confecção da superfície.

Para avaliar os parâmetros de rugosidade em vários locais de uma amostra de material, é proposta uma divisão espacial hierárquica da área amostrada. Embora essa divisão espacial possa ser implementada de várias maneiras, é relevante considerar um padrão de dimensão área e de localização para cada região e o tamanho da própria região. Um padrão de divisão e de localização (tal como definido numa *quadtree*) favorece a comparação de diferentes amostras e o tamanho da região é importante para determinar a significância da medição da rugosidade.

O tamanho de cada região pode variar significativamente entre os diferentes tipos de materiais. Este parâmetro de tamanho deve ser definido pelo usuário, portanto, por quem avalia os valores calculados e define a melhor resolução para avaliar. Para a divisão espacial é utilizada uma estrutura de dados *quadtree*, cujo padrão de divisão e localização das partes é o mesmo para todos os níveis de detalhe (sempre divide em 4 a área do nodo), independente do tamanho da amostra.

Uma *quadtree* é uma estrutura árvore amplamente usada para divisão espacial na representação cenários em computação gráfica, seja para testes de colisão, representação de estruturas para um nível de detalhamento ou para manter informações hierárquicas sobre um determinado local. Como característica, um nodo deste tipo de árvore pode ser uma folha (sem nodos filhos, isto é, o fim de um ramo) ou um ramo (com exatamente quatro nodos filhos). Um nodo de galho

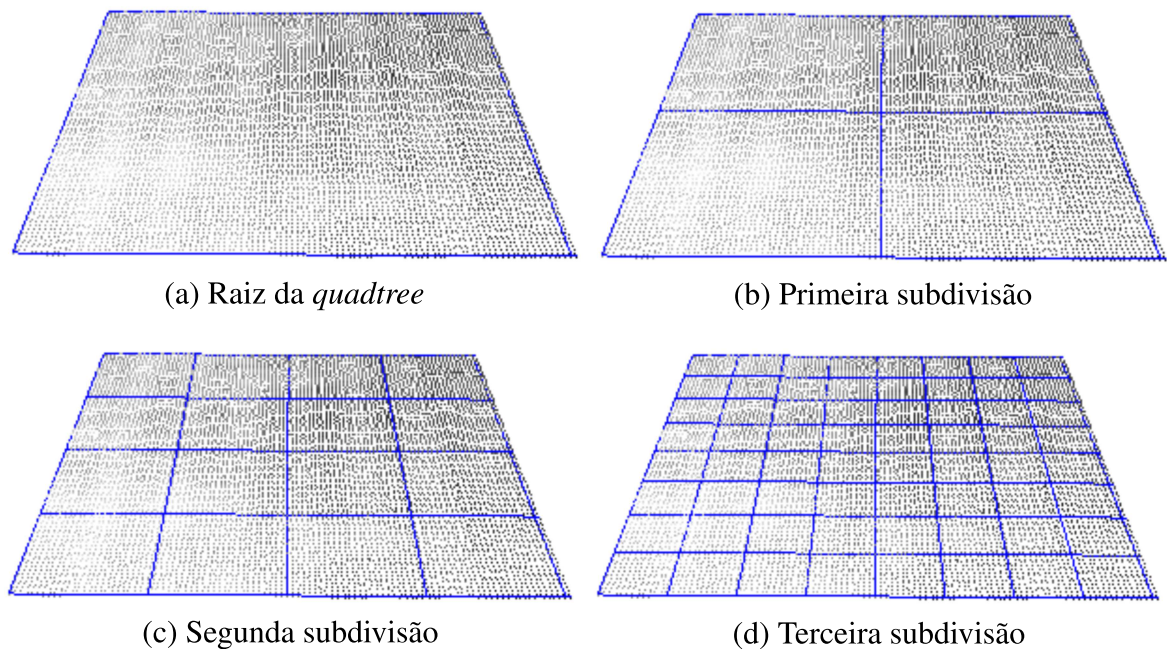


Figura 14: Subdivisão espacial hierárquica com *quadtree*. (a) elemento da raiz; (b–d) são subdivisões sucessivas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

de árvore possui valores médios que representam os valores calculados de seus quatro nodos filhos. Se os nodos filhos também são ramos, eles também têm valores médios ou representativos para seus quatro nodos filhos e assim por diante. Assim, no nível mais alto da árvore (chamado de raiz), tem-se os coeficientes de rugosidade calculados para toda a superfície. Em cada nível da árvore, os parâmetros de rugosidade de cada região são calculados com relação à divisão espacial. O último nível é o parâmetro definido pelo usuário para a área mínima de avaliação dos parâmetros de rugosidade. A Figura 14 mostra um exemplo de diferentes níveis de divisão da superfície usando uma *quadtree*.

A *quadtree* tem uma característica importante para estrutura hierárquica, que é a representação de uma informação única para uma região maior. Por exemplo, se um nodo não necessita subdivisão, aos contrários dos seus nodos-irmão, então ele é um nodo-folha e consegue representar uma informação para uma região maior, tal como ilustrado na Figura 15. A vantagem desta representação é economizar memória, pois pode diminuir consideravelmente a quantidade de nodos necessários para representação da superfície. No caso do tipo de amostra estudado, este comportamento não foi verificado, dada a natureza dos dados, com grande variação de valores (tal como uma imagem de ruído). Uma possibilidade não explorada neste trabalho, mas que pode ser interessante para estudo e avaliação de rugosidade, é a considerar um limiar de similaridade entre valores para criar um valor médio que os represente e assim evitar subdivisões de ramo. Dessa forma, algumas regiões seriam representadas com um valor médio de R_a e outras com mais detalhes.

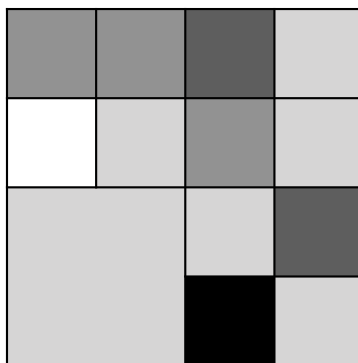


Figura 15: *Quadtree* com subdivisão parcial.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.1 Computação dos Parâmetros de Rugosidade para Níveis da *Quadtree*

Após a divisão espacial da superfície, de acordo com as coordenadas que formam o polígono de superfície, a classificação dos pontos por região / divisão é executada. Este processo é recursivo; ou seja, os pontos também são classificados dentro da região das subdivisões sucessivas. Cada ponto fica vinculado com a sua respectiva região ou nodo da *quadtree*, em cada nível de subdivisão.

É relevante destacar que os parâmetros de rugosidade dos diferentes ramos da árvore não são obtidos pela média; eles são recalculados. Para cada subdivisão espacial, os pontos de cada região são considerados para o cálculo dos parâmetros de rugosidade (como descrito no subcapítulo 3.2.2) e os valores são mantidos na estrutura da árvore. Dessa forma, o usuário pode avaliar os coeficientes de rugosidade nos vários níveis de subdivisão da *quadtree*. A Figura 16 é um exemplo de superfície com parâmetros calculados em diferentes níveis da *quadtree*. Em destaque, a variação de valores e cores em diferentes níveis de um ramo selecionado.

3.3 Avaliação de Rugosidade

Após o cálculo dos parâmetros de rugosidade em diferentes níveis da árvore, as informações para representação e análise dos resultados são processadas em outro *software*. A Figura 17 apresenta o cálculo das informações geradas por este outro *software* para a análise e avaliação da rugosidade das superfícies amostradas.

O processo de geração das informações gráficas para análise e avaliação de rugosidade é definido como:

1. Todos os arquivos de coeficientes de rugosidade (um arquivo por superfície) são lidos pelo *software* para análise.
2. As superfícies são mantidas em uma lista para processamento em conjunto.

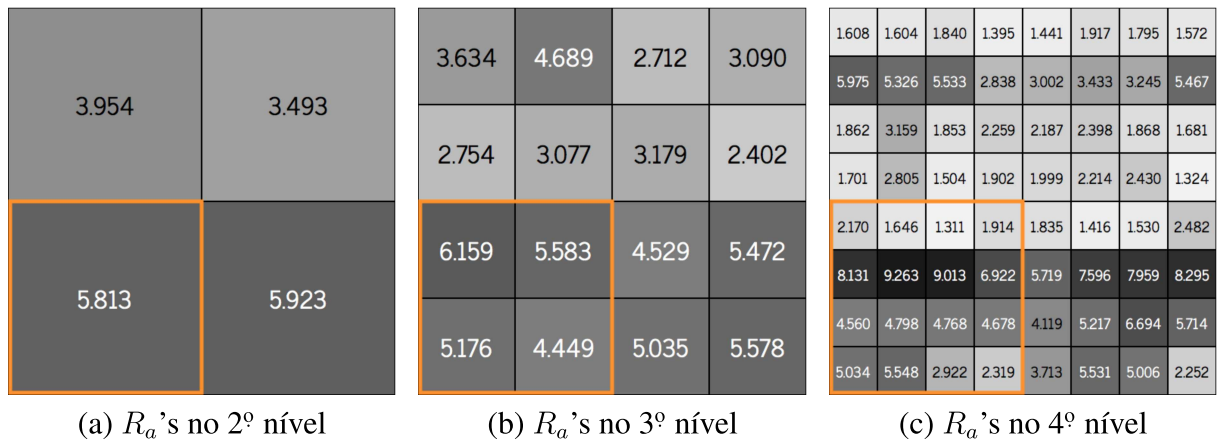


Figura 16: R_a calculado para diferentes níveis da *quadtree* da superfície. Quanto mais escura a cor do quadrado, maior o R_a associado. Em destaque nodos de um mesmo ramo da árvore.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3. De acordo com o nível da *quadtree* definido para análise, todos os nodos de todas as superfícies são percorridos para determinar os valores de R_a referência: média ($R_{a,avg}$), desvio-padrão ($R_{a,sdv}$), mínimo ($R_{a,min}$) e máximo ($R_{a,max}$). Mais detalhes são descritos no subcapítulo 3.3.1.
4. Para cada nodo de cada superfície e de acordo com o nível da *quadtree* selecionado:
 - (a) São computadas as assinaturas de rugosidade, conforme definido no subcapítulo 3.3.1.
 - (b) O histograma do nodo é computado (subcapítulo 3.3.2).
 - (c) Um sinal é montado a partir dos dados de R_a do nodo e plotado num gráfico comparativo com os valores de referência (subcapítulo 3.3.2).
5. Uma página com todos os objetos gráficos gerados é exibida ao usuário, que pode avaliar e analisar rugosidade medida em cada superfície e inferir quais comportamentos são encontrados e as possibilidades de avaliar favorecimento de aderência em cada situação ou configuração do processo de aquisição dos blocos.

3.3.1 Assinatura de Rugosidade da Superfície

Para representação em nível de detalhes da rugosidade da superfície, é gerado uma assinatura da superfície, composta pelos valores de rugosidade de cada região definida pela subdivisão da *quadtree*. Dessa forma, é possível identificar visualmente o padrão da superfície amostrada e compará-la com outra superfície pela sua assinatura de rugosidade. A Figura 18 mostra um

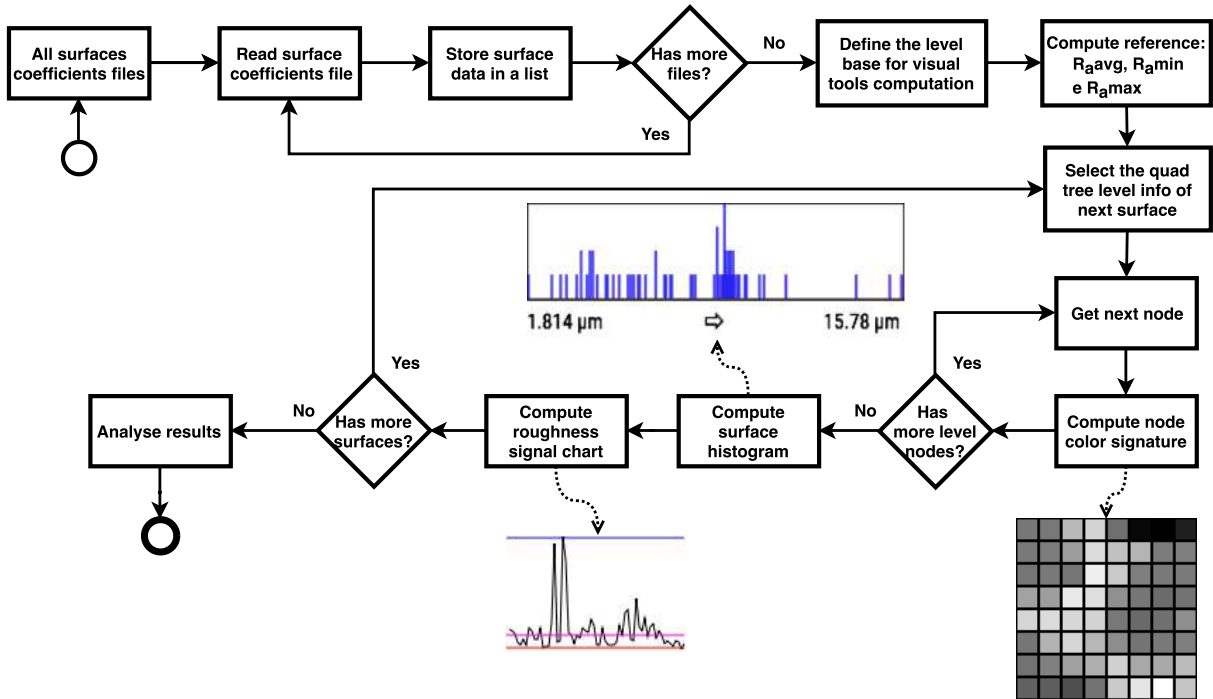


Figura 17: Processo para computação das ferramentas para avaliação e análise dos coeficientes de rugosidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

exemplo da assinatura visual gerado a partir dos coeficientes de referência (denominado média de rugosidade das superfícies amostradas R_{aavg}) e o nível de maior detalhe usado para exemplo, no caso o quarto nível da *quadtree* (3ª subdivisão).

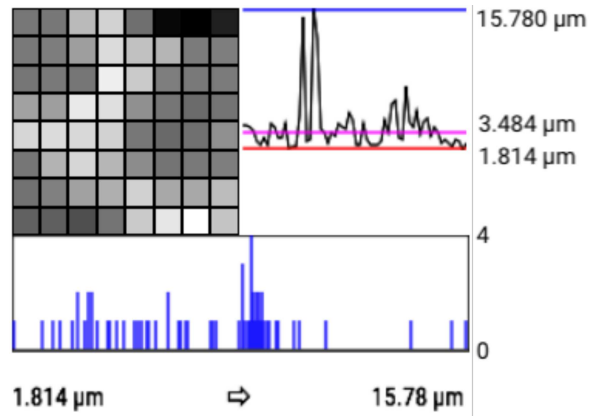
Para gerar as cores da assinatura visual, é usada uma escala de cinzas, com o valor de R_a local sendo comparado com a média (R_{aavg}), mínimo (R_{amin}) e máximo (R_{amax}), valores de referência. Para fins de comparação e na ausência de um valor de referência padrão na literatura, a média de R_a (R_{aavg}), bem como o valor mínimo (R_{amin}) e o máximo (R_{amax}) de R_a calculado em todas as superfícies amostradas são usados como valores de referência.

A partir desses valores de referência, quanto mais próximo o R_a local é de R_{amin} , mais próxima de branco será a cor. Quanto mais próximo o R_a local estiver do R_{amax} , mais próxima de preto será a sua cor. Consequentemente, quanto mais próximo do R_{aavg} , mais próxima do cinza-médio será a sua cor.

O nível de profundidade máxima definido (o menor detalhe avaliado da *quadtree*) é um critério de escolha do usuário. Para os testes realizados, o quarto nível da *quadtree* ($1.5625mm^2$) é usado para exemplificar a geração de assinatura do bloco, pois não está tão distante da resolução de leitura do equipamento LiDAR ($10\ \mu m$) e ainda com uma quantidade de pontos razoável (≈ 156 pontos) para uma variação de valores R_a .

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

(a) Assinatura de rugosidade expandida



(b) Assinatura minificada e outras ferramentas.

Figura 18: Em (a) exemplo de assinatura de rugosidade da superfície. Calculado a partir do 4º nível (3ª divisão) dos parâmetros de rugosidade da *quadtree* (R_a). (b) Exemplo de métricas de avaliação de rugosidade da superfície. Centro: assinatura visual minificada da superfície. Abaixo: histograma calculado a partir da assinatura visual. À direita: gráfico comparando os coeficientes R_a da superfície com os valores de referência $R_{a,avg}$ (linha rosa), $R_{a,min}$ (linha vermelha) e $R_{a,max}$ (linha azul).

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Outras Ferramentas para Avaliação de Rugosidade

Além da assinatura visual da rugosidade, também é proposta a utilização de outras métricas para avaliar e comparar a rugosidade (R_a) entre as superfícies. A Figura 18 dá um exemplo do conjunto de métricas usado para avaliação e comparação de rugosidade.

Primeiro, a partir da composição de cores da assinatura de rugosidade, é construído um histograma para verificar a frequência das cores e comparar a dispersão ou concentração dentro do intervalo de valores $R_{a,min}$ (branco) e $R_{a,max}$ (preto). O eixo x do histograma representa os 256 valores possíveis de tons de cinza, $[R_{a,min}) .. (R_{a,max}]$. O eixo y representa o número de vezes (frequência) em que um determinado tom de cinza aparece na assinatura visual. O histograma pode ser usado para verificar a dispersão dos coeficientes R_a em relação à média ($R_{a,avg}$) para cada superfície. A assinatura de rugosidade da superfície permite uma avaliação visual da dispersão dos coeficientes, e o histograma permite uma avaliação quantitativa dessa dispersão.

Outra forma de avaliação usada é a comparação dos coeficientes de superfície com os parâmetros de referência através de um gráfico de linhas, com o qual é possível verificar o comportamento e a distribuição dos coeficientes das superfícies em relação aos parâmetros de referência.

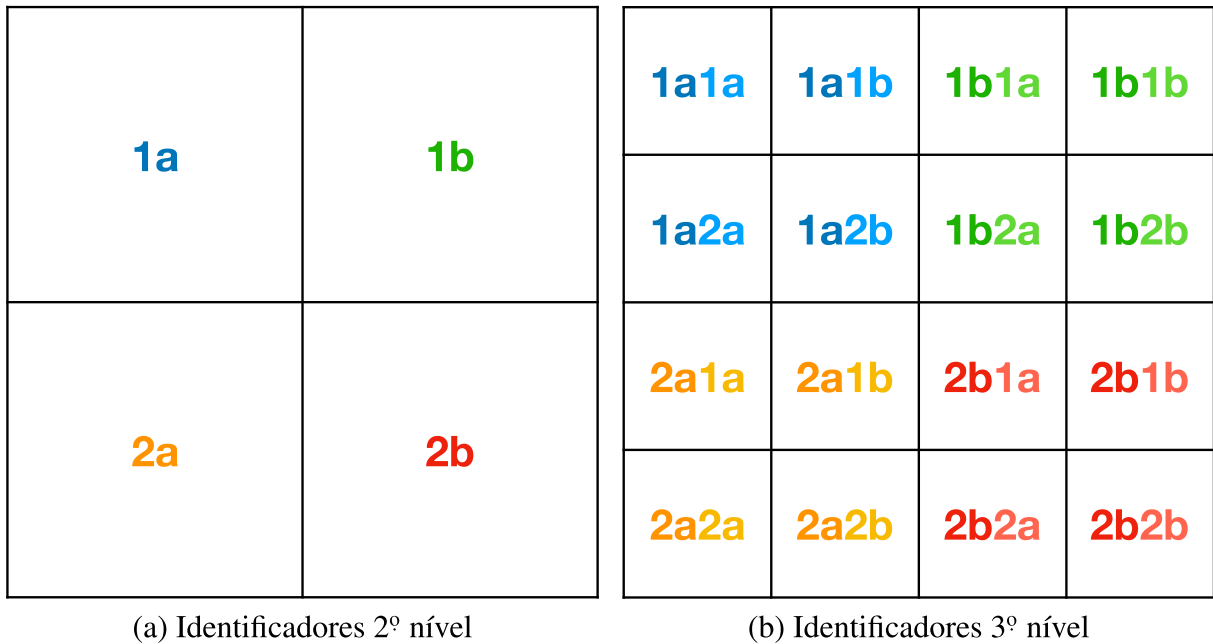


Figura 19: Organização de nodos-folha em uma *quadtree*. Organização dos nodos no 2º nível (a) e organização dos nodos no 3º nível (b).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para construir o gráfico, a matriz bidimensional dos coeficientes de superfície é transformada em um sinal unidimensional, seguindo processo de ordenação de nodo descrito no subcapítulo 3.3.2.1. Além dos coeficientes, os valores de referência ($R_{a,avg}$, $R_{a,min}$ e $R_{a,max}$) também são plotados no gráfico e, de forma geral, as variações dos coeficientes ao longo da superfície podem ser avaliadas em relação às informações de referência. Dessa forma, é possível comparar uma superfície com as demais, verificando aquelas que possuem maior ou menor variação dos coeficientes em relação a $R_{a,avg}$.

3.3.2.1 Ordenação de nodos para gerar sinal unidimensional

Converter uma matriz bidimensional numa estrutura unidimensional é algo trivial na computação. A regra básica é que as linhas da matriz sejam dispostas uma após a outra. Dessa forma, concatenando as linhas, obtém-se um vetor unidimensional. No entanto, os nodos da *quadtree* são organizados em ramos da estrutura de árvore e não numa sequência por linha de dados. A Figura 19 mostra a relação dos nodos-folhas com seu nodo parente. Percebe-se que nodos em linhas diferentes são vizinhos próximos, o que não se verifica na estrutura de matriz 2D.

Para garantir a ordenação do sinal unidimensional, partindo de uma estrutura de matriz, um algoritmo de ordenação dos nodos foi desenvolvido.

O algoritmo considera que todos os nodos de uma mesma linha sejam vizinhos, indepen-

dentamente do ramo da árvore ao qual pertencem. Para isso, o algoritmo avalia a posição de cada nodo-filho dentro do seu nodo parente e gera uma identificação única para ordenação linear. Os nodos são organizados conforme a posição do quadrante: noroeste (canto esquerdo superior), nordeste (canto direito superior), sudoeste (canto esquerdo inferior) e sudeste (canto direito inferior).

A identificação única é composta pela junção de duas identificações parciais. A primeira identificação parcial (*idNS*) é utilizada para representar a posição do nodo na vertical (direção norte ou sul). Já a segunda (*idWE*), é utilizada para representar a posição do nodo na horizontal (direção oeste ou leste).

A identificação única para ordenação é gerada para todos os nodos, em todos os níveis da *quadtree*, seguindo as regras:

1. A identificação vertical e a identificação horizontal são inicializadas com os valores das variáveis equivalentes no nodo-pai.
2. Se o nodo é um dos filhos dos quadrantes ao norte, então o identificador *idNS* é concatenado com o dígito 1; caso contrário, é concatenado com o dígito 2.
3. Se o nodo é um dos filhos dos quadrantes à oeste, então o identificador *idWE* é concatenado com a letra *a*; caso contrário, é concatenado com a letra *b*.
4. O processo é repetido recursivamente até chegar nos nodos-folha.

Na Figura 19 pode-se verificar os identificadores associados com cada nodo. As cores dos caracteres são usadas para representar os diferentes ramos da estrutura de árvore.

Após a identificação parcial, todos os nodos-folha são obtidos para compor a estrutura unidimensional, o sinal desejado para gráfico. Os nodos são ordenados considerando a sua identificação: $id = idNS + idWE$. A Figura 20 apresenta o resultado final da ordenação dos nodos selecionados da *quadtree* para formar um sinal unidimensional.

3.4 Computação de Rugosidade de Superfícies para Múltiplos Planos

Durante a análise dos primeiros experimentos e resultados obtidos, utilizando o método descrito no subcapítulo 3.2, foram observadas necessidade de alterações no método. Mais especificamente: na ordem das tarefas do processo, na forma de calcular plano de ajustes, no cálculo de distância do ponto ao plano e também na proposição de outras formas de avaliação de rugosidade, que complementam o método descrito no subcapítulo 3.3.

3.4.1 Customização da Assinatura de Rugosidade

A primeira modificação realizada em relação ao método 3.3 é a possibilidade de customização das informações geradas através da assinatura de rugosidade. Como apresentado na Figura

1a	1b	2a	2b
----	----	----	----

(a) Ordenação 2º nível

1a1a	1a1b	1b1a	1b1b	1a2a	1a2b	1b2a	1b2b	2a1a	2a1b	2b1a	2b1b	2a2a	2a2b	2b2a	2b2b
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

(b) Ordenação 3º nível

Figura 20: Resultado da ordenação dos nodos. Em (a) ordenação para os nodos do 2º nível. Em (b) a ordenação para os nodos no 3º nível.

Fonte: Elaborado pelo autor.

18, a assinatura de rugosidade é uma região quadrada que abrange toda a superfície, portanto, todos os nodos-folha da estrutura *quadtree*. A partir desses nodos são computadas informações estatísticas como média ($R_a avg$) e desvio-padrão ($R_a sdv$) para representar os dados quantitativos da superfície.

A Figura 21 mostra um exemplo desta possibilidade de customização.

Se alguma linha ou coluna da superfície apresenta alguma característica não desejada para análise, como por exemplo, algum grão de areia ou um furo, é possível desconsiderar estas linhas ou colunas para calcular $R_a avg$ e $R_a sdv$, desmarcando-as na interface do sistema. Essa customização, eliminando nodos de ramos diferentes, é facilitada pelo esquema de ordenação descrito no subcapítulo 3.3.2.1.

Também como pode ser visto na Figura 21, os valores de média ($R_a avg$) e desvio-padrão ($R_a sdv$) são calculados por linha e por coluna da assinatura de rugosidade. Dessa forma, também é possível analisar individualmente as informações de linhas e colunas, sem a necessidade remover as outras linhas e colunas.

3.4.2 Cálculo de Múltiplos Planos de Ajuste

O método descrito no subcapítulo 3.2 calcula apenas um plano médio de ajuste para os pontos da nuvem (veja Figura 13) e a rugosidade é calculada através da distância absoluta de cada ponto (p_{ij}) ao plano (P), considerando apenas a diferença absoluta no eixo Z ($a = p_{ijz} - getZ(P, p_{ijx}, p_{ijy})$). Ainda que o método defina uma avaliação local de rugosidade, discretizando a área da superfície em áreas uniformemente espaçadas da superfície, o mesmo plano geral é utilizado para computar os parâmetros de rugosidade. Dessa forma, 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 considerar a geometria local dos

0.954	0.646	0.533	0.668	0.784	0.557	0.537	0.685	<input checked="" type="checkbox"/> 0.670 (0.134)
0.984	0.732	0.650	0.590	0.712	0.572	0.732	0.671	<input checked="" type="checkbox"/> 0.705 (0.120)
0.530	0.576	0.529	0.527	0.440	0.591	0.494	0.549	<input checked="" type="checkbox"/> 0.529 (0.044)
0.654	0.455	0.527	0.785	0.597	0.603	0.486	0.531	<input checked="" type="checkbox"/> 0.580 (0.099)
0.526	0.512	0.689	0.619	0.624	0.597	0.658	0.630	<input checked="" type="checkbox"/> 0.607 (0.057)
0.647	0.664	1443	1886	0.583	0.721	0.676	0.755	<input type="checkbox"/> 0.922 (0.445)
0.470	0.560	1567	1444	0.627	0.487	0.618	0.626	<input type="checkbox"/> 0.800 (0.412)
1.002	0.681	0.834	0.901	0.851	0.898	0.990	0.852	<input checked="" type="checkbox"/> 0.876 (0.094)
<input checked="" type="checkbox"/> 0.721 (0.209)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.603 (0.087)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.846 (0.394)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.928 (0.453)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.652 (0.120)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.628 (0.119)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.649 (0.153)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.662 (0.099)	

0.954	0.646	0.533	0.668	0.784	0.557	0.537	0.685	<input checked="" type="checkbox"/> 0.670 (0.134)
0.984	0.732	0.650	0.590	0.712	0.572	0.732	0.671	<input checked="" type="checkbox"/> 0.705 (0.120)
0.530	0.576	0.529	0.527	0.440	0.591	0.494	0.549	<input checked="" type="checkbox"/> 0.529 (0.044)
0.654	0.455	0.527	0.785	0.597	0.603	0.486	0.531	<input checked="" type="checkbox"/> 0.580 (0.099)
0.526	0.512	0.689	0.619	0.624	0.597	0.658	0.630	<input checked="" type="checkbox"/> 0.607 (0.057)
0.647	0.664	1443	1886	0.583	0.721	0.676	0.755	<input type="checkbox"/> 0.922 (0.445)
0.470	0.560	1567	1444	0.627	0.487	0.618	0.626	<input type="checkbox"/> 0.800 (0.412)
1.002	0.681	0.834	0.901	0.851	0.898	0.990	0.852	<input checked="" type="checkbox"/> 0.876 (0.094)
<input checked="" type="checkbox"/> 0.721 (0.209)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.603 (0.087)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.846 (0.394)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.928 (0.453)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.652 (0.120)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.628 (0.119)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.649 (0.153)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.662 (0.099)	

$$R_{avg} = 0,711$$

$$R_{sdv} = 0,266$$

(a) Assinatura original

$$R_{avg} = 0,661$$

$$R_{sdv} = 0,148$$

(b) Assinatura customizada

Figura 21: Assinatura de rugosidade original (a) e valores associados. Assinatura de rugosidade modificada (b) e seus valores associados. Em destaque as linhas que foram removidas do cálculo dos valores R_{avg} e R_{sdv} .

Fonte: Elaborado pelo autor.

pontos para compor um plano mais ajustado.

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 rugosidade para a superfície. A Figura 22 apresenta a diferença entre um plano médio calculado com método descrito no subcapítulo 3.2 e vários planos calculados levando em consideração a superfície média local (para cada nodo da *quadtree*), a partir da mesma nuvem de pontos.

A partir da modificação no primeiro método para considerar os planos locais (de cada nodo), é possível calcular a rugosidade de forma mais ajustada às variações de ondulação de cada região da nuvem de pontos. Além disso, o cálculo de rugosidade permite que o método possa ser mais facilmente adaptado para outras áreas que possuem nuvem pontos com maior ondulação como é o caso da geologia.

3.4.3 Uso de *Principal Component Analysis* para Computação de Planos

Para ajustar os planos tal como a geometria local das amostras, a primeira modificação necessária é a computação de planos de ajuste locais para cada região da superfície. Dessa forma,

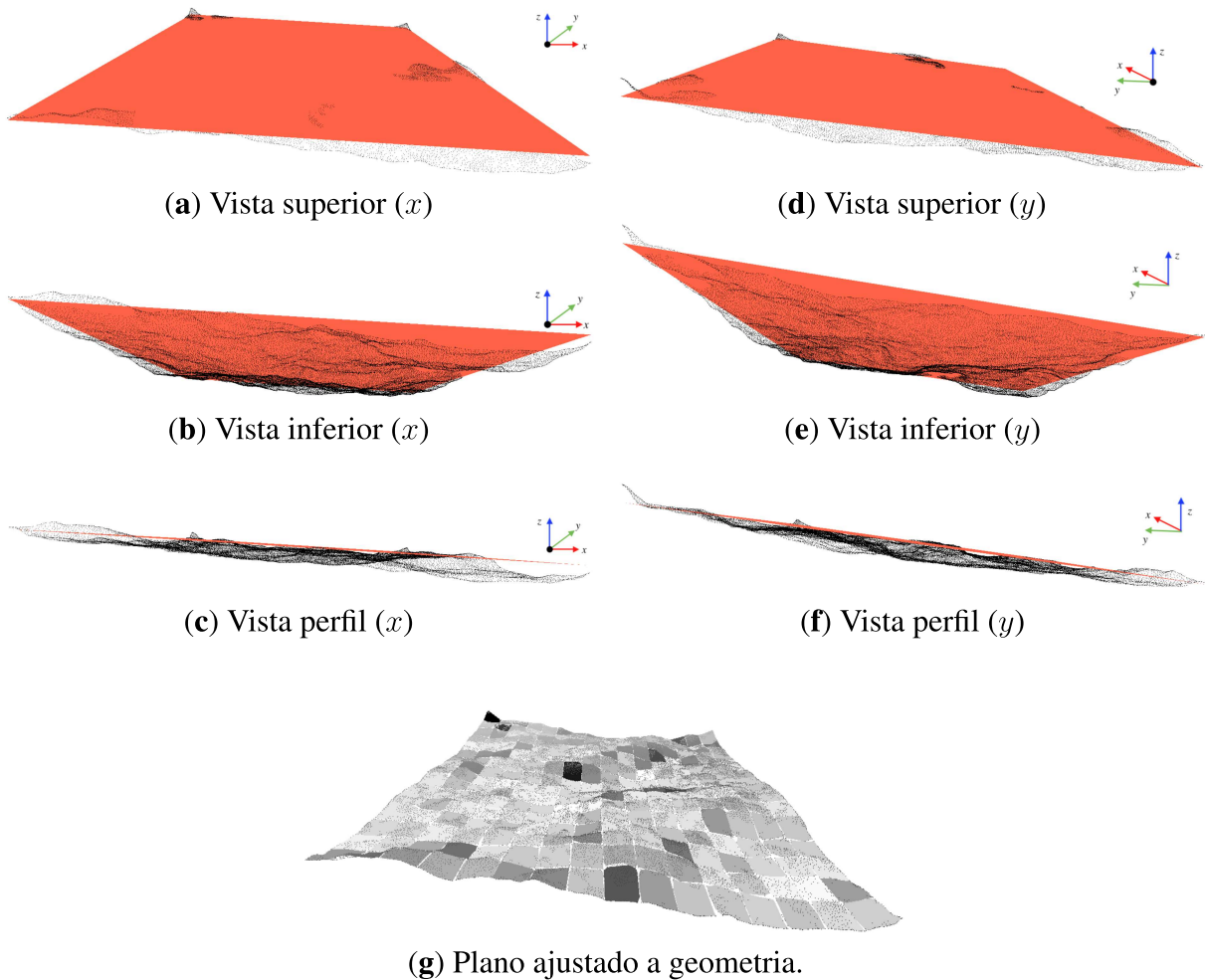


Figura 22: Planos calculados sobre uma mesma nuvem de pontos. Em (a), (b), (c), (d), (e) e (f) o plano médio calculado com primeiro método. Já em (g) os planos calculados com segundo método e ajustados à geometria da amostra.

Fonte: Elaborado pelo autor.

os parâmetros de rugosidade associados a uma região ou local da superfície, são calculados com base no plano local e não mais em relação ao plano global.

A modificação em relação ao método descrito na subcapítulo 3.2 se dá em três momentos: primeiro, a modificação da ordem do algoritmo para cálculo do plano e da divisão de áreas; segundo, a utilização do método de Análise de Componentes Principais (*PCA - Principal Component Analysis*) conforme descrito em (GOMES et al., 2016) para calcular o plano associado com os pontos de cada local; terceiro, o cálculo de distância do ponto em relação ao plano formado pelo sistema de vetores calculados pelo PCA.

O fluxo processo de cálculo dos planos de ajustes é apresentado na Figura 3.4.3. No diagrama da Figura 3.4.3 as etapas que estão em destaque são as principais modificações do processo geral do primeiro método. A construção da *quadtree* é executada primeiro e o cálculo plano é realizado para cada nodo em cada nível da estrutura hierárquica.

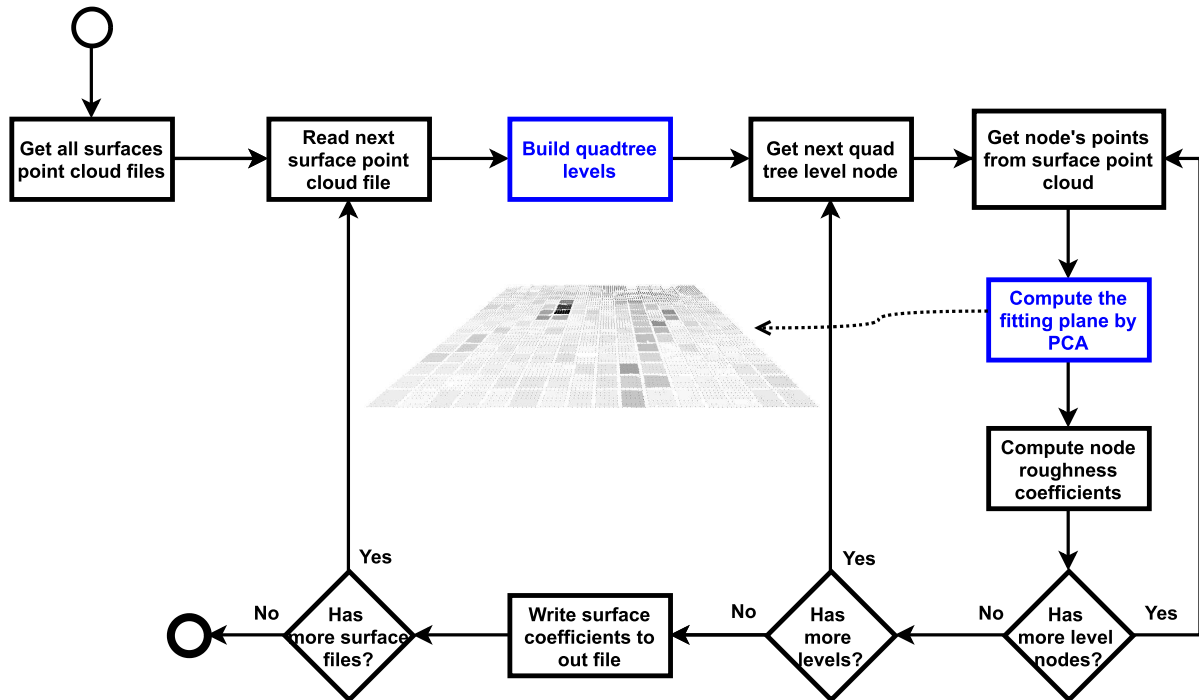


Figura 23: Novo processo para cálculo dos planos de ajuste para cada local da superfície, em todos os níveis de divisão hierárquica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3.1 Principal Component Analysis

A análise de componentes principais (*Principal Component Analysis*) é uma técnica de análise de um conjunto de dados inter-relacionados e tem por objetivo a redução do número de dimensionalidade para representar tal conjunto de dados (DAULTREY, 1976; JOLLIFFE, 2005; ABDI; WILLIAMS, 2010). Por exemplo, a partir da nuvem de pontos de uma superfície, é possível reduzir a sua representação de N vetores no espaço R^3 para um sistema de 3 vetores tridimensionais que são os seus componentes principais, aqueles que melhor representam o conjunto de dados.

Primeiro passo para obter os componentes principais é a montar a matriz das covariância (C) dos valores, com objetivo de determinar o quão relacionados estão os dados. Se o sinal da covariância é positivo, então duas variáveis estão *correlacionadas*; portanto, se uma aumenta ou diminui de valor, a outra também aumenta ou diminui, da mesma forma. Se o sinal da covariância é negativo, as variáveis estão *inversamente correlacionadas*; se uma variável aumenta a outra diminui de valor. A matriz de covariância (C) é definida como:

$$C = \begin{bmatrix} Cov(x, x) & Cov(x, y) & Cov(x, z) \\ Cov(y, x) & Cov(y, y) & Cov(y, z) \\ Cov(z, x) & Cov(z, y) & Cov(z, z) \end{bmatrix}$$

É importante, no entanto, que as informações utilizadas sejam padronizadas para que contribuam igualmente na análise dos componentes. Para isso, subtrai-se do valor a média (\bar{x}) e divide-se pelo desvio-padrão (σ), utilizando a seguinte fórmula:

$$v = \frac{\text{valor} - \bar{x}}{\sigma}$$

Próximo passo é a calcular os autovetores e autovalores a partir da matriz de variância. Cada autovetor relaciona uma quantidade de dados. O primeiro autovetor relaciona a maioria dos valores, o segundo a segunda maior a parte e assim sucessivamente para tantas dimensões quanto tem-se de dados. Geometricamente, os autovetores representam as direções dos dados que definem um valor máximo de variância. Pode ser entendido como a maior dispersão dos dados, ou aquele que maximiza a variância dos pontos projetados nele em relação a origem. Os próximos vetores não devem estar correlacionados com os anteriores e seguem a mesma regra de maior dispersão dos dados.

Os autovalores são calculados a partir da matriz de covariância (C), da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} C & \lambda I \end{bmatrix} = 0$$

Onde I é a matriz identidade. Os autovalores são organizados em ordem do maior para o menor ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$). A partir do i -ésimo autovalor λ_i é calculado o respectivo autovetor (t_i):

$$\begin{bmatrix} C & \lambda_i I \end{bmatrix} t_i = 0, i = 1, 2, 3,$$

Para o presente trabalho, o objetivo é reduzir a representação da nuvem de pontos de cada superfície amostra para ser representada com PCA e com isso obter planos que melhor definem ou ajustam um subconjunto de pontos da nuvem. Mais detalhes são descritos no subcapítulo 3.4.3.2).

3.4.3.2 Aplicação PCA

Neste trabalho, é proposto uso do método de análise de componentes principais proposto em (GOMES et al., 2016). O método proposto em (GOMES et al., 2016) analisa uma nuvem de pontos e calcula três vetores próprios (autovetores e autovalores) que definem o plano: o primeiro autovetor 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 também o vetor normal (ou direção) do plano. Sendo assim, um plano de ajuste P de um conjunto de pontos NP é um sistema definido por três vetores: $P(NP) = (\vec{f}, \vec{s}, \vec{n})$, onde \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 ajustados à superfície original, o processo deve ser executado recursivamente dividindo os pontos da nuvem associados ao plano atual em duas metades. Para cada metade, o processo de computação de planos através dos autovetores é

executado. O processo se repete até o limite mínimo pontos por plano ou atingir o número máximo de subdivisões.

A Figura 24 ilustra a representação de autovetores de um conjunto de pontos. O vetor azul (F), que possui o maior autovalor, representa o primeiro componente do sistema. O vetor vermelho (S), com segundo maior autovalor, é usado em conjunto F para definir o plano e o vetor verde (N) é a orientação do plano ou normal do plano.

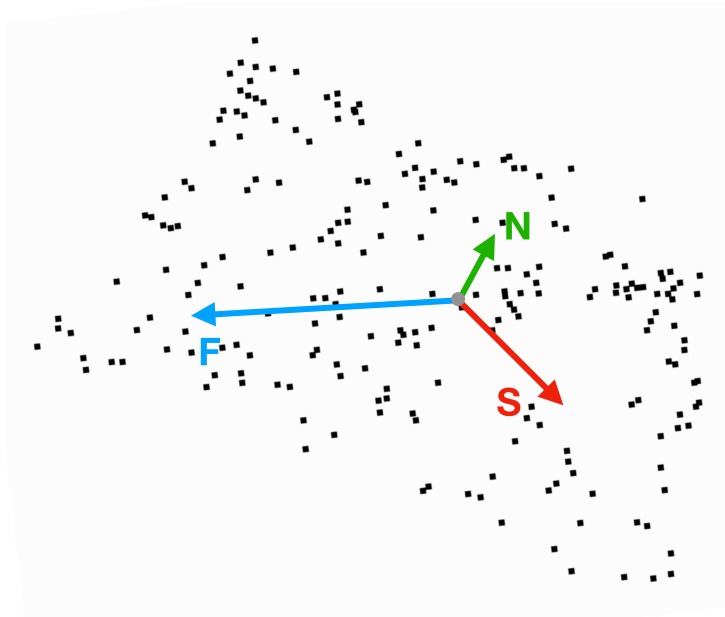


Figura 24: PCA computado para um conjunto de pontos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este trabalho, conforme apresentado na Figura 3.4.3, a subdivisão da nuvem de pontos ocorre antes do cálculo dos planos, para que se tenha uma divisão uniforme da área de cada nodo ou região, seguindo a regra de divisão da *quadtree* (ver subcapítulo 3.2.3). O método original (GOMES et al., 2016) foi adaptado e ficou definido para não permitir subdivisões e também foi ajustado o parâmetro de número mínimo de pontos para 4, com objetivo de ter uma geometria mínima para cálculo do plano. Em resumo, o método de cálculo de planos por PCA (sistema com 3 vetores) é executado para cada nodo de cada nível da *quadtree*.

No primeiro método para computação de rugosidade 3.2 o plano de ajuste é computado considerando o eixo Z como altura. Dessa forma, as distâncias em relação ao plano são sempre ortogonais e não a menor distância em relação ao plano. 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, sendo necessário calcular a distância do ponto em relação ao plano de forma independente da orientação do plano.

Após a definição de plano para cada nodo, é calculado o parâmetro de rugosidade R_a em cada região (nodo) da superfície. Para cada ponto associado à região / nodo, calcula-se a dis-

tância do ponto ao plano do nodo. Depois a forma de cálculo dos parâmetros rugosidade segue a fórmula de cálculo tal como definido em (SANTOS; JÚLIO, 2013) e apresentado na Figura 3. A distância d de um ponto p ao plano P , é obtida através do produto escalar do vetor que vai do plano ao ponto com a normal do plano. Logo, $d = \vec{v} \cdot \vec{n}$, sendo que \vec{v} é o vetor que vai do primeiro autovetor do sistema do plano até ponto atual da nuvem: $\vec{v} = p - \vec{f}$. Portanto, d é a projeção do ponto p na normal do plano. A Figura 25 demonstra os parâmetros envolvidos e relação entre eles.

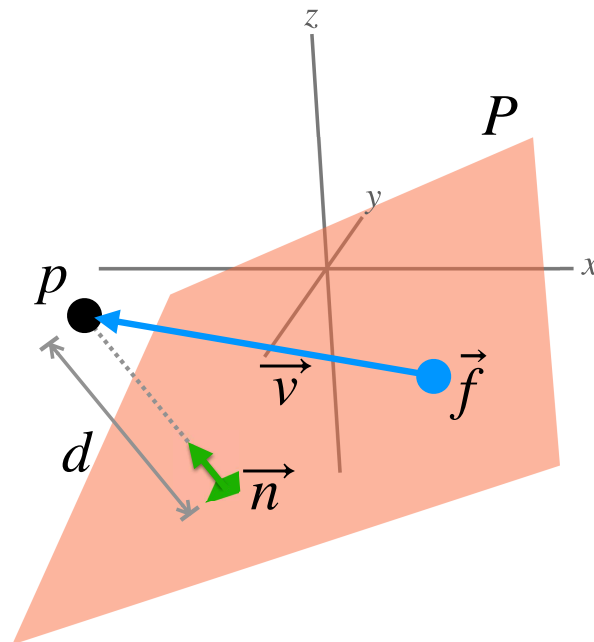


Figura 25: Cálculo de distância do ponto ao plano, no sistema de componentes definido para o plano.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, os dados de rugosidade podem ser disponibilizados e analisados da mesma forma que foi descrita no subcapítulo 3.3.

3.4.4 Cálculo de Áreas de Vales

Embora alguns trabalhos (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; THAMBOO; DHANASEKAR, 2015; STOLZ; MASUERO, 2015) apontem como um bom critério de análise de rugosidade de superfícies o parâmetro da rugosidade média (R_a), ele pode falhar como medida única de avaliação de aderência por contato, pois é uma medida relacionada unicamente à altura, nenhuma medida de horizontal ou de área é considerada na avaliação. Por exemplo, nos casos em que a medida de abertura lateral é menor do que a profundidade da região. Nesses casos, uma partícula da matriz cimentícia estaria limitada à abertura lateral e não à profundidade (R_a) da amostra. Estima-se que quanto maior a ocupação dos vales pelas partículas dos materiais utilizados como revestimentos, maior a aderência através da área de

contato entre o substrato e o revestimento.

Além disso, alguns autores (CARASEK, 2010; THAMBOO; DHANASEKAR, 2015; VAZ; CARASEK, 2019) apontam que outros fatores também impactam na aderência, como porosidade, absorção de água e área de contato (SARKER; COSTA; HADIGHEH, 2019; KOZUBAL et al., 2020). Kozubal et al. (KOZUBAL et al., 2020) sugerem o cálculo de densidade de partículas de cimento que podem entrar em contato com a superfície como uma forma de determinar o quanto ela favorece a aderência. Em (KOZUBAL et al., 2020) a análise é feita a partir de segmentação de imagem 2D, separando área de concreto da área de agregados (por exemplo, pedras). A função de densidade leva em consideração a área de concreto versus a área de elementos agregados.

Em relação ao fator de área de superfície de contato, as informações geométricas deste trabalho mostram as áreas ou partes onde ocorre concentração de partículas. O método proposto para análise de áreas de contato, classifica regiões da superfície que são vales e, mais especificamente, identificando lagos que formam regiões onde ocorre maior concentração de massa de cimento. A partir das áreas dos lagos, são computados os parâmetros área total de vales (ou superfície com maior concentração de cimento) e área média de vales. O valor calculado para área total de lagos dos vales é chamado de **índice de área de vales** (Δ_T), pois é uma razão entre a soma das áreas de lagos pela área total da superfície. Isso garante um valor normalizado e independente da variação de dimensões das superfícies amostradas. Esse parâmetro é utilizado para verificar área total de densidade de partículas cimento que entram em contato com os vales da superfície. Já o parâmetro de **área média de vales** (Δ_{avg}), é o tamanho médio das áreas. O parâmetro Δ_T não relaciona áreas individuais com o total, o que pode ser avaliado com o parâmetro Δ_{avg} . Por exemplo, uma amostra pode ter um valor Δ_T que é o maior se comparado o outras amostras, mas ter um valor Δ_{avg} menor, indicando que a superfície é formada muitas regiões de lagos de menor área. Estima-se que uma amostra com valores Δ_T e Δ_{avg} maiores do que outras favorece a aderência, considerando área de contato.

Para computação dos lagos, são consideradas apenas as regiões que possuem pontos de borda (limites do lago) e pelo menos um ponto interno (que não pertence a borda). A borda é o limite na altura do plano da região (ou limite definido de acordo com o parâmetro de nível de ajuste selecionado). Por exemplo, um ponto em que a altura (distância de um ponto ao plano) é zero, é um ponto que está exatamente em cima do plano. Por padrão, este parâmetro de nível é definido como zero, portanto, a altura do plano médio local. Todos os pontos do nível selecionado ou abaixo dele são considerados pontos de vale.

No *software* desenvolvido para este trabalho, é possível definir o nível de distância, ajustando o parâmetro para acima ou abaixo de zero (parâmetro é chamado de nível de ajuste). No entanto, as variações de valor deste recurso não foram exploradas no presente trabalho. Foi utilizado por padrão o nível zero, que corresponde ao nível do plano local.

Para fazer a classificação das áreas, é necessário realizar algumas etapas de preparação da informação, até computação das áreas de vales (definidos como lagos). A Figura 26 apresenta

o processo geral do algoritmo para cálculo de áreas de vales associadas à rugosidade.

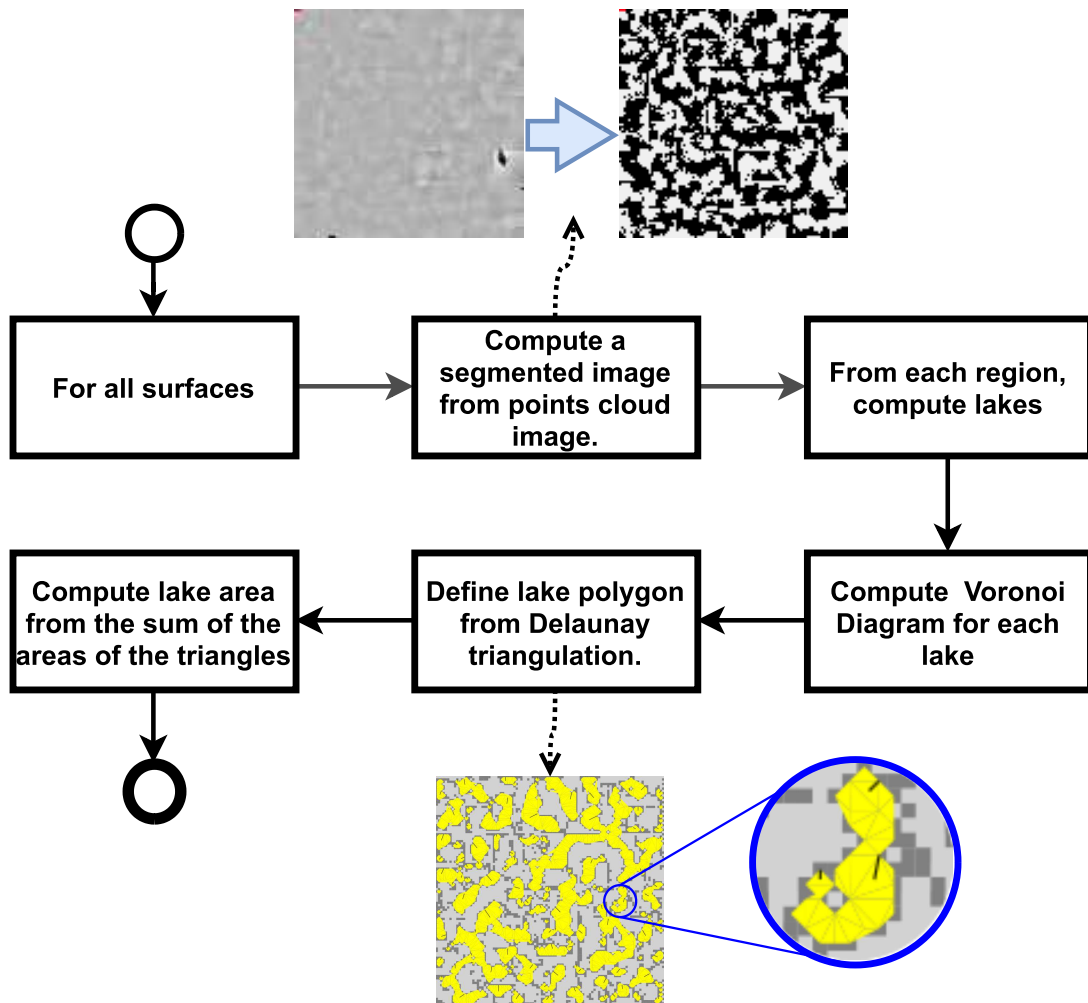


Figura 26: Processo geral para computação de áreas de vales.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo geral para computação de áreas de vale para cada superfície é definido como:

1. O primeiro passo consiste em segmentar a amostra em regiões cujos pontos estejam abaixo do nível de ajuste. Essa etapa é detalhada no subcapítulo 3.4.5.
2. A partir dos pontos definidos como pontos de vales, identificados com pixels pretos na imagem segmentada da superfície, são computados todos "lagos", regiões de pontos conectados (vizinhos) e que possuem uma área. O subcapítulo 3.4.5.1 descreve a computação que define lagos e demais informações que são extraídas deles.
3. Para cada lago, a partir dos seus pontos de borda, é computado o diagrama de Voronoi, e executada triangulação pelo método de Delaunay (WANG et al., 2019). Dessa forma, é possível montar o polígono que envolve a área do lago.

4. A partir dos triângulos que definem o polígono que envolve o lago, é computada a área do lago, somando a área desses triângulos. O somatório de áreas dos lagos da superfície (Δ_S), é a base para calcular o parâmetro de índice de área de vales da superfície (Δ_T). Para fins de comparação e avaliação das áreas também são computados o valor da área média de vale (Δ_{avg}), o desvio-padrão das áreas de vales (Δ_{sdv}), menor área (Δ_{min}) e maior área (Δ_{max}).

3.4.5 Etapa de segmentação e classificação das regiões de vales

Para segmentar e classificar regiões dos lagos, a nuvem de pontos é representada numa imagem 2D como um mapa de alturas. A partir dela é criada uma imagem binária por separação de pixels em vale ou pico, que é utilizada para criar uma imagem que representa os segmentos de regiões de vales da amostra.

No mapa de alturas, cada ponto da nuvem é associado com um pixel da imagem. Conforme a distância absoluta do ponto em relação ao nível de ajuste e valores vale mínimo e pico máximo, o pixel correspondente recebe um tom-de-cinza associado, respectivamente, na escala que vai do preto ao branco [0..1]. Se o ponto está abaixo do nível de ajuste, o pixel correspondente recebe um tom-de-cinza que vai do cinza médio (0.5) ao preto (0.0); se o ponto está acima do nível de ajuste, o pixel recebe um tom-de-cinza que vai do cinza-médio (0.5) ao branco (1.0). Na imagem do mapa de alturas é possível perceber informações de topografia, inclusive de partes da superfície que possuem um nível de informação de ondulação ou até relevo (conforme apresentado na Figura 1 (a)).

A partir da imagem de mapa de alturas, é criada a imagem binária (Figura 27 (b)), separando pontos de vales dos pontos de picos. Essa imagem é a representação em duas cores para a imagem do mapa. Este processo de binarização é um pré-processamento para a segmentação e classificação das áreas de vale (Figura 27 (c)). Para cada pixel da imagem do mapa de alturas, um pixel da imagem binária é criado. A cor deste pixel será branca (1.0) o pixel do mapa seja maior que o cinza-médio (0.5); ou será preta, caso o pixel do mapa seja menor ou igual a (0.5). A imagem binária contém apenas a separação dos pixels em acima ou abaixo do nível ajuste. As regiões precisam ser separadas em diferentes conjuntos ou segmentos.

A partir imagem binária, é feito o processo de segmentação e classificação dos pixels de áreas de vale conectados, para identificar e separar as regiões de vales. Uma região de vale é um conjunto de pixels pretos conectados. Na Figura 27 (c) é apresentado o conjunto de regiões segmentadas, onde cada região possui uma cor diferente. Para definir uma região, a imagem binária é percorrida e, para o primeiro pixel preto que não foi visitado (não classificado pelo algoritmo), este pixel é designado a um objeto de região de vale e seus pixels vizinhos mais próximos (esquerda, topo, direita e abaixo) também são visitados, classificados e empilhados para que eles sejam verificados. Esses pixels vizinhos também passam pelo mesmo processo. Esse processo se repete até que todos os pontos conectados tenham sido visitados e classifica-

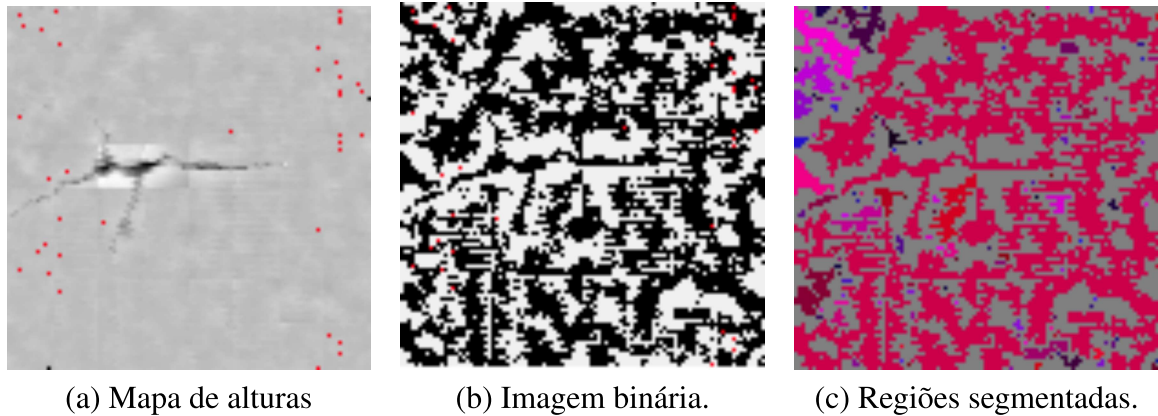


Figura 27: Processo de segmentação e classificação de regiões de vales.

Fonte: Elaborado pelo autor.

dos, formando assim uma região de vale. Depois o algoritmo identifica o próximo pixel preto não visitado e não conectado a nenhuma região e executa o mesmo processo recursivamente. E assim sucessivamente até que todos os pontos da imagem binária sejam visitados e classificados. Na Figura 27 (c) é apresentado o resultado do processo de segmentação e classificação, onde cada região de pixels de vale segmentada possui uma cor diferente.

3.4.5.1 Etapa de computação de regiões de lagos dos vales

A etapa de computação de regiões de lagos dos vales é executada após etapa de segmentação de regiões de vales da amostra. A informação de entrada é a imagem de regiões segmentadas e, para cada uma delas, são computados e identificados os lagos que as formam. Um lago é caracterizado como um conjunto de pixels conectados que possuem pelo menos um ponto interno (que não seja de borda). Um ponto de borda é uma fronteira entre a região de vale e a região de picos, ou seja, um pixel que tem algum pixel vizinho que não é de vale. Todos os pixels de cada lago de uma região são agrupados numa lista e os respectivos pontos da nuvem são agrupados em outra lista, para execução do processo de modelagem geométrica.

Após a detecção de todos os lagos de todas as regiões, é feita a modelagem geométrica de cada lago. O objetivo é criar uma representação poligonal para cada lago, para calcular a sua área e, conseqüentemente, calcular a área de total de lagos de uma superfície. O valor total de área de lagos da superfície é utilizado para determinar os parâmetros índice de área de vales (Δ_T) e área média de vale (Δ_{avg}), representando parâmetros relacionados à área de contato. A Figura 28 é a representação de lagos de uma superfície. Em destaque, um exemplo de geometria associada a um lago.

A geometria do lago é construída a partir da organização dos pontos de borda do lago. Na Figura 28 pode-se verificar a natureza da forma complexa das regiões de vale nas superfícies amostradas. São formas côncavas e complexas. O diagrama Voronoi facilita a identificação das

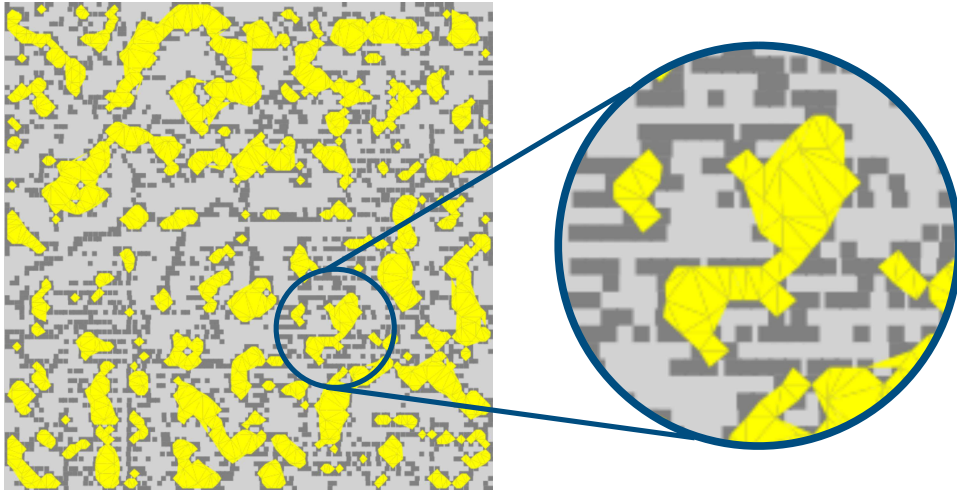


Figura 28: Classificação de regiões de vales em lagos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

conexões de um ponto com seus vizinhos, por isso a primeira tarefa é a criação de um diagrama de Voronoi a partir dos pontos de borda do lago, aqueles que definem o perímetro da forma.

Depois de construído o Diagrama Voronoi, é realizada a triangulação Delaunay (WANG et al., 2019), conectando pontos de referência de células vizinhas no diagrama. Portanto, a geometria de um lago é a malha de triângulos.

Além de serem utilizados para representação poligonal do lago, os triângulos são utilizados no cálculo de área de vales. Logo, seja Δ a função de cálculo de área de um triângulo e Δ_L a área de um lago, definido como o somatório das áreas dos T triângulos que formam a sua geometria:

$$\Delta_L = \sum_{i=1}^T \Delta_i$$

E a área total de lagos da superfície, que define o valor total de áreas de concentração de massa na superfície (Δ_S), é calculado através da soma das áreas de todos os Δ_L dos L lagos da superfície:

$$\Delta_S = \sum_{i=1}^L \Delta_{L_i}$$

O valor Δ_S não pode ser utilizado de forma direta, pois a área total das superfícies pode variar por conta da resolução de leitura do equipamento. O equipamento pode ultrapassar um pouco o limite definido na parametrização do processo de leitura. Além disso, é importante garantir uma base de comparação entre superfícies de qualquer dimensão. Para garantir essa comparação na mesma base e, finalmente, definir o parâmetro de índice de área de vales (Δ_T),

é feita a normalização do valor Δ_S , dividindo Δ_S pela área total da superfície (\square_{Sup}).

O cálculo de \square_{Sup} é dado por:

$$\square_{Sup} = (x_1 - x_0) \times (y_1 - y_0)$$

E para calcular Δ_T :

$$\Delta_T = \frac{\Delta_S}{\square_{Sup}}$$

Por fim, é computado histograma das áreas, onde é possível verificar a distribuição das áreas, numa relação de tamanho da área versus a frequência ao longo da superfície. Para este histograma foram determinadas 20 faixas de representação de área, começando na menor área dentre todas as amostras Δ_{refmin} até a maior área dentre todas as amostras Δ_{refmax} , definidos previamente sobre todos os valores Δ_{min} e Δ_{max} de todas as superfícies.

A Figura 29 é um exemplo de todas as informações computadas para uma amostra, contendo resultados desenvolvidos a partir do método 3.2 e também as adaptações e implementações do método proposto no subcapítulo 3.4 para determinação e avaliação de rugosidade e área de contato. Na Figura 29, à esquerda, são exibidas informações visuais sobre área dos lagos de vales da amostra (pixels amarelos). À direita são exibidas medidas de rugosidade (R_a) da amostra e de referência para calcular gráficos e assinatura de rugosidade (R_{amin} , R_{amax} e R_{avg}). Além disso, são exibidas as informações de área da amostra (Δ_S e Δ_T) e de referência (Δ_{min} e Δ_{max}). As informações gráficas apresentadas em 3.3 (assinatura de rugosidade, gráficos de comportamento de R_a e distribuição de valores de R_a) são mostradas no canto inferior direito. Além disso, caso existam dados de amostragem 2D para comparação, também são exibidas as informações relacionadas à rugosidade e à assinatura de rugosidade 2D (a que está em forma cruz). Em destaque laranja os parâmetros relacionados à área de vales e em azul o índice de área de vales (Δ_T) da amostra.

No capítulo 4, são descritos os experimentos realizados para validar os métodos propostos. Também são apresentados os resultados obtidos e como é feita a análise de rugosidade com os métodos propostos.

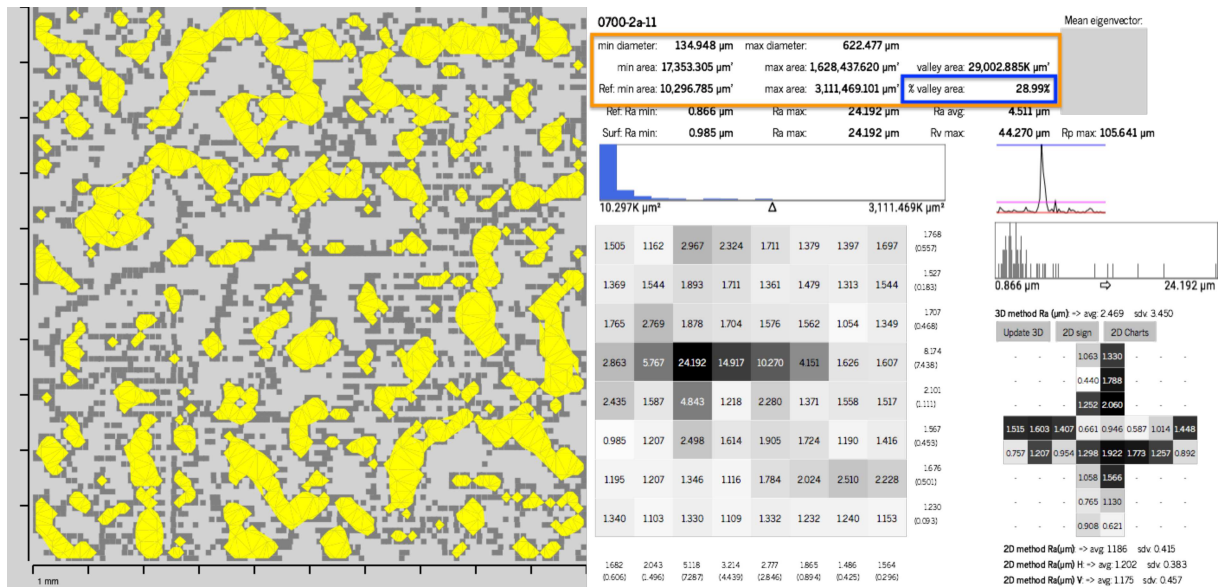


Figura 29: Resultados gerados a partir dos métodos propostos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 EXPERIMENTOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Para validar os métodos propostos e confirmar as hipóteses do trabalho, foram feitos três experimentos. O primeiro experimento, descrito no subcapítulo 4.1, abrange validação do método de computação de rugosidade para um plano único (subcapítulo 3.2) e do método de avaliação de rugosidade (subcapítulo 3.3). O segundo experimento (descrito no subcapítulo 4.2) abrange a validação do método que evolui a computação de rugosidade para múltiplos planos em uma superfície e os parâmetros de índice de área de vales e área média de vale, complementares ao parâmetro de rugosidade (método descrito no subcapítulo 3.4). Por fim, o terceiro experimento (descrito no subcapítulo 4.4) traz uma comparação entre resultados de computação de rugosidade pelos métodos 2D e 3D, com objetivo de ratificar que deve ser utilizado método 3D em detrimento do 2D, complementado a análise de problema de posicionamento do método 2D que foi discutida no subcapítulo 2.4.

Para os resultados computados com o método proposto foi utilizado o equipamento 3D laser especificado no subcapítulo 2.5 e ilustrado na Figura 7. A Figura 11 apresenta o equipamento no processo leitura laser.

4.1 Testes e Análise sobre Método de Computação de Rugosidade para Um Único Plano

O método descrito no subcapítulo 3.2 define o cálculo de um plano de ajustes para representar uma nuvem de pontos. Esse modelo de representação é interessante, principalmente, quando se quer analisar a superfície de forma mais abrangente, sem considerar variações locais de planos. O teste em questão tem por objetivo validar:

1. Funcionamento geral do sistema para computar rugosidade a partir de um plano e ferramentas para avaliação.
2. Demonstrar que há diferenças em analisar resultados com maior nível de detalhe de rugosidade.
3. Verificar se há diferenças na computação de rugosidade, considerando alguma condição variável na aquisição dos blocos, para demonstrar que o método pode ser utilizado para avaliação de rugosidade. Para este teste foi determinada variação da temperatura de sinterização dos blocos no processo de produção.

4.1.1 Condições de teste

Para validar o método proposto, foram calculados os coeficientes de rugosidade e geradas informações de análise para amostras de blocos de cerâmica vermelha. O objetivo desses ensaios é verificar se as técnicas propostas são satisfatórias para a avaliação da rugosidade de

superfícies dos blocos, permitindo a associação entre essa propriedade e a resistência à adesão de argamassas de revestimento com os blocos. Para tanto, blocos cerâmicos foram produzidos a partir da mesma argila submetida a ciclos de queima de 800 °C e 1000 °C, resultando em blocos com diferenças significativas entre suas propriedades físicas e mecânicas.

Os blocos foram preparados, lidos e analisados de acordo com os processos definidos no capítulo 3.1 e 3.3. No total foram coletados três blocos de cada grupo de temperatura e amostradas 4 áreas em cada uma, totalizando 24 superfícies. Por fim, as informações visuais foram obtidas para análise e avaliação dos resultados.

Para o cálculo das assinaturas de rugosidade, foi utilizado o 3º nível de subdivisão da hierarquia *quadtree*, porque é uma boa resolução para o cálculo da rugosidade, pois se aproxima do nível de resolução de leitura do laser e, ainda, porque foi o primeiro nível de divisão que permitiu verificar uma diferença significativa entre as superfícies (veja Tabela 4). Para visualizar a assinatura, foi definida uma versão minificada da figura (sem os valores dos coeficientes R_a), pois facilita a interpretação visual e a comparação dos resultados.

4.1.2 Avaliação dos Resultados Obtidos

Para avaliar os resultados, as assinaturas visuais de todas as superfícies são comparadas. As outras informações (histograma e gráfico de rugosidade) também são usadas para auxiliar na análise do comportamento do coeficiente. Assim, além dos valores R_a calculados para cada localização em cada nível da *quadtree* (representando os dados para avaliação quantitativa), assim como computados nos documentado nos trabalhos (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014), este trabalho apresenta novas formas de avaliação, permitindo uma análise em nível de detalhes do comportamento dos coeficientes sobre uma superfície e também comparações de coeficientes (assinaturas) entre diferentes superfícies.

Em relação à avaliação local, ou seja, a visualização das informações de rugosidade na superfície, com divisão espacial das regiões (*quadtree*), que é a assinatura da rugosidade do método, permite uma melhor interpretação dos coeficientes calculados localmente do que os métodos de referência, descritos em (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014). Pode-se inferir maior resolução e exatidão o que acontece com os coeficientes internos e sua distribuição ao longo da superfície.

A partir da análise da assinatura, é possível visualizar partes da superfície que apresentam maior variedade de coeficientes e identificar quais partes possuem maior (ou menor) nível de rugosidade. Indicando, por exemplo, em quais partes da amostra há maior chance de intertravamento interfacial (maior R_a). Em comparação com os métodos apresentados em (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; KOZUBAL et al., 2020) há um ganho considerável a este respeito, porque os métodos apresentam apenas coeficientes globais de rugosidade das superfícies, sem uma análise local ou em níveis de detalhe.

Em comparação com os métodos de reconstrução de superfície (SCHALL; SAMOZINO,

2005; KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006; TAUBIN, 2012; KAZHDAN; HOPPE, 2013; BERGER et al., 2014; NAN; WONKA, 2017), o método proposto tem uma vantagem, tanto porque as informações nestas obras de referência são suavizadas em relação à forma original superfície, quanto ao fato de elas não terem o foco na análise dos coeficientes de rugosidade, justamente porque visam reproduzir superfícies suavizadas e não analisar as rugosidades. Esses métodos permitem apenas uma avaliação qualitativa (visual) dos coeficientes de rugosidade em alto nível.

A assinatura de rugosidade também permite uma avaliação geral da superfície, comparando 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 de partes (superfícies) dentro do próprio bloco, para encontrar padrões comportamentais que indiquem um fator de adesão interfacial superior em determinadas localizações e o comportamento global dos coeficientes em relação aos blocos da mesma temperatura. Por exemplo, existem regiões de um bloco que possuem maior rugosidade e outras com menor rugosidade; assim é possível identificar regiões onde os blocos poderiam favorecer a adesão com interface de massa.

Com objetivo de avaliar os coeficientes de rugosidade das superfícies propõe-se a análise tanto de níveis de detalhe das divisões da *quadtree*, quanto comparação entre superfícies analisando as métricas de avaliação desenvolvidas (assinatura, histograma e gráfico de rugosidade).

4.1.2.1 Avaliação por Nível de Detalhes

A primeira forma de avaliação proposta é a análise hierárquica e local dos coeficientes de rugosidade. Nesse método de avaliação, é possível analisar e comparar assinaturas de superfície em diferentes níveis de detalhe. Quanto maior o nível de divisão da *quadtree* avaliado, maior o nível de detalhe desta avaliação, precisamente porque os níveis anteriores são de valores globais ou médios em relação a uma região. Deve-se considerar também que no nível inicial da *quadtree* (nível da raiz) o coeficiente calculado é o valor global da superfície, ou seja, o mesmo tipo de resultado que os trabalhos apresentados em (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; KOZUBAL et al., 2020). A Tabela 4 apresenta uma comparação nos níveis iniciais das *quadtrees* de duas superfícies amostradas para os testes realizados. No exemplo, os coeficientes no nível mais baixo de detalhe da assinatura de rugosidade (níveis 1, 2 e 3 da árvore) apresentam resultados muito semelhantes, devido aos valores médios de R_a . Isso é perceptível porque tanto o R_a na primeira coluna quanto os valores $R_{a\min}$ e $R_{a\max}$ na segunda e terceira colunas da tabela são muito semelhantes (inclusive as imagens são muito semelhantes). Porém, no terceiro nível de divisão (nível 4 da *quadtree*), a diferença entre as superfícies é mais evidente. As imagens têm uma diferença maior e os parâmetros $R_{a\min}$ e $R_{a\max}$ e, também, têm uma diferença maior em relação aos resultados dos níveis anteriores.

O profissional de engenharia, entretanto, pode utilizar o nível de subdivisão que entende mais adequado ao seu propósito, pois é possível buscar um padrão de similaridade entre os

blocos ou analisar suas diferenças com mais ou menos nível de detalhes.


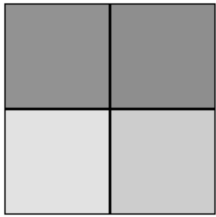
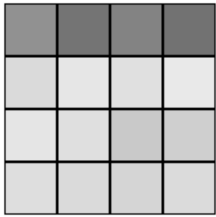
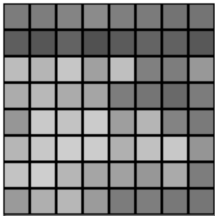

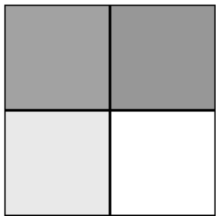
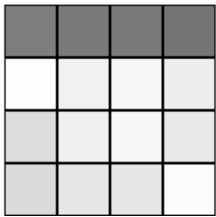
Superfície	Raiz (nível 1)	1ª divisão (nível 2)	2ª divisão (nível 3)	3ª divisão (nível 4)
2º bloco de 800 °C, amostra B	 $R_a = 3,283 \mu m$	 $R_{aavg} = 3,283 \mu m$ $R_{amin} = 2,772 \mu m$ $R_{amax} = 3,698 \mu m$ $R_{asdv} = 0,394 \mu m$	 $R_{aavg} = 3,283 \mu m$ $R_{amin} = 2,595 \mu m$ $R_{amax} = 5,003 \mu m$ $R_{asdv} = 0,677 \mu m$	 $R_{aavg} = 3,705 \mu m$ $R_{amin} = 2,453 \mu m$ $R_{amax} = 7,978 \mu m$ $R_{asdv} = 1,020 \mu m$
	3º bloco de 1000 °C, amostra B	 $R_a = 3,059 \mu m$	 $R_{aavg} = 3,059 \mu m$ $R_{amin} = 2,454 \mu m$ $R_{amax} = 3,602 \mu m$ $R_{asdv} = 0,482 \mu m$	 $R_{aavg} = 3,059 \mu m$ $R_{amin} = 2,207 \mu m$ $R_{amax} = 4,890 \mu m$ $R_{asdv} = 0,826 \mu m$

Tabela 4: Assinaturas de rugosidade das superfícies em quatro níveis de detalhe. Na primeira coluna, o R_a geral é mostrado abaixo de cada figura. Nas demais colunas são mostradas a média (R_{aavg}), mínimo (R_{amin}), máximo (R_{amax}) e desvio-padrão (R_{asdv}) para cada conjunto de R_a .

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2.2 Avaliação comparativa da rugosidade

A comparação dos resultados obtidos em diferentes temperaturas indica ao profissional de engenharia uma métrica para determinar qual processo adotar, de acordo com o nível de rugosidade desejado. A Tabela 5 apresenta os resultados (R_{aavg} , R_{amin} , R_{amax} e R_{asdv}), obtidos pela comparação dos coeficientes em todas as superfícies de cada bloco e também sobre todas as superfícies de todos os blocos do mesmo grupo de temperatura (mesmo pico de queima). Os valores mostram que as amostras do grupo de temperatura de queima 1000 °C apresentam maior variação dos coeficientes e também maior valor de rugosidade. Isso indica que esta temperatura de queima apresenta maior rugosidade ao longo da superfície e, conseqüentemente, gera uma resistência ao cisalhamento (VENKATARAMA REDDY; LAL; NANJUNDA RAO, 2007).

A outra forma de análise utilizada neste trabalho é a comparação de dados através das ferramentas de análise que são propostas no trabalho. Combinando o uso das três ferramentas, vários comportamentos, padrões e análises das superfícies amostradas podem ser inferidos. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nos testes realizados para a validação do modelo.

Grupo de Temperatura	Todos blocos	1º bloco	2º bloco	3º bloco
Blocos de 800 °C	$R_{a\,avg} = 3,457 \mu m$	$R_{a\,avg} = 3,575 \mu m$	$R_{a\,avg} = 3,348 \mu m$	$R_{a\,avg} = 3,448 \mu m$
	$R_{a\,min} = 2,169 \mu m$	$R_{a\,min} = 2,214 \mu m$	$R_{a\,min} = 2,219 \mu m$	$R_{a\,min} = 2,169 \mu m$
	$R_{a\,max} = 8,134 \mu m$	$R_{a\,max} = 7,978 \mu m$	$R_{a\,max} = 7,980 \mu m$	$R_{a\,max} = 8,134 \mu m$
	$R_{a\,sdv} = 0,917 \mu m$	$R_{a\,sdv} = 1,026 \mu m$	$R_{a\,sdv} = 0,802 \mu m$	$R_{a\,sdv} = 0,918 \mu m$
Blocos de 1000 °C	$R_{a\,avg} = 3,502 \mu m$	$R_{a\,avg} = 3,262 \mu m$	$R_{a\,avg} = 3,261 \mu m$	$R_{a\,avg} = 3,984 \mu m$
	$R_{a\,min} = 1,814 \mu m$	$R_{a\,min} = 2,049 \mu m$	$R_{a\,min} = 1,986 \mu m$	$R_{a\,min} = 1,814 \mu m$
	$R_{a\,max} = 15,780 \mu m$	$R_{a\,max} = 10,037 \mu m$	$R_{a\,max} = 9,966 \mu m$	$R_{a\,max} = 15,780 \mu m$
	$R_{a\,sdv} = 1,026 \mu m$	$R_{a\,sdv} = 0,712 \mu m$	$R_{a\,sdv} = 0,792 \mu m$	$R_{a\,sdv} = 1,478 \mu m$

Tabela 5: Comparação da rugosidade da superfície por grupo de temperatura. A primeira coluna mostra os valores calculados de todos os blocos no mesmo grupo de temperatura. As demais colunas mostram os valores de média ($R_{a\,avg}$), mínimo ($R_{a\,min}$), máximo ($R_{a\,max}$) e desvio padrão ($R_{a\,sdv}$) de cada bloco.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calcular as assinaturas, os valores de R_a mínimo ($R_{a\,min}$), R_a máximo ($R_{a\,max}$) e R_a médio ($R_{a\,avg}$) foram computados sobre todas as superfícies amostradas. Os valores encontrados foram: $R_{a\,min} = 1,814 \mu m$, $R_{a\,max} = 15,78 \mu m$ e a rugosidade média $R_{a\,avg}$ foi $3,484 \mu m$.

A assinatura de rugosidade auxilia na avaliação da rugosidade e aderência da interface em diferentes amostras de temperatura, conforme mostrado na Tabela 6, algumas superfícies apresentam maior variação de rugosidade do que outras. Isso é percebido tanto pelos dados de média e desvio-padrão calculados, quanto pela variação de cores da assinatura. No entanto, outros comportamentos também podem ser identificados. Por exemplo, nos testes realizados, foi possível verificar um comportamento padronizado (similaridade) entre as superfícies de regiões semelhantes de todos os blocos, como se vê na coluna “Superfície A” da Tabela 6. Verifica-se que nesta região dos blocos, os coeficientes apresentam geralmente pouca variação; eles têm valores próximos ou abaixo da rugosidade média ($R_{a\,avg}$). Esse comportamento é destacado pelo gráfico de coeficientes.

Outra ferramenta utilizada na avaliação de resultados, o histograma, permite comparar a variação dos valores de rugosidade entre blocos de diferentes temperaturas de queima. Nota-se, de forma geral, que as superfícies dos blocos com uma temperatura de queima de 800 °C concentraram os coeficientes mais próximos do centro do histograma (ou mais próximo do valor $R_{a\,avg}$). Nas superfícies dos blocos de 1000 °C, há uma variação maior ou dispersão dos valores em relação à rugosidade média ($R_{a\,avg}$).

Através dos resultados apresentados com as ferramentas utilizadas para análise, foi possível verificar quantitativa e visualmente que os blocos com temperatura de queima de 1000 °C apresentam maior variação de rugosidade em relação aos blocos com temperatura de queima de 800 °C, o que estima-se favorecer a aderência por contato com interface de massa de concreto.

Por fim, as ferramentas propostas permitem uma maior variação dos critérios de avaliação

da rugosidade de superfícies em relação à forma quantitativa apresentada nas obras de referência (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; KOZUBAL et al., 2020) e os métodos subjetivos de (SCHALL; SAMOZINO, 2005; KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006; TAUBIN, 2012; KAZHDAN; HOPPE, 2013; BERGER et al., 2014; NAN; WONKA, 2017). Como pode ser verificado nos resultados apresentados, é possível analisar em vários níveis de detalhe, permitindo comparações e considerações que não são facilmente determinadas unicamente pela análise de coeficientes globais.

4.2 Testes e Análise sobre Método de Computação de Rugosidade para Múltiplos Planos

No subcapítulo 3.4 é descrito o método de computação de rugosidade para múltiplos planos. Este método permite modelar melhor a geometria da superfície do que o método descrito em 3.2. Alguns testes foram realizados nesta etapa para com objetivo de validar o método:

1. Funcionamento geral do sistema para computar rugosidade a partir de múltiplos planos.
2. Demonstrar que os parâmetros índice de área de vales Δ_T e área média de vales Δ_{avg} , podem ser utilizados para avaliar diferenças em grupos de amostras que variam por algum critério, mais especificamente, amostras de olarias diferentes.
3. Discussão sobre utilização dos dois métodos propostos para computação de rugosidade.

4.2.1 Condições de teste

Para validar o método descrito no subcapítulo 3.4 foram adquiridos e lidos, conforme o método descrito no subcapítulo 3.1, 10 blocos de 5 olarias diferentes, a fim de proporcionar variabilidade dos dados. De cada bloco, foram amostradas 10 superfícies, totalizando 500 amostras de superfícies de blocos de cerâmica vermelha. O objetivo deste teste é verificar se método é eficaz para computação de rugosidade e também para demonstrar como utilizar os parâmetros de índice de área de vales (Δ_T) e área média de vales (Δ_{avg}). Para testar eficácia do método são computados os parâmetros de rugosidade, da mesma forma como foi feita a validação no teste descrito no subcapítulo 4.1, obtendo assinatura de rugosidade e dados estatísticos, com destaque rugosidade média (R_{avg}) e desvio-padrão (R_{sdv}).

Para os novos parâmetros propostos, são computadas as medidas: área de vale total (Δ_S), índice de área de vale (Δ_T), área média de vale (Δ_{avg}) e desvio-padrão de áreas de vale (Δ_{sdv}). Estima-se que as áreas de vale com maior tamanho em média, favorecem a aderência por contato, porque ocorre maior concentração de partículas da matriz cimentícia, inclusive permitindo concentração de partículas com tamanho maior do que em outras áreas. Para verificar isso, foram feitas as seguintes análises:

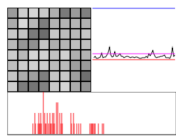
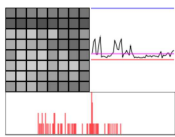
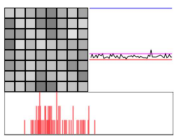
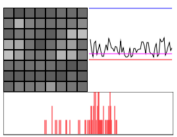
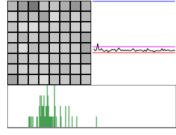
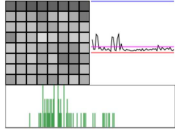
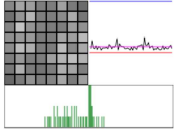
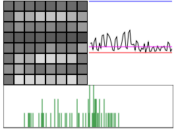
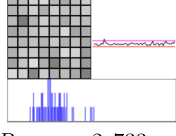
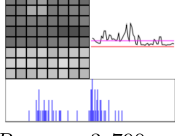
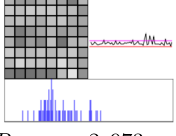
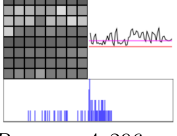
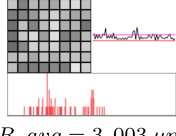
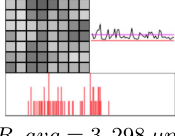
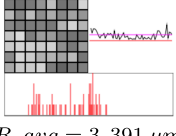
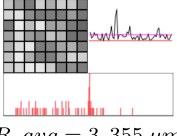
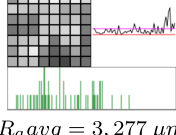
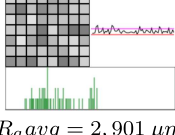
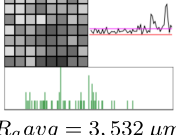
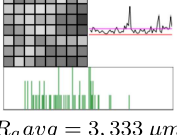
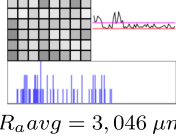
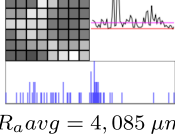
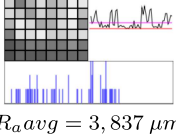
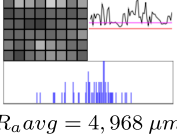
Bloco	Superfície A	Superfície B	Superfície C	Superfície D
1º Bloco de 800 °C	 $R_a avg = 2,922 \mu m$ $R_a min = 2,316 \mu m$ $R_a max = 5,308 \mu m$ $R_a sdv = 0,419 \mu m$	 $R_a avg = 3,705 \mu m$ $R_a min = 2,453 \mu m$ $R_a max = 7,978 \mu m$ $R_a sdv = 1,020 \mu m$	 $R_a avg = 2,831 \mu m$ $R_a min = 2,214 \mu m$ $R_a max = 4,394 \mu m$ $R_a sdv = 0,296 \mu m$	 $R_a avg = 4,841 \mu m$ $R_a min = 2,629 \mu m$ $R_a max = 7,714 \mu m$ $R_a sdv = 1,212 \mu m$
2º Bloco de 800 °C	 $R_a avg = 2,640 \mu m$ $R_a min = 2,229 \mu m$ $R_a max = 4,177 \mu m$ $R_a sdv = 0,180 \mu m$	 $R_a avg = 3,266 \mu m$ $R_a min = 2,283 \mu m$ $R_a max = 6,957 \mu m$ $R_a sdv = 0,767 \mu m$	 $R_a avg = 3,436 \mu m$ $R_a min = 2,614 \mu m$ $R_a max = 5,761 \mu m$ $R_a sdv = 0,457 \mu m$	 $R_a avg = 4,050 \mu m$ $R_a min = 2,219 \mu m$ $R_a max = 7,980 \mu m$ $R_a sdv = 1,238 \mu m$
3º Bloco de 800 °C	 $R_a avg = 2,733 \mu m$ $R_a min = 2,261 \mu m$ $R_a max = 3,845 \mu m$ $R_a sdv = 0,216 \mu m$	 $R_a avg = 3,790 \mu m$ $R_a min = 2,277 \mu m$ $R_a max = 8,134 \mu m$ $R_a sdv = 1,045 \mu m$	 $R_a avg = 2,973 \mu m$ $R_a min = 2,169 \mu m$ $R_a max = 5,268 \mu m$ $R_a sdv = 0,391 \mu m$	 $R_a avg = 4,296 \mu m$ $R_a min = 2,300 \mu m$ $R_a max = 6,885 \mu m$ $R_a sdv = 1,138 \mu m$
1º Bloco de 1000 °C	 $R_a avg = 3,003 \mu m$ $R_a min = 2,139 \mu m$ $R_a max = 5,381 \mu m$ $R_a sdv = 0,504 \mu m$	 $R_a avg = 3,298 \mu m$ $R_a min = 2,259 \mu m$ $R_a max = 6,214 \mu m$ $R_a sdv = 0,711 \mu m$	 $R_a avg = 3,391 \mu m$ $R_a min = 2,285 \mu m$ $R_a max = 6,145 \mu m$ $R_a sdv = 0,724 \mu m$	 $R_a avg = 3,355 \mu m$ $R_a min = 2,049 \mu m$ $R_a max = 10,037 \mu m$ $R_a sdv = 0,854 \mu m$
2º Bloco de 1000 °C	 $R_a avg = 3,277 \mu m$ $R_a min = 1,986 \mu m$ $R_a max = 8,985 \mu m$ $R_a sdv = 0,901 \mu m$	 $R_a avg = 2,901 \mu m$ $R_a min = 2,192 \mu m$ $R_a max = 4,488 \mu m$ $R_a sdv = 0,448 \mu m$	 $R_a avg = 3,532 \mu m$ $R_a min = 2,227 \mu m$ $R_a max = 9,966 \mu m$ $R_a sdv = 0,993 \mu m$	 $R_a avg = 3,333 \mu m$ $R_a min = 2,233 \mu m$ $R_a max = 10,037 \mu m$ $R_a sdv = 0,761 \mu m$
3º Bloco de 1000 °C	 $R_a avg = 3,046 \mu m$ $R_a min = 2,001 \mu m$ $R_a max = 6,404 \mu m$ $R_a sdv = 0,844 \mu m$	 $R_a avg = 4,085 \mu m$ $R_a min = 1,814 \mu m$ $R_a max = 15,780 \mu m$ $R_a sdv = 1,542 \mu m$	 $R_a avg = 3,837 \mu m$ $R_a min = 1,952 \mu m$ $R_a max = 7,959 \mu m$ $R_a sdv = 1,465 \mu m$	 $R_a avg = 4,968 \mu m$ $R_a min = 2,471 \mu m$ $R_a max = 9,812 \mu m$ $R_a sdv = 1,423 \mu m$

Tabela 6: Tabela de resultados para o teste de comparação de grupos de temperatura. Os resultados foram gerados utilizando método de computação de um único plano para superfície. Nos gráficos de linhas nos resultados, as linhas coloridas representam os valores de referência. A linha rosa é a média geral ($R_a avg = 3,484$), a linha vermelha é o valor mínimo geral ($R_a min = 1,814$) e a linha azul é o máximo geral ($R_a max = 15,78$)

Fonte: Elaborado pelo autor.

1. Análise comparativa direta sobre o índice de área de vales (Δ_T), através da média por olaria, para determinar qual olaria apresenta blocos com maior índice de área total e, conseqüentemente, qual favorece mais a aderência por área de contato.
2. Teste de hipóteses, mais especificamente o teste-F sobre os dados de desvio-padrão das áreas de vales (Δ_{sdv}), a um nível de significância de 5%, para verificar se há diferenças significativas entre as áreas das amostras de olarias diferentes. Portanto, se há diferença nos blocos de olarias diferentes.
3. Teste de hipóteses, mas especificamente o teste-Z, sobre os dados de área média de vale (Δ_{avg}), a um nível de significância de 5%, para verificar se os dados de área média de vale são significativamente maiores de uma olaria para outra. Dessa forma, é possível indicar estatisticamente quais seriam as olarias com maior ou menor área média de vale (Δ_{avg}) e, conseqüentemente, as que produzem blocos que favorecem a aderência por área de contato.

4.2.2 Análise dos Parâmetros relacionados à Área de Vales

Um dos objetivos do trabalho é propor outros parâmetros relacionados à topografia da superfície, além dos parâmetros de rugosidade apresentados no subcapítulo 2.3 e que permitam verificar aderência entre substrato de cerâmica vermelha e matriz cimentícia. Conforme descrito no subcapítulo 3.4, este trabalho apresenta o índice de áreas de vales (Δ_T) e a média de área de vales (Δ_{avg}) para determinar um parâmetro relacionado à superfície de contato. Para demonstrar o uso destes parâmetros são analisados alguns resultados apresentados na Tabela 7 e Figura 30 e também são apresentados resultados da análise estatística.

Para esta análise foram selecionadas 5 amostras consideradas representativas, uma para cada olaria. De todas as amostras de uma mesma olaria, é considerada a amostra mais representativa aquela que possui valor Δ_T mais próximo do valor médio de Δ_T da respectiva olaria (Δ_{Tavg}).

Na Figura 30, os pixels em amarelo representam as áreas de vales de cada amostra. Visualmente, não é possível avaliar com exatidão os resultados, mas é perceptível que algumas superfícies possuem áreas de vale maiores do que outras, enquanto outras possuem maior quantidade de áreas de vale, porém com tamanhos menores. Isso impacta nos parâmetros relacionados a áreas de vale. Aquelas superfícies com áreas maiores, como pode ser visto na Figura 30 para as olarias 4 e 5, apresentam valor Δ_{avg} maior do que outras superfícies, como as das olarias 1, 2 e 3, na mesma figura. Isso pode ser analisado numericamente, observando os valores da Tabela 7, em especial a coluna Δ_T . É possível afirmar que a olaria 5 tende a ter maior aderência por contato, considerando como parâmetro o índice de área total de vales (Δ_T) e o critério de que quanto maior valor de Δ_T maior o favorecimento à aderência. Outra forma de avaliação proposta relacionada a áreas, é a análise de área média de vales (Δ_{avg}). Seguindo o mesmo critério, a olaria 4 obteve maior valor, portanto, estima-se que os blocos analisados desta olaria

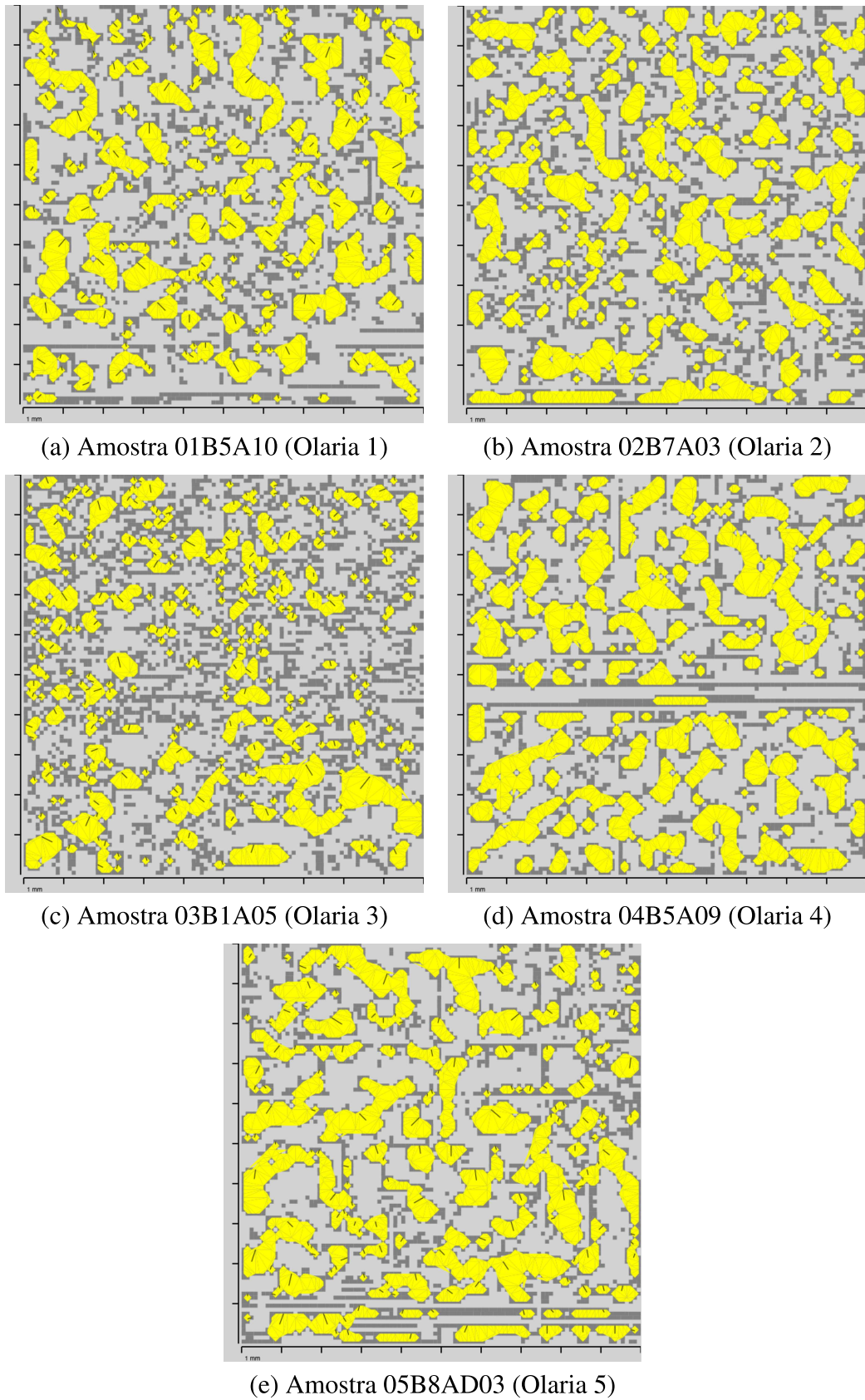


Figura 30: Resultados que demonstram o cálculo das áreas. Em (a) um resultado da olaria 1, em (b) da olaria 2, em (c) da olaria 3, em (d) da olaria 4 e em (e) da olaria 5.

Fonte: Elaborado pelo autor.

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

Tabela 7: Valores Δ_{avg} , Δ_T e Δ_{Tavg} da Olaria da amostra de cada uma das cinco olarias apresentadas na Figura 30

Fonte: Elaborado pelo autor.

apresentem favorecimento a aderência por área de contato. As olarias 4 e 5 possuem valores próximos nos dois critérios, mas dependendo do parâmetro adotado uma ou outra olaria seria definida como a que apresenta resultados que favorecem aderência através da área de contato.

4.2.2.1 Considerações sobre os parâmetros de área

Em relação aos parâmetros Δ_T e Δ_{avg} , é proposta a análise em conjunto dos parâmetros, uma vez que o tamanho e forma das áreas de concentração de partículas da matriz cimentícia tem variação entre as amostras. Conforme definido na **hipótese 3**, estima-se que as superfícies com maior tamanho área de vale, favorecem a aderência por contato, porque ocorre maior concentração de partículas da matriz cimentícia, inclusive permitindo utilização de partículas com tamanho maior do que em outras superfícies.

Estima-se que o parâmetro de área média de vales (Δ_{avg}) é o que melhor representa o favorecimento à aderência por área de contato, em comparação ao Δ_T . Isso porque o Δ_{avg} está mais relacionado com o diâmetro de partículas da matriz cimentícia. No entanto, se duas amostras A e B possuem valores de Δ_{avg} muito próximos, o maior valor Δ_T indica uma tendência de maior aderência por área de contato.

Nos subcapítulos 4.2.3.1, 4.2.3.2 e 4.2.3.3 são feitas análises estatísticas sobre os parâmetros relacionados à área de contato.

4.2.3 Análises Estatísticas sobre os Parâmetros de Área

4.2.3.1 Verificação de diferença significativa entre amostras

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados de desvio-padrão separados por olaria, por bloco e por amostra.

A Tabela 10 apresenta o teste realizado de uma área versus as outras para determinar se, a um nível de significância de 5%, há diferenças significativas entre as amostras das olarias. Quando o valor de F for maior que o valor $F_{crítico} = 1,394061257$, indica que é possível afirmar que as amostras são diferentes entre si, avaliando os valores médios de área de vale.

Superfície	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
B1A01	0, 2391	0, 1912	0, 1603	0, 1961	0, 3199
B1A02	0, 2555	0, 2757	0, 2081	0, 1808	0, 3822
B1A03	0, 2328	0, 1918	0, 1059	0, 1911	0, 4002
B1A04	0, 2019	0, 2090	0, 1224	0, 1763	0, 4075
B1A05	0, 2297	0, 1851	0, 1668	0, 1636	0, 4290
B1A06	0, 2092	0, 2899	0, 1552	0, 1821	0, 4154
B1A07	0, 2118	0, 1852	0, 1081	0, 1656	0, 4079
B1A08	0, 1662	0, 2349	0, 3154	0, 1682	0, 4523
B1A09	0, 1681	0, 1952	0, 1704	0, 1878	0, 3907
B1A10	0, 1981	0, 2637	0, 1639	0, 1916	0, 4258
B2A01	0, 1430	0, 2529	0, 2375	0, 2075	0, 3119
B2A02	0, 1642	0, 2480	0, 1486	0, 2008	0, 2624
B2A03	0, 1673	0, 2350	0, 3155	0, 1793	0, 5483
B2A04	0, 1792	0, 2328	0, 2259	0, 1758	0, 2899
B2A05	0, 1571	0, 2259	0, 2601	0, 2072	0, 2825
B2A06	0, 1817	0, 2417	0, 2064	0, 1603	0, 2153
B2A07	0, 2116	0, 2304	0, 1504	0, 1906	0, 3349
B2A08	0, 2057	0, 2847	0, 1440	0, 1642	0, 3038
B2A09	0, 1941	0, 2361	0, 1092	0, 1922	0, 4040
B2A10	0, 1850	0, 2473	0, 1767	0, 1379	0, 4193
B3A01	0, 2393	0, 2845	0, 6844	0, 2048	0, 3812
B3A02	0, 1603	0, 2926	0, 1516	0, 1939	0, 3487
B3A03	0, 1529	0, 2280	0, 2554	0, 1622	0, 5072
B3A04	0, 1626	0, 2272	0, 1853	0, 1904	0, 3234
B3A05	0, 1622	0, 1693	0, 2570	0, 1710	0, 3344
B3A06	0, 1950	0, 2141	0, 2473	0, 1950	0, 4601
B3A07	0, 1754	0, 2682	0, 3364	0, 1673	0, 3463
B3A08	0, 2071	0, 4120	0, 3012	0, 1576	0, 3585
B3A09	0, 2118	0, 2607	0, 1569	0, 1497	0, 3843
B3A10	0, 1761	0, 2609	0, 1848	0, 1854	0, 4911
B4A01	0, 1788	0, 2922	0, 3732	0, 1978	0, 3339
B4A02	0, 2294	0, 2396	0, 1396	0, 1945	0, 4606
B4A03	0, 1601	0, 2714	0, 1562	0, 2010	0, 4242
B4A04	0, 2015	0, 2133	0, 1353	0, 1644	0, 3921
B4A05	0, 2332	0, 2429	0, 3524	0, 1869	0, 4442
B4A06	0, 1806	0, 2385	0, 2137	0, 1496	0, 3737
B4A07	0, 1941	0, 1962	0, 1808	0, 1920	0, 5027
B4A08	0, 1834	0, 2755	0, 1101	0, 1917	0, 5247
B4A09	0, 1475	0, 2130	0, 3038	0, 1869	0, 3928
B4A10	0, 1420	0, 2238	0, 1371	0, 2137	0, 3518
B5A01	0, 1785	0, 2412	0, 4048	0, 1760	0, 2587
B5A02	0, 1809	0, 2986	0, 3188	0, 2353	0, 3409
B5A03	0, 1622	0, 2082	0, 1655	0, 2068	0, 3388
B5A04	0, 2118	0, 2762	0, 0994	0, 1519	0, 3332
B5A05	0, 1519	0, 2772	0, 2888	0, 1848	0, 3671
B5A06	0, 2029	0, 2952	0, 3814	0, 2379	0, 4768
B5A07	0, 2359	0, 2891	0, 1605	0, 1914	0, 3011
B5A08	0, 2366	0, 2555	0, 1532	0, 2045	0, 4073
B5A09	0, 1215	0, 2453	0, 1352	0, 2129	0, 3084
B5A10	0, 2367	0, 2868	0, 2789	0, 1908	0, 3354

Tabela 8: Desvio-padrão das áreas de lagos computadas para os blocos 01 a 05 das 5 olarias do teste

Fonte: Elaborado pelo autor.

Superfície	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
B6A01	0,1947	0,2773	0,1486	0,2039	0,3380
B6A02	0,1655	0,1712	0,1753	0,2157	0,3129
B6A03	0,1313	0,2010	0,1430	0,1833	0,3756
B6A04	0,1216	0,2489	0,1515	0,1734	0,3631
B6A05	0,1483	0,2223	0,1939	0,1611	0,4194
B6A06	0,1876	0,2529	0,1780	0,2110	0,4137
B6A07	0,1786	0,2404	0,2240	0,1697	0,5212
B6A08	0,1891	0,2451	0,3061	0,1946	0,5774
B6A09	0,1349	0,2317	0,1977	0,1630	0,4175
B6A10	0,1942	0,2390	0,1256	0,1762	0,6464
B7A01	0,1740	0,1973	0,1903	0,1690	0,3516
B7A02	0,1452	0,2046	0,2159	0,1656	0,6315
B7A03	0,1771	0,2033	0,2652	0,2061	0,3278
B7A04	0,1744	0,2583	0,1462	0,1876	0,4266
B7A05	0,2120	0,2027	0,2292	0,2016	0,3636
B7A06	0,1598	0,2861	0,1374	0,1838	0,3213
B7A07	0,1720	0,2223	0,1761	0,2081	0,3470
B7A08	0,2292	0,1914	0,2323	0,2000	0,6220
B7A09	0,2074	0,2348	0,1395	0,1622	0,3619
B7A10	0,2081	0,3024	0,1469	0,1754	0,4237
B8A01	0,1817	0,2040	0,1516	0,1683	0,3172
B8A02	0,1893	0,2872	0,2459	0,1840	0,2710
B8A03	0,2414	0,1764	0,2691	0,1648	0,3251
B8A04	0,1522	0,1871	0,2485	0,1409	0,3757
B8A05	0,2006	0,2081	0,1676	0,1816	0,3673
B8A06	0,1459	0,2051	0,3002	0,1791	0,4703
B8A07	0,1650	0,2166	0,2910	0,1944	0,2839
B8A08	0,1573	0,2378	0,2398	0,1768	0,6326
B8A09	0,1401	0,2199	0,1928	0,1996	0,3218
B8A10	0,1874	0,1852	0,2432	0,2098	0,3315
B9A01	0,1584	0,2074	0,1533	0,2055	0,4068
B9A02	0,1679	0,2535	0,1910	0,1812	0,2849
B9A03	0,2293	0,2910	0,1622	0,2117	0,3822
B9A04	0,1495	0,2448	0,1978	0,1754	0,4665
B9A05	0,2224	0,3306	0,2010	0,1980	0,4398
B9A06	0,1657	0,2538	0,2292	0,2263	0,3165
B9A07	0,2174	0,1650	0,2625	0,1629	0,3169
B9A08	0,1784	0,2724	0,2799	0,1678	0,4661
B9A09	0,1570	0,2430	0,2101	0,2036	0,2968
B9A10	0,0967	0,2801	0,2471	0,1642	0,5866
B10A01	0,2001	0,2245	0,2435	0,1675	0,4760
B10A02	0,1882	0,2044	0,2030	0,1546	0,3852
B10A03	0,2586	0,2056	0,1854	0,2163	0,3987
B10A04	0,1756	0,1904	0,1459	0,2063	0,3748
B10A05	0,1843	0,1737	0,1945	0,2439	0,3335
B10A06	0,1788	0,1574	0,1581	0,1910	0,4048
B10A07	0,2553	0,1960	0,2297	0,1740	0,4557
B10A08	0,2927	0,1907	0,1943	0,2276	0,4334
B10A09	0,1407	0,1993	0,1549	0,2024	0,3678
B10A10	0,2714	0,1815	0,1649	0,1762	0,4424

Tabela 9: Desvio-padrão das áreas de lagos computadas para os blocos 06 a 10 das 5 olarias do teste

Fonte: Elaborado pelo autor.

	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
Olaria 1		1,380349145	5,379345391	2,807493131	5,916596211
Olaria 2	1,380349145		3,897090392	3,875320743	5,916596211
Olaria 3	5,379345391	3,897090392		15,10247523	1,099872899
Olaria 4	2,807493131	3,875320743	15,10247523		16,61080322
Olaria 5	5,916596211	5,916596211	1,099872899	16,61080322	

Tabela 10: Resultado do teste-F para os dados de desvio-padrão de área (Δ_{sdv}). O valor do $F_{crítico}$ para referência é 1,394061257.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os valores da Tabela 10 é possível afirmar que há diferença entre as áreas analisadas para diferentes Olarias. Apenas em duas situações o valor ficou abaixo de 1,394061257. Portanto, conclui-se que a avaliação do parâmetro de índice de área de vales pode ser utilizada para comparar amostras produzidas em diferentes materiais ou processos de produção.

4.2.3.2 Verificação de Área Média de Vales

Nesta avaliação são utilizados os valores de área média de vale (Δ_{avg}). O objetivo é demonstrar que as áreas médias de vale de uma olaria, a um nível de significância de 5%, são significativamente maiores que a das outras. Dessa forma, permite observar qual olaria produz os blocos com maior valor de área média de vales (Δ_{avg}) e, conseqüentemente, os blocos que, teoricamente, têm mais aderência por contato. As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores de (Δ_{avg}) computados para o teste, separados por olaria, por bloco e por amostra.

A Tabela 13 apresenta o resultado do teste realizado de uma área versus as outras para determinar se é possível afirmar, a um nível de significância de 5%, que os dados de valor de área média de vales (Δ_{avg}) de uma olaria é significativamente maior que das outras olarias. Quando o valor de Z for maior que o valor $Z_{crítico} = 1,959963985$, indica que o valor Δ_{avg} é maior do que o valor Δ_{avg} de outra olaria. É relevante destacar ainda que, normalmente, no teste de hipóteses configura-se como primeira hipótese aquela variável que maior desvio-padrão. No entanto, com objetivo apresentar tanto relacionamento da olaria A versus B, quanto da olaria B versus A, optou-se por utilizar uma olaria por vez como primeira variável, independente dos valores de desvio-padrão em questão.

Considerando os valores da Tabela 13 é possível afirmar que os valores de Δ_{avg} da Olaria 5 são significativamente maiores que os valores de Δ_{avg} das outras olarias. Por esta análise e de acordo com a **hipótese 3** de quanto maior a área de contato maior a tendência ao aumento da aderência, estima-se que os blocos da olaria 5 possuam maior tendência ao aumento da aderência em comparação com os blocos do experimento amostrados de outras olarias.

Superfície	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
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
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

Tabela 11: Valor de médias de área de lagos computadas para os blocos 01 a 05 das 5 olarias do teste

Fonte: Elaborado pelo autor.

Superfície	Olaria 1	Olaria 2	Olaria 3	Olaria 4	Olaria 5
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
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
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

Tabela 12: Valor de médias de área de lagos computadas para os blocos 06 a 10 das 5 olarias do teste

Fonte: Elaborado pelo autor.

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

Tabela 13: Resultado do teste-Z para os dados de média de área (Δ_{avg})

Fonte: Elaborado pelo autor.

	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

Tabela 14: Média e desvio-padrão dos índices de área de vales (Δ_T)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3.3 Comparativo de Índices de Área de Vales

Na análise comparativa direta sobre as áreas de vale são avaliados os valores de Δ_T para as amostras dos blocos das 5 olarias. Para esta validação, observa-se a **hipótese 3** que quanto maior o valor de Δ_T , maior aderência por contato. Para esta análise foram considerados os valores de índice de área de vales (Δ_T), separados por olaria, bloco e amostra. A Figura 31 mostra um comparativo das áreas.

A Tabela 14 apresenta os dados de média e desvio-padrão sobre os dados apresentados na Figura 31.

Outra forma de avaliação do parâmetro Δ_T em relação às amostras das olarias é a separação dos valores das em faixas de valores. Tal como um histograma, o objetivo é visualizar 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 (valores da Figura 31). Os valores de mínimo (Δ_{min}) e de máximo (Δ_{max}) definem o intervalo do histograma de Δ_T e, dentro desse intervalo, são definidas cinco faixas uniformemente distribuídas (apresentadas na Tabela 15).

A partir dos valores Δ_T (apresentados na Figura 31) é feita a composição do histograma, contabilizando o valor Δ_T de cada amostra na respectiva faixa de representação. A Tabela 16 apresenta a quantidade de Δ_T por faixa de representação. As linhas estão na ordem da olaria com menor média Δ_T até a olaria com maior Δ_T .

Os resultados indicam a maior distribuição de áreas com maior Δ_T para as olarias 4 e 5, pois concentram maior quantidade de valores nas faixas 4 e 5. Já a olaria 3 apresenta a menor quantidade de áreas com maior faixa de representação (faixas 4 e 5) e concentra maior quantidade de valores Δ_T nas faixas de representação 2 e 3. Além disso, como mostrado no

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%
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%
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%
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%

Figura 31: Índice de área de vales (Δ_T) de todas as amostras, com escala do menor (em branco) até o maior (em azul mais escuro) (Δ_T).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Faixa	Menor percentual	Maior percentual
Faixa 1	11,81	17,63
Faixa 2	17,63	23,46
Faixa 3	23,46	29,28
Faixa 4	29,28	35,10
Faixa 5	35,10	40,92

Tabela 15: Faixas para agrupamento de valores de Δ_T .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Olaria	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5	Média Δ_T
Olaria 3	5	53	40	2	0	22,87%
Olaria 1	3	6	60	31	0	27,60%
Olaria 2	0	6	24	69	1	30,01%
Olaria 4	0	0	3	73	24	33,43%
Olaria 5	0	2	3	54	41	34,00%

Tabela 16: Quantidade de valores de Δ_T por olaria e por faixa de representação. Linhas estão ordenadas pela média de Δ_T da olaria.

Fonte: Elaborado pelo autor.

comparação da Tabela 14, 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 . Com objetivo de ilustrar melhor este comportamento a Figura 32 apresenta a distribuição das áreas por faixa de representação e por olaria. No gráfico, por clareza visual, as olarias estão na ordem da olaria com maior pra a menor média de Δ_T .

A Figura 33 apresenta uma visão geral de todos os valores Δ_T por bloco de cada olaria em um gráfico de dispersão. Como pode ser observado no gráfico, para a olaria 3 os pontos (em verde) na sua grande maioria ficam abaixo da média (linha preta), indicando pela análise de Δ_T que essa olaria tende a ter menor aderência por contato do que as demais. O contrário se verifica com as olarias 4 e 5, cujos dados ficam na grande maioria acima da média.

De acordo com o que foi apresentado nas Figuras 31, 32 e 33 e nas Tabelas 14, 16, 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 vale. Nessa análise e de acordo com a **hipótese 3**, de que quanto maior o índice de área de vales (Δ_T), maior a aderência, é possível afirmar que os blocos produzidos pelas olarias 4 e 5 possuem maior Δ_T e, portanto, uma tendência de maior aderência por contato com matriz cimentícia. Conseqüentemente, como a olaria 3 possui menor frequência de valores Δ_T nas faixas de maior representação, conclui-se, pelo mesmo critério, que os blocos produzidos por ela tendem a não favorecer tanto a aderência através da área de contato, quanto os blocos produzidos pelas demais olarias do experimento.

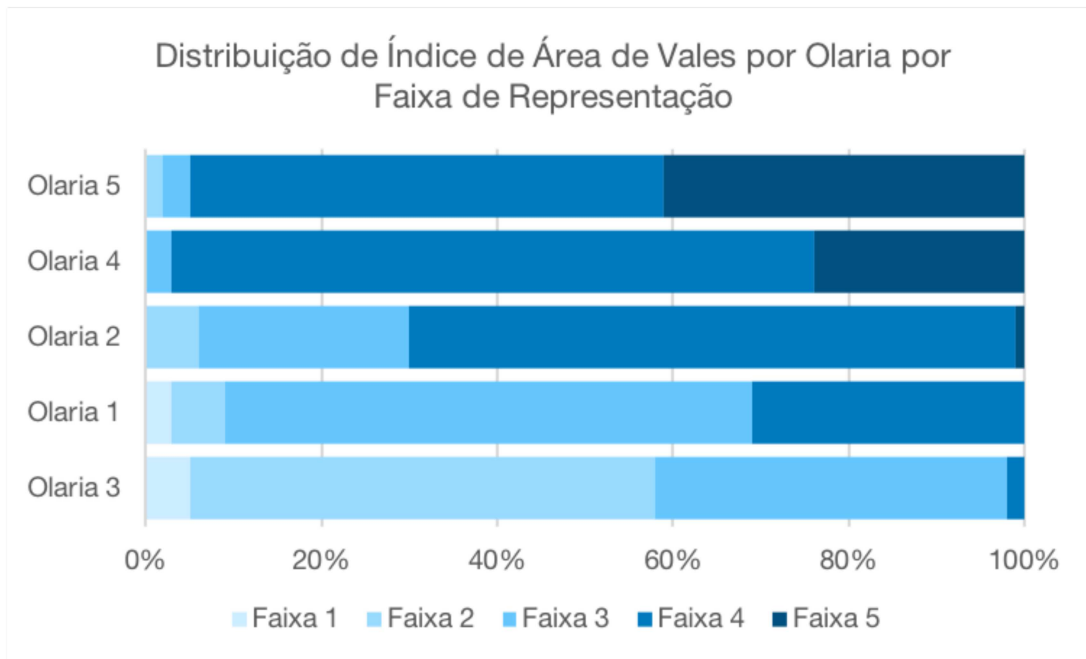


Figura 32: Distribuição de Δ_T por olaria e por faixa de representação. As linhas do gráfico estão ordenadas pela média de Δ_T , do maior para o menor valor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

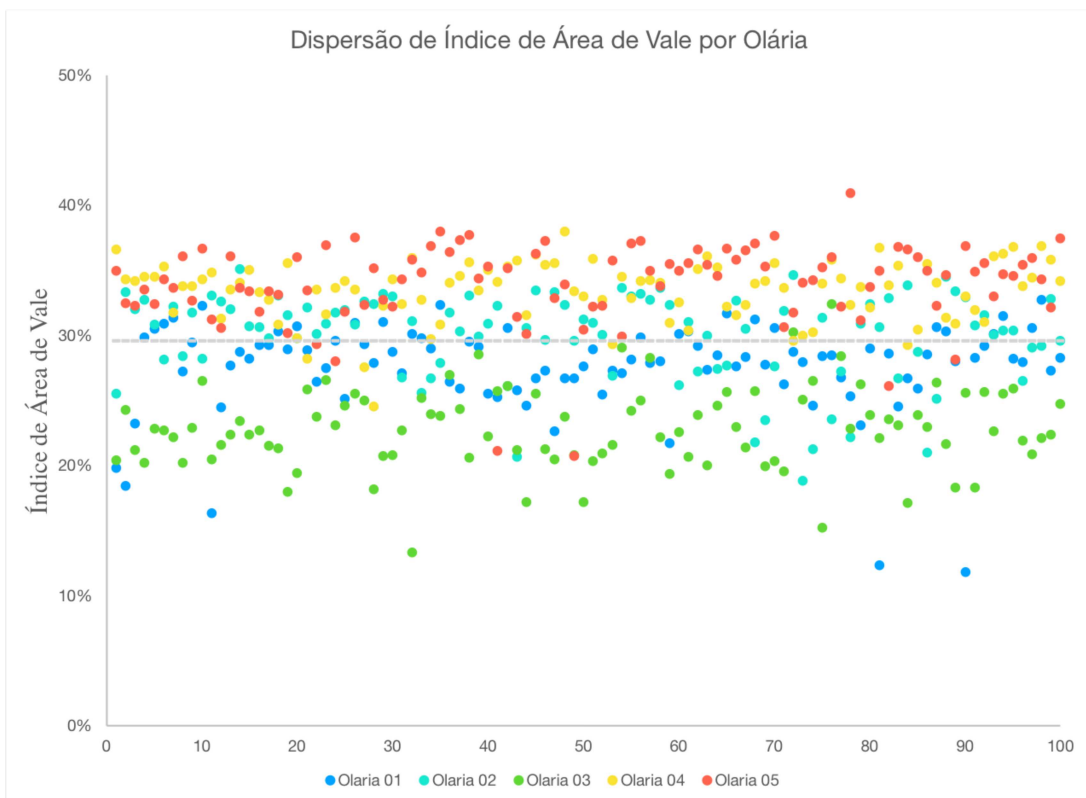


Figura 33: Dispersão de Δ_T por olaria. Em cinza a linha de média de Δ_T das olarias.

Fonte: Elaborado pelo autor.

	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

Tabela 17: Média e desvio-padrão da rugosidade média ($R_{a,avg}$) das amostras. Todos os valores em μm .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Faixa	Menor R_a (μm)	Maior R_a (μm)
Faixa 1	0,5668	1,5644
Faixa 2	1,5644	2,5619
Faixa 3	2,5619	3,5595
Faixa 4	3,5595	4,5570
Faixa 5	4,5570	5,5546

Tabela 18: Faixas para agrupamento de valores de $R_{a,avg}$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3.4 Comparativo entre Rugosidade Média e Índices de Área de Vales

Nesta etapa de testes são computados os dados de rugosidade média $R_{a,avg}$ para todos os blocos de todas as olarias. Os valores médios de R_a são analisados estatisticamente e comparados com os valores de índice de área de vales. Além da análise estatística, é pretendido analisar a relação entre os dois parâmetros para os dados amostrados e indicar qual grupo de blocos possui maior aderência, seguindo os critérios apresentados na **hipótese 3**.

Os dados são apresentados na Figura 31 e os dados de $R_{a,avg}$ são apresentados na Figura 34. Em ambas as figuras as células com cores mais escuras indicam valor maior e células mais claras têm valor menor de cada parâmetro.

Assim como foi feito na análise de áreas, também são comparados os dados de $R_{a,avg}$ entre olarias. A Tabela 17 apresenta os dados de média e desvio-padrão de $R_{a,avg}$ sobre os dados apresentados na Figura 34.

Também como foi feito na análise de áreas, é realizada a avaliação do parâmetro $R_{a,avg}$ em relação às amostras das olarias e à separação em faixas de valores, tal como um histograma. O objetivo é visualizar distribuição dos valores por ordem de relevância (maior valor, mais relevante). Para tanto, são determinados os valores de $R_{a,avg}$ mínimo ($R_{a,min}$) e máximo ($R_{a,max}$) de todas as amostras (valores da Figura 34). Os valores de mínimo ($R_{a,min}$) e de máximo ($R_{a,max}$) definem o intervalo do histograma de $R_{a,avg}$ e, dentro desse intervalo, são definidas cinco faixas uniformemente distribuídas (apresentadas na Tabela 18).

A partir dos valores $R_{a,avg}$ (apresentados na Figura 34) é feita a composição do histograma, contabilizando o valor $R_{a,avg}$ de cada amostra na respectiva faixa de representação. A Tabela 19 apresenta a quantidade de $R_{a,avg}$ por faixa de representação. As linhas estão na ordem da

Olaria	Olaria 01	Olaria 02	Olaria 03	Olaria 04	Olaria 05
B1A01	3,5750	2,4295	0,7890	2,2099	2,1863
B1A02	3,6041	1,8725	1,5071	2,1331	3,2305
B1A03	4,8458	1,5578	0,7112	2,5859	2,4048
B1A04	1,6442	1,6890	0,6507	1,9389	2,3700
B1A05	1,6700	1,6012	0,7043	2,1037	2,1164
B1A06	1,5071	3,2784	0,6848	1,9191	2,6054
B1A07	1,5021	1,6352	0,6552	2,1042	2,3003
B1A08	1,5847	2,4917	1,4621	1,8652	2,2063
B1A09	1,3855	1,7279	1,3004	2,5545	2,3884
B1A10	1,6187	3,4044	0,6046	2,2394	2,6937
B2A01	4,0309	2,2906	2,4897	2,2534	2,3303
B2A02	2,2759	1,9217	0,7732	2,4866	2,5229
B2A03	1,8318	2,1508	1,6882	1,9949	1,9235
B2A04	1,5298	1,8036	1,3456	2,0092	1,7762
B2A05	1,6959	1,7893	2,0247	1,9375	1,6929
B2A06	1,5907	1,7022	0,9334	1,9117	2,0062
B2A07	1,6419	2,2552	0,6160	2,2342	1,8440
B2A08	1,6929	2,1179	0,6203	4,6873	2,0785
B2A09	1,7466	1,7556	1,1186	2,0789	2,5116
B2A10	1,7309	2,6531	2,1212	2,4467	1,9143
B3A01	2,3971	1,9082	3,5811	2,8508	2,4247
B3A02	1,9067	2,8927	0,5668	2,5768	2,7409
B3A03	2,3206	2,0417	0,7471	2,7590	1,7140
B3A04	1,8313	1,6679	0,8690	1,8768	2,7289
B3A05	1,9530	1,5718	0,8829	1,9375	2,4419
B3A06	2,0126	1,6275	0,7005	2,0961	1,7978
B3A07	1,9676	1,6616	2,2430	3,1689	2,2918
B3A08	2,2542	2,6699	3,5840	3,6033	2,4987
B3A09	2,0643	1,8053	1,3727	1,9604	2,4305
B3A10	2,0785	1,8950	1,6392	1,9599	2,5645
B4A01	2,2467	3,6127	4,1437	2,6133	1,9382
B4A02	2,0186	2,5080	3,3418	2,4007	2,3522
B4A03	2,0497	3,9487	0,6665	2,6075	1,7160
B4A04	2,0259	2,8233	0,6268	2,3360	1,8255
B4A05	1,9931	2,8542	3,4702	2,7533	1,7291
B4A06	2,4843	1,8361	2,0513	2,1081	1,9746
B4A07	2,5077	1,9596	0,7150	2,2913	2,0927
B4A08	1,9178	2,0058	0,7505	2,3000	1,8822
B4A09	1,9759	2,0907	1,6611	2,3418	1,7524
B4A10	2,1861	1,7584	0,8126	2,8790	1,9607
B5A01	2,1254	2,0710	2,6151	2,3410	4,1241
B5A02	1,5918	3,9991	1,1053	2,5674	2,0672
B5A03	2,1358	4,1132	2,2631	2,0224	2,5515
B5A04	2,7346	2,7067	0,6063	1,8711	2,7729
B5A05	1,7257	1,8098	0,9246	1,9493	1,9135
B5A06	2,1689	2,9691	3,1014	2,0576	2,3021
B5A07	3,1343	1,8459	1,0766	1,9588	2,1345
B5A08	2,8014	2,3711	0,6387	2,0714	2,0846
B5A09	1,4410	3,2670	0,7439	2,3982	4,2585
B5A10	1,9035	2,0966	3,4759	2,3645	3,4468
B6A01	1,9520	2,4879	0,6425	2,1575	2,8640
B6A02	2,0695	1,7862	0,6597	2,3703	3,7456
B6A03	1,7742	3,1816	0,6840	3,3108	2,9813
B6A04	1,6745	1,8327	0,6639	2,0060	3,3202
B6A05	1,6557	1,7795	0,7112	2,0742	2,6262
B6A06	1,7147	1,8253	0,8384	2,1546	3,0122
B6A07	1,6972	1,7821	0,7111	1,8762	2,8888
B6A08	1,6631	1,7786	0,7871	2,0904	3,9790
B6A09	2,9036	1,7195	1,5856	2,5687	2,8792
B6A10	1,9151	3,6158	0,6572	2,4398	3,3810
B7A01	1,6984	1,6454	1,8616	2,9347	1,9973
B7A02	1,6863	2,5237	0,8865	2,0224	2,1154
B7A03	1,7047	1,6550	2,7990	2,0762	1,9031
B7A04	1,7041	3,6074	0,6367	2,0061	1,8865
B7A05	1,8504	2,3817	0,7213	2,5723	1,9007
B7A06	1,7624	1,7036	0,6971	2,4142	2,1786
B7A07	2,6876	1,6218	0,7000	2,7605	2,1441
B7A08	2,4143	3,0787	0,6690	2,6067	2,6256
B7A09	2,6814	4,0312	0,6990	2,0425	1,9902
B7A10	2,2536	3,3762	0,6868	2,2343	2,2881
B8A01	2,2892	2,0074	2,0615	2,2041	2,6028
B8A02	2,9304	1,7576	0,7134	2,7091	2,4109
B8A03	2,6602	4,5855	0,7829	2,3503	2,3202
B8A04	3,5103	3,8598	1,7509	2,1772	2,1088
B8A05	2,6089	1,9153	2,7599	1,8813	1,9029
B8A06	1,7340	3,2574	1,1081	1,7878	2,4213
B8A07	2,0742	2,2703	1,5448	1,7799	2,6761
B8A08	1,8125	4,4172	1,6961	2,2570	2,2370
B8A09	2,7446	1,5628	0,9758	2,1234	2,6671
B8A10	1,9156	1,7585	1,5156	2,3191	2,2245
B9A01	4,3251	1,8643	1,1671	2,3138	1,9061
B9A02	1,9877	2,1328	1,4496	2,0804	3,1665
B9A03	3,3545	3,4007	0,8761	2,0955	1,8669
B9A04	1,8640	1,6270	3,0754	2,6250	2,6897
B9A05	2,1790	3,2278	1,5031	2,7903	1,8111
B9A06	1,7992	5,5546	2,6143	2,3742	1,8615
B9A07	2,6245	2,6521	1,8850	2,1758	2,6583
B9A08	1,8163	2,1081	2,1551	2,3162	2,6840
B9A09	1,7238	1,6905	3,0028	2,6882	2,9834
B9A10	4,3578	2,9327	2,3183	2,1497	2,3224
B10A01	1,4614	2,2938	3,2125	2,1921	1,9370
B10A02	1,5805	1,5866	1,0517	2,2486	2,2582
B10A03	1,8552	1,7699	0,6724	2,2102	2,0777
B10A04	1,6378	1,4916	0,6371	1,9658	1,7631
B10A05	1,6400	1,4570	0,7557	1,8866	1,7680
B10A06	1,8128	1,5718	0,8689	1,8843	1,9291
B10A07	1,9234	1,6492	2,2454	1,7816	2,5632
B10A08	2,1504	1,5409	0,7943	1,7473	4,5045
B10A09	1,5697	1,6890	0,9078	2,0105	2,2522
B10A10	2,3305	1,5748	0,6833	2,1341	2,0218

Figura 34: Rugosidade média (R_a) de todas as amostras, com escala do menor (em branco) até o maior (em verde mais escuro) (R_a).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Olaria	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5	Média ($R_{a,avg}$)
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

Tabela 19: Faixas para agrupamento de valores de $R_{a,avg}$. Linhas estão ordenadas pela média ($R_{a,avg}$).

Fonte: Elaborado pelo autor.

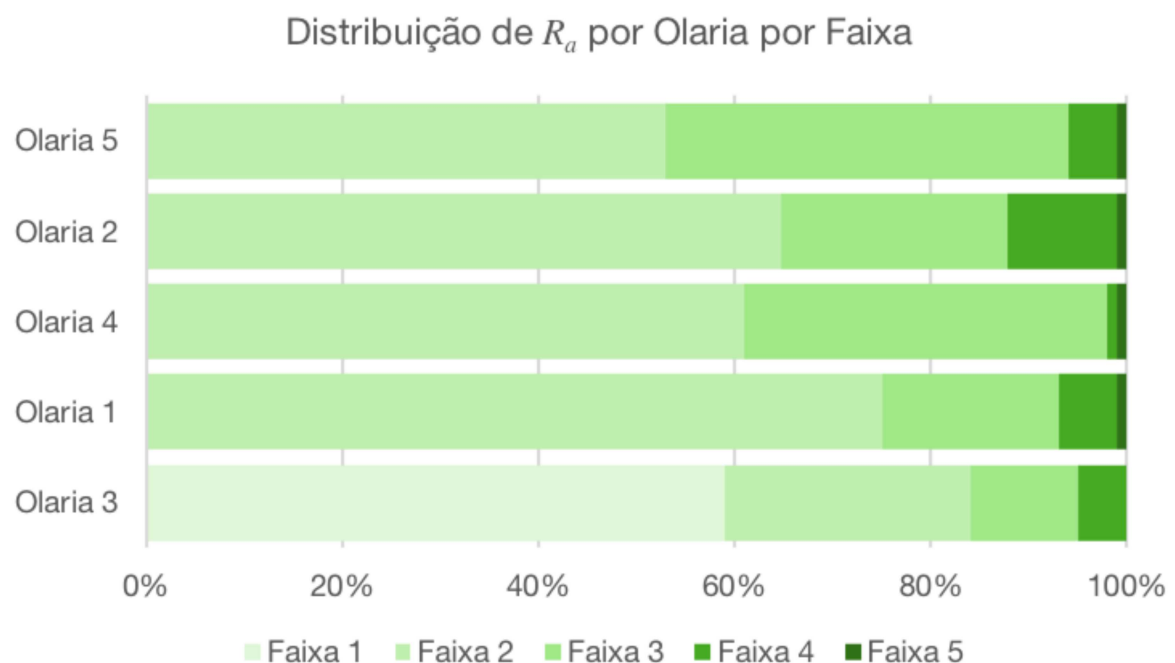


Figura 35: Distribuição de $R_{a,avg}$ por faixa de representação e por olaria.

Fonte: Elaborado pelo autor.

olaria com menor média $R_{a,avg}$ até a olaria com maior $R_{a,avg}$.

Os resultados indicam a maior distribuição de áreas com maior $R_{a,avg}$ para as olarias 2 e 5. As olarias 1 e 4 também possuem quantidades parecidas. Já a olaria 3 apresenta a menor quantidade de áreas com maior faixa de representação. Com objetivo de ilustrar melhor este comportamento a Figura 35 apresenta a distribuição dos valores de $R_{a,avg}$ por faixa de representação e por olaria. No gráfico, por clareza visual, as olarias estão na ordem de maior concentração de valores na faixa de maior representação.

A Figura 36 apresenta uma visão geral de todos os valores $R_{a,avg}$ por bloco de cada olaria em gráfico de dispersão. Como pode ser observado no gráfico, a olaria 3 (pontos em verde) na sua grande maioria ficam abaixo da média, indicando pela análise de $R_{a,avg}$ que esta olaria possui blocos com menor favorecimento de aderência por contato em relação aos demais blocos

amostrados de outras olarias.

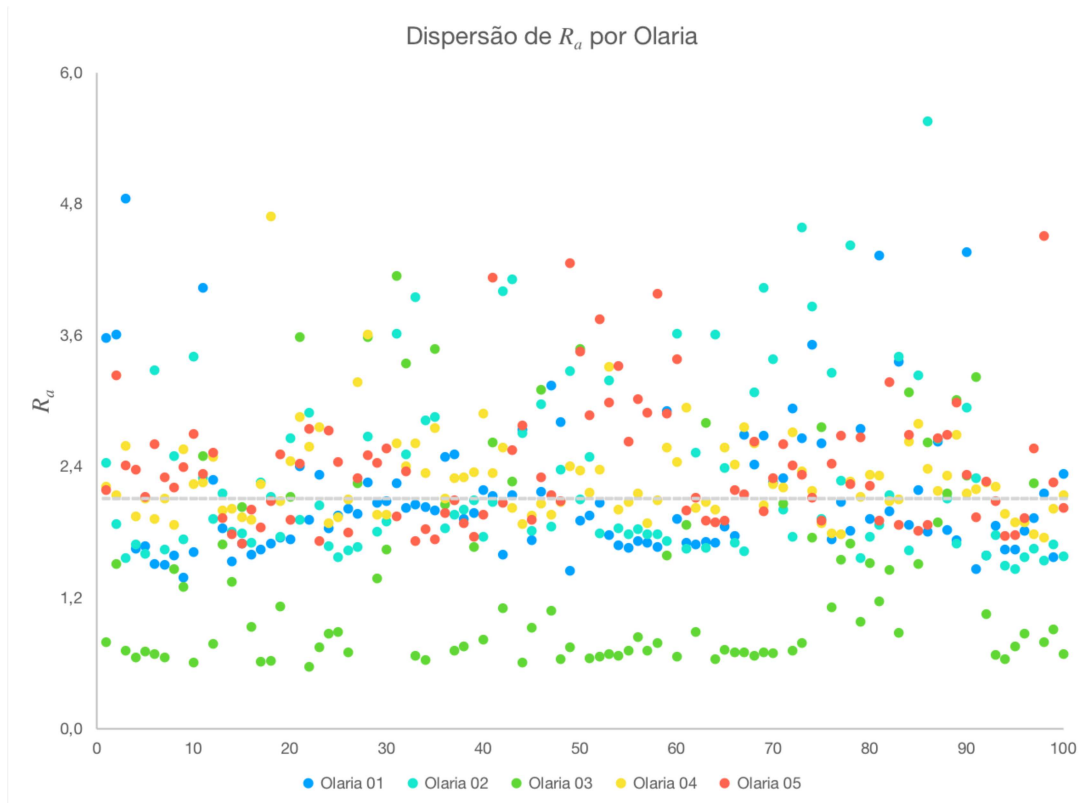


Figura 36: Distribuição de rugosidade média por olaria. Em cinza a linha de média $R_{a,avg}$ de todas as olarias.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o que foi apresentado nas Figuras 34, 35 e 36 e nas Tabelas 17, 19, 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 3**, de que quanto maior a rugosidade média, tende a maior a aderência, é possível afirmar que as olarias 2 e 5 possuem maior $R_{a,avg}$ e favorecem a aderência. Consequentemente, como a olaria 3 possui menor frequência de valores $R_{a,avg}$ nas faixas de maior representação, estima-se, pela mesma hipótese, que os blocos produzidos por ela não favoreçam tanto aderência quanto os blocos das outras olarias.

4.2.4 Relação entre Parâmetros Rugosidade Média e Índice de Área de Vales

Com objetivo de estudar a relação entre os parâmetros Δ_T com $R_{a,avg}$ foi definido um gráfico de quadrantes. Essa análise compara a relação dos valores dos parâmetros entre as olarias estudadas. Para composição do gráfico, o eixo x representa os valores de $R_{a,avg}$ de cada bloco e o eixo y representa os valores de Δ_T de cada bloco. Os valores de $R_{a,avg}$ são normalizados pelo maior valor de $R_{a,avg}$ dentre todas as amostras e os valores de Δ_T são

normalizados pelo maior valor de Δ_T de todas as amostras, pois as escalas de valores dos parâmetros são diferentes.

Na Figura 37 são apresentados dados de todas as olarias em conjunto e separadamente em um gráfico de dispersão, destacando uma olaria versus as outras. Percebe-se que as olarias 4 e 5 possuem padrão similar de distribuição dos dados e que as olarias 1 e 2 também são similares. Já a olaria 3 possui um padrão de distribuição diferente das demais. Analisando o gráfico e considerando que as duas variáveis ($R_{a\text{avg}}$ e Δ_T) que estão nesta análise, estima-se que os blocos das olarias 5 e 4 possuem parâmetros que favorecem a aderência, em detrimento dos blocos das outras olarias estudadas. Também estima-se que as olarias 2 e 1, têm valores combinados que são superiores aos da olaria 3. Dessa forma e, considerando as análises individuais dos parâmetros apresentadas nas Figuras 31, 32, 34, 35 e 37 e nas Tabelas 14, 16, 17 e 19, é possível estabelecer uma ordem para olarias em relação aos resultados obtidos no trabalho, da que apresenta resultados com maiores valores para a que apresenta os menores valores:

$$\text{Olaria5} > \text{Olaria4} > \text{Olaria2} > \text{Olaria1} > \text{Olaria3}$$

4.3 Plano Único versus Múltiplos Planos

A vantagem de utilizar múltiplos planos (método descrito em 3.4) é poder gerar uma malha que se ajusta melhor à topografia da superfície original da nuvem de pontos. Isto acontece porque os planos locais têm uma orientação diferente dos seus vizinhos. Quanto maior a ondulação da superfície, maior será o ganho de aproximação em relação à superfície original da nuvem.

Em alguns casos, onde a superfície original é plana, este ganho não é tão evidente. Outro caso onde o método que calcula um único plano (3.2) pode ser mais adequado é quando se tem o objetivo de estudar rugosidade em nível de ondulação. Nestes casos, uma superfície média vai produzir valores de rugosidade maiores. A distância do ponto em relação ao plano é maior porque a variação local da geometria dos pontos não é tão aproximada quanto é no método que calcula múltiplos planos.

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos sobre as mesmas amostras apresentadas na Tabela 6.

Os valores de referência calculados para o grupo de amostras das Tabelas 6 e 20 são: $R_{a\text{min}} = 1,761$, $R_{a\text{max}} = 8,098$, $R_{a\text{avg}} = 2,809$ e $R_{s\text{dv}} = 1,048$.

A Tabela 21 apresenta um resumo dos dados das Tabelas 6 e 20.

Nota-se tanto comparando visualmente nas Tabelas 6 e 20, quanto numericamente na Tabela 21 que os valores de R_a calculados pelo método 3.2 são maiores do que os valores de R_a calculados pelo método 3.4. Este resultado já era o esperado, pois os planos de segundo método se ajustam melhor à geometria local dos pontos do que o plano de ajustes do primeiro método. Também percebe-se um desvio-padrão médio menor nos resultados do segundo método, um erro ou diferença de distância menor do que os resultados do método 1.

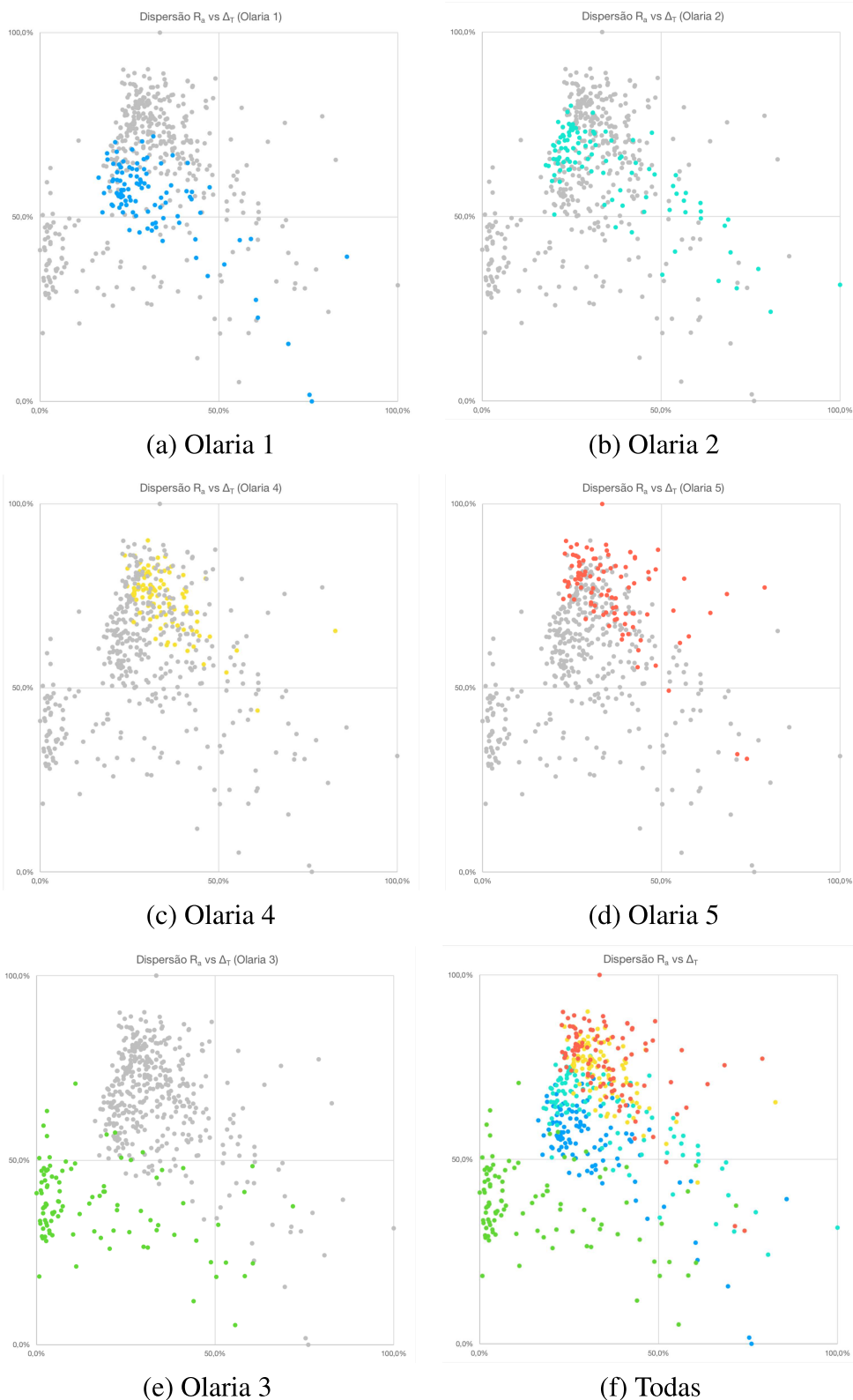


Figura 37: Distribuição dos valores por R_a e por Δ_T . Em (a), (b), (c), (d) e (e) valores de uma olaria em destaque, respectivamente, 1, 2, 4, 5 e 3. Em (f) a junção dos dados de todas as olarias. Em todos os gráficos, o eixo X representa valores normalizados (percentual) para R_a e o eixo Y representa valores normalizados para Δ_T .

Fonte: Elaborado pelo autor.

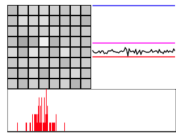
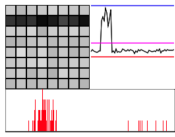
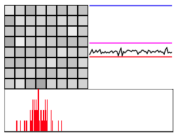
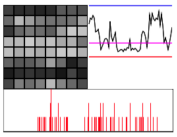
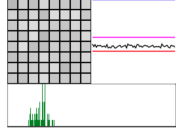
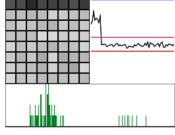
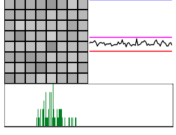
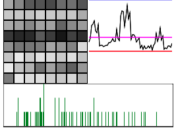
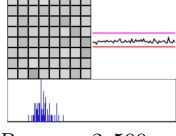
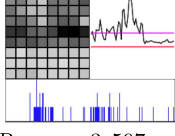
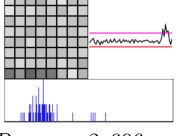
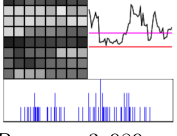
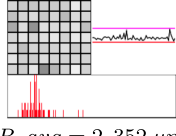
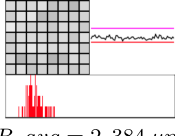
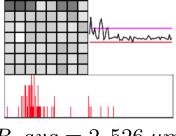
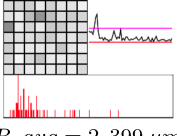
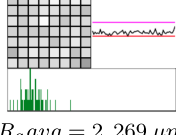
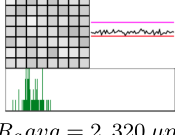
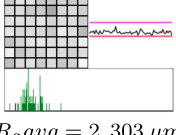
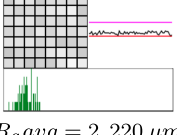
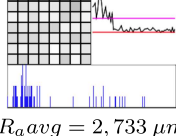
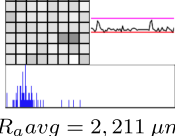
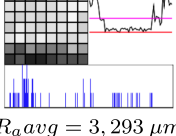
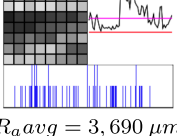
Bloco	Superfície A	Superfície B	Superfície C	Superfície D
1º Bloco de 800 °C	 $R_a avg = 2,468 \mu m$ $R_a min = 1,966 \mu m$ $R_a max = 2,937 \mu m$ $R_a sdv = 0,171 \mu m$	 $R_a avg = 3,078 \mu m$ $R_a min = 2,235 \mu m$ $R_a max = 7,712 \mu m$ $R_a sdv = 1,413 \mu m$	 $R_a avg = 2,444 \mu m$ $R_a min = 2,001 \mu m$ $R_a max = 2,939 \mu m$ $R_a sdv = 0,167 \mu m$	 $R_a avg = 4,216 \mu m$ $R_a min = 2,464 \mu m$ $R_a max = 7,293 \mu m$ $R_a sdv = 1,472 \mu m$
2º Bloco de 800 °C	 $R_a avg = 2,428 \mu m$ $R_a min = 2,197 \mu m$ $R_a max = 2,692 \mu m$ $R_a sdv = 0,126 \mu m$	 $R_a avg = 2,986 \mu m$ $R_a min = 2,257 \mu m$ $R_a max = 6,584 \mu m$ $R_a sdv = 1,072 \mu m$	 $R_a avg = 2,750 \mu m$ $R_a min = 2,425 \mu m$ $R_a max = 3,237 \mu m$ $R_a sdv = 0,197 \mu m$	 $R_a avg = 3,513 \mu m$ $R_a min = 2,058 \mu m$ $R_a max = 7,282 \mu m$ $R_a sdv = 1,334 \mu m$
3º Bloco de 800 °C	 $R_a avg = 2,500 \mu m$ $R_a min = 2,195 \mu m$ $R_a max = 2,911 \mu m$ $R_a sdv = 0,145 \mu m$	 $R_a avg = 3,597 \mu m$ $R_a min = 2,263 \mu m$ $R_a max = 8,098 \mu m$ $R_a sdv = 1,378 \mu m$	 $R_a avg = 2,606 \mu m$ $R_a min = 2,142 \mu m$ $R_a max = 4,431 \mu m$ $R_a sdv = 0,375 \mu m$	 $R_a avg = 3,989 \mu m$ $R_a min = 2,107 \mu m$ $R_a max = 6,683 \mu m$ $R_a sdv = 1,334 \mu m$
1º Bloco de 1000 °C	 $R_a avg = 2,352 \mu m$ $R_a min = 1,978 \mu m$ $R_a max = 3,314 \mu m$ $R_a sdv = 0,236 \mu m$	 $R_a avg = 2,384 \mu m$ $R_a min = 2,101 \mu m$ $R_a max = 2,758 \mu m$ $R_a sdv = 0,164 \mu m$	 $R_a avg = 2,526 \mu m$ $R_a min = 1,821 \mu m$ $R_a max = 4,888 \mu m$ $R_a sdv = 0,565 \mu m$	 $R_a avg = 2,399 \mu m$ $R_a min = 1,894 \mu m$ $R_a max = 5,162 \mu m$ $R_a sdv = 0,604 \mu m$
2º Bloco de 1000 °C	 $R_a avg = 2,269 \mu m$ $R_a min = 1,815 \mu m$ $R_a max = 3,058 \mu m$ $R_a sdv = 0,206 \mu m$	 $R_a avg = 2,320 \mu m$ $R_a min = 1,913 \mu m$ $R_a max = 2,682 \mu m$ $R_a sdv = 0,162 \mu m$	 $R_a avg = 2,303 \mu m$ $R_a min = 1,875 \mu m$ $R_a max = 2,925 \mu m$ $R_a sdv = 0,176 \mu m$	 $R_a avg = 2,220 \mu m$ $R_a min = 1,871 \mu m$ $R_a max = 2,488 \mu m$ $R_a sdv = 0,145 \mu m$
3º Bloco de 1000 °C	 $R_a avg = 2,733 \mu m$ $R_a min = 1,761 \mu m$ $R_a max = 6,418 \mu m$ $R_a sdv = 1,180 \mu m$	 $R_a avg = 2,211 \mu m$ $R_a min = 1,784 \mu m$ $R_a max = 3,291 \mu m$ $R_a sdv = 0,287 \mu m$	 $R_a avg = 3,293 \mu m$ $R_a min = 1,875 \mu m$ $R_a max = 7,018 \mu m$ $R_a sdv = 1,579 \mu m$	 $R_a avg = 3,690 \mu m$ $R_a min = 1,987 \mu m$ $R_a max = 6,479 \mu m$ $R_a sdv = 1,352 \mu m$

Tabela 20: Tabela de resultados para o teste de comparação de grupos de temperatura utilizando o método de computação de rugosidade por múltiplos planos. Nos gráficos de linha dos resultados, as linhas coloridas representam os valores de referência. A linha rosa é a média geral ($R_a avg = 2,809$), a linha vermelha é o valor mínimo geral ($R_a min = 1,761$) e a linha azul é o máximo geral ($R_a max = 8,098$)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Bloco	Método 1		Método 2		M1 vs M2
	$R_{avg}(\mu m)$	$R_{sdv}(\mu m)$	$R_{avg}(\mu m)$	$R_{sdv}(\mu m)$	
1º Bloco de 800 °C	2,922	0,419	2,468	0,171	↓
	3,705	1,020	3,078	1,413	↓
	2,831	0,296	2,444	0,167	↓
	4,841	1,212	4,216	1,472	↓
2º Bloco de 800 °C	2,640	0,180	2,428	0,126	↓
	3,266	0,767	2,986	1,072	↓
	3,436	0,457	2,750	0,197	↓
	4,050	1,238	3,513	1,334	↓
3º Bloco de 800 °C	2,733	0,216	2,500	0,145	↓
	3,790	1,045	3,597	1,378	↓
	2,973	0,391	2,606	0,375	↓
	4,296	1,138	3,989	1,334	↓
1º Bloco de 1000 °C	3,003	0,504	2,352	0,236	↓
	3,298	0,711	2,384	0,164	↓
	3,391	0,724	2,526	0,565	↓
	3,355	0,854	2,399	0,604	↓
2º Bloco de 1000 °C	3,277	0,901	2,269	0,206	↓
	2,901	0,448	2,320	0,162	↓
	3,532	0,993	2,303	0,176	↓
	3,333	0,761	2,220	0,145	↓
3º Bloco de 1000 °C	3,046	0,844	2,733	1,180	↓
	4,085	1,542	2,211	0,287	↓
	3,837	1,465	3,293	1,579	↓
	4,968	1,423	3,690	1,352	↓
Média	3,480	0,815	2,803	0,660	↓

Tabela 21: Comparação de médias e desvios-padrão de rugosidade pelos métodos de plano único (método 1) e múltiplos planos (método 2). Na coluna “M1 vs M2” mostra que todos os valores de R_a são menores pelo método 2 do que pelo método 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Comparações entre métodos 2D e 3D

Como é também objetivo deste trabalho demonstrar que há vantagem no uso dos métodos propostos para análise de rugosidade em 3D em detrimento ao uso do método convencional em 2D, foram realizados testes comparativos sobre os dois métodos a partir de dados adquiridos de um mesmo conjunto de amostras. Para os dados em 2D foi executado o procedimento em conformidade com a Norma ISO 4287 (ISO 4287, 2009). Já para os dados 3D foram adquiridos com base no método descrito nos subcapítulos 3.1.1 e 3.1.2. O objetivo do teste é verificar que há diferença significativa nos resultados de rugosidade para os métodos 3D e 2D e que os valores obtidos no método 3D são significativamente maiores do que os valores obtidos no uso do método 2D.

Conforme já evidenciado no subcapítulo 2.4 o procedimento de aquisição de dados e cálculo de rugosidade, por padrão, é feito sobre uma linha de dados. Conforme apresentado na Tabela 3, uma linha de dados não é suficiente para representar a rugosidade de uma superfície, visto que a posição e orientação das linhas interfere no resultado final. No método 3D, não há este problema de posicionamento e direção, pois os dados são utilizados sem uma direção específica e abrangem toda área de superfície da amostra. Dessa forma, para analisar os resultados nos dois métodos numa mesma base de comparação, foi realizado um ajuste dos dados 2D.

Utilizando a mesma fonte de dados dos resultados de rugosidade apresentados na Tabela 2, com 2 duas linhas horizontais e 2 verticais para cada amostra, foi computado um plano de ajuste. Além disso, os dados 2D foram modificados para posicioná-los na superfície. Isto porque o rugosímetro 2D devolve os dados como uma lista de pontos em duas dimensões; a primeira dimensão é o passo de leitura e a segunda a altura em relação ao ponto de ajuste inicial. Para posicionar as linhas horizontais, foi utilizada a variável do passo de leitura X e a variável de altura Z . Para a variável y , a fim de evitar sobreposição das linhas e posicioná-las próximo ao local de origem na aquisição (próximo ao centro da amostra), foi adicionado para a primeira linha o valor 0.4 e para a segunda linha o valor 0.6. De forma similar foram ajustados os dados das linhas verticais, porém com a variável de passo de leitura associada à Y e os valores de posicionamento na variável X , sendo definido para a primeira linha o valor 0.4 e para a segunda linha o valor 0.6.

A partir dos dados preparados de 2D para 3D, foi criado um plano de ajuste conforme o método definido em 3.2. A divisão hierárquica de regiões também foi definida como no primeiro método 3.2. Para cada nodo de cada nível da árvore foi calculado o R_a . E para cada nível foram calculados $R_{a,avg}$ (R_a médio) e $R_{a,sdv}$ desvio-padrão, conforme padrão do método.

A Figura 38 apresenta o resultado da assinatura de rugosidade criada para os dados em 2D. É relevante destacar que cada linha retangular, vertical ou horizontal, representa uma linha amostrada em 2D, com 2000 pontos e que cada nodo contém 250 pontos, com exceção dos nodos que coincidem com as duas direções, que possuem 500 pontos.

A partir da média de coeficiente de rugosidade ($R_{a,avg}$) dos dados 3D e 2D, foi possível

-	-	-	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)

Figura 38: Assinatura de rugosidade para uma amostra 2D, com a média e o desvio-padrão por linha e por coluna. Todos os valores em μm .

Fonte: Elaborado pelo autor.

comparar os resultados das amostragens. É esperado que os valores de R_a sejam maiores no método 3D do que no método 2D. Para determinar se há diferença significativa no uso dos métodos e que os valores de R_a no geral são significativamente maiores no método 3D do que no método 2D, foi utilizado o teste de hipóteses, mas especificamente, o teste Z, ao nível de significância de 5%. A Tabela 22 apresenta dos dados utilizados na comparação.

O teste Z para verificação de similaridade, resultou em $Z = 4,5501$ e $Z_{crítico} = 1,96$, o que indica que existe diferença significativa entre os dois métodos de determinação da rugosidade de blocos cerâmicos. Além disso, observou-se que os valores de R_a calculados pelo método 3D, tanto na média de amostra, quanto individualmente por nodo, em geral são maiores que os valores computados pelo método 2D. Nos resultados obtidos no teste, o R_a médio encontrado na amostra 2D (1,6697) é correspondente a $\approx 73,6\%$ do R_a médio encontrado pelo método 3D (2,2701). Isto pode ser explicado pela diferença de leitura de dados, tendo em vista o que é descrito no subcapítulo 2.4 e ilustrado na Figura 4; enquanto o equipamento utilizado no método 3D utiliza feixe laser, o equipamento utilizado no método 2D (rugosímetro) utiliza agulha mecânica, com limitação de alcance para os maiores vales. Outra observação é de que o desvio-padrão, é menor quando o método 2D é utilizado. Estima-se que isto ocorre porque com o método 2D captura de apenas um perfil da superfície e diversos vales foram atenuados em

Superfície	3D		2D	
	Média	desvio-padrão	Média	desvio-padrão
71-03	1,4146	0,3097	1,0985	0,4406
71-04	1,5578	0,3762	1,3732	0,7150
71-08	1,4134	0,2774	1,2196	0,4082
71-11	2,4688	3,4498	1,1864	0,4145
72-05	1,4980	0,4042	1,5196	0,6215
72-06	2,0226	1,0559	1,1962	0,4985
72-08	2,9995	3,0025	1,3237	0,5304
72-14	1,3550	0,2889	1,2079	0,4006
73-03	1,6456	0,3082	1,4056	0,6408
73-06	2,9496	2,7432	1,1206	0,4390
73-13	3,4371	2,8085	1,3825	0,5925
73-15	1,5793	0,3046	1,1433	0,6497
81-06	1,6341	0,3637	1,4159	0,5269
81-08	2,6501	2,3393	1,1831	0,4017
81-12	1,6252	0,4608	1,3282	0,5818
81-15	1,5279	0,3215	1,1555	0,3855
82-05	1,7534	0,4022	1,7402	0,8089
82-08	3,9270	1,4186	1,1943	0,4649
82-11	2,4406	1,4780	1,8456	1,8393
82-13	4,3361	3,8089	1,3783	0,5732
83-05	1,9349	0,8957	1,2251	0,5610
83-06	1,9442	0,6437	1,3304	0,5632
83-11	2,0400	1,1887	2,2207	1,5252
83-13	4,1887	2,7815	1,4706	0,6140
91-04	1,9032	0,5333	1,3244	0,5022
91-08	1,6381	0,3780	1,0718	0,4218
91-13	1,5807	0,2499	1,3139	0,5632
91-14	1,5711	0,2834	1,4881	0,4848
92-08	2,0163	0,4389	1,6662	0,7983
92-09	2,1057	0,5840	1,8648	0,7827
92-14	2,0366	0,4195	2,0247	0,9210
92-17	1,9478	0,4758	1,8738	0,6097
93-05	1,6361	0,3557	1,2874	0,4716
93-08	1,5558	0,2791	1,4292	0,6242
93-11	1,6661	0,2911	1,6039	0,8315
93-13	1,7115	0,3730	1,6227	0,7184
101-06	2,5956	0,5201	2,2859	0,8053
101-07	2,5059	0,4525	2,3720	0,9811
101-09	2,5258	0,5005	2,4646	1,0995
101-14	2,8449	2,2447	2,2834	0,8100
102-01	2,5806	1,3682	2,0842	0,6804
102-06	3,6642	1,3143	2,8958	1,1875
102-09	2,9381	1,1550	2,5435	1,2076
102-15	2,7223	0,6257	2,5091	0,8421
103-06	2,7123	0,9665	2,6024	1,0694
103-08	3,2522	1,5168	2,3113	1,0514
103-17	2,4910	0,8369	2,2518	0,7391
103-19	2,4201	0,8874	2,3075	0,8687

Tabela 22: Média e desvio-padrão de R_a calculados em 3D e 2D

Fonte: Elaborado pelo autor.

função das dimensões da agulha, enquanto no método tridimensional, além da captura de vales com maior amplitude e frequência, foi analisada uma área de $1,25 \times 10 \text{ mm}$, o que permitiu a captura de maior quantidade de variações de rugosidade da superfície. A diferença de valor de R_a em função do método de medição também foi observada por Cristea et al. (CRISTEA et al., 2018) em outros tipos de substrato.

Em virtude dos resultados obtidos e das observações sobre problemas relacionados ao método convencional (2D), estima-se que o método 3D é o mais indicado para determinação de rugosidade das superfícies dos blocos cerâmicos, confirmando o que já foi indicado por (PINHEIRO; HOLANDA, 2010; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho propõe métodos para computação e análise de rugosidade de superfícies, com objetivo de fornecer informações quantitativas e qualitativas que possam indicar o quanto superfícies com determinadas características topográficas podem favorecer a aderência por contato com outros materiais. Para validação, o método foi aplicado no contexto da engenharia civil, mais especificamente para estudo da rugosidade e sua influência no intertravamento mecânico entre substratos de cerâmica vermelha e matriz cimentícia. Os dados utilizados nos experimentos foram adquiridos por equipamento de digitalização por laser (LiDAR), sendo que cada amostragem resulta uma nuvem de pontos 3D. A partir do estudo realizado, são estabelecidas três hipóteses de solução para atingir os objetivos propostos.

A primeira hipótese é de que um método de determinação de rugosidade que utilize dados e computação de dados 3D, possui maior exatidão do que o método convencional, o método 2D. Para esta hipótese foram coletados dados em 2D e 3D, conforme metodologia de aquisição de informações apropriada de cada formato. Foi estabelecida uma mesma base de comparação, foram feitas análises estatísticas (testes de hipóteses) e foi possível afirmar: primeiro, que o método 2D não é representativo para determinação de rugosidade de superfícies, visto que o local e a orientação de amostragem de perfil influenciam no resultado; segundo, que o métodos 3D propostos neste trabalho possuem maior exatidão e permitem capturar melhor as características da superfícies, uma vez que são feitas análises localizadas de rugosidade. Nos resultados obtidos nos testes, também foi possível observar que o valor médio da rugosidade (R_a) encontrado nas amostras 2D (1,6697) é corresponde a $\approx 73,6\%$ do R_a (média aritmética) encontrado pelo método 3D (2,2701), o que estima-se seja causado pelo fato de o equipamento laser tem possui maior resolução e exatidão de leitura (por conta da limitação de alcance do equipamento 2D, como mostra o esquema ilustrado na Figura 4).

A segunda hipótese apresentada é de que a partir da avaliação a rugosidade com maior nível detalhe, ou seja, observando valores em diferentes locais da amostra e não apenas um valor médio, é possível verificar com maior exatidão a contribuição da rugosidade para aderência por área de contato. Utilizando as informações gráficas apresentadas foi possível avaliar com mais nível de detalhe e exatidão o comportamento da rugosidade ao longo da superfície amostrada. Definimos uma assinatura de rugosidade para visualizar os diferentes valores da rugosidade de forma localizada na superfície. Propomos também o uso histograma que permite avaliar concentração ou dispersão dos valores de rugosidade da amostra em relação à valores de referência (mínimo e máximo). Já o gráfico de perfil é proposto com objetivo de verificar o comportamento ou variação da rugosidade ao longo da superfície. Conforme foi possível observar nos resultados apresentados, tanto visualmente quando numericamente, os valores calculados de rugosidade tem grande variação entre amostras de um mesmo bloco e também dentro da própria amostra. Dessa forma é possível compreender melhor onde ocorre maior ou menor intertravamento mecânico na superfície. É relevante destacar ainda que o método descrito no subcapítulo

3.4 propõe a computação de múltiplos planos de ajuste, capturando também as variações locais da topografia da superfície.

O trabalho apresentou ainda uma terceira hipótese, de que quanto maior a área de contato, maior o intertravamento mecânico entre os materiais envolvidos. Essa hipótese é apresentada a partir da observação de que o parâmetro rugosidade média (R_a) é um parâmetro unicamente relacionado a altura ou, mais precisamente, a distância perpendicular de um ponto ao plano de ajuste. No entanto, uma medida lateral ou de área também deve ser considerada, pois o diâmetro dos grãos da matriz cimentícia também podem influenciar intertravamento com o substrato cerâmico. Para avaliar área de contato, o presente trabalho propõe o uso de dois novos parâmetros: índice de área total de vales (Δ_T) e área média de vale (Δ_{avg}). Estima-se que uma superfície A com valor de R_a maior do que outra B, pode não ter maior aderência por contato que a superfície B, que tem maior valor de área total de contato. Para validar os métodos e os novos parâmetros propostos, foram feitos experimentos cujos resultados demonstram que as amostras de blocos cerâmicos de diferentes olarias possuem valores de R_a e de área de contato (Δ_T e Δ_{avg}) significativamente diferentes e estima-se que, aquelas que possuem maiores valores dos parâmetros estudados, favorecem a aderência por área de contato entre blocos cerâmicos e matriz cimentícia. Por fim, estima-se que o parâmetro Δ_{avg} seja um valor mais representativo para estimar valores de área de contato do que o parâmetro Δ_T , pois é uma medida que relaciona com a quantidade de áreas de vales da amostra. No entanto, os 2 parâmetros devem ser utilizados em conjunto, pois para superfícies com valores de Δ_{avg} similares, aquela que possui valor significativamente maior de Δ_T , tende a favorecer aderência por área de contato.

Em comparação com trabalhos com foco em reconstrução de superfície estudados, como (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006; TAUBIN, 2012; KAZHDAN; HOPPE, 2013; NAN; WONKA, 2017; ZHOU; SHEN; HU, 2019; WANG et al., 2019), os métodos propostos trazem uma vantagem significativa na computação de rugosidade, pois os trabalhos de referência tem foco na reconstrução de superfícies. Dessa forma a rugosidade é suavizada nos métodos volumétricos (KAZHDAN; BOLITHO; HOPPE, 2006; TAUBIN, 2012; KAZHDAN; HOPPE, 2013; NAN; WONKA, 2017) ou é tratada como parte da geometria, como em (ZHOU; SHEN; HU, 2019; WANG et al., 2019). Os métodos de referência não computam um plano de ajuste e tratam a rugosidade como relevo, sensível a escala de aplicação e a parâmetros de vizinhança para definir o que é um relevo ou rugosidade. Na escala da micro-rugosidade, que é indicada para os estudos de rugosidade na engenharia civil (KOZUBAL et al., 2020), por exemplo, os métodos de reconstrução de superfícies não trazem exatidão, pois as informações de rugosidade podem ser tratadas como ruído ou suavizados em relação a topografia original da superfície.

Outros trabalhos relacionados no contexto da engenharia civil trazem o estudo dos parâmetros de rugosidade, como (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; LE ROUX et al., 2015; KLINGVALL EK et al., 2016; KOZUBAL et al., 2020). No entanto, estes trabalhos utilizam o método convencional 2D e utilizam um valor médio e único de R_a para determinar a rugosidade de uma superfície. Nos resultados apresentados, percebe-se que

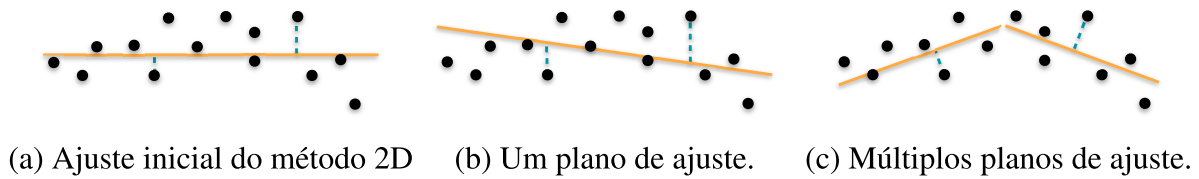


Figura 39: Linha de referência e planos de ajuste para computação de distâncias / rugosidade nos métodos estudados. Em (a) a linha de referência no método 2D, alinhada eixo X . Em (b) o plano de ajustes único, que considera todos os pontos da nuvem e em (c) os múltiplos planos, calculados com os pontos de cada local.

Fonte: Elaborado pelo autor.

há diferença significativa de valores de R_a em locais diferentes de uma amostra. Os métodos propostos neste trabalho se mostram vantajosos, pois permitem avaliar estes valores em diferentes locais e em nível detalhe, através da organização dos dados em estrutura hierárquica. Em relação aos níveis de detalhe, conforme exemplo da Figura 16, o comportamento ou diferença local é visível apenas com maior nível de detalhe.

O trabalho proposto também apresenta novas formas de computação do plano de ajuste inicial em relação ao método convencional 2D. No método convencional 2D e também nos trabalhos de referência (SANTOS; JÚLIO, 2013; MOREAU; ROUDET; GENTIL, 2014; LE ROUX et al., 2015; KLINGVALL EK et al., 2016; KOZUBAL et al., 2020), um ponto de ajuste inicial é definido como base. Já no método descrito no subcapítulo 3.2 (chamado de método 1), um plano de ajuste é encontrado minimizando o erro quadrado. E no método descrito no subcapítulo 3.4 múltiplos planos de ajustes são computados analisando a geometria local através do cálculo PCA (autovetores) dos pontos. Os dois métodos propostos se ajustam melhor a topografia da superfície, conforme demonstra a Figura 39.

5.1 Limitações do Método

Os experimentos realizados neste trabalho com objetivo de validar os métodos foram realizados a partir de leitura com equipamento laser (LiDAR). Conforme descrito nos subcapítulos 1.4 e 2.5, o equipamento possui limitação da quantidade de pontos amostrados (≈ 10.000 pontos), bem como de dimensão ($10mm \times 10mm$) e resolução ($\approx 2,5\mu m$). Ainda são fatores limitadores para os experimentos com uso deste equipamento o peso do material a ser digitalizado e os ajustes de posicionamento e altura do laser, pois necessitam intervenção humana. No caso de falhas na aquisição de dados, o método não aborda a eliminação automática de ruídos e erros de dados (chamados de *outliers*).

Ainda em relação aos dados de entrada, não foram feitos estudos e experimentos que explorassem com maior profundidade a aquisição de informações por outros métodos como: fotogrametria, microscopia eletrônica e ultrassom. Esses métodos também podem ser utilizados

para aquisição de nuvem de pontos e reconstrução de superfícies. Alguns, inclusive, provêm dados com maior resolução e quantidade de informações, além de ter um alcance maior de dimensões, como é o caso da fotogrametria.

Os softwares desenvolvidos para computação de planos e parâmetros de rugosidade e área de contato, foram projetados para manipular os dados utilizados nos experimentos, não há suporte para informações de entrada como fotos. Para estes casos é necessário executar um pré-processamento das informações para gerar a nuvem de pontos 3D.

A escala de aplicação dos métodos também deve ser entendida dentro do contexto aplicação, pois para alguns cenários, a micro-escala (utilizada nos experimentos) pode não ser a mais adequada. Para estudo da rugosidade e área de contato no contexto da engenharia civil, é adequado o uso da micro-escala. Nesta escala, o método de computação de múltiplos planos produz melhores resultados porque se ajusta melhor a topografia da superfície. No entanto, em outros contextos onde a meso ou macro-escala são utilizadas, pode ser mais interessante utilizar um plano único de ajustes. Isso é sensível a cada contexto de aplicado.

5.2 Aplicações em outros contextos

Embora este trabalho apresente métodos para cálculo de rugosidade superficial aplicado ao contexto da engenharia civil, ele também pode ser usado com sucesso em outros contextos. Para o estudo de formações de rochas em geomecânica e geodinâmica de rochas, a análise de rugosidade é importante para determinar a resistência ao cisalhamento, deformação e comportamento de infiltração de descontinuidades em superfícies rochosas. Diversos trabalhos como (SCESI; GATTINONI, 2007; POROPAT, 2009; MAH et al., 2013; GE et al., 2015; ZOU; JING; CVETKOVIC, 2015) apontam a dificuldade da análise de dados pelo método tradicional e a tendência do uso de nuvens de pontos 3D para calcular a rugosidade superficial com eficiência e exatidão.

Conforme descrito em (SCESI; GATTINONI, 2007; POROPAT, 2009; MAH et al., 2013; GE et al., 2015; ZOU; JING; CVETKOVIC, 2015), a rugosidade é uma parte do cálculo realizado para a medição da forma de um perfil de superfície. No contexto da geomecânica de rochas, o parâmetro *JRC* (*Joint Roughness Coefficient*) é usado. Este parâmetro é calculado com base na geometria da superfície e basicamente utiliza algum parâmetro associado à distância do ponto ao plano de ajuste da superfície, semelhante ao R_a calculado neste trabalho.

Poropat (POROPAT, 2009) descreve ainda que a rugosidade pode afetar a resistência ao cisalhamento em várias escalas, tanto em níveis de ondulação quanto em micro-rugosidade, que a caracterização da rugosidade deve ser compreendida e está associada à escala. O método de cálculo de múltiplos planos, proposto neste trabalho, pode ser utilizado para o cálculo da rugosidade em várias escalas, pois possibilita a análise da rugosidade em vários níveis de representação hierárquica e com definição de planos locais da superfície. Além disso, as ferramentas de análise de rugosidade propostas auxiliam no entendimento dos padrões de rugosidade, indicando quantitativa e visualmente o comportamento da variação da textura ao longo da

superfície.

Também é possível aprofundar o estudo das áreas de vales para relacionar os parâmetros de área com fluxo de óleo e gás ou permeabilidade e porosidade de rochas. Por exemplo, analisando a direção preferencial das áreas, aplicando o método *PCA (Principal Component Analysis)*, é possível definir uma direção preferencial ou média das áreas vale. A Figura 40 é um estudo inicial aplicado aos dados de uma amostra de rocha, cuja leitura foi feita em laboratório, a partir do método de fotogrametria e convertida para nuvem de pontos 3D. A malha de planos é apresentada na Figura 22.

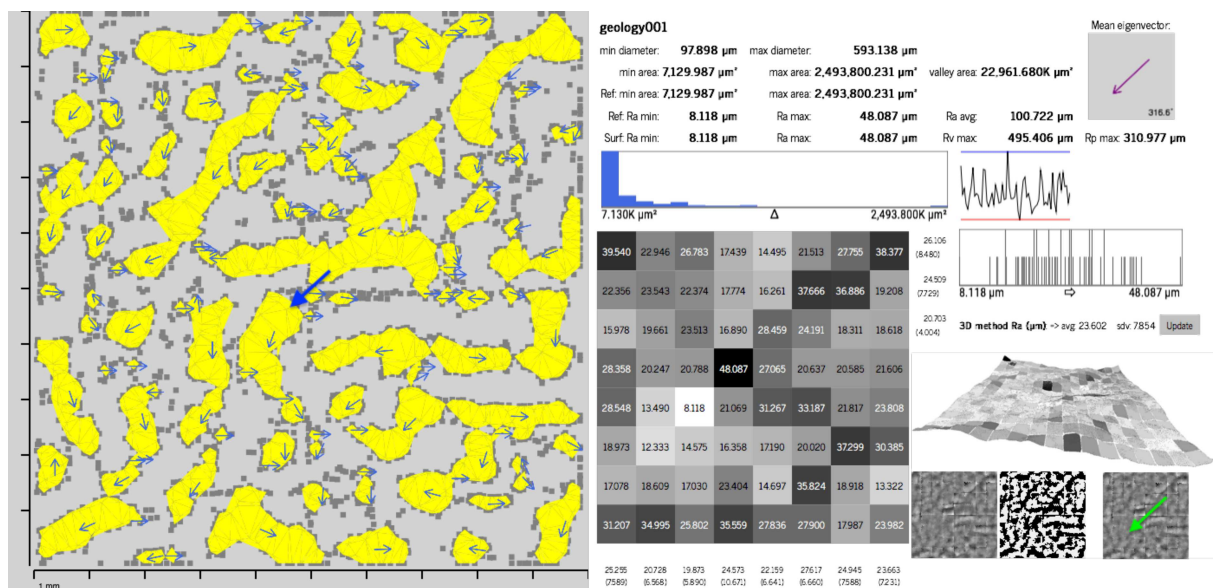


Figura 40: Exemplo dos vetores para análise de direção de áreas de vale. Resultado obtido sobre a nuvem de pontos da Figura 22.

Fonte: Elaborado pelo autor.

São apresentados os vetores (em azul) relacionados às áreas (pixels em amarelo) e o vetor médio sobre os vetores de todas as áreas de vales. Os vetores são obtidos via PCA, mas especificamente, o primeiro autovetor calculado sobre os pontos da nuvem que pertencem a área de cada lago dos vales. Na Figura 40 é possível observar o vetor que indica a direção, que estima-se, seja a maior direção para um fluxo de óleo e gás. Isto pode ser levado em consideração para análise do efeito da rugosidade ou relevo na formação das rochas.

5.3 Trabalhos Futuros

Além dos aspectos relacionados a limitações do método, outros estudos podem ser realizados para estender este trabalho. Estima-se que o cálculo do volume associado aos pontos de vales da superfície possa representar melhor a aderência por contato entre os materiais, visto que é uma medida que relaciona tanto a altura quanto a área superficial. Para o cálculo de volume é

necessário reconstruir a superfície geométrica dos vales e aplicar realizar uma aproximação de cálculo de volume. Isto pode ser realizado utilizando uma *octree* para representação espacial.

Em relação a aplicação do método em outras escalas, uma oportunidade de estudo é a utilização de dados adquiridos por microscopia de força atômica (*Atomic Force Microscope - AFM*). O equipamento permite a seleção de um ponto e região análise (dimensões), na escala de observação em nanômetros (*nm*). É necessário no entanto, estabelecer um método para transformar as informações adquiridas em uma nuvem de pontos 3D, para que possa ser utilizada nos métodos propostos neste trabalho. Outro fator importante a ser considerado é a compreensão o método mais adequado de computação de planos, visto que a resolução dos dados adquiridos por AFM é muito maior (escala em *nm*) em relação informações adquiridas pelo equipamento LiDAR (*μm*) e que o estudo da rugosidade é realizado na escala dos *μm*, conforme indicado em (KOZUBAL et al., 2020).

É possível também aprofundar o estudo sobre aderência por área contato analisando outros parâmetros de rugosidade além do R_a . Analisando individualmente ou em conjunto com os parâmetros de área de vales que foram propostos neste trabalho.

Além disso, também é pretendido como trabalho futuro a publicação da base de dados utilizada neste trabalho, para que sirva de referência e possa apoiar outros estudos.

REFERÊNCIAS

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. **WIRES Computational Statistics**, [S.l.], v. 2, n. 4, p. 433–459, 2010.

ARNOLD, D. M. **Contribuição ao estudo dos fatores intervenientes na aderência de revestimentos de argamassas: análise quantitativa da rugosidade de substratos cerâmicos em microescala**. Prelo, 2021. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, Prelo, 2021.

BAGHERIFARD, S.; GHELICHI, R.; GUAGLIANO, M. Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening. **Applied Surface Science**, [S.l.], v. 258, n. 18, p. 6831 – 6840, 2012.

BARRIOS-MURIEL, J.; SALGADO, D.; CAMBERO, I.; ALONSO, F.; GONZÁLEZ, A. An approach for Surface Roughness Filtering as an alternative to ISO Standard. **Procedia Manufacturing**, [S.l.], v. 41, p. 674 – 681, 2019. 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2019, 19-21 June 2019, Madrid, Spain.

BERGER, M.; TAGLIASACCHI, A.; SEVERSKY, L.; ALLIEZ, P.; LEVINE, J.; SHARF, A.; SILVA, C. State of the art in surface reconstruction from point clouds. In: EUROGRAPHICS STAR REPORTS, 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. v. 1, n. 1, p. 161–185.

BJÖRCK Åke. Least squares methods. In: **Handbook of Numerical Analysis**. [S.l.]: Elsevier, 1990. p. 465–652. (Handbook of Numerical Analysis, v. 1).

BOLITHO, M.; KAZHDAN, M.; BURNS, R.; HOPPE, H. Multilevel streaming for out-of-core surface reconstruction. In: SYMPOSIUM ON GEOMETRY PROCESSING, 2007. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2007. p. 69–78.

BOLITHO, M.; KAZHDAN, M.; BURNS, R.; HOPPE, H. Parallel poisson surface reconstruction. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON VISUAL COMPUTING, 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p. 678–689.

CARASEK, H. Argamassas. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, São Paulo, IBRACON**, [S.l.], p. 892–944, 2010.

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**, [S.l.], v. 1122, p. 012003, nov 2018.

DAULTREY, S. **Principal components analysis**. [S.l.]: Geo Abstracts Limited Norwich, 1976.

FENG, Q.; SJÖGREN, P.; STEPHANSSON, O.; JING, L. Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. **Engineering Geology**, [S.l.], v. 59, n. 1, p. 133–146, 2001.

FERNÁNDEZ, O. Obtaining a best fitting plane through 3D georeferenced data. **Journal of Structural Geology**, [S.l.], v. 27, n. 5, p. 855–858, 2005.

- 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.
- GARBACZ, A.; COURARD, L.; KOSTANA, K. Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems. **Materials Characterization**, [S.l.], v. 56, n. 4, p. 281 – 289, 2006. 9th ECSIA and 7th STERMAT: Stereology and Image Analysis in Materials Science.
- GE, Y.; TANG, H.; ELDIN, M. M. E.; CHEN, P.; WANG, L.; WANG, J. A description for rock joint roughness based on terrestrial laser scanner and image analysis. **Scientific reports**, [S.l.], v. 5, p. 16999, Nov 2015.
- GOMES, R. K.; de Oliveira, L. P.; GONZAGA, L.; TOGNOLI, F. M.; VERONEZ, M. R.; de Souza, M. K. An algorithm for automatic detection and orientation estimation of planar structures in LiDAR-scanned outcrops. **Computers & Geosciences**, [S.l.], v. 90, p. 170 – 178, 2016.
- GRIGORIADIS, K. Use of laser interferometry for measuring concrete substrate roughness in patch repairs. **Automation in Construction**, [S.l.], v. 64, p. 27 – 35, 2016.
- HOŁA, J.; SADOWSKI, Ł.; REINER, J.; STACH, S. Usefulness of 3D surface roughness parameters for nondestructive evaluation of pull-off adhesion of concrete layers. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 84, p. 111 – 120, 2015.
- ISO 4287. **4287**: 2003, sr en iso 4287: 2003/ac: 2009 geometrical product specifications (gps). [S.l.: s.n.], 2009.
- JOLLIFFE, I. Principal Component Analysis. In: **Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science**. [S.l.]: American Cancer Society, 2005.
- KAZHDAN, M.; BOLITHO, M.; HOPPE, H. Poisson Surface Reconstruction. In: **FOURTH EUROGRAPHICS SYMPOSIUM ON GEOMETRY PROCESSING**, 2006, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland. **Proceedings...** Eurographics Association, 2006. p. 61–70. (SGP '06).
- KAZHDAN, M.; HOPPE, H. Screened poisson surface reconstruction. **ACM Transactions on Graphics (ToG)**, [S.l.], v. 32, n. 3, p. 29, 2013.
- KLINGVALL EK, R.; RÄNNAR, L.-E.; BÄCKSTÖM, M.; CARLSSON, P. The effect of EBM process parameters upon surface roughness. **Rapid Prototyping Journal**, [S.l.], v. 22, n. 3, p. 495–503, 2016.
- 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**, [S.l.], v. 13, n. 11, 2020.
- LABATUT, P.; PONS, J.; KERIVEN, R. Efficient Multi-View Reconstruction of Large-Scale Scenes using Interest Points, Delaunay Triangulation and Graph Cuts. In: **IEEE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION**, 2007., 2007. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–8.

- LAVOUÉ, G. A roughness measure for 3D mesh visual masking. In: APPLIED PERCEPTION IN GRAPHICS AND VISUALIZATION, 4., 2007. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2007. p. 57–60.
- LAVOUÉ, G. A Local Roughness Measure for 3D Meshes and Its Application to Visual Masking. **ACM Trans. Appl. Percept.**, New York, NY, USA, v. 5, n. 4, p. 21:1–21:23, Feb. 2009.
- 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**, [S.l.], v. 35, n. 3, p. 1063 – 1079, 2015.
- LEE, C. H.; VARSHNEY, A.; JACOBS, D. W. Mesh Saliency. In: ACM SIGGRAPH 2005 PAPERS, 2005, New York, NY, USA. **Anais...** ACM, 2005. p. 659–666. (SIGGRAPH '05).
- MA, Z.; ZHANG, W.; GAO, J.; LIN, L.; KRISHNASWAMY, S. Characterization of the interface roughness of coatings based on ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum. In: ANNUAL REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION, QNDE 2016, 43., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. v. 1806, n. 1, p. 90021.
- MAH, J.; SAMSON, C.; MCKINNON, S. D.; THIBODEAU, D. 3D laser imaging for surface roughness analysis. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, [S.l.], v. 58, n. Complete, p. 111–117, 2013.
- MARSHALL, S. J.; BAYNE, S. C.; BAIER, R.; TOMSIA, A. P.; MARSHALL, G. W. A review of adhesion science. **dental materials**, [S.l.], 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. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 243, p. 118274, 2020.
- MIRO, M. M.; VEITH, M.; LEE, J.; SOLDERA, F.; MUECKLICH, F.; BENNEWITZ, R.; AKTAS, C. 3D and 2D structural characterization of 1D Al/Al₂O₃ biphasic nanostructures. **Journal of microscopy**, [S.l.], v. 258, n. 2, p. 113–118, 2015.
- MOREAU, N.; ROUDET, C.; GENTIL, C. **Study and Comparison of Surface Roughness Measurements**. Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique (GTMG'14), Lyon.
- MUMMERY, L. **Surface Texture Analysis: the handbook**. [S.l.]: Hommelwerke GmbH, 1992.
- MYSHKIN, N.; PETROKOVETS, M.; CHIZHIK, S. Simulation of real contact in tribology. **Tribology International**, [S.l.], v. 31, n. 1-3, p. 79–86, 1998.
- NAN, L.; WONKA, P. PolyFit: polygonal surface reconstruction from point clouds. In: THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ICCV), 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017.
- PEREZ, F.; BISSONNETTE, B.; COURARD, L. Combination of mechanical and optical profilometry techniques for concrete surface roughness characterisation. **Magazine of Concrete Research**, [S.l.], v. 61, n. 6, p. 389–400, 2009.

PINHEIRO, B.; HOLANDA, J. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [S.l.], v. 56, n. 339, p. 237–243, 2010.

POROPAT, G. Measurement of surface roughness of rock discontinuities. **Rock Engineering in Difficult Conditions**, [S.l.], 2009.

SADOWSKI, Ł.; CZARNECKI, S.; HOŁA, J. Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [S.l.], v. 67, p. 3 – 13, 2016. Special Issue on Adhesion, Surface Preparation and Adhesive Properties.

SAHOO, P. 1 - Surface topography. In: DAVIM, J. P. (Ed.). **Tribology for Engineers**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2011. p. 1 – 32.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. 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**, [S.l.], v. 15, n. 1, 2014.

SANDER, M. **A Practical Guide to the Assessment of Surface Texture**. [S.l.]: Mahr Feinprüf, 1991.

SANTOS, P. M.; JÚLIO, E. N. A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 38, n. Supplement C, p. 912 – 923, 2013.

SARKER, M.; COSTA, D. D. da; HADIGHEH, S. A. Multi-scale 3D roughness quantification of concrete interfaces and pavement surfaces with a single-camera set-up. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 222, p. 511 – 521, 2019.

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: Engineering**, [S.l.], v. 108, p. 257 – 269, 2017.

SCESI, L.; GATTINONI, P. Roughness control on hydraulic conductivity in fractured rocks. **Hydrogeology Journal**, [S.l.], v. 15, n. 2, p. 201–211, 2007.

SCHALL, O.; SAMOZINO, M. Surface from scattered points. In: A BRIEF SURVEY OF RECENT DEVELOPMENTS. 1ST INTERNATIONAL WORKSHOP ON SEMANTIC VIRTUAL ENVIRONMENTS, PAGE (S, 2005. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2005. p. 138–147.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Analysis of main parameters affecting substrate/mortar contact area through tridimensional laser scanner. **Journal of colloid and interface science**, [S.l.], v. 455, p. 16–23, 2015.

TAHA, M. R.; SHRIVE, N. The use of pozzolans to improve bond and bond strength. In: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM. CANADÁ, 9., 2001. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2001.

TAUBIN, G. Smooth signed distance surface reconstruction and applications. **Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications**, [S.l.], p. 38–45, 2012.

- THAMBOO, J. A.; DHANASEKAR, M. Characterisation of thin layer polymer cement mortared concrete masonry bond. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 82, p. 71 – 80, 2015.
- THOMAS, T. **Rough Surfaces**. [S.l.]: Imperial College Press, 1999.
- 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**, [S.l.], v. 65, n. 374, p. 303–318, 2019.
- VENKATARAMA REDDY, B.; LAL, R.; NANJUNDA RAO, K. Enhancing bond strength and characteristics of soil-cement block masonry. **Journal of materials in civil engineering**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 164–172, 2007.
- WANG, H.; SHI, H.; LI, Y.; WANG, Y. The Effects of Leaf Roughness, Surface Free Energy and Work of Adhesion on Leaf Water Drop Adhesion. **PLOS ONE**, [S.l.], v. 9, n. 9, p. 1–10, 09 2014.
- WANG, K.; TORKHANI, F.; MONTANVERT, A. A fast roughness-based approach to the assessment of 3D mesh visual quality. **Computers and Graphics**, [S.l.], v. 36, n. 7, p. 808–818, Nov. 2012.
- WANG, R.; PEETHAMBARAN, J.; CHEN, D. LiDAR Point Clouds to 3-D Urban Models: a review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 606–627, Feb 2018.
- WANG, W.; SU, T.; LIU, H.; LI, X.; JIA, Z.; ZHOU, L.; SONG, Z.; DING, M. Surface reconstruction from unoriented point clouds by a new triangle selection strategy. **Computers and Graphics**, [S.l.], 2019.
- ZHOU, Y.; SHEN, S.; HU, Z. Detail Preserved Surface Reconstruction from Point Cloud. **Sensors**, [S.l.], v. 19, n. 6, 2019.
- ZOU, L.; JING, L.; CVETKOVIC, V. Roughness decomposition and nonlinear fluid flow in a single rock fracture. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, [S.l.], v. 75, p. 102–118, 2015.