

Análise da rugosidade de agregados reciclados e a influência na aderência pasta-agregado em compósitos cimentícios: uma nova abordagem com microscopias de superfície

Roughness analysis of recycled aggregates and the influence on paste-aggregate adhesion in cementitious composites: The new approach with surface microscopy

Amanda Marques Lopes Estolano¹ , Diego Henrique Alves da Silva² , Larissa Fonseca Torres Sá² ,
Felipe Mendes da Cruz² , Nathalia Bezerra de Lima¹ 

¹Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Química Fundamental. Recife, PE, Brasil.

²Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco. Recife, PE, Brasil.

e-mail: amanda.estolano@ufpe.br, dhas@poli.br, lfts@poli.br, felipemendeslsht@poli.br, nathalia.blima@ufpe.br

RESUMO

A resistência mecânica de concretos e argamassas são influenciados pelas características dos agregados, incluindo forma, composição e rugosidade. O objetivo deste trabalho é investigar a influência da rugosidade de agregados graúdos reciclados na aderência com a argamassa cimentícia. A rugosidade dos agregados foi variada através de tratamento mecânico e lixamento manual para obtenção de diferentes níveis e foi quantificada através da microscopia confocal a laser. Através do método de imersão em argamassa, desenvolvido nesse estudo, foi analisada a zona de transição interfacial visualizada por meio da microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicam que o tratamento mecânico deve ser realizado de forma controlada para garantir o equilíbrio entre remover a argamassa aderida e não gerar uma superfície excessivamente rugosa que comprometa a interação com a pasta cimentícia. Concluiu-se que a topografia da superfície é um fator determinante para a aderência pasta-agregado e melhoria no comportamento mecânico do concreto fabricado com resíduo de construção e demolição. Rugosidades moderadas, com vales e depressões bem definidos e alternados, favorecem a penetração da pasta cimentícia e criam uma ligação interfacial mais densa.

Palavras-chave: Rugosidade; Agregado; Superfície; Concreto; Microscopia.

ABSTRACT

The mechanical strength of concrete and mortars is influenced by the characteristics of the aggregate, including shape, composition and roughness. Recycled aggregates have a more porous surface and variable composition compared to natural aggregates, contributing to the interlocking of the system and increasing the transition area between the paste and the aggregate. The objective of this work is to investigate the influence of the roughness of recycled coarse aggregates on the adhesion with cementitious mortar. The roughness of the aggregates was varied through mechanical treatment and manual sanding to obtain different levels, and it was quantified using laser confocal microscopy. Using the mortar immersion method developed in this study, the interfacial transition zone was analyzed through scanning electron microscopy. The results indicate that mechanical treatment should be performed in a controlled manner to ensure a balance between removing adhered mortar and not creating an excessively rough surface that compromises the interaction with the cement paste. It was concluded that surface topography is a determining factor for paste-aggregate adhesion and improvement in the mechanical behavior of concrete made with construction and demolition waste. Moderate roughness, with well-defined and alternating valleys and depressions, favors the penetration of the cement paste and creates a denser interfacial bond.

Keywords: Roughness; Recycled aggregate; Surface; Concrete; Microscopy.

1. INTRODUÇÃO

Na mecânica dos sólidos, os concretos são considerados um meio heterogêneo trifásico composto por três elementos principais: agregados graúdos, matriz (pasta de cimento e partículas finas excluídas dos agregados graúdos) e uma zona de interface entre a matriz e os agregados, conhecida como Zona de Transição Interfacial (ZTI). Esta representação em escala intermediária permite considerar a interação entre esses componentes durante a ocorrência de diversos fenômenos físicos, como degradação mecânica, fluência e difusão termo-higrométrica. A região interfacial é uma parte essencial da microestrutura global do concreto, mas caracterizar suas propriedades mecânicas distintivas é desafiador devido à presença de porosidade concentrada, que reduz a resistência à compressão e tração. A espessura e a porosidade da ZTI podem variar conforme diversos fatores, incluindo relação água/cimento, dimensões dos agregados, disposição geométrica na amostra e superfícies de contato entre agregados e matriz [1].

A rugosidade dos agregados graúdos também é um fator que influencia nas propriedades mecânicas do concreto através da aderência agregado-pasta na ZTI. O agregado reciclado de concreto, por exemplo, possui naturalmente uma superfície mais porosa e de composição variável em relação aos agregados naturais. Alguns estudos revelam que o aumento da rugosidade do agregado de concreto favorece o fortalecimento da ZTI, com consequente aumento da resistência ao cisalhamento na interface [2–4]. Agregados com superfície mais rugosa resultam em maiores valores de microdureza em comparação com aqueles de superfície menos rugosa, devido ao intertravamento mecânico entre a pasta de cimento e o agregado. Esse efeito é especialmente notável próximo à superfície do agregado e menos evidente à medida que se afasta dela [5].

De acordo com ZHAO *et al.* [6] o aumento da rugosidade e o formato circular do agregado aumentam a tensão de escoamento e, conseqüentemente, otimiza a estabilidade do concreto, resistência à deformação e resistência à compressão. Portanto, é fundamental selecionar agregados com determinada morfologia para melhorar propriedades mecânicas para diversas aplicações na indústria da construção [7].

Embora para ZAETANG *et al.* [8] os agregados reciclados fossem mais fracos que os agregados naturais, as melhorias na resistência à compressão e resistência à abrasão e resistência à abrasão foram alcançadas como resultado de uma melhor ligação entre o agregado reciclado e a pasta de cimento devido ao aumento da porosidade superficial e da rugosidade dos agregados reciclados. Diante da heterogeneidade desse tipo de agregado, muitos estudos contemplam estratégias para otimizar o uso de resíduo de construção e demolição (RCD) na própria indústria da construção civil transformando-os em areia [9, 10], brita [11, 12] e cimento [13, 14].

No estudo de SANTOS *et al.* [15] foi desenvolvido um procedimento para medir a rugosidade de agregados graúdos reciclados por interferometria óptica, que é uma técnica que permite medir irregularidades na superfície. Os autores identificaram um aspecto diferente do usual: o agregado reciclado de concreto possui rugosidade semelhante aos agregados naturais triturados. Em contrapartida, identificaram que o agregado cerâmico vermelho é menos áspero que os agregados naturais. A área superficial específica dos agregados reciclados está mais relacionada à superfície interna das paredes dos poros do que a rugosidade da superfície. Em relação ao agregado natural, o agregado reciclado apresenta usualmente um desgaste por abrasão maior [16, 17] e, da mesma forma que os resultados de absorção, essa propriedade também é fortemente influenciada pelo material aderido. Além disso, a superfície rugosa do agregado reciclado de concreto contribui no baixo desempenho em relação ao agregado natural, que apresenta uma superfície lisa e microestrutura densa.

Outro aspecto importante é a ação do intertravamento do agregado que pode ampliar a área real de ligação. Nos estudos de CHEN *et al.* [18], essa ação desempenhou um papel fundamental na resistência ao cisalhamento interfacial da interface rugosa. SHEN *et al.* [19] atribuíram a melhoria da resistência de ligação entre o agregado reciclado de concreto e a argamassa à modificação da rugosidade, topografia e geoquímica da superfície do agregado por meio do processo de carbonatação. Nesse caso, o efeito do intertravamento físico devido ao aumento da rugosidade contribuiu para essa melhoria na zona de transição interfacial.

Alguns estudos mostram a eficiência de microscopias de superfície para explorar parâmetros de rugosidade de agregados para concreto. SUN *et al.* [20] e JI *et al.* [21] utilizaram o microscópio confocal a laser e microscópio eletrônico de varredura para realizar análises quantitativas da morfologia superficial, parâmetros de rugosidade e proporção de materiais dos agregados a fim de melhorar processos de seleção e otimização de durabilidade e desempenho dos materiais para construção. A técnica de microscopia confocal de varredura a laser é amplamente empregada em diversas áreas, como ciência dos materiais, engenharia têxtil e biologia. Contudo, seu potencial para caracterizar materiais à base de cimento ainda não foi completamente explorado. A técnica apresenta várias vantagens distintas que o tornam ideal para examinar materiais de cimento hidratados e com textura grosseira. Além de proporcionar uma resolução superior à da microscopia óptica convencional e uma ampla gama de ampliação, pode operar em condições de temperatura e pressão padrão, eliminando a necessidade de secagem prévia das amostras para análise. Além disso, é capaz de capturar imagens e quantificar

superfícies irregulares. As imagens confocais podem ser utilizadas para criar representações tridimensionais, fornecendo informações adicionais que não seriam evidentes em seções finas ou na caracterização superficial tradicional [22].

A utilização de microscopias de superfície para avaliar parâmetros de rugosidade é, de fato, amplamente utilizado em materiais cimentícios [22–24]. Porém, este estudo contempla a condição da zona de transição interfacial diante de diferentes níveis de rugosidade de agregado reciclado de concreto e agregado reciclado de tijolo cerâmico após diferentes tipos de solicitação abrasiva. Foram utilizadas as técnicas de estereoscopia, microscopia confocal a laser e microscopia eletrônica de varredura para mostrar os efeitos da rugosidade na aderência pasta-agregado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais e tratamentos superficiais dos agregados

Os resíduos de concreto e tijolo cerâmico foram coletados a partir de uma única peça para não interferir na análise de rugosidade. O resíduo de concreto foi seccionado em peças menores com, aproximadamente, $1,5 \times 1,5$ cm de superfície e 1,0 cm de espessura. O resíduo de tijolo cerâmico foi seccionado em peças menores com, aproximadamente, $1,5 \times 1,5$ cm de superfície e 0,3 cm de espessura. Foram preparadas 3 amostras de agregado de concreto e 4 amostras de agregado de tijolo cerâmico. As amostras foram submetidas a análise no estereoscópio para registrar imagens das superfícies com três níveis de rugosidade: Rugosidade natural; Rugosidade pós-tratamento mecânico; Rugosidade pós lixamento. Os diferentes processos permitiram obter variação significativa de rugosidade.

O primeiro processo de tratamento mecânico foi executado na betoneira para melhorar o comportamento do material através da retirada da argamassa aderida e mudança na superfície do agregado. As amostras foram submetidas a um tratamento de limpeza autóloga com utilização da betoneira e dispositivo abrasivo para acelerar o processo de limpeza e desintegração da parte frágil na superfície do agregado. Para aumentar o nível de rugosidade na superfície das amostras foi utilizada a lixa de grão nº 50 e foi aplicado lixamento manual. As Figuras 1 e 2 mostram o aumento da rugosidade das superfícies com as imagens obtidas no estereoscópio. A microscopia confocal também comprovou o aumento dos parâmetros de rugosidade.

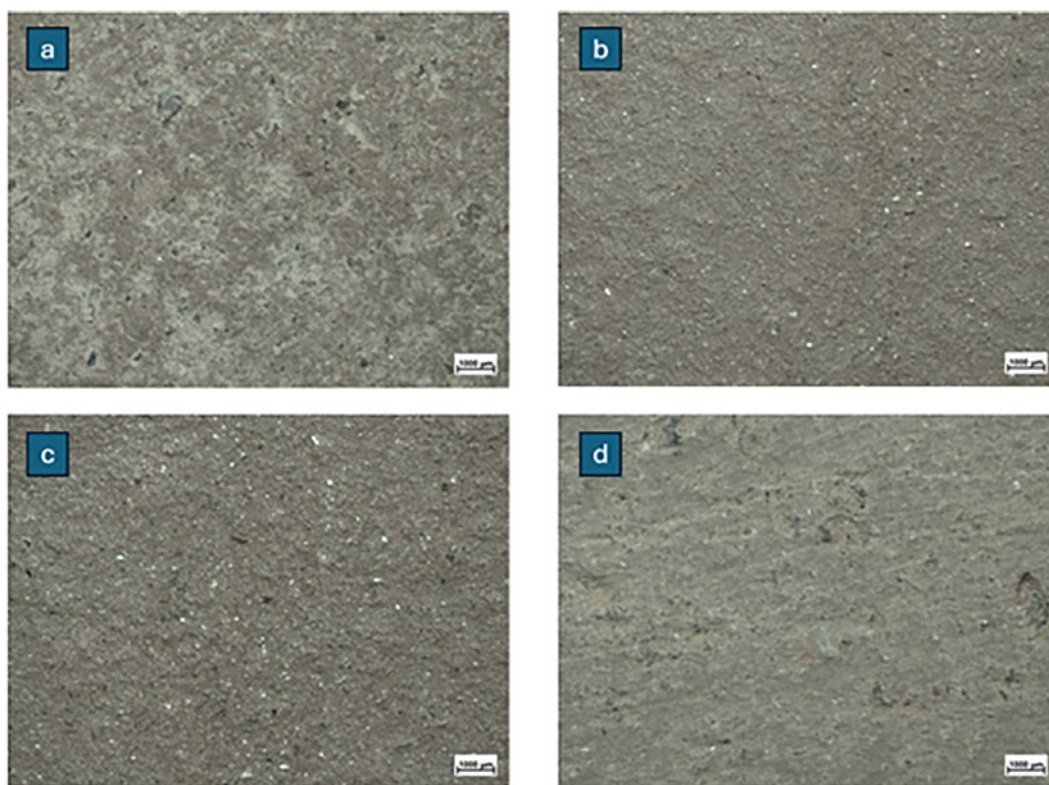


Figura 1: Imagens do estereoscópio das superfícies do agregado de tijolo reciclado com (a) superfície natural; (b) superfície pós-tratamento mecânico; (c) superfície pós lixamento simples e (d) superfície pós lixamento duplo.



Figura 2: Imagens do estereoscópio das superfícies do agregado de concreto reciclado com (a) superfície natural; (b) superfície pós-tratamento mecânico e (c) rugosidade pós lixamento simples.

2.2. Análise de superfície por microscopia confocal

As superfícies dos agregados e das zonas de transição interfacial foram analisadas utilizando um microscópio confocal a laser (Zeiss Axio Imager Z2m) e o software Zen, que gerou imagens topográficas e calculou parâmetros de rugosidade, incluindo Ra (rugosidade média), Rsk (skewness) e Rku (kurtosis), conforme especificado na Tabela 1. Os agregados reciclados de concreto e tijolo cerâmico foram selecionados devido à sua predominância na composição do resíduo. Os microscópios confocais de varredura têm uma profundidade de campo estreita, capturando apenas partes próximas ao plano de foco. Ao deslocar o plano de foco, verticalmente, o microscópio produz uma série de seções ópticas, que o software utiliza para reconstruir um mapa tridimensional da superfície, conhecido como relevo de superfície [25].

Tabela 1: Parâmetros de teste da Microscopia Confocal.

MÉTODO DE DIGITALIZAÇÃO	PIXEL DE IMAGEM	ÁREA DE DIGITALIZAÇÃO (μm)	LENTE OBJETIVAS	AMPLIAÇÃO
Varredura XYZ	1024 × 1024	256 × 256	MPLAPOLEXT 50×	10×

2.3. Métodos de análise de rugosidade do agregado por imersão em argamassa

O método de ensaio desenvolvido nesse estudo consistiu em imergir os agregados reciclados com rugosidade conhecida em argamassa cimentícia, como mostrado na Figura 3. Esse processo simula o comportamento do agregado grão reciclado no concreto. Uma das faces do agregado, analisada por microscopia confocal, e a

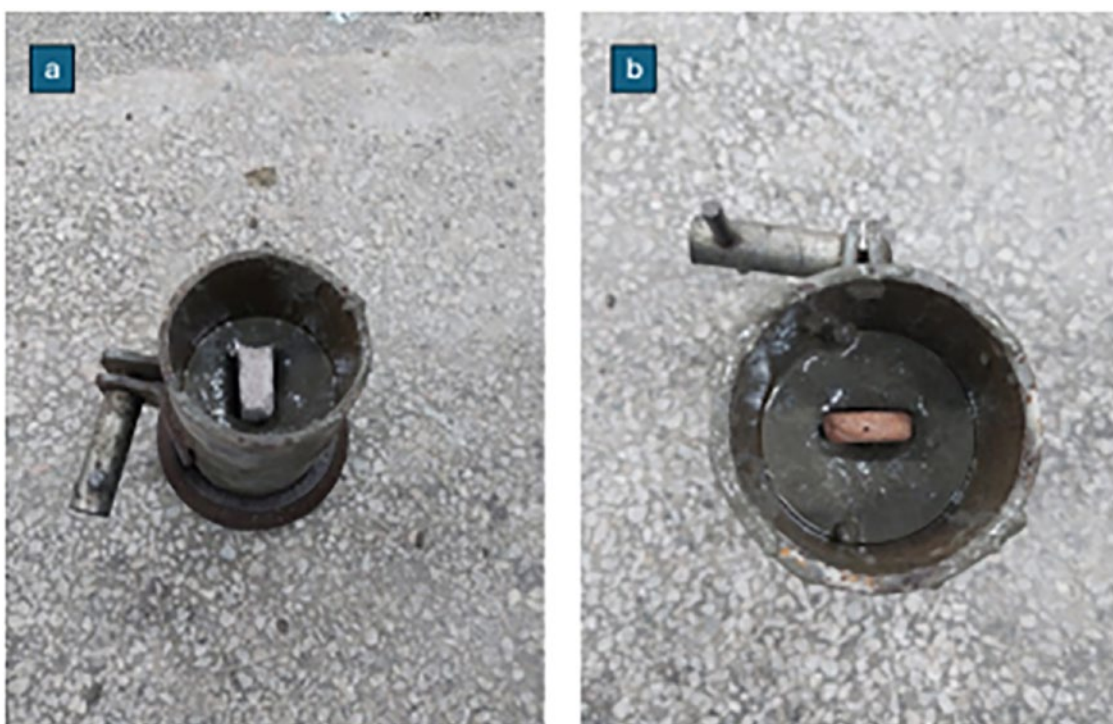


Figura 3: Imersão de agregado reciclado de concreto (a) e tijolo cerâmico (b) em argamassa cimentícia.

posição no corpo de prova foram identificados previamente. Foram moldados 6 corpos de prova com agregados de rugosidade distintas. A dosagem utilizada foi de 609 kg/m³ de cimento, 1126,5 kg/m³ de areia natural e 0,60 de relação água/cimento. Todos os corpos de prova foram moldados com a mesma composição. Após as moldagens e cura úmida de 28 dias, os corpos de prova foram cortados transversalmente (Figura 4), para permitir a avaliação da zona de transição interfacial da face do agregado com rugosidade conhecida e a argamassa.



Figura 4: Corpo de prova de argamassa seccionado transversalmente com agregado reciclado de concreto (a) e tijolo cerâmico (b).

2.4. Análise da zona de transição interfacial por Microscopia Eletrônica de Varredura

A microestrutura da superfície foi analisada pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com o equipamento da marca Tescan, modelo MIRA3, conectado a um analisador de raios X por dispersão de energia (EDS), filamento FEG e detector de elétrons secundários. Os corpos de prova cilíndricos foram cortados transversalmente e seccionados em tamanhos menores para viabilizar a análise no microscópio, como mostrado na Figura 5. A ZTI foi analisada na face com rugosidade conhecida.

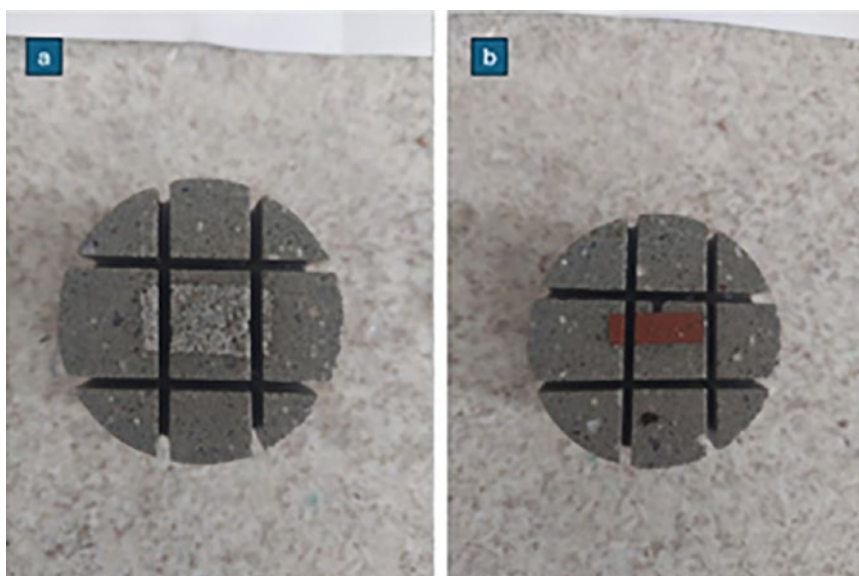


Figura 5: Corpos de prova com o agregado reciclado de concreto (a) e tijolo cerâmico (b) seccionados para a análise de microscopia eletrônica de varredura.

3. RESULTADOS E DICUSSÕES

3.1. Rugosidade dos agregados reciclados

O parâmetro de altura média aritmética (R_a), também conhecido como média da linha central (CLA), é empregado como uma medida de controle de qualidade geral da rugosidade superficial. Ele representa o desvio médio das irregularidades ao longo de um comprimento de amostragem específico. Por outro lado, a Raiz quadrada média da rugosidade (R_q) indica o desvio padrão da distribuição das alturas superficiais, sendo crucial para descrever a rugosidade por meio de métodos estatísticos. Comparado com o R_a , o R_q é mais sensível a grandes desvios da linha média. O coeficiente de curtose (R_{ku}) descreve a nitidez da densidade de probabilidade do perfil. Uma curtose menor que 3 indica uma distribuição platocurtótica, com poucos picos altos e vales baixos, enquanto uma curtose maior que 3 indica uma distribuição leptocurtótica, com mais picos altos e vales baixos. A assimetria de um perfil, medida ao longo do comprimento de avaliação, é o terceiro momento central da função de densidade de probabilidade de amplitude do perfil. A distorção (R_{sk}) é uma medida da simetria do perfil em relação à linha média. Esse parâmetro é sensível a vales profundos ocasionais ou picos altos. Uma distribuição de altura simétrica, com igual número de picos e vales, tem assimetria zero. Perfis com picos removidos ou vales profundos apresentam assimetria negativa, enquanto perfis com vales preenchidos ou picos altos mostram assimetria positiva [26]. Os parâmetros de rugosidade das amostras estão dispostos na Tabela 2. As imagens de microscopia confocal e estereoscopia estão dispostas na Figura 6, comprovando a diferença significativa de rugosidade.

Tabela 2: Parâmetros de rugosidade das amostras.

AMOSTRA	CONDIÇÃO	NÍVEL DE RUGOSIDADE	SIGLA	PARÂMETROS			
				R_a	R_q	R_{ku}	R_{sk}
Resíduo de tijolo cerâmico	Natural	1	T1	3.280	4.140	3.230	0.236
Resíduo de tijolo cerâmico	Tratamento mecânico	2	T2	4.580	5.931	3.473	0.153
Resíduo de tijolo cerâmico	Lixamento simples	3	T3	8.642	10.006	2.013	0.329
Resíduo de tijolo cerâmico	Lixamento duplo	4	T4	9.199	11.606	2.862	-0.280
Resíduo de concreto	Natural	1	C1	7.319	8.775	2.407	-0.047
Resíduo de concreto	Tratamento mecânico	2	C2	15.417	20.022	4.104	1.229
Resíduo de concreto	Lixamento simples	3	C3	21.040	26.567	3.615	-0.642

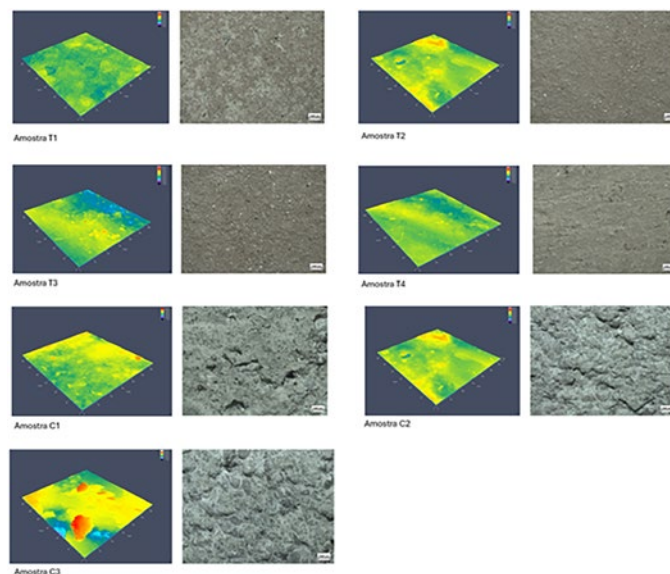


Figura 6: Microscopia confocal e estereoscopia da superfície dos agregados reciclados de tijolo e concreto com diferentes níveis de rugosidade.

3.2. Zona de transição interfacial argamassa-agregado de tijolo cerâmico

A análise da aderência entre pasta e agregado reciclado de tijolo cerâmico, a partir das imagens da ZTI revela aspectos importantes sobre o impacto da rugosidade superficial no comportamento dessa ligação. A Figura 7a mostra o agregado cerâmico com rugosidade natural que, conforme destacado por SANTOS *et al.* [15], é inferior à dos agregados naturais e agregados reciclados de concreto. Essa menor rugosidade implica em uma aderência menos eficiente entre a pasta e o agregado, uma vez que a superfície mais lisa oferece menos áreas de ancoragem mecânica para a ligação com a pasta cimentícia.

A comparação entre o agregado com rugosidade natural (Figura 7a) e o agregado tratado mecanicamente (Figura 7b) revela um efeito evidente do aumento da rugosidade na melhoria da adesão. O tratamento mecânico realizado na betoneira gerou uma superfície mais áspera, o que facilitou a ligação interfacial entre a pasta e o agregado. Isso é explicado pelo mecanismo de intertravamento, onde as irregularidades aumentam a área de contato e criam uma conexão mecânica mais forte. A análise microscópica da ZTI demonstra essa melhoria, mesmo que as imagens em escala macroscópica (obtidas por estereoscópio) não evidenciem de forma clara a fragilidade inicial da ligação nos agregados com menor rugosidade. A microscopia, em contrapartida, mostra a formação de vazios entre a pasta e o agregado, que estão mais presentes quando a rugosidade é menor.

Por outro lado, as Figuras 7c e 7d, que mostram agregados com rugosidade superficial mais elevada, apresentam aspecto distinto. Apesar do aumento da área de contato, a porosidade na ZTI se mantém em níveis semelhantes ao que se observa nos agregados não tratados mecanicamente. Esse comportamento pode ser explicado pela excessiva rugosidade que, ao criar uma superfície com muitos vales e depressões, a pasta cimentícia tem dificuldade de penetrar totalmente nessas regiões, o que gera vazios e falhas na interface. Isso sugere que, embora o aumento da rugosidade possa inicialmente melhorar a aderência por intertravamento, existe um limite ideal. Quando esse limite é ultrapassado, a superfície excessivamente irregular começa a comprometer a eficiência da ligação pasta-agregado, pois impede a completa infiltração e adesão da pasta nas cavidades mais profundas.

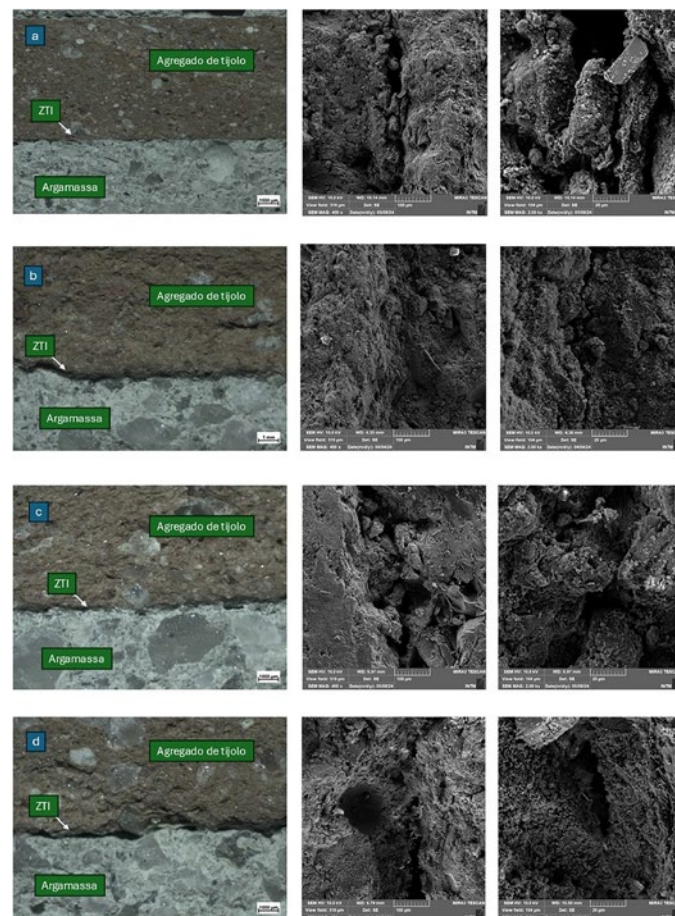


Figura 7: Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de tijolo cerâmico por Microscopia Eletrônica de Varredura na condição (a) natural, (b) com tratamento mecânico, (c) com lixamento simples e (d) com lixamento duplo.

As imagens demonstram o impacto da rugosidade na aderência pasta-agregado, mostrando que há um ponto de equilíbrio em que a rugosidade superficial promove uma ligação mais forte. Rugosidades muito baixas reduzem a aderência, enquanto rugosidades excessivas podem dificultar a interação da pasta com a superfície, resultando na formação de poros e na perda de eficiência da ligação. A Figura 8 mostra a superfície do agregado na condição natural visualizada no microscópio confocal. Observa-se uma superfície com vales em formato de agulha e muito próximos uns dos outros. Essa configuração, como observado na imagem 7a, não apresentou uma boa aderência. Em contrapartida, a Figura 9 mostra a superfície do agregado pós tratamento mecânico. A conformação da superfície, diferentemente do agregado antes do tratamento, apresenta uma topografia com vales e depressões bem definidos e alternados. O tratamento mecânico se mostra eficaz até certo ponto, sendo necessário controlar o nível de abrasão para otimizar o desempenho do agregado reciclado.

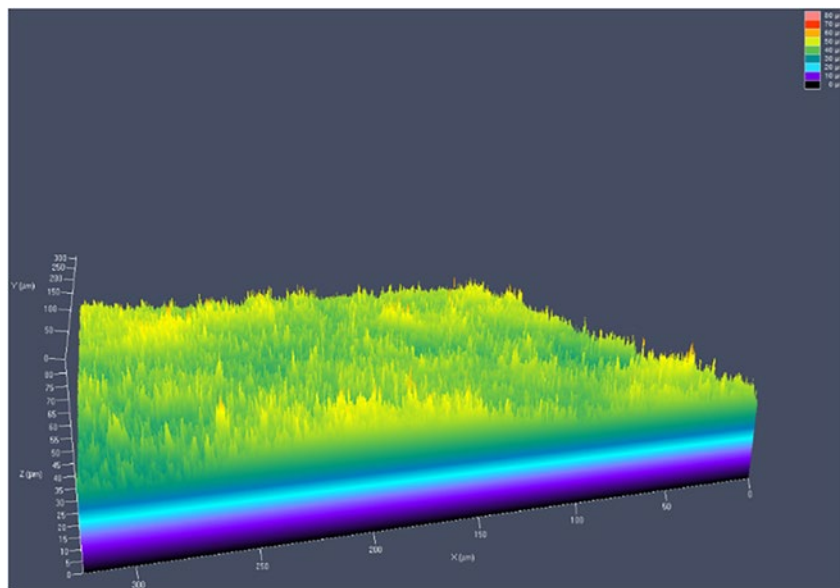


Figura 8: Topografia da superfície do agregado de tijolo na condição natural por Microscopia Confocal.

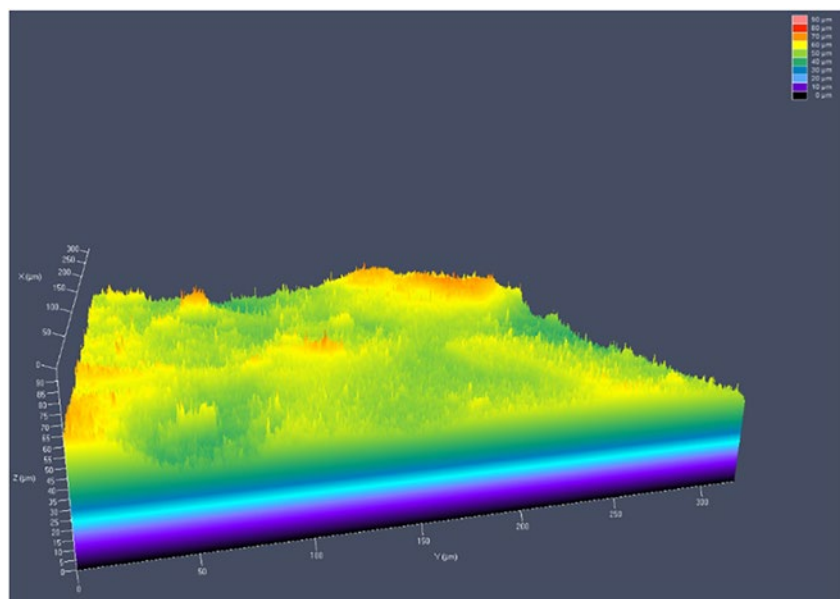


Figura 9: Topografia da superfície do agregado de tijolo pós tratamento mecânico por Microscopia Confocal.

3.3. Zona de transição interfacial argamassa-agregado de concreto

Nos agregados reciclados de concreto, o comportamento de aderência com o aumento da rugosidade apresentou similaridades com o observado nos agregados de tijolo cerâmico, mas com outros aspectos importantes. A análise da ZTI revela que, embora o aumento da rugosidade contribua inicialmente para uma melhor adesão entre a pasta e o agregado, há um ponto em que essa melhoria deixa de ser proporcional. Quando a rugosidade ultrapassa um valor máximo ideal, a aderência diminui, e isso se torna visível pelos vazios observados na ZTI dos agregados mais rugosos em comparação com aqueles de rugosidade natural ou tratados mecanicamente de forma moderada.

HONG *et al.* [27] apontam que, em concretos com agregados graúdos de rugosidade moderada, os ganhos mecânicos são expressivos. Superfícies mais rugosas tendem a melhorar parâmetros como resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade e índice de Poisson. Entretanto, após um certo nível de rugosidade, esses ganhos começam a diminuir e os parâmetros mecânicos crescem de forma mais lenta. Isso indica que existe um limite ideal de rugosidade a ser mantido para otimizar a aderência e o desempenho mecânico global. A Figura 10c exemplifica esse fenômeno, mostrando que os agregados com rugosidade excessiva apresentam fissuras e vazios maiores na ZTI, comprometendo a integridade da ligação.

Na Figura 10a, os agregados reciclados de concreto sem processos abrasivos apresentam uma ZTI mais densa e homogênea com uma menor presença de poros e fissuras. Isso demonstra que, em sua condição natural, esses agregados podem manter uma aderência adequada sem a necessidade de tratamentos. No entanto, quando submetidos a tratamento mecânico e lixamento (Figura 10b), ocorre um aumento nos poros e fissuras na ZTI. Esse comportamento sugere que, embora o tratamento tenha como objetivo remover a argamassa aderida e expor uma superfície mais áspera para melhorar a adesão, pode ultrapassar o ponto ideal de rugosidade.

A remoção excessiva de material durante o tratamento mecânico, especificamente em agregados reciclados que já estão naturalmente limpos, pode expor a superfície a níveis de rugosidade excessivos. Nessa condição, a aderência pasta-agregado pode ser comprometida pois a argamassa cimentícia tem dificuldade em penetrar nas depressões e vales profundos criados pela rugosidade excessiva.

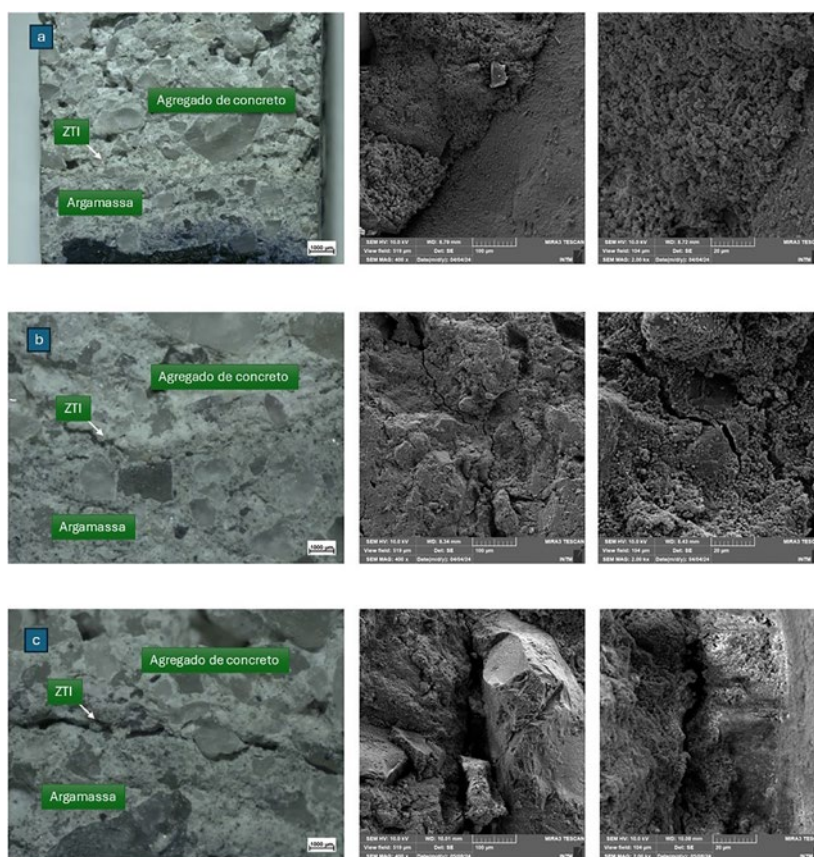


Figura 10: Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de concreto por Microscopia Eletrônica de Varredura na condição (a) natural, (b) com tratamento mecânico, (c) com lixamento simples.

A Figura 11 mostra a superfície do agregado na condição natural visualizada no microscópio confocal. Observa-se uma topografia com vales e depressões bem definidos e alternados. Esse agregado apresentou melhor aderência na análise por microscopia eletrônica de varredura. Em contrapartida, a Figura 12 mostra a superfície do agregado pós-tratamento mecânico. A conformação da superfície, diferentemente do agregado antes do tratamento, apresenta uma área maior de depressão em relação aos vales.

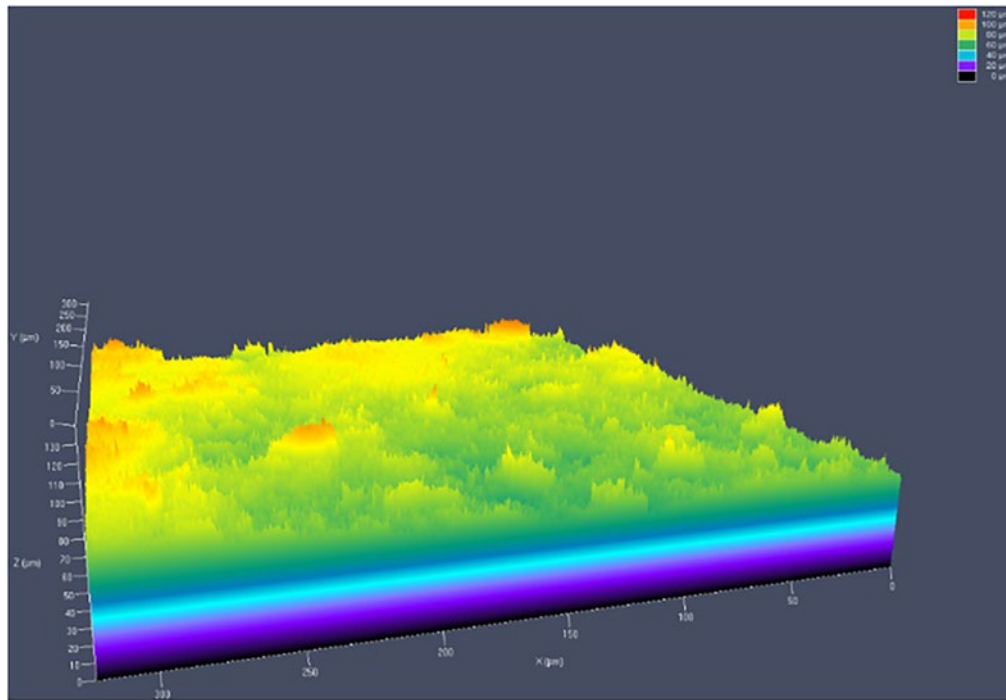


Figura 11: Topografia da superfície do agregado de concreto na condição natural por Microscopia Confocal.

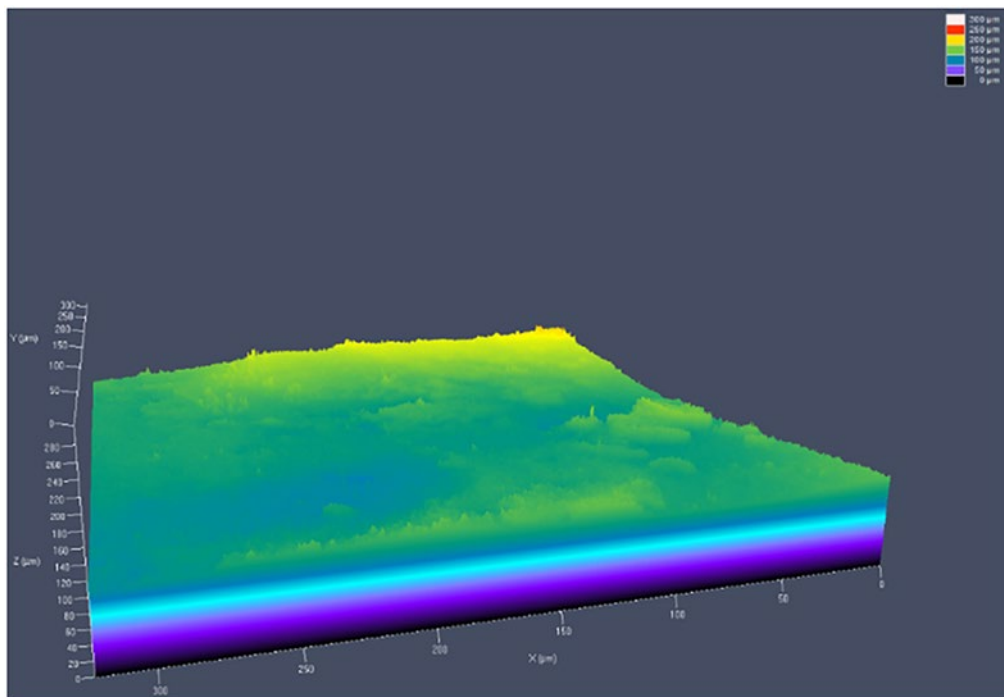


Figura 12: Topografia da superfície do agregado de concreto pós tratamento mecânico por Microscopia Confocal.

Portanto, tanto nos agregados de tijolo cerâmico quanto nos agregados de concreto, a topografia da superfície é um fator determinante para a aderência pasta-agregado. Rugosidades moderadas, com vales e depressões bem definidos e alternados, favorecem a penetração da pasta cimentícia e criam uma ligação interfacial mais robusta. Em contrapartida, rugosidades muito baixas ou excessivamente altas resultam em porosidade e áreas de falha na ZTI, comprometendo a eficácia da ligação. Assim, o controle da rugosidade é determinante para otimizar o desempenho dos agregados reciclados e garantir a integridade estrutural do concreto. A Figura 13 apresenta a semelhança da topografia da superfície do agregado de tijolo e do agregado de concreto que apresentaram melhor aderência pasta-agregado entre todas as superfícies analisadas nesse estudo.

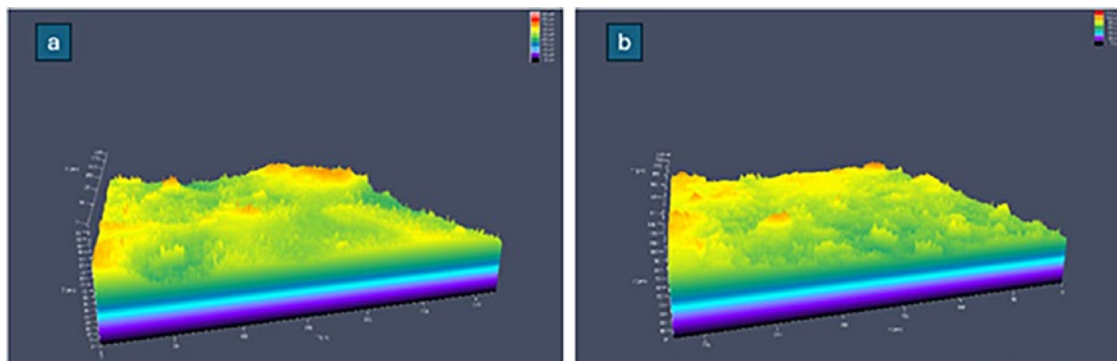


Figura 13: Topografia da superfície do agregado de tijolo pós tratamento (a) e agregado de concreto na condição natural (b).

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, a microscopia confocal e microscopia eletrônica de varredura foram ferramentas importantes na investigação da zona de transição interfacial pasta-agregado com diferentes níveis de rugosidade. As seguintes conclusões foram obtidas:

- A microscopia confocal revela que o tratamento mecânico influencia diretamente a rugosidade de ambos os resíduos, com o concreto sendo mais afetado pelo tratamento na betoneira e apresentando maior irregularidade superficial após os processos de lixamento. O tijolo cerâmico se comporta de maneira mais gradual aos tratamentos, mas também apresenta um aumento substancial na rugosidade ao final do processo de lixamento.
- Nos agregados reciclados de tijolo cerâmico, a conformação da superfície, diferentemente do agregado antes do tratamento, apresenta uma topografia com vales e depressões bem definidos e alternados. O tratamento mecânico se mostra eficaz até certo ponto, sendo necessário controlar o nível de abrasão para otimizar o desempenho do agregado reciclado.
- Nos agregados reciclados de concreto, o controle da rugosidade é fundamental para garantir uma boa aderência e melhorar o desempenho do concreto. O tratamento mecânico deve ser realizado de forma controlada, com o objetivo de encontrar o equilíbrio entre remover a argamassa aderida e não gerar uma superfície excessivamente rugosa que comprometa a interação com a pasta cimentícia.
- A topografia da superfície dos agregados, tanto de tijolo cerâmico quanto de concreto, é importante para a aderência entre a argamassa cimentícia e o agregado. Rugosidades moderadas, com vales e depressões bem definidos, promovem uma melhor penetração da argamassa e uma ligação interfacial mais forte. Rugosidades muito baixas ou excessivamente altas prejudicam essa adesão, criando falhas e comprometendo a integridade estrutural do concreto.
- A rugosidade do agregado reciclado de concreto é maior que o agregado reciclado de tijolo na condição natural. Os valores de rugosidade aumentam com os processos de tratamento mecânico e lixamento.
- O intertravamento do sistema tem influência em rugosidades mais baixas, enquanto em rugosidades mais elevadas prevalece o aumento da superfície de contato pasta-agregado, região frágil na interface.

Em geral, o estudo destaca a importância da análise da rugosidade dos agregados reciclados para o desempenho mecânico do concreto. O tratamento mecânico, além de promover a desintegração da argamassa aderida e a separação de materiais frágeis, mostrou-se eficaz na modificação da topografia dos agregados. A rugosidade é um parâmetro importante, pois superfícies com textura adequada favorecem a aderência com a pasta cimentícia, melhorando a resistência e a durabilidade do concreto. O uso de microscopias de superfície revelou-se uma importante ferramenta para avaliar a qualidade dos agregados graúdos e melhorar o desempenho do concreto com RCD.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] MAZZUCCO, G., SALOMONI, V.A., MAJORANA, C., "A cohesive contact algorithm to evaluate the mechanical behaviour of concrete ITZ at different roughness conditions", *Construction & Building Materials*, v. 294, pp. 123479, Ago. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123479>.
- [2] CEIA, F., RAPOSO, J., GUERRA, M., *et al.*, "Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces", *Construction & Building Materials*, v. 109, pp. 139–145, Abr. 2016. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.002>.
- [3] SUN, C., LANGE, D.A., XIAO, J., *et al.*, "Contact behavior between cracked surfaces of recycled aggregate concrete", *Construction & Building Materials*, v. 155, pp. 1168–1178, Nov. 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.125>.
- [4] GÜÇLÜER, K., "Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete", *Journal of Building Engineering*, v. 27, pp. 100949, Jan. 2020. doi: <http://doi.org/10.1016/j.job.2019.100949>.
- [5] QUDOOS, A., ATTA-UR-REHMAN, KIM, H.G., *et al.*, "Influence of the surface roughness of crushed natural aggregates on the microhardness of the interfacial transition zone of concrete with mineral admixtures and polymer latex", *Construction & Building Materials*, v. 168, pp. 946–957, Abr. 2018. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.205>.
- [6] ZHAO, Y., DUAN, Y., ZHU, L., *et al.*, "Characterization of coarse aggregate morphology and its effect on rheological and mechanical properties of fresh concrete", *Construction & Building Materials*, v. 286, pp. 122940, Jun. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122940>.
- [7] ZHENG, W., SHUI, Z., XU, Z., *et al.*, "Impact of coarse aggregate morphology and separation distance on concrete properties based on visual learning", *Journal of Building Engineering*, v. 89, pp. 109254, Jul. 2024. doi: <http://doi.org/10.1016/j.job.2024.109254>.
- [8] ZAETANG, Y., SATA, V., WONGSA, A., *et al.*, "Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate", *Construction & Building Materials*, v. 111, pp. 15–21, Maio 2016. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060>.
- [9] DOS SANTOS, D.O.J., FONTES, C.M.A., LIMA, P.R.L., "Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal", *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 1, pp. e11801, Maio 2017. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0133>.
- [10] MIKAMI, R.J., KRUGER, P., PEREIRA, E., *et al.*, "Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável", *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 3, pp. e12163, Out. 2018. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0497>.
- [11] NANYA, C.S., DA SILVA FERREIRA, F.G., DA SILVA CAPUZZO, V.M., "Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete", *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 4, pp. e13073, Jan. 2022. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1373>.
- [12] VIANA NETO, L.A., SALES, A.T.C., SALES, L.C., "Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland", *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 1, pp. e-11958, Mar. 2018. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0294>.
- [13] CANTERO, B., SÁEZ DEL BOSQUE, I.F., SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I., *et al.*, "Durability of concretes bearing construction and demolition waste as cement and coarse aggregate substitutes", *Cement and Concrete Composites*, v. 134, pp. 104722, Nov. 2022. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104722>.
- [14] MA, Z., HU, R., SHEN, J., *et al.*, "Chloride diffusion and binding capacity of sustainable cementitious materials with construction waste powder as cement replacement", *Construction & Building Materials*, v. 368, pp. 130352, Mar. 2023. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130352>.

- [15] SANTOS, W.F., QUATTRONE, M., JOHN, V.M., *et al.*, "Roughness, wettability and water absorption of water repellent treated recycled aggregates", *Construction & Building Materials*, v. 146, pp. 502–513, Ago. 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.012>.
- [16] ALQARNI, A.S., ABBAS, H., AL-SHWIKH, K.M., *et al.*, "Influence of treatment methods of recycled concrete aggregate on behavior of high strength concrete", *Buildings*, v. 12, n. 4, pp. 494, Apr. 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings12040494>.
- [17] ABED, M., NEMES, R., LUBLÓY, É., "The impact of time on the heat resistance of self-compacting high-performance concrete incorporated with recycled materials", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 138, n. 1, pp. 35–45, Out. 2019. doi: <http://doi.org/10.1007/s10973-019-08263-z>.
- [18] CHEN, Z., XIAO, J., DING, T., *et al.*, "Push-off test on concrete-concrete interface with different types of concrete after elevated temperatures", *Construction & Building Materials*, v. 377, pp. 131157, Maio 2023. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131157>.
- [19] SHEN, P., GU, Z., LU, J., *et al.*, "Preparation of reactive urchin-like recycled concrete aggregate by wet carbonation: towards improving the bonding capability of the interfacial transition zone in recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites*, v. 143, pp. 105235, Out. 2023. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105235>.
- [20] SUN, E., ZHAO, Y., CAI, R., *et al.*, "Characterization of the microstructure evolution features of various aggregates based on confocal laser scanning microscope", *Construction & Building Materials*, v. 424, pp. 135933, Abr. 2024. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135933>.
- [21] JI, X., CHEN, Y., HOU, Y., *et al.*, "Surface microscopic properties of various aggregates using laser scanning confocal microscope", *Construction & Building Materials*, v. 290, pp. 123222, Jul. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123222>.
- [22] KURTIS, K.E., EL-ASHKAR, N.H., COLLINS, C.L., *et al.*, "Examining cement-based materials by laser scanning confocal microscopy", *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 7, pp. 695–701, Out. 2003. doi: [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00114-2](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00114-2).
- [23] PIRANGI, L., FÁBIA, L., GOMES DE ANDRADE, K., *et al.*, "Desenvolvimento e caracterização de concreto sustentável com resíduos de conchas marinhas", *Ambiente Construído*, v. 24, pp. e131502, Jan. 2024. doi: <http://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100723>.
- [24] LOPES ESTOLANO, A.M., CRUZ OLIVEIRA, P.D.S., JOSÉ DA SILVA, F., *et al.*, "Avaliação por microscopia eletrônica e de força atômica para análise do comportamento abrasivo de compósitos com carbetto de silício", *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 28, n. 2, pp. e20220335, Abr. 2023. doi: <http://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0335>.
- [25] FICKER, T., MARTIŠEK, D., JENNINGS, H.M., "Roughness of fracture surfaces and compressive strength of hydrated cement pastes", *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 6, pp. 947–955, Jun. 2010. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.002>.
- [26] GADELMAWLA, E.S., KOURA, M.M., MAKSOUD, T.M.A., *et al.*, "Roughness parameters", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 123, n. 1, pp. 133–145, Abr. 2002. doi: [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2).
- [27] HONG, L., GU, X., LIN, F., "Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete", *Construction & Building Materials*, v. 65, pp. 338–349, Ago. 2014. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.131>.