



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA - CCEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS

AMANDA MARQUES LOPES ESTOLANO

**EFEITO DA RUGOSIDADE DE AGREGADOS DE RCD, TRATADOS
MECANICAMENTE, EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS SUSTENTÁVEIS**

Recife
2024

AMANDA MARQUES LOPES ESTOLANO

**EFEITO DA RUGOSIDADE DE AGREGADOS DE RCD, TRATADOS
MECANICAMENTE, EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS SUSTENTÁVEIS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciência de Materiais.

Área de concentração: Materiais não metálicos

Orientador: Prof^ª. Dr^ª Nathalia Bezerra de Lima

Orientador externo: Prof^º Dr^º Felipe Mendes da Cruz

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Estolano, Amanda Marques Lopes.

Efeito da rugosidade de agregados de RCD, tratados mecanicamente, em compósitos cimentícios sustentáveis / Amanda Marques Lopes Estolano. - Recife, 2024.
95f.: il.

Inclui referências e apêndices.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Ciências de Materiais, 2024.

Orientação: Nathalia Bezerra de Lima.

Coorientação: Felipe Mendes da Cruz.

1. Concreto; 2. Resíduo; 3. Tratamento mecânico; 4. Rugosidade. I. Lima, Nathalia Bezerra de. II. Cruz, Felipe Mendes da. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

AMANDA MARQUES LOPES ESTOLANO

**EFEITO DA RUGOSIDADE DE AGREGADOS DE RCD, TRATADOS
MECANICAMENTE, EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS SUSTENTÁVEIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciência de Materiais.

Aprovada em: 28/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a Nathalia Bezerra de Lima (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Alexandre Duarte Gusmão (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Eliana Cristina Barreto Monteiro (Examinadora Externa)
Universidade de Pernambuco

Prof^o. Dr. Manoel Henrique da Nóbrega Marinho (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Prof^a. Dr^a Yêda Vieira Póvoas (Examinadora Externa)
Universidade de Pernambuco

RESUMO

A indústria da construção civil é reconhecida como uma das principais geradoras de resíduos devido aos processos de construção e demolição. O reuso dentro da própria indústria ainda é limitado devido à variabilidade desses resíduos para aplicações em materiais cimentícios. A resistência mecânica de concretos e argamassas são influenciados pelas características dos agregados, incluindo forma, composição e rugosidade. Os agregados reciclados possuem uma superfície mais porosa e composição variável em relação aos agregados naturais, contribuindo com o intertravamento do sistema e aumento da área de transição entre a pasta e o agregado. Este estudo apresenta uma análise da influência da rugosidade de agregados reciclados diante da aderência pasta-agregado em concretos. A metodologia da pesquisa consistiu na utilização do tratamento mecânico dos agregados com o auxílio do equipamento betoneira como modificador de rugosidade superficial e limpeza. 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 resíduos 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. Em contrapartida, rugosidades muito baixas ou excessivamente altas resultam em vazios e áreas de falha na zona de transição interfacial, comprometendo a eficácia da ligação.

Palavras-chave: Concreto; Resíduo; Tratamento mecânico; Rugosidade.

ABSTRACT

The construction industry is recognized as one of the main generators of waste due to construction and demolition processes. Reuse within the industry is still limited due to the variability of this waste for applications in cementitious materials. The mechanical strength of concrete and mortar is influenced by the characteristics of the aggregates, 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. This study presents an analysis of the influence of recycled aggregates' roughness on paste-aggregate adhesion in concrete. The research methodology involved the use of mechanical treatment of the aggregates with the aid of a concrete mixer as a roughness modifier and for cleaning the aggregates. The roughness of the aggregates was varied through mechanical treatment and manual sanding to achieve different levels and was quantified using laser confocal microscopy. Through the mortar immersion method, developed in this study, the interfacial transition zone was analyzed using scanning electron microscopy. The results indicate that mechanical treatment must be carried out in a controlled manner to ensure a balance between removing adhered mortar and avoiding the creation of an excessively rough surface that compromises interaction with the cement paste. It was concluded that surface topography is a determining factor for paste-aggregate adhesion and improvement of 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. In contrast, very low or excessively high roughness results in voids and areas of failure in the interfacial transition zone, compromising the effectiveness of the bond.

Keywords: Concrete; Waste; Mechanical treatment; Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Representação da superfície do agregado graúdo natural (a) e agregado graúdo reciclado (b)	20
Figura 2 –	Limpeza autógena do agregado reciclado de concreto.	26
Figura 3 –	Principais componentes do agregado oriundo de resíduo de construção e demolição	47
Figura 4 –	Distribuição granulométrica do pó fino obtido após o tratamento mecânico	49
Figura 5 –	Tratamento mecânico do RCD: a) resíduo sem tratamento; b) betoneira em operação; c) disco abrasivo; d) resíduo tratado	50
Figura 6 –	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	54
Figura 7 –	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	54
Figura 8 –	Imersão de agregado reciclado de concreto (a) e tijolo cerâmico (b) em argamassa cimentícia	56
Figura 9 –	Corpo de prova de argamassa seccionado transversalmente com agregado reciclado de concreto (a) e tijolo cerâmico (b)	56
Figura 10 –	Corpos de prova seccionados para a análise de microscopia eletrônica de varredura.	57
Figura 11 –	Microscopia confocal e estereoscopia da superfície dos agregados reciclados de tijolo e concreto com diferentes níveis de rugosidade	59
Figura 12 –	Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de tijolo cerâmico na condição (a) natural, b) com tratamento mecânico, c) com lixamento simples e d)	63

	com lixamento duplo.	
Figura 13 –	Topografia da superfície do agregado de tijolo na condição natural por Microscopia Confocal	64
Figura 14 –	Topografia da superfície do agregado de tijolo pós tratamento mecânico por Microscopia Confocal	65
Figura 15 –	Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de concreto na condição (a) natural, b) com tratamento mecânico, c) com lixamento simples	67
Figura 16 –	Topografia da superfície do agregado de concreto na condição natural por Microscopia Confocal	68
Figura 17 –	Topografia da superfície do agregado de concreto pós tratamento mecânico por Microscopia Confocal	68
Figura 18 –	Semelhança na topografia da superfície do agregado de tijolo pós tratamento (a) e agregado de concreto na condição natural (b)	69
Figura 19 –	Corpo de prova após o rompimento e identificação dos principais elementos que compõem o agregado reciclado utilizado na composição.	70
Figura 20 –	Resultados de resistência à compressão dos concretos.	71
Figura 21 –	Teste na mesa para o teste de consistência nas amostras de argamassa a) REF, b) RP-V e c) RP	72
Figura 22 –	Resultados de resistência à compressão das argamassas aos 28 dias	66
Figura 23 –	Aspecto do pó disperso no ar durante o tratamento mecânico	75
Figura 24 –	Difratograma do pó reciclado	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Ensaaios químicos do cimento.....	34
Tabela 2 -	Ensaaios físicos e mecânicos do cimento	34
Tabela 3 -	Propriedades físicas dos agregados graúdos naturais e reciclados...	34
Tabela 4 -	Composição química do pó antes e depois do tratamento mecânico.	35
Tabela 5 -	Proporções das misturas de concreto	37
Tabela 6 -	Proporções das misturas de argamassa	38
Tabela 7 -	Parâmetros de teste da Microscopia Confocal.	41
Tabela 8 -	Parâmetros de rugosidade das amostras.....	44
Tabela 9 -	Resultado do teste de consistência das argamassas.....	58
Tabela 10 -	Fluorescência de Raio X (FRX) do pó reciclado.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	12
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	O AGREGADO RECICLADO DE RCD	18
2.1.1	Agregado reciclado de concreto	18
2.1.2	Agregado reciclado de tijolo cerâmico	21
2.3	MÉTODOS DE TRATAMENTO MECÂNICO	23
2.4	CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO	26
2.5	MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM TIJOLO CERÂMICO	30
3	METODOLOGIA	33
3.1	CONCRETOS E ARGAMASSAS COM AGREGADO RECICLADO.....	33
3.1.1	Método de tratamento mecânico.....	35
3.1.2	Preparação dos concretos.....	37
3.1.3	Dosagem das argamassas.....	37
3.1.4	Testes	38
3.2	ENSAIO DE RUGOSIDADE AGREGADO POR IMERSÃO	39
3.2.1	Materiais e tratamento superficial dos agregados	39
3.2.2	Análise de superfície por microscopia confocal	40
3.2.3	Método de análise por imersão em argamassa	41
3.2.4	Análise da zona de transição interfacial por MEV	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	RUGOSIDADE POR MICROSCOPIA CONFOCAL	43
4.1.1	Zona de transição interfacial argamassa-agregado de tijolo cerâmico.....	47
4.1.2	Zona de transição interfacial argamassa-agregado de concreto.....	51
4.2	Análises complementares	55
4.2.1	Resistência à compressão dos concretos	55

4.2.2	Resistência à compressão das argamassas.....	57
4.2.3	Aspectos de toxicidade do pó.....	59
5	CONCLUSÕES.....	63
6	PERSPECTIVAS.....	65
	REFERÊNCIAS.....	66
	APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS E ARGAMASSAS.....	80
	APÊNDICE B – IMAGENS DA ANÁLISE DE ESTEREOSCOPIA E MICROSCOPIA CONFOCAL DOS AGREGADOS	82
	APÊNDICE C – IMAGENS DA ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL AGREGADO-ARGAMASSA NO ESTEREOSCÓPIO E MEV	89

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A geração de resíduos proveniente de atividades humanas, como também a forma de manuseio, armazenamento e descarte podem apresentar sérios riscos ao meio ambiente e à saúde pública. No Brasil, o crescente aumento de produção de resíduos sólidos aliado a práticas de descarte e alto custo com armazenamento resultam, geralmente, em um destino inadequado favorecendo a proliferação de doenças, inundações devido à obstrução de ralos e bueiros, poluição do ar, contaminação dos solos e dos recursos hídricos (Antenor, Szigethy, 2020; Kumar, Banerjee, 2020).

A Construção civil, setor que produziu cerca de 45 milhões de toneladas de RCD em 2022, possui também a potencialidade de reaproveitamento dos resíduos gerados pelas próprias atividades. Dessa forma, além de minimizar o impacto do descarte inadequado e aumento de demanda nos aterros, reduz a extração de matéria prima na natureza. O uso dos diversos tipos de resíduos como substituintes de areia e brita, que são materiais amplamente utilizados nesse setor, são estratégias eficientes de destinação e podem ser utilizados no setor da construção civil em peças para revestimento, argamassas para assentamento de blocos, concretos não estruturais, dentre outros (ABREMA, 2023).

No contexto de reutilização de materiais na construção civil, é possível destacar estudos que possibilitam o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado no concreto (Azevedo *et al.*, 2020; Gomes *et al.*, 2021; Medina Martinez *et al.*, 2022). Embora esses estudos comprovem a viabilidade do uso desses materiais como agregados, o reaproveitamento ainda não é expressivo no setor. Portanto, reutilizar esses materiais na construção é uma forma de diminuir o volume destinado às áreas de armazenamento, promover ações de sustentabilidade e colaborar com ciclo otimizado de vida do produto.

Os resíduos de construção e demolição têm composição variada e a qualidade do material e o comportamento ao ser inserido em concretos e argamassas depende de vários aspectos, como característica dos elementos

originais, composição (proporção relativa de tijolos, fragmentos de pedras, concreto e demais elementos) idade do edifício destruído etc.(Nandal *et al.*, 2022). Embora haja uma grande necessidade do desenvolvimento de soluções alternativas e sustentáveis na indústria da construção, a incorporação de agregados de concreto reciclado pode conferir ao material uma queda significativa nas propriedades físicas e mecânicas. Em contrapartida, métodos de tratamento podem oferecer ao material reciclado uma redução na porosidade e absorção que melhoram a aderência com a nova pasta. Bui (2018) utilizou tratamento químico com silicato de sódio e sílica ativa para revestir os grãos e fortalecer a microestrutura na zona de transição interfacial, reduzindo a quantidade de água na superfície da partícula. Outra forma que favorece a desintegração da argamassa porosa aderida e o fortalecimento da zona de transição é o método mecânico através do equipamento de abrasão Los Angeles com uma ação combinada de abrasão ou atrito, impacto e retificação (Yunusa *et al.*, 2022).

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 à tração. A espessura e a porosidade da ZIT podem variar conforme diversos fatores, incluindo relação água/cimento, dimensões dos agregados, disposição geométrica na amostra e superfícies de contato entre agregados e matriz (Mazzucco, Salomoni e Majorana, 2021).

A rugosidade dos agregados graúdos também é um fator que influencia nas propriedades mecânicas do concreto através da aderência agregado-pasta na zona de transição interfacial. 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 Zona de Transição Interfacial, com consequente aumento da resistência ao cisalhamento na interface (Ceia *et al.*, 2016; Güçlüer, 2020; Sun *et al.*, 2017). 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 (Qudoos *et al.*, 2018a).

De acordo com Zhao *et al.* (2021), o aumento da rugosidade e o formato circular do agregado aumentam a tensão de escoamento e, consequentemente, 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 (Zheng *et al.*, 2024). Embora os agregados reciclados fossem mais fracos que os agregados naturais, as melhorias na resistência à compressão 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 (Zaetang *et al.*, 2016).

No estudo desenvolvido por Santos *et al.* (2017), foi desenvolvido um procedimento para medir a rugosidade de agregados grãos 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 (Abed, Nemes e Lublók, 2019; Alqarni *et al.*, 2022) 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. (2023), essa ação desempenhou um papel fundamental na resistência ao cisalhamento interfacial da interface rugosa. Shen et al. (2023) atribuíram a melhoria da resistência de ligação entre o RCA 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 microscopia de superfície para explorar parâmetros de rugosidade de agregados para concreto. Sun et al. (2024) e Ji et al. (2021) 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 (Kurtis et al., 2003). A utilização de microscopias de superfície para avaliar parâmetros de rugosidade é, de fato, amplamente utilizado em materiais cimentícios (Ji et al., 2021; Lopes Estolano et al., 2023; Pirangi et al., 2024; Sun et al., 2024).

Diante disso, este estudo visa explorar o impacto da rugosidade dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, analisando como a modificação superficial desses agregados por tratamento mecânico pode melhorar a aderência na ZTI e, conseqüentemente, o desempenho

global do material. A abordagem proposta busca contribuir para o desenvolvimento de concretos mais sustentáveis e com melhor desempenho, utilizando agregados reciclados de forma eficiente e econômica na construção civil.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal investigar o efeito da rugosidade dos agregados provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) sobre o concreto, com foco na influência dessa característica na conformação da zona de transição interfacial entre a pasta cimentícia e o agregado.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar o efeito da rugosidade do agregado reciclado misto diante do comportamento mecânico do concreto.
- Propor método de ensaio para avaliar a aderência agregado-pasta.
- Propor um método mecânico para melhoria das propriedades do agregado reciclado.

1.3. JUSTIFICATIVA

A crescente preocupação com o impacto ambiental gerado pela construção civil tem impulsionado pesquisas voltadas para a reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD), que podem contribuir para soluções mais sustentáveis. No Brasil, a produção de RCD alcançou cerca de 45 milhões de toneladas em 2022, e o manejo inadequado desses resíduos pode acarretar graves consequências ambientais e de saúde pública. Entre as soluções propostas para minimizar esses efeitos, o uso de RCD como agregado em concretos tem ganhado relevância, não apenas pela redução do volume destinado a aterros, mas também pela diminuição da extração de recursos naturais.

No entanto, a incorporação de agregados reciclados no concreto apresenta desafios, principalmente no que se refere às propriedades mecânicas e de

durabilidade. Uma das principais questões observadas é a diferença nas características superficiais dos agregados reciclados em comparação com os naturais, especialmente em relação à rugosidade. A rugosidade da superfície dos agregados é um aspecto importante na Zona de Transição Interfacial (ZTI) – região onde ocorre a ligação entre a pasta de cimento e os agregados – que afeta diretamente o desempenho mecânico do concreto. Estudos indicam que a maior rugosidade pode favorecer o intertravamento mecânico entre a pasta e o agregado, melhorando a resistência ao cisalhamento e a microdureza na interface.

Os tratamentos aplicados aos agregados reciclados, como o método com uso de tambores rotativos, visam principalmente a remoção da argamassa aderida, que compromete a qualidade do material. No entanto, essa pesquisa propõe uma investigação do tratamento mecânico com uso da betoneira com o objetivo específico de modificar a rugosidade dos agregados, buscando otimizar a aderência na ZTI e, conseqüentemente, melhorar as propriedades globais do concreto. Esta abordagem inovadora se destaca porque, até o momento, os estudos focam principalmente na remoção da argamassa aderida, sem explorar o potencial do tratamento mecânico como modificador da rugosidade para aprimorar o comportamento do compósito.

Ao propor um tratamento mecânico para aumentar a rugosidade dos agregados reciclados, o presente trabalho pretende não apenas melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, mas também contribuir para a otimização do ciclo de vida dos materiais, promovendo uma construção civil mais sustentável e eficiente. Além disso, ao desenvolver um método específico para avaliar a aderência agregado-pasta, a pesquisa poderá fornecer novos parâmetros técnicos para o uso de RCD em concretos, consolidando sua viabilidade técnica e econômica.

Assim, esta pesquisa se justifica pela necessidade de desenvolver soluções inovadoras que permitam o uso eficiente de agregados reciclados na construção civil, promovendo um material com melhor desempenho e reduzido impacto ambiental. Ao investigar o efeito da rugosidade do agregado e propor um tratamento mecânico como modificador dessa característica, o trabalho contribui para a expansão do conhecimento na área e oferece uma nova perspectiva sobre o reaproveitamento de RCD em concretos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1. O AGREGADO RECICLADO DE RCD

O impacto ambiental do descarte inadequado de resíduos sólidos pode ser minimizado com métodos de reutilização e reciclagem. A construção civil é um setor que contribui para a exaustão de recursos, emissões de CO₂ e, principalmente, para o descarte inadequado de resíduos provenientes de suas atividades. Os resíduos de construção e demolição podem ser utilizados como matéria-prima alternativa para o setor, embora haja grande variabilidade na composição desses materiais.

2.1.1. Agregado reciclado de concreto

As características do agregado reciclado de concreto (ARC) influenciam diretamente no comportamento de concretos e argamassas produzidos a partir dele. Há um esforço nos estudos para que as propriedades do agregado reciclado sejam semelhantes ao do agregado natural, em relação aos aspectos físicos, químicos e microestruturais. Normalmente, o ARC obtido a partir de resíduos de construção e demolição possuem impurezas aderidas na superfície e alguns materiais indesejados que podem influenciar na redução da resistência devido à maior porosidade do material aderido. Por essa razão, métodos de tratamento são importantes para melhorar a qualidade desses agregados sustentáveis. De acordo com Wu et al. (2022), é possível identificar os principais componentes do resíduo de concreto: resíduos de pasta de cimento hidratada, resíduos de argamassa de cimento endurecido e resíduos de concreto.

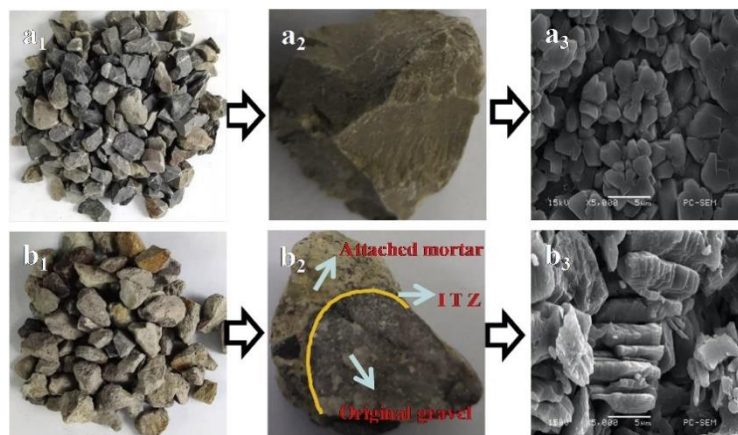
Quanto às propriedades físicas do ARC, a absorção em relação ao agregado natural (AN) é maior e exige o aumento da relação água/cimento na mistura e pode estar associado às impurezas existentes. Esse aumento na relação a/c também pode estar associado a outros aspectos relacionados ao ARC: (i) presença de vazios na argamassa aderida; (ii) textura heterogênea, rugosa e angular; (iii) maior superfície específica (Martínez-García *et al.*, 2021).

No estudo de Alqarni et al. (2022) observou-se um aumento na absorção de água do ARC em relação ao AN, na ordem de sete vezes, devido à argamassa

porosa aderida. Martínez-García et al. (2021) observaram que, embora o aumento da absorção influencie negativamente na resistência mecânica do material, a distribuição granulométrica adequada do ARC gera um melhor empacotamento de partículas. Os índices de densidade nesse tipo de agregado também são inferiores ao AN (Zhu *et al.*, 2020). Outra propriedade importante do agregado é o desgaste por abrasão, que a partir de ensaios em um dispositivo padrão, fornece informações de durabilidade acerca da capacidade do agregado em não se quebrar e/ou desintegrar quando submetido ao atrito. Em relação ao AN, o agregado reciclado apresenta usualmente um desgaste por abrasão maior (Abed, Nemes e Lubláy, 2019; Alqarni *et al.*, 2022) e, da mesma forma que os resultados de absorção, essa propriedade também é fortemente influenciada pelo material aderido. Além disso, a superfície rugosa do ARC contribui no baixo desempenho em relação ao AN, que apresenta uma superfície lisa e microestrutura densa.

Nas Figuras 1(a1), 1(a2) e 1(a3) observa-se o agregado natural em nível macro, o grão e a micrografia obtida no microscópio eletrônico de varredura, respectivamente. Processos de lavagem podem ser suficientes para impedir a interferência de sujidades no desempenho mecânico de concretos e argamassas. Em contrapartida, as Figuras 1(b1), 1(b2) e 1(b3) representam o agregado reciclado nas mesmas perspectivas. Observa-se argamassa aderida no grão e uma zona de transição interfacial (ZTI) (Figura 1(b2)) que fragiliza o grão e é suscetível ao rompimento nesse ponto (Zhu *et al.*, 2020).

Figura 1. Representação da superfície do agregado graúdo natural (a) e agregado graúdo reciclado (b)



Fonte: Zhu et al., 2020

Quanto à composição química dos agregados reciclados de concreto, os elementos óxidos com maior percentual são o óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) (Martínez-García *et al.*, 2021; Prošek *et al.*, 2020) e óxidos alcalinos em menor proporção (Chen *et al.*, 2020). A maior porcentagem de elementos de óxido encontrados são óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Quando o tamanho de partícula aumenta, a quantidade de CaO diminui porque a maioria das partículas de cimento não hidratadas em argamassa velha são mais próximas do tamanho de partículas de cimento. Existe uma relação direta entre tamanho de partícula e teor de SiO_2 , pois o agregado miúdo na argamassa velha é composto, principalmente, por areia natural e partículas de cimento velho. Isso significa que o conteúdo mais antigo de CaO e SiO_2 está disponível para hidratação em um estágio posterior. Além disso, a porcentagem de Al_2O_3 e óxido de ferro (Fe_2O_3) é maior para tamanhos de partícula menores que 0,075 mm em comparação com outros tamanhos. Isso confirma que as partículas predominantemente menores que 0,075 mm são partículas de cimento não hidratadas ou parcialmente hidratadas (Martínez-García *et al.*, 2021).

Ao contrário do cimento, o resíduo de concreto reciclado em pó tem quantidades relativamente altas de óxidos de silício, mas níveis ligeiramente mais baixos de óxido de cálcio. Isso se deve à presença abundante de CaCO_3 (Carbonato de cálcio) e quartzo no resíduo de concreto original (Wu, Wang e Ma, 2022). As seguintes fases podem ser identificadas no ARC através de ensaio de difração e raios-X: quartzo, plagioclásio e feldspato potássico, moscovita, clorita (Prošek *et al.*,

2020), calcita, dolomita. O pó de concreto reciclado consiste principalmente de quartzo, calcita e dolomita. O quartzo se origina principalmente da areia natural, enquanto a calcita e a dolomita vêm do agregado graúdo no concreto original. Quando o pó é incorporado, reduz a formação de C-S-H (hidrato de silicato de cálcio) e hidróxido de cálcio no compósito (Wu, Wang e Ma, 2022).

2.1.2. Agregado reciclado de tijolo cerâmico

A demolição de estruturas urbanas antigas, composta principalmente por alvenaria, gerou uma grande quantidade de resíduos cerâmicos. Além disso, esses resíduos também são obtidos como subproduto da indústria cerâmica. Esse cenário incentivou pesquisas voltadas ao uso de tijolos reciclados como agregados em materiais cimentícios, promovendo uma economia circular e contribuindo para a preservação de recursos naturais (Marín-Cortés et al., 2024).

González et al. (2017) explicam que os resíduos de tijolo cerâmico podem ser classificados em duas categorias: materiais cerâmicos porosos, como tijolos e telhas, que apresentam baixa dureza e alta absorção de água, e materiais impermeáveis ou semipermeáveis, como grés cerâmico e ladrilhos, que possuem maior dureza e menor absorção de água. Essas diferenças impactam diretamente as propriedades do concreto produzido com esses resíduos, resultando em concretos de menor densidade e maior concentração, como observado por Jankovic, Nikolic e Bojovic (2012) que planejou a previsão de substituição até 32,5% dos agregados naturais por tijolos reciclados em blocos de concreto, mantendo a conformidade com as normas europeias.

O uso de agregados finos de tijolo cerâmico, no entanto, pode apresentar alguns desafios. Rosca (2022) investigou a substituição de areia por partículas finas de tijolo reciclado no concreto e concluiu que essas substituições podem reduzir a densidade e a resistência do material.

Por outro lado, Lam, Nguyen e Nguyen (2021) aponta que a utilização de pó de resíduo de tijolo em argamassas mostrou uma queda inicial na resistência, mas com melhoria significativa no longo prazo. Essa melhoria está relacionada ao comportamento pozolânico desses materiais, que interagem quimicamente com o cimento ao longo do tempo. A presença de sílica, alumina e óxido de ferro em

proporções superiores a 70% nos resíduos cerâmicos indica um potencial de atividade pozolânica, favorecendo a durabilidade e a resistência do concreto.

Assim, o uso de resíduos de tijolos cerâmicos como agregados em concretos e argamassas apresenta-se como uma solução sustentável e técnica viável, especialmente para aplicações menos exigentes, como blocos de concreto. Ajustando corretamente as proporções de substituição e considerando as características mineralógicas dos resíduos, é possível desenvolver materiais de construção que atendam às exigências normativa.

2.2. RUGOSIDADE DOS AGREGADOS

A rugosidade dos agregados desempenha é um aspecto importante no desempenho de materiais cimentícios.. Em geral, a influência da rugosidade é evidente na interação entre os agregados e as matrizes cimentícias, afetando diretamente a resistência de ligação e o comportamento da interface, bem como a durabilidade do material final.

Nos estudos de Pan, Oeser e Liu (2025) a rugosidade superficial dos agregados foi investigada com base em simulações de dinâmica molecular, revelando que uma rugosidade moderada melhora a adesão ao aumentar a área de contato entre o betume e o agregado, enquanto uma rugosidade excessiva resulta em falhas de adesão devido ao contato incompleto. Este estudo fornece uma nova perspectiva sobre como a rugosidade pode mitigar os efeitos negativos da umidade na interface betume-agregado, oferecendo diretrizes para a formulação de misturas asfálticas mais resistentes à degradação.

Loz et al. (2021) também ressaltam a importância da rugosidade em diferentes escalas, demonstrando que as características petrográficas e texturais das rochas influenciam diretamente a rugosidade micro e macroscópica dos agregados. Esse estudo amplia a compreensão de como a composição mineral e a granulometria impactam a interface pasta-agregado no concreto, sugerindo que a rugosidade em microescala é fundamental para a resistência de ligação, embora invisível a olho nu.

De forma complementar, Qudoos et al. (2018b) mostraram como a rugosidade da superfície afeta a zona de transição interfacial no concreto. Quanto maior a rugosidade, maior a resistência na zona interfacial, especialmente quando misturas

minerais e látex de polímero são adicionados, contribuindo para um material mais resistente. Além disso, Hong, Gu e Lin (2014a) confirmaram que a rugosidade aumenta as resistências de ligação à tração e ao cisalhamento, mas com uma tendência de estabilização conforme a rugosidade atinge um certo nível.

A pesquisa de Hu et al. (2020) focou na rugosidade dos pavimentos de concreto com agregado exposto, destacando como a exposição controlada do agregado pode melhorar a resistência ao deslizamento, oferecendo uma aplicação prática da rugosidade na segurança viária. Kuang et al. (2019) investigaram misturas asfálticas, demonstrando que a rugosidade do agregado influencia diretamente a estabilidade térmica e o desempenho geral da mistura em condições adversas.

Estudos como os de Santos et al. (2017b) e Kolay e Kayabali (2006) exploraram o tratamento de agregados reciclados e a durabilidade de rochas argilosas, destacando que a rugosidade superficial, aliada à porosidade, afeta diretamente a capacidade de absorção de água e a resistência à deterioração, sugerindo que ajustes na rugosidade podem otimizar o desempenho de materiais reciclados e naturais.

Em geral, a rugosidade dos agregados é um fator determinante no desempenho de materiais cimentícios, influenciando não apenas a resistência de ligação, mas também a durabilidade e a estabilidade do material sob diferentes condições. Através dos diversos estudos apresentados, fica evidente que a manipulação da rugosidade em diferentes escalas oferece uma oportunidade para otimizar o desempenho desses materiais em diversas aplicações, desde pavimentos rodoviários até concreto estrutural, proporcionando avanços significativos na engenharia de materiais.

2.3. MÉTODOS DE TRATAMENTO MECÂNICO EM AGREGADOS RECICLADOS

O tratamento mecânico consiste, basicamente, na remoção das sujidades através do atrito e impacto direto de esferas de aço nos resíduos em algum dispositivo de abrasão. Esse método foi utilizado por KIM et al. (2018) com o intuito de fabricar agregados finos reciclados de alta qualidade com o auxílio de um fluido de lavagem (água proveniente de obras hidráulicas). Foi utilizado uma bola de aço de 45 mm de diâmetro e um tempo do processo de moagem foi fixado em 5 e 10

minutos, considerando o aumento da produtividade em campo. Alqarni et al. (2022) também utilizaram o método mecânico através do equipamento de abrasão Los Angeles, mas sem a utilização do fluido de lavagem. Nesse estudo, utilizou-se 8 esferas de aço de 46 mm e 60 mm de diâmetro nos tempos de 5min, 10min e 15min. O objetivo do ensaio, mesmo utilizando um equipamento destinado a verificação da qualidade dos agregados, passou a ser essencialmente para a retirada de argamassa e pasta aderida ao concreto velho.

Grande parte dos estudos optam por métodos mecânicos apenas para obtenção da granulometria desejada e retirada do material grosseiro, sem preocupação com a retirada do material aderido. Silva et al. (2021) usou o procedimento usual que consiste em: (i) pré peneiramento, (ii) limpeza dos agregados; (iii) remoção de contaminantes e materiais indesejáveis, (iv) lavagem da areia, (v) dimensionamento dos agregados e condicionamento. O peneiramento mecanizado é extensivamente utilizado para essa finalidade de obtenção das diferentes granulometrias. No estudo desenvolvido por Kou et al. (2012), partículas com tamanho entre 150mm e 50mm, e <50mm foram utilizados como agregados graúdos reciclados. As partículas com tamanho menor que 50mm foram novamente triturados para obtenção de dois tipos de agregados graúdos (20/10mm e 10/5mm).

No processo de remoção da argamassa e pasta aderida, as condições de abrasão influenciam diretamente nas propriedades do agregado tratado. A taxa de absorção após o experimento de abrasão, analisada por Kim et al. (2018), foi diminuída com maiores quantidades de material triturado, maior tempo de abrasão e menores volumes do fluido de lavagem. Dessa forma, a condição ideal apontada pelos autores consistiu em: (i) relação peso do agregado para a esfera de aço foi de 1:2, (ii) relação volume do agregado para o fluido de lavagem foi de 1:2 e (iii) o tempo de abrasão foi de 10 minutos. O baixo desempenho dessa propriedade com a presença do fluido, segundo os autores, pode ser explicado pela absorção de energia em queda livre. Portanto, a eficiência na retirada da argamassa e pasta aderida pode ser favorecida através de um processo de abrasão de 10 minutos, um maior número de esferas de aço (Kim, Kim e Kim, 2018) e maior tamanho de esferas (Alqarni et al., 2022).

Quanto aos tratamentos químicos para separação da argamassa e/ou pasta aderida à superfície do agregado reciclado, Kim et al. (2018) utilizou na segunda etapa do estudo o ácido sulfúrico diluído em água neutra como substituinte do fluido

de lavagem com o intuito de remover a pasta sem causar erosão. Nesse processo, o pH da mistura é controlado por um sensor automático anexado à área de alimentação. Os estudos de Alqarni et al. (2022) mostraram outros dois tratamentos químicos: imersão do resíduo em uma solução de pasta de cimento-sílica ativa e em solução de silicato de sódio. Em ambos os métodos, o agregado de concreto reciclado seco foi imerso por 30 minutos nas soluções em diferentes dosagens, retirado e seco. Segundo os autores, a sílica ativa pode auxiliar na percolação dos finos através da argamassa aderida e o silicato de sódio pode aumentar a dureza do material aderido na superfície. Acredita-se que o tratamento de abrasão no equipamento Los Angeles pode ser mais eficiente na remoção da argamassa porosa em relação aos métodos com silicato de sódio e pasta de cimento (ALQARNI et al., 2022). Em contrapartida, o tratamento químico utilizado por Kim et al. (2018) com ácido sulfúrico resultou na eluição contínua de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da pasta de cimento aderida e fácil desprendimento do agregado.

Os estudos de tratamento mecânico com uso da máquina de abrasão Los Angeles também fornecem resultados satisfatórios. No método utilizado por Prasad, Pandey e Kumar (2021), a máquina de abrasão comportou 10kg de agregado por moagem, e o processo foi capaz de remover a argamassa aderida por 5min de rotação sem danos excessivos. Pandurangan, Dayanithy e Om Prakash (2016) também utilizaram esse método que resultou em apenas 5% de argamassa aderida após o processo. Além disso, houve uma redução de 32,3% na absorção do agregado reciclado tratado em relação ao agregado reciclado não tratado. Nos estudos de Huang et al. (2022) foi investigado o efeito da textura da superfície na energia livre de superfície ao aplicar a medição do ângulo de contato. Para os autores, o controle da rugosidade influencia na aderência dos agregados com o ligante asfáltico através do tratamento por três tipos de ferramentas: serra, esmerilhadeira e papel abrasivo. Dessa forma, a rugosidade do agregado pode influenciar no desempenho mecânico do concreto e esse mecanismo será investigado.

O tratamento de limpeza autógena com utilização da betoneira é um tratamento simples e de baixo custo, como elencado por Dimitriou, Savva e Petrou (2018). No estudo desses autores, os agregados reciclados foram submetidos ao processo de mistura na betoneira modificada de 8m^3 a uma velocidade de 10rpm por 5 horas. Durante o processo, a água foi adicionada a fim de auxiliar na remoção das

partículas finas desprendidas. Após o peneiramento, o agregado apresentou propriedades melhores através da redução da absorção e do coeficiente Los Angeles, além da diminuição do teor de argamassa aderida. Com o objetivo de reduzir a quantidade de materiais finos aderidos à superfície dos agregados reciclados, Pepe et al. (2014) utilizou a técnica de limpeza autógena no moinho e a Figura 2 ilustra o mecanismo do método. Com este processo, os ARC foram colocados em um tambor de moinho rotativo e colidem uns contra os outros enquanto removem pedaços de argamassa presos à superfície. Nesse estudo, a resistência à compressão uniaxial e resistência à tração mostraram um efeito positivo e, por sugestão, os autores ressaltaram que aumentar a quantidade de partículas e as dimensões do tambor do moinho pode ter um efeito significativo na eficácia do método.

Figura 2. Limpeza autógena do agregado reciclado de concreto.



Fonte: Adaptado de Pepe et al. (2014) e Tam et al. (2021).

2.4. CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

O principal fator para uma adequada trabalhabilidade do concreto fresco é a demanda de água para atingir uma fluidez que facilite o manuseio, mistura, escoamento, lançamento e adensamento do material. A incorporação de agregados reciclados de construção e demolição no concreto tende a influenciar negativamente

nos aspectos reológicos (AKPINAR; AL ATTAR, 2021; ALQARNI et al., 2022; KIM; JANG, 2022; LIU et al., 2021; MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2021; MI et al., 2020).

Em um concreto demolido com exposição de 25 anos, Akpinar e Al Attar (2021) observaram um aumento no teor de água com a incorporação de ARC através de uma tendência altamente linear. Essa linearidade foi observada por Akpinar e Al Attar (2021) que obtiveram um coeficiente de relação (R^2) de 0,9837 e por Martínez-García et al. (2021) que obtiveram um coeficiente de 0,9692 para agregados finos de concreto. Kim et al. (2022) também demonstraram que os agregados e pó reciclados podem conferir ao material uma diminuição no abatimento com o aumento da taxa de substituição. Essa redução do abatimento pode estar associada a alguns aspectos como: má qualidade da argamassa aderida através da porosidade do material e fragilidade na zona de transição interfacial (ALQARNI et al., 2022), a absorção relativamente alta do agregado reciclado e microestrutura irregular (KIM; JANG, 2022), e a maior superfície específica em agregados mais finos, textura mais heterogênea, rugosa e angular (MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2021). O mesmo ocorre, segundo Liu et al. (2021), com os agregados reciclados mistos de concreto e tijolo, e que esse efeito pode ser compensado com técnicas de pré-umedecimento da mistura.

O comportamento mecânico do concreto pode ser alterado por alguns aspectos, como por exemplo, características dos materiais e dosagem. Em geral, a incorporação do agregado reciclado ao concreto tende a reduzir as propriedades mecânicas devido à porosidade e, conseqüentemente, maiores quantidades de água na mistura. Amorim Júnior et al. (2019) associam o aumento da relação a/c com a maior probabilidade de formação de uma película ao redor do agregado que enfraquece ainda mais a zona de transição. Há queda no desempenho mecânico quando se insere resíduos no processo e Akpinar e Al Attar (2021), Zhu et al. (2020) e Patra et al. (2022) associam essa redução com a presença de argamassa velha aderida à superfície dos agregados reciclados que possui menor superfície específica, natureza porosa e maiores absorções de água em relação aos agregados naturais. Patra et al. (2022) completa que a redução também está associada ao aumento de finos na mistura oriundos do processo de trituração do agregado reciclado.

Amorim Júnior et al. (2018) também observaram a queda na resistência à compressão com o aumento do teor de resíduo e associou ao aumento da relação

água/cimento da mistura, além do agregado reciclado ser menos resistente que o agregado natural devido à existência de uma fraca zona de transição entre a argamassa aderida e o concreto velho. Xia et al. (2021) complementam que o aumento do tamanho máximo da partícula contribui para o aumento da superfície específica em contato com a matriz da argamassa velha e o aparecimento de defeitos no agregado reciclado.

No estudo desenvolvido por Akpınar e Al Attar (2021), a dosagem que utilizou 100% de agregado graúdo reciclado atingiu resistência à compressão de 49MPa indicando a possibilidade da substituição total em concretos para fins estruturais. Patra et al. (2022) explicam que, em alguns casos, a utilização do agregado pode não apresentar queda substancial de resistência à compressão e pode ser explicado pelo comportamento da pasta em penetrar nos poros e fraturas do agregado conferindo melhor interação na zona de transição interfacial agregado reciclado-pasta.

O estudo de Geng et al. (2019) utilizou concretos reciclados com idades distintas: 1, 18 e 40 anos. O concreto reciclado com idade de 1 ano foi desenvolvido e armazenado em laboratório, sem influência de argamassa aderida na superfície. Os demais, foram recolhidos de construções existentes. Katz e Kulisch (2017) pontuam que os materiais cimentícios com agregado reciclado produzido em laboratório possuem um comportamento menos complexo e variável em relação ao agregado proveniente de usinas de reciclagem. Reforçando as observações feitas por Akpınar e Al Attar (2021) e Zhu et al. (2020) quanto à fragilidade do agregado devido ao material aderido, o concreto sem a interferência desse material obteve resistência superior aos concretos produzidos com resíduos de 18 e 40 anos, e aproximou-se da resistência à compressão do concreto de referência, com redução de apenas 0,76%. Ainda nesse estudo, os concretos produzidos com agregados com mais tempo de serviço obtiveram menores valores de resistência, e os autores atribuíram aos efeitos combinados de intemperismo e erosão. O fortalecimento da zona de transição do agregado reciclado mais jovem pode estar associado às reações de hidratação incompletas na argamassa residual e ao surgimento de novas reações químicas com a nova pasta de cimento.

No estudo desenvolvido por Alqarni et al. (2022), a redução de resistência à compressão atingiu 56,7% com a substituição total do agregado graúdo por agregado de concreto reciclado. Esse resultado pode ser explicado pelo uso de um

concreto de menor resistência preparados para essa finalidade, variando de 15 a 20 MPa. Outra variável são as características do agregado natural, para confecção de um concreto de alta resistência. Para isso, os autores utilizaram um agregado gráúdo de calcário em que a abrasão obtida foi de 22% e, em contrapartida, utilizaram um agregado reciclado com abrasão Los Angeles de 38,6%.

A qualidade do resíduo de concreto reciclado utilizado como agregado impacta fortemente nas propriedades do concreto novo. A absorção do agregado reciclado, por exemplo, é um indicativo do desempenho do concreto sustentável. Nos estudos de Akpinar e Al Attar (2021), Amorim Júnior et al. (2019), Amorim Júnior et al. (2018), Geng et al. (2019) e Patra et al. (2022), a absorção de água dos agregados reciclados gráúdos correspondeu a valores entre 3,5% e 6,5%, enquanto o estudo de Alqarni et al. (2022) com agregados de baixa qualidade obteve, em média, 8,2%. Quanto aos agregados reciclados miúdos as taxas de absorção são mais elevadas, como observado nos estudos de Abbaspour et. al (2016), que obtiveram o valor médio de absorção de água de 13,06%.

Pereira et al. (2012) observaram que, dentre as propriedades analisadas, incluindo a resistência à compressão, a incorporação de agregados miúdos de concreto reciclado afetou negativamente os resultados. Ainda nesse estudo, a resistência à abrasão foi a propriedade mais afetada com a incorporação, conclusão também obtida por Wang et al. (2019). De forma similar, Wu et al. (2022) testaram o uso de agregados reciclados em concreto permeável em teores até 100% e obtiveram uma redução expressiva de resistência à compressão em até 15,7%. Para os autores, com esse tipo de concreto, o teor razoável para substituição seria de 50%, embora a redução em relação ao concreto de referência ainda persista em todos os teores analisados.

As características físicas e mecânicas do concreto contendo resíduos de construção e demolição são determinantes para identificar aspectos de durabilidade, ou seja, se o material tende a resistir aos agentes externos e proteger a armadura adequadamente. Alguns testes podem ser feitos para avaliar a eficiência das espessuras de cobertura do concreto na proteção à armadura, como é o caso de testes de migração de íons cloreto, resistividade, porosidade e carbonatação acelerada.

De acordo com os estudos desenvolvidos por Amorim Júnior et al. (2019), os concretos com a incorporação de resíduo são mais suscetíveis aos cloretos, que

levam menos tempo para saturar e atravessar a espessura de cobrimento. Os resultados mostraram que o coeficiente de difusão e o fluxo foram intensificados com o aumento do teor de resíduo e, conseqüentemente, da relação a/c. Portanto, os cloretos se difundem mais rapidamente nos concretos com resíduos, e isso acelera a oxidação do aço no concreto armado. Analogamente, nos estudos desenvolvidos por Wang et al. (2019) e Zhu et al. (2020), o aumento no teor de resíduo de concreto aumentou a porosidade e, conseqüentemente, facilitará a entrada de agentes agressivos. Em contrapartida, baixos teores podem retardar a deterioração do concreto através de uma zona de transição com maior compacidade.

A porosidade do material intensifica a entrada de agentes agressivos e é um parâmetro importante na durabilidade do concreto. Esses agentes são transportados do meio externo para o interior do material pela água através dos poros interligados. Amorim Júnior et al. (2019) reforçam a relação direta entre a porosidade e a relação a/c, além de afirmar que os concretos com resíduo apresentam maior porosidade que os concretos com agregados naturais. Além disso também observaram que o concreto sustentável com relação a/c de 0,55 obteve resultado semelhante de porosidade aparente em relação ao concreto sem resíduo com relação a/c de 0,45. O aumento da quantidade de poros está associado à absorção do agregado reciclado, resultando em maior sucção de água (Amorim Júnior, Silva e Ribeiro, 2018).

2.5. MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE TIJOLO CERÂMICO

A incorporação de agregados reciclados de tijolos cerâmicos no concreto apresenta um conjunto variado de benefícios e desafios, conforme descrito por diversos estudos. Um dos aspectos positivos mais destacados é a contribuição para a sustentabilidade ambiental, uma vez que essa prática reutiliza resíduos de construção e demolição, minimizando o esgotamento de recursos naturais e o impacto ambiental, conforme mencionado por Hussein et al. (2022), Su et al. (2024), Yang et al. (2023) e Atyia, Mahdy e Abd Elrahman (2021).

No estudo de Hussein et al. (2022), a substituição total de agregados naturais por tijolos triturados na produção de concretos leves estruturais foi viabilizada com

resultados encorajadores. A resistência à compressão alcançada variou entre 39,5 e 41,5 MPa, quando se utilizou sílica ativa e metacaulim como substituição parcial do cimento. Além disso, o concreto apresentou bom desempenho sob exposição a altas temperaturas, indicando que o uso de agregados reciclados pode contribuir para a durabilidade do concreto em condições extremas.

Por outro lado, Ibrahim et al. (2013) também estudou a utilização de tijolos cerâmicos como substituto de agregados graúdos em concretos espumados leves. Ele observou que, ao substituir 25% do agregado graúdo por tijolos de barro, a resistência à compressão foi a mais alta, atingindo 25 MPa. No entanto, conforme a porcentagem de tijolos aumentava, houve uma queda significativa na resistência, indicando que o uso excessivo de agregados reciclados pode comprometer o desempenho mecânico do concreto.

Su et al. (2024) exploraram o uso de agregados de tijolos reciclados (RBA) em concreto curado a vapor (HCC). Eles demonstraram que a adição de 10-20% de RBA melhorou a resistência à compressão em até 11,3% e também aumentou a impermeabilidade do concreto. Isso demonstra que, em proporções adequadas, o uso de RBA pode compensar os efeitos prejudiciais causados pela cura a vapor e contribuir para a durabilidade de longo prazo do concreto.

Por outro lado, Yang et al. (2023) investigou a incorporação de resíduos de tijolos de demolição na produção de concretos leves. Ele constatou que, embora a trabalhabilidade do concreto fosse comprometida com o aumento da substituição por resíduos de tijolos, a resistência à compressão foi aprimorada, atingindo 39,4 MPa em 28 dias com a substituição de 20% dos agregados leves por tijolos de demolição.

Os desafios dessa incorporação também são evidentes no estudo de Joyklad et al. (2022) que aponta que o concreto de agregados de tijolos de argila reciclados (CBA) sofre uma significativa perda de resistência à compressão, tornando-o mais adequado para aplicações não estruturais. Para mitigar essa limitação, Joyklad propôs o uso de reforço externo com folhas de Fiberglass Chopped Strand Mat (FCSM), que se mostrou eficaz para melhorar a resistência à compressão e deformação, independentemente do tipo de agregado de tijolos utilizado.

Outra abordagem interessante foi trazida por Yuan et al. (2023), que investigaram o impacto da incorporação de fibras de basalto em concreto com agregados de tijolos reciclados. Eles observaram que a adição de fibras de basalto aumentou a resistência à compressão e melhorou o modo de falha do concreto,

especialmente quando 40% do agregado reciclado foi utilizado com 2 kg/m³ de fibra de basalto.

Em termos de sustentabilidade, o estudo de Sharma, Sharma e Parashar (2022) destaca a vantagem ambiental de utilizar resíduos de tijolos e vidro reciclado como substitutos de agregados graúdos em concreto convencional. Eles verificaram que, ao substituir 50% dos agregados por resíduos de vidro e tijolos demolidos, o desempenho do concreto foi comparável ao do concreto convencional, com a vantagem de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e a energia incorporada.

No estudo de Atyia, Mahdy e Abd Elrahman (2021), a utilização de resíduos de tijolos de argila triturada (CCB) como substituição de agregados e material cimentício também demonstrou ser uma solução viável para a produção de concreto estrutural leve. Além disso, o CCB moído apresentou atividade pozolânica, permitindo reduzir o teor de cimento sem deterioração significativa nas propriedades do concreto.

Por fim, Pasupathy, Ramakrishnan e Sanjayan (2023) investigaram o uso de resíduos de tijolos em misturas de geopolímeros imprimíveis em 3D. Embora a resistência à compressão tenha diminuído com altos teores de resíduos de tijolos, a incorporação de até 10% de tijolos reciclados melhorou as propriedades endurecidas, além de trazer significativas reduções de emissão de carbono e energia incorporada, contribuindo para a sustentabilidade da construção.

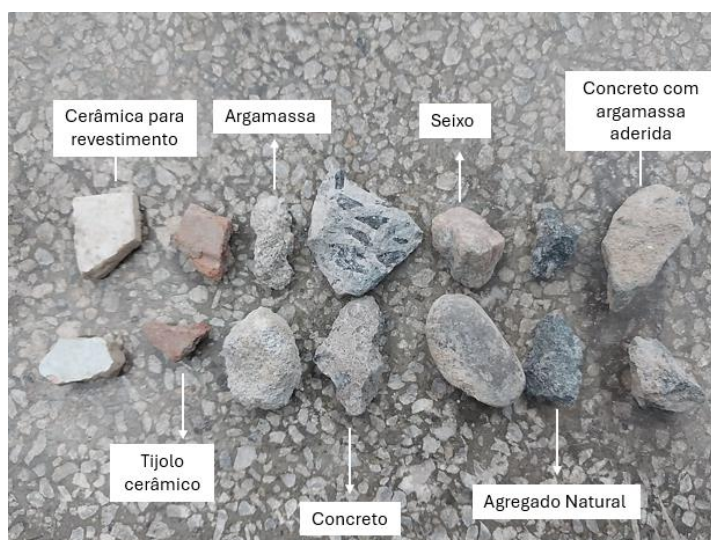
Em conclusão, o uso de agregados reciclados de tijolos cerâmicos no concreto oferece importantes vantagens ambientais e econômicas. No entanto, é necessário um controle rigoroso das proporções de substituição para garantir que as propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e a trabalhabilidade, atendam aos requisitos das aplicações estruturais.

3 METODOLOGIA

3.1. CONCRETOS E ARGAMASSAS COM AGREGADO RECICLADO

O resíduo usado para preparar o concreto foi retirado de uma empresa beneficiadora oriundos de construtoras da cidade do Recife e regiões circunvizinhas. Os resíduos são beneficiados numa granulometria de dimensão máxima característica superior a 4,8mm e possuem composição básica de concreto, brita natural, tijolo cerâmico, argamassa e cerâmica como mostrado na Figura 3. O material fino proveniente do tratamento mecânico utilizado no estudo possui granulometria inferior a 4,25mm e aproximadamente 12% do peso total do resíduo pós-tratamento. A distribuição granulométrica do pó fino por difração a laser e composição química por Fluorescência de Raios X estão expostos na Figura 5 e Tabela 4, respectivamente. O cimento Portland comum utilizado é o CII Z 32 que leva, em sua composição, de 6 a 14% de pozolana e até 10% de material carbonático. Os ensaios químicos, físicos e mecânicos do cimento estão especificados nas Tabelas 1 e Tabela 2. As propriedades físicas dos agregados naturais e reciclados estão listadas na Tabela 3.

Figura 3. Principais componentes do agregado oriundo de resíduo de construção e demolição.



Fonte: A autora (2023).

Tabela 1. Ensaio químicos do cimento.

Teores (%)			
Perda ao Fogo	MgO	SO ₃	Resíduo Insolúvel
7,62	2,57	2,65	12,96

Fonte: Cimento Poty

Tabela 2. Ensaio físicos e mecânicos do cimento

Finura (%)		Blain	Água de	Tempo de	de	Expansibilidade	Resistência à		
		e	consistência	pega		a quente (mm)	Compressão		
		(cm ² /g)	(%)				(MPa)		
#200	#325			Início	Fim		3	7	28
				(min)	(min)		dias	dias	dias
0,31	4,27	4.236	30,02	219	310	0,0	23,7	28,8	26,6

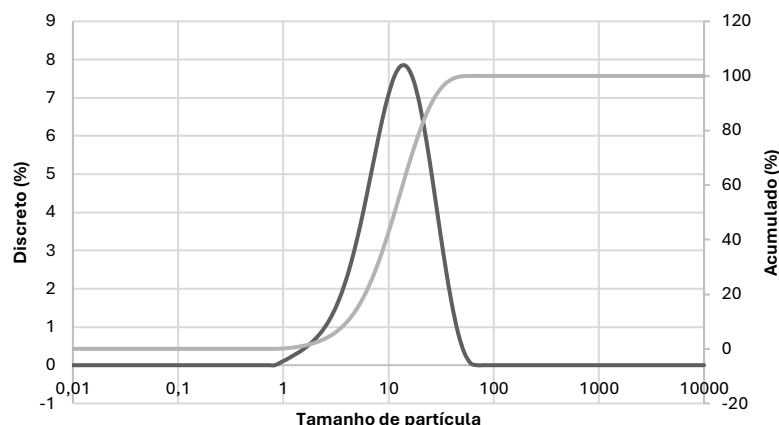
Fonte: Cimento Poty

Tabela 3. Propriedades físicas dos agregados graúdos naturais e reciclados.

Propriedades	Agregado graúdo natural	Agregado graúdo reciclado misto
Densidade seca (kg/m ³)	2,73	2,34
Densidade superfície saturada seca (kg/m ³)	2,74	2,44
Coeficiente de Los Angeles (%)	19	35
Absorção de água (24h) %	0,92	6,72
Módulo de finura	3,22	3,19

Fonte: A autora (2023).

Figura 4. Distribuição granulométrica do pó fino obtido após o tratamento mecânico.



Fonte: A autora (2023).

Tabela 4. Composição química do pó antes e depois do tratamento mecânico.

*Perda ao fogo

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Fe ₂ O _{3T}	SO ₃	Cl	K ₂ O	PF*	Outros
Pré- tratamento (%)	41,46	12,30	13,75	4,82	1,41	3,72	0,79	0,78	2,59	17,00	1,38
Pós- tratamento (%)	39,66	11,62	18,31	5,31	1,21	3,77	1,14	0,76	2,15	14,78	1,29

Fonte: A autora (2023).

3.1.1. Método de tratamento mecânico

As amostras de resíduos, ilustradas na Figura 5a, foram submetidas a um tratamento de limpeza autógena utilizando uma betoneira e um dispositivo abrasivo, com o objetivo de acelerar o processo de limpeza e desintegração dos agregados reciclados mais frágeis. Para cada 20 kg de material, dois dispositivos abrasivos foram inseridos no processo, e uma betoneira operada por 20 minutos, conforme demonstrado na Figura 5b. Para minimizar a perda de material disperso no ar, uma lona plástica foi colocada na entrada da betoneira durante todo o processo de tratamento mecânico. Após esse tratamento, os resíduos foram classificados em dois grupos granulométricos: material com granulometria superior a 4,75 mm,

destinado aos agregados graúdos para a produção de concreto, e material com granulometria inferior a 4,75 mm, destinado aos agregados miúdos para a produção de argamassa. A Figura 6d apresenta a extinção grosseiramente separada. A separação foi realizada por peneiração mecânica. O dispositivo abrasivo, mostrado na Figura 5c, foi introduzido no processo para acelerar a remoção da argamassa aderida aos agregados de concreto, cuja presença poderia comprometer a zona de transição interfacial massa-agregada. O dispositivo utilizado consistia em um disco com diâmetro de 155 mm, revestido com óxido de alumínio de gramatura 80, comumente empregado em lixadeiras, esmerilhadeiras e furadeiras.

Figura 5. Tratamento mecânico do RCD: a) resíduo sem tratamento; b) betoneira em operação; c) disco abrasivo; d) resíduo tratado.



Fonte: A autora (2024).

3.1.2. Preparação dos concretos

A Tabela 5 apresenta as proporções das misturas de concreto utilizando agregado natural (AN), agregado reciclado não tratado (AR) e agregado reciclado tratado (ART). Foram preparadas três misturas de concreto, as quais foram submetidas aos ensaios de resistência à especificidade aos 3, 14 e 28 dias. Em todas as misturas, foi mantido o mesmo consumo de cimento e a relação água/cimento (a/c) de 0,50. Os agregados reciclados foram submetidos a tratamento mecânico, com o objetivo de investigar sua influência no comportamento mecânico do concreto, por meio da remoção parcial da argamassa aderida e da desintegração de agregados com resistência mecânica inferior, como os agregados de argamassa e de tijolo cerâmico.

Tabela 5. Proporções das misturas de concreto.

Mistura	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	NA (kg/m ³)	AR (kg/m ³)	ART (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	a/c
C-REF	410	758,5	988,1	-	-	8,2	0.50
C-AR	410	758,5	-	820	-	8,2	0.50
C-ART	410	758,5	-	-	820	8,2	0.50

C-REF: Concreto de referência; C-AR: Concreto com agregado reciclado não tratado; C-ART: Concreto com agregado reciclado tratado.

Fonte: A autora (2024).

3.1.3. Dosagem das argamassas

A Tabela 6 apresenta as proporções das misturas de argamassa com pó proveniente do tratamento mecânico dos agregados reciclados. Após o processo, todo o material passante na peneira de abertura 4,75mm foi utilizado para substituir totalmente a areia natural. Foram fabricadas três misturas para avaliação do comportamento do agregado fino reciclado quanto a resistência à compressão das argamassas. Além da mistura de referência, outras duas misturas com 100% de substituição do agregado fino natural por agregado fino reciclado. A segunda mistura variou o consumo de cimento em relação a argamassa de referência (A-AR-V) e a

terceira mistura fixou o consumo de cimento em relação a argamassa de referência (A-AR).

Tabela 6. Proporções das misturas de argamassa.

Mistura	Cimento (kg/m ³)	Areia natural (kg/m ³)	Areia reciclada (kg/m ³)	a/c
A-REF	609,0	1126,6	-	0.60
A-PR-V	589,5	-	1090,6	0.60
A-PR	609,0	-	1041,39	0.60

A-REF: Argamassa de referência; A-PR-V: Argamassa com pó reciclado e variação no consumo de cimento; A-PR: Argamassa com pó reciclado e sem variação no consumo de cimento.

Fonte: A autora (2024).

3.1.4. Testes

O ensaio de resistência à compressão do concreto foi realizado nas idades de cura de 3, 7 e 28 dias. A prensa a ser utilizada será da marca INSTROM, modelo 5598, eletromecânica, microprocessada e com célula de carga de 3000 kN. A velocidade de carregamento utilizada será de 0,45 MPa/s, conforme recomenda a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para determinar as fases cristalinas e a estrutura cristalina das amostras do pó, foram analisadas pelo difratômetro da Bruker modelo D2-Phaser, radiação Cu α , comprimento de onda 1,54 Å e as configurações utilizadas nos ensaios foram: passo angular 0,05°, velocidade de varredura de 5,2°/min, faixa angular 5 – 80° (2 θ), e velocidade de rotação do goniômetro de 15 rpm. As ferramentas utilizadas no difratômetro serão um feixe convergente de 1mm, um *air-scatter* de 3 mm e um filtro de Ni de 0,5 mm. O *air scatter* e o filtro de Níquel serão utilizados para diminuir os efeitos da fluorescência do Fe. No teste de granulometria a laser, uma Máquina Laser Mastersizer 2000, da Malvern Instruments, analisou o tamanho das partículas dos materiais.

3.2. ENSAIO DE RUGOSIDADE AGREGADO POR IMERSÃO EM ARGAMASSA

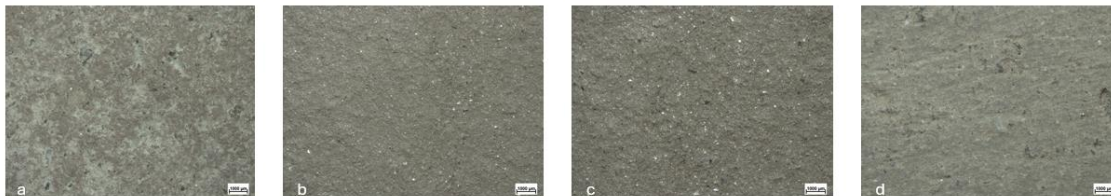
O ensaio de rugosidade por imersão em argamassa foi desenvolvido nesse estudo para elucidar os aspectos que envolvem a topografia da superfície dos agregados e a aderência com a pasta cimentícia. A fim de simular o comportamento do agregado quando inserido no concreto, esse ensaio avaliou a zona de transição interfacial da face do agregado com rugosidade conhecida e a argamassa que o envolve.

3.2.1. Materiais e tratamento superficial dos agregados

Os resíduos de concreto e tijolo cerâmico foram retirados de uma única peça, a fim de não interferir na análise de rugosidade. O resíduo de concreto foi seccionado em peças menores, com aproximadamente 1,5x1,5 cm de superfície e 1,0 cm de espessura. A sobra de tijolo cerâmico foi cortada em peças menores, com cerca de 1,5x1,5 cm de superfície e 0,3 cm de espessura. Foram preparadas três amostras de agregado de concreto e quatro amostras de agregado de tijolo cerâmico. Essas amostras foram comprovadas por estereoscopia, registrando-se imagens de superfícies com três níveis de rugosidade: (i) rugosidade natural, (ii) rugosidade pós-tratamento mecânico e (iii) rugosidade pós-lixamento. Os diferentes processos resultaram em variações significativas na rugosidade. O primeiro tratamento mecânico foi realizado na betoneira, com o objetivo de melhorar o comportamento do material, removendo a argamassa aderida e modificando a superfície do agregado.

As amostras foram submetidas a um processo de limpeza autógena, com o uso de betoneira e de um dispositivo abrasivo, para acelerar a limpeza e a desintegração da parte frágil da superfície do agregado. Para aumentar ainda mais o nível de rugosidade das amostras, foi utilizada lixa de grão nº 50 e foi realizado manual de lixamento. As Figuras 6 e 7 mostram o aumento da rugosidade das superfícies, com imagens obtidas por estereoscopia. A microscopia confocal também comprovou o aumento dos intervalos de rugosidade.

Figura 6. 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.



Fonte: A autora (2024).

Figura 7. 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.



Fonte: A autora (2024).

3.2.2. Análise de superfície por microscopia confocal

As imagens topográficas das superfícies e os parâmetros de rugosidade (R_a – rugosidade média, R_{sk} – skewness e R_{ku} – kurtosis) foram obtidos através de análise em microscópio confocal a laser (Zeiss Axio Imager Z2m) com o auxílio do software Zen e estão descritos na Tabela 7. Os agregados reciclados analisados antes e depois do processo de tratamento mecânico foram o de concreto e tijolo cerâmico, devido a quantidade mais expressiva na composição do resíduo. Os microscópios confocais de varredura são microscópios ópticos com uma profundidade de campo muito estreita. Isso significa que as imagens capturadas por esses microscópios mostram apenas partes dos objetos que estão próximas do plano de foco, enquanto outras partes, mais distantes desse plano, não são visíveis nas imagens. Ao mover o plano de foco através de uma série de posições verticais,

o microscópio gera uma série de seções ópticas. A partir dessas seções, o software reconstrói um mapa digital tridimensional da superfície, também conhecido como relevo de superfície (Ficker et al., 2010).

Tabela 7. Parâmetros de teste da Microscopia Confocal.

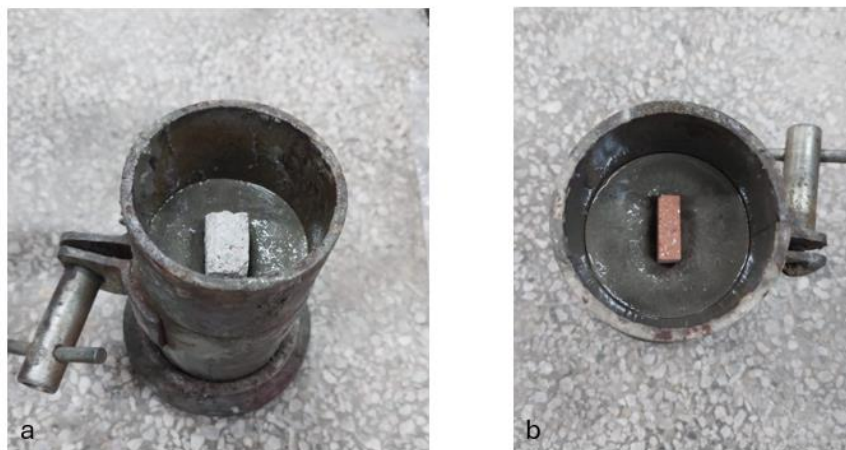
Método de digitalização	Pixel de imagem	Área de digitalização (μm)	Lentes objetivas	Ampliação
Varredura XYZ	1024x1024	256 x 256	MPLAPOLEXT 50x	10x

Fonte: A autora (2024).

3.2.3. Método de análise por imersão em argamassa

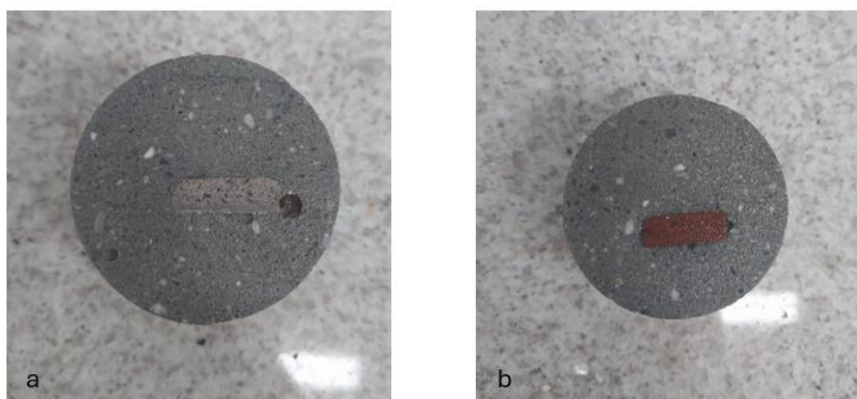
O método de ensaio desenvolvido nesse estudo consistiu em imergir os agregados reciclados com rugosidade conhecida em argamassa cimentícia, como mostrado na Figura 8. Esse processo simula o comportamento do agregado graúdo reciclado no concreto. Uma das faces do agregado, analisada por microscopia confocal, e a 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 9), para permitir a avaliação da zona de transição interfacial da face do agregado com rugosidade conhecida e a argamassa.

Figura 8. Imersão de agregado reciclado de concreto (a) e tijolo cerâmico (b) em argamassa cimentícia.



Fonte: A autora (2024).

Figura 9. Corpo de prova de argamassa seccionado transversalmente com agregado reciclado de concreto (a) e tijolo cerâmico (b).



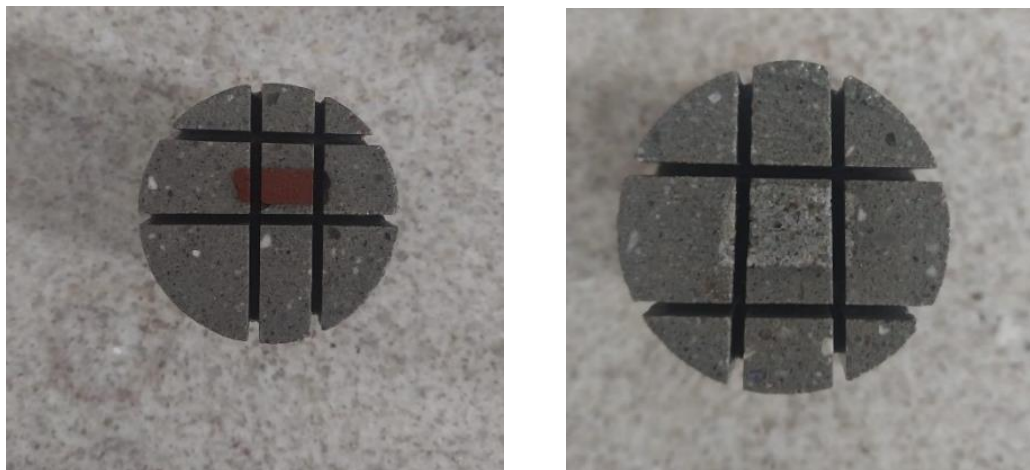
Fonte: A autora (2024).

3.2.4. Análise da zona de transição interfacial por MEV

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 10. A ZTI foi analisada na face com rugosidade do agregado conhecida.

Figura 10. Corpos de prova seccionados para a análise de microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: A autora (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RUGOSIDADE DOS AGREGADOS RECICLADOS POR MICROSCOPIA CONFOCAL

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 platicurtótica, 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 (Gadelmawla et al., 2002). Os parâmetros de rugosidade das amostras estão dispostos na Tabela 8. As imagens de microscopia confocal e estereoscopia estão dispostas na Figura 11 e detalhadas no Apêndice B, comprovando a diferença significativa de rugosidade nos diferentes níveis considerados.

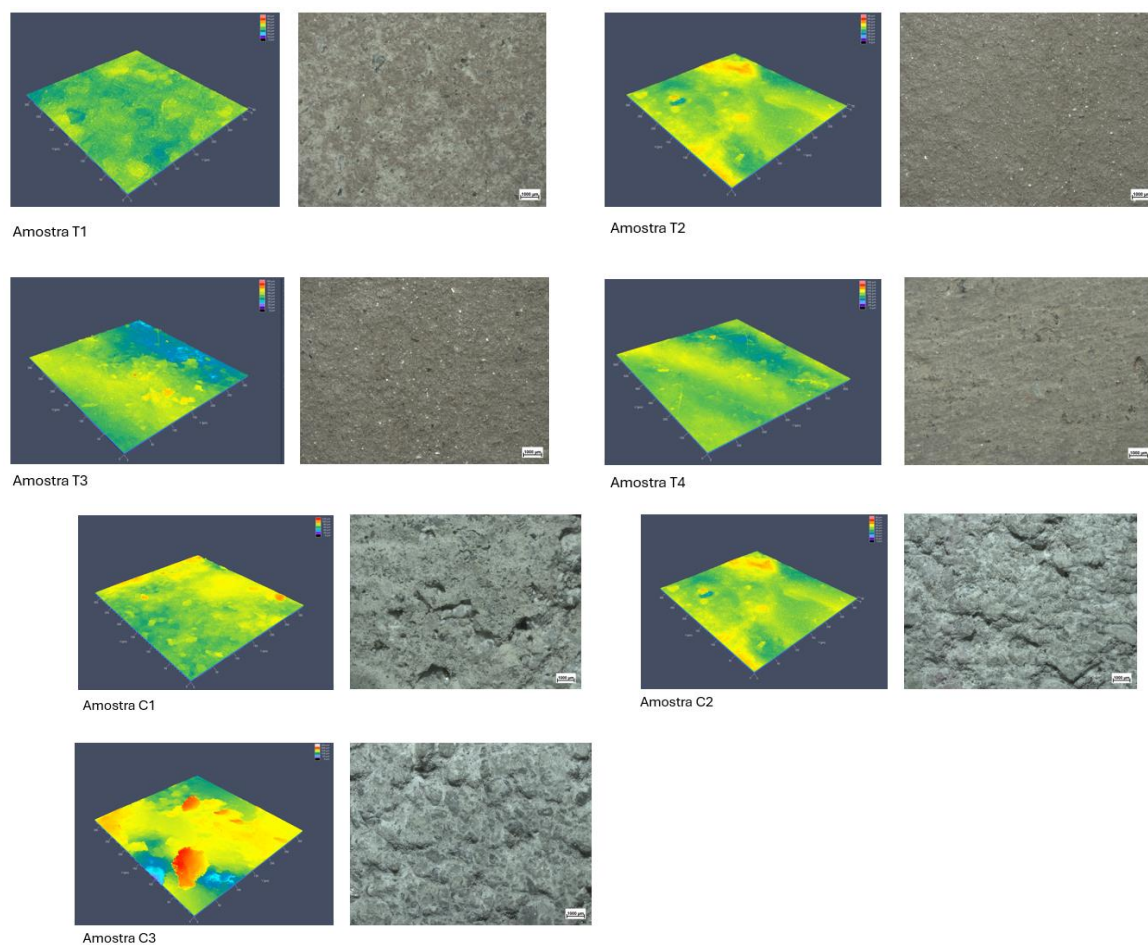
Tabela 8. Parâmetros de rugosidade das amostras.

Amostra	Condição	NR	S	Parâmetros			
				R_a	R_q	R_{ku}	R_{sk}
Resíduo de tijolo cerâmico	Natural	1	T1	3.280	4.140	3.2 30	0.23 6
Resíduo de tijolo cerâmico	Tratamento mecânico	2	T2	4.580	5.931	3.4 73	0.15 3
Resíduo de tijolo cerâmico	Lixamento simples	3	T3	8.642	10.00 6	2.0 13	0.32 9
Resíduo de tijolo cerâmico	Lixamento duplo	4	T4	9.199	11.60 6	2.8 62	- 0.28 0
Resíduo de concreto	Natural	1	C1	7.319	8.775	2.4 07	- 0.04 7
Resíduo de concreto	Tratamento mecânico	2	C2	15.417	20.02 2	4.1 04	1.22 9
Resíduo de concreto	Lixamento simples	3	C3	21.040	26.56 7	3.6 15	- 0.64 2

NR = Nível de rugosidade; S = Sigla.

Fonte: A autora (2024).

Figura 11. Microscopia confocal e estereoscopia da superfície dos agregados reciclados de tijolo e concreto com diferentes níveis de rugosidade.



Fonte: A autora (2024).

A análise dos parâmetros de rugosidade das amostras de resíduos de tijolo cerâmico e concreto, obtidas por microscopia confocal, revela a influência de diferentes tratamentos mecânicos no perfil topográfico das superfícies. Os níveis de rugosidade variam desde a rugosidade natural do resíduo (nível 1) até processos de lixamento simples (nível 3) e duplo (nível 4). Esses ensaios fornecem informações sobre a rugosidade média (R_a), a rugosidade quadrática média (R_q), a curtose (R_{ku}) e a assimetria (R_{sk}), possibilitando uma correlação detalhada entre os níveis de tratamento e as características da superfície.

Os parâmetros de rugosidade das amostras de tijolo cerâmico mostram uma tendência crescente com o aumento das solicitações na superfície:

- Nível 1 (rugosidade natural): $R_a = 3.280$, $R_q = 4.140$, $R_{ku} = 3.230$, $R_{sk} = 0.236$.
- Nível 2 (após tratamento na betoneira): $R_a = 4.580$, $R_q = 5.931$, $R_{ku} = 3.473$, $R_{sk} = 0.153$.
- Nível 3 (lixamento simples): $R_a = 8.642$, $R_q = 10.006$, $R_{ku} = 2.013$, $R_{sk} = 0.329$.
- Nível 4 (lixamento duplo): $R_a = 9.199$, $R_q = 11.606$, $R_{ku} = 2.862$, $R_{sk} = -0.280$.

A transição entre os níveis 1 e 2, após o tratamento mecânico na betoneira, resulta em um aumento significativo nos valores de R_a e R_q , indicando uma maior irregularidade na superfície devido ao desgaste e quebra das partículas do resíduo. Esse aumento é ainda mais pronunciado no nível 3, após o lixamento simples, com os valores de R_a e R_q representando quase o dobro do valor em relação ao nível 2. O lixamento duplo (nível 4) não provoca um aumento tão expressivo em comparação ao lixamento simples, sugerindo que o tratamento adicional produz uma suavização das irregularidades.

O comportamento de R_{ku} e R_{sk} também fornece informações importantes sobre a distribuição dos picos e vales. Nos níveis iniciais (1 e 2), o valor de R_{ku} elevado (>3) indica a presença de picos mais acentuados, enquanto a diminuição de R_{ku} nos níveis 3 e 4 aponta para uma superfície mais homogênea após os processos de lixamento. O valor de R_{sk} , que mede a assimetria da superfície, torna-se negativo no nível 4 (-0.280), indicando a predominância de vales após o lixamento duplo.

Os resíduos de concreto apresentam um comportamento distinto, com rugosidade natural já mais elevada no nível 1 em comparação ao tijolo cerâmico:

- Nível 1 (rugosidade natural): $R_a = 7.319$, $R_q = 8.775$, $R_{ku} = 2.407$, $R_{sk} = -0.047$.
- Nível 2 (após tratamento na betoneira): $R_a = 15.417$, $R_q = 20.022$, $R_{ku} = 4.104$, $R_{sk} = 1.229$.
- Nível 3 (lixamento simples): $R_a = 21.040$, $R_q = 26.567$, $R_{ku} = 3.615$, $R_{sk} = -0.642$.

Nos resíduos de concreto, o tratamento na betoneira (nível 2) provoca um aumento significativo nos valores de R_a e R_q , representando quase o dobro em relação ao nível 1. Esse aumento reflete uma maior fragmentação e exposição das

superfícies mais ásperas do resíduo. O lixamento simples (nível 3) continua essa tendência de aumento na rugosidade, com valores de R_a alcançando 21.040 e R_q chegando a 26.567, sugerindo que o concreto, após ser lixado, exibe uma superfície muito mais irregular com muitos vales.

O parâmetro R_{ku} atinge o valor mais alto no nível 2, indicando a formação de picos mais acentuados após o tratamento mecânico, enquanto o valor de R_{sk} positivo (1.229) nesse mesmo nível sugere uma predominância de picos na superfície. No nível 3, após o lixamento simples, o valor de R_{sk} se torna negativo (-0.642), revelando a formação de vales mais profundos, o que contrasta com o comportamento observado no tijolo cerâmico.

Comparando os dois tipos de resíduos, o concreto apresenta uma rugosidade inicial (nível 1) mais alta do que o tijolo cerâmico, indicando uma maior heterogeneidade do material e a presença de agregados de diferentes tamanhos em sua composição. No entanto, enquanto o tijolo cerâmico apresenta um aumento mais gradual da rugosidade com o avanço dos tratamentos, o concreto exibe um aumento mais expressivo nos níveis 2 e 3.

Os parâmetros de curtose (R_{ku}) e assimetria (R_{sk}) também mostram comportamentos diferentes entre os dois resíduos. No tijolo cerâmico, R_{ku} diminui com os tratamentos, indicando uma suavização dos picos, enquanto no concreto, o aumento de R_{ku} no nível 2 sugere a formação de picos mais afiados, que se tornam menos proeminentes após o lixamento simples.

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

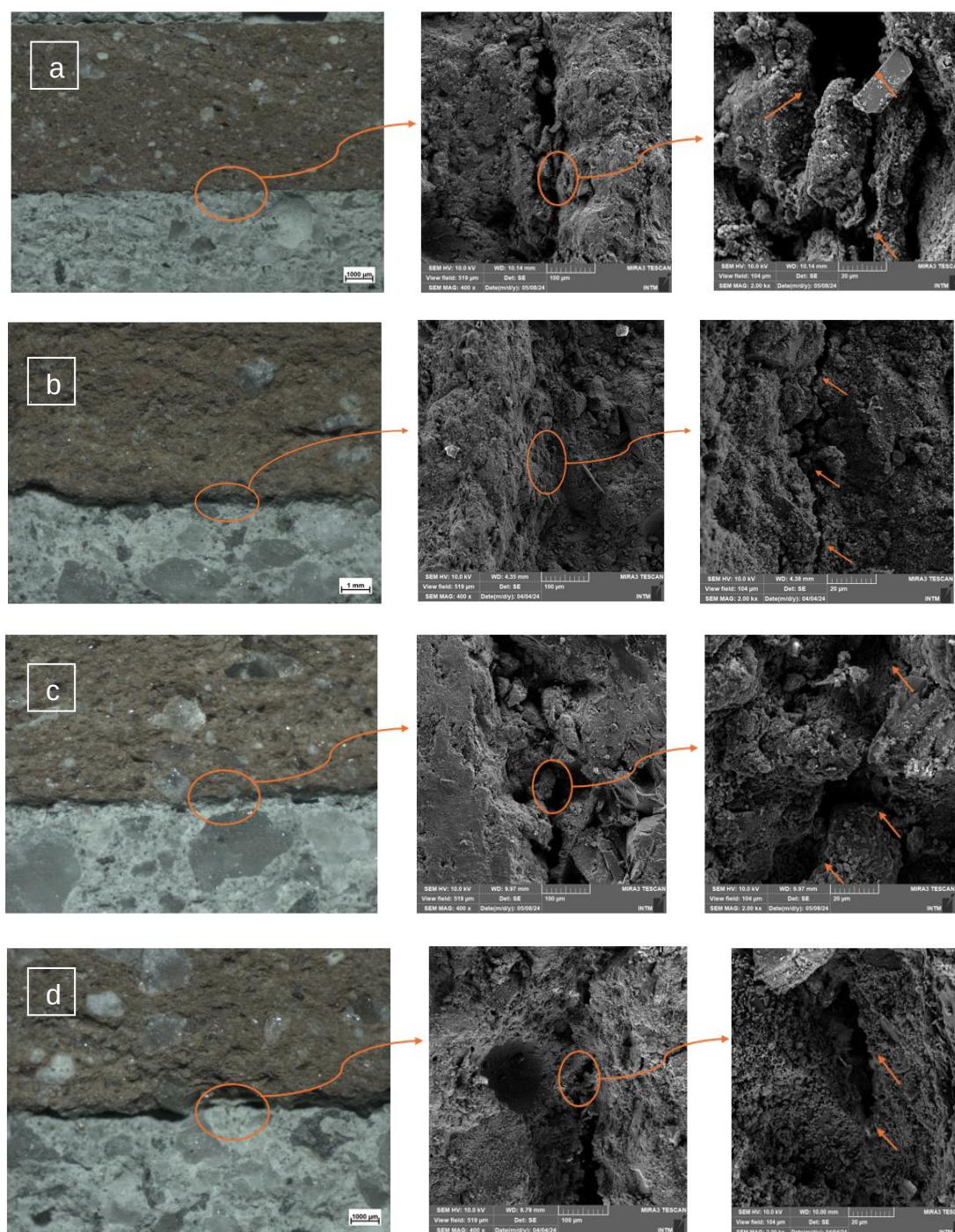
A análise da aderência entre pasta e agregado reciclado de tijolo cerâmico, a partir das imagens da Zona de Transição Interfacial (ZTI), revela aspectos importantes sobre o impacto da rugosidade superficial no comportamento dessa ligação. A Figura 22a mostra o agregado cerâmico com rugosidade natural que, conforme destacado por Santos et al. (2017), é inferior à dos agregados naturais e agregados reciclados de concreto. Essa menor rugosidade implica 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. As imagens podem ser melhor observadas no Apêndice C.

A comparação entre o agregado com rugosidade natural (Figura 22a) e o agregado tratado mecanicamente (Figura 22b) 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 imagens da Figura 22c e 22d, 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: 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, há 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 12. Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de tijolo cerâmico na condição (a) natural, b) com tratamento mecânico, c) com lixamento simples e d) com lixamento duplo.

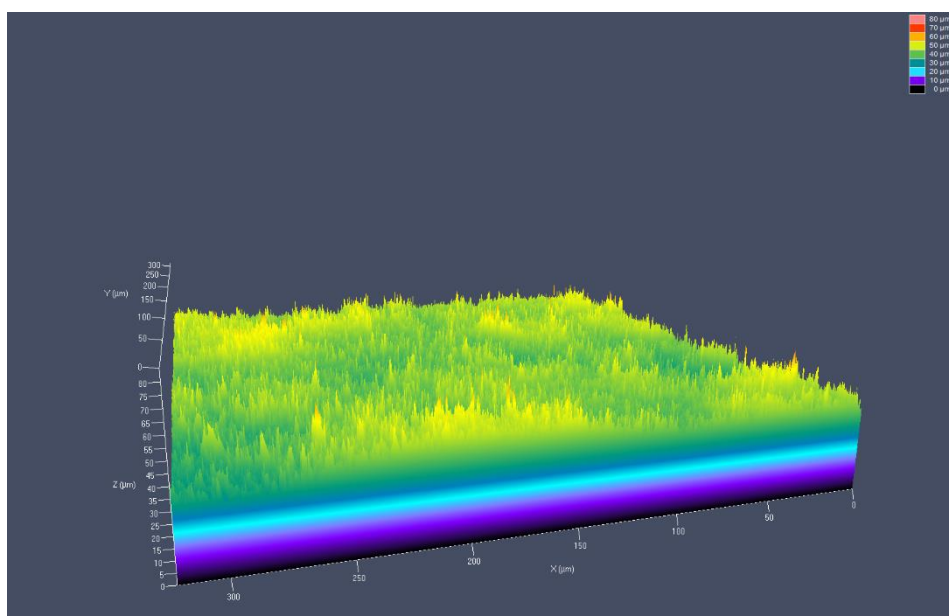


Fonte: A autora (2024).

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 resultam em uma menor

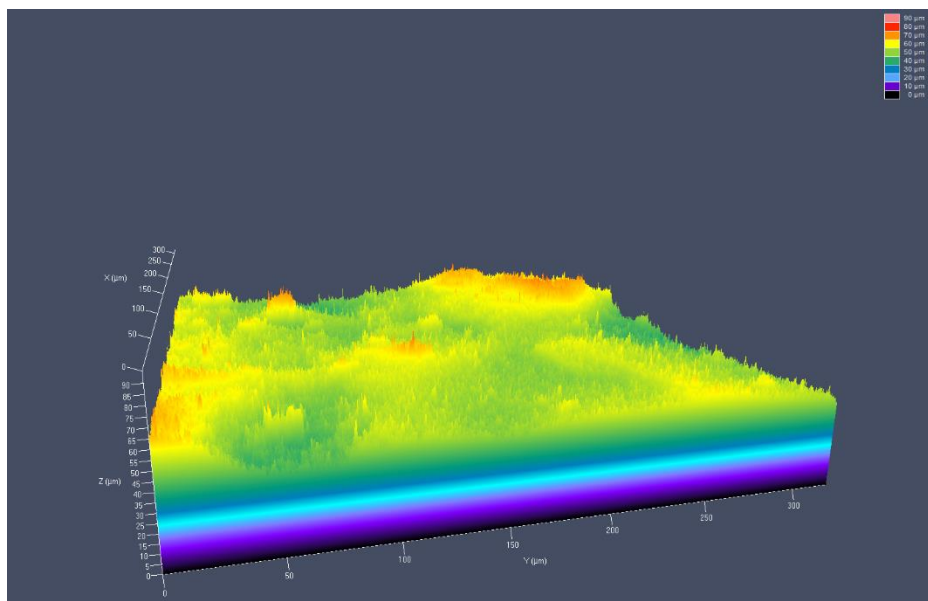
aderência, enquanto rugosidades excessivas podem dificultar a interação da pasta com a superfície, levando à formação de poros e à perda de eficiência na ligação. A Figura 13 mostra a superfície do agregado na condição natural. Observa-se uma superfície com vales em formato de agulha e muito próximos uns dos outros. Essa configuração, como observado na imagem 22a, não apresentou uma boa aderência. Em contrapartida, a Figura 14 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 13. Topografia da superfície do agregado de tijolo na condição natural por Microscopia Confocal.



Fonte: A autora (2024).

Figura 14. Topografia da superfície do agregado de tijolo pós tratamento mecânico por Microscopia Confocal.



Fonte: A autora (2024).

4.1.2. 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 Zona de Transição Interfacial (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.

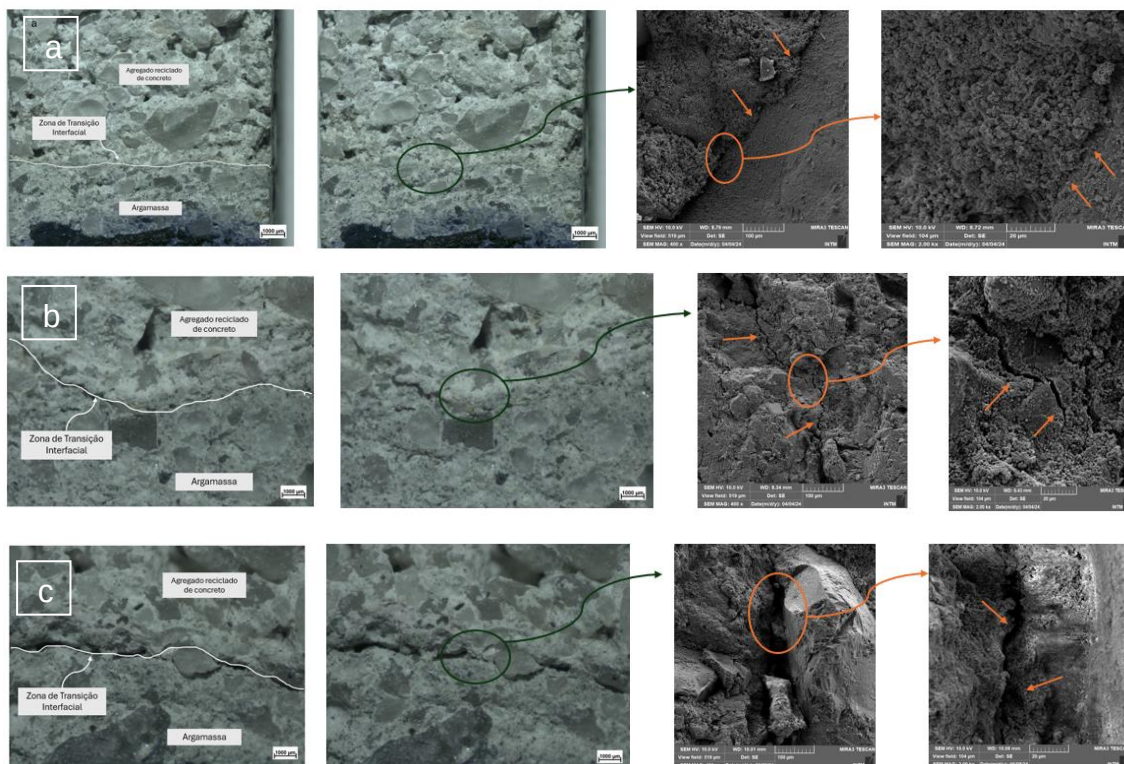
Hong, Gu e Lin (2014b) apontam que, em concretos com agregados graúdos de rugosidade moderada, os ganhos mecânicos são expressivos. Superfícies mais rugosas tendem a melhorar parâmetros como resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade e índice de Poisson. Entretanto, após um 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

15c exemplifica esse fenômeno, mostrando que os agregados com rugosidade excessiva apresentam fissuras e vazios maiores na ZTI, comprometendo a integridade da ligação.

Na Figura 15a, 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 15b), 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, particularmente em agregados reciclados que já estão naturalmente limpos, pode expor a superfície a níveis de rugosidade excessivos, como observado na Figura 25b. 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. Essa porosidade adicional e as fissuras na ZTI indicam que, ao passar de um certo limite, a aspereza da superfície passa a atuar de forma negativa, criando áreas de falha na interface.

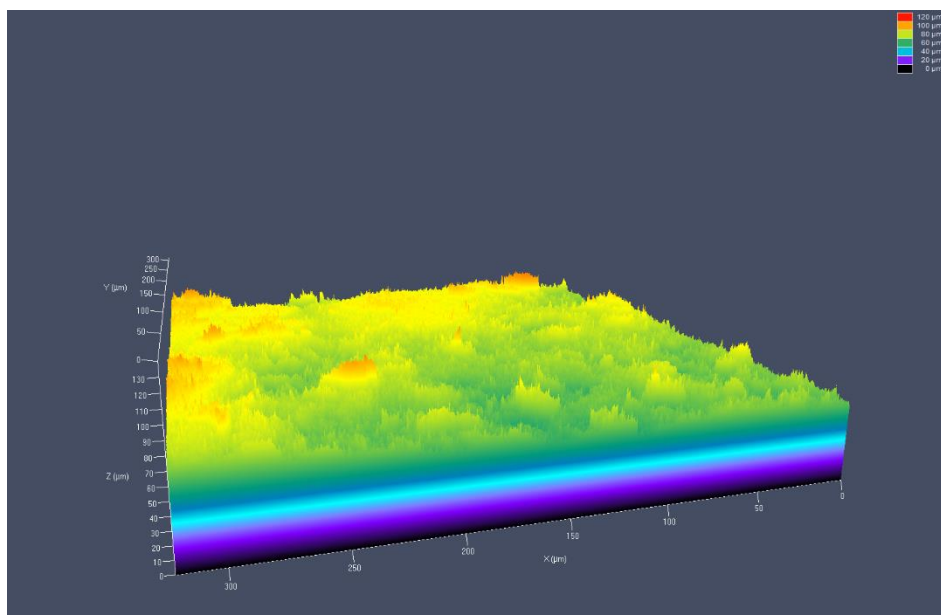
Figura 15. Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de concreto na condição (a) natural, b) com tratamento mecânico, c) com lixamento simples.



Fonte: A autora (2024).

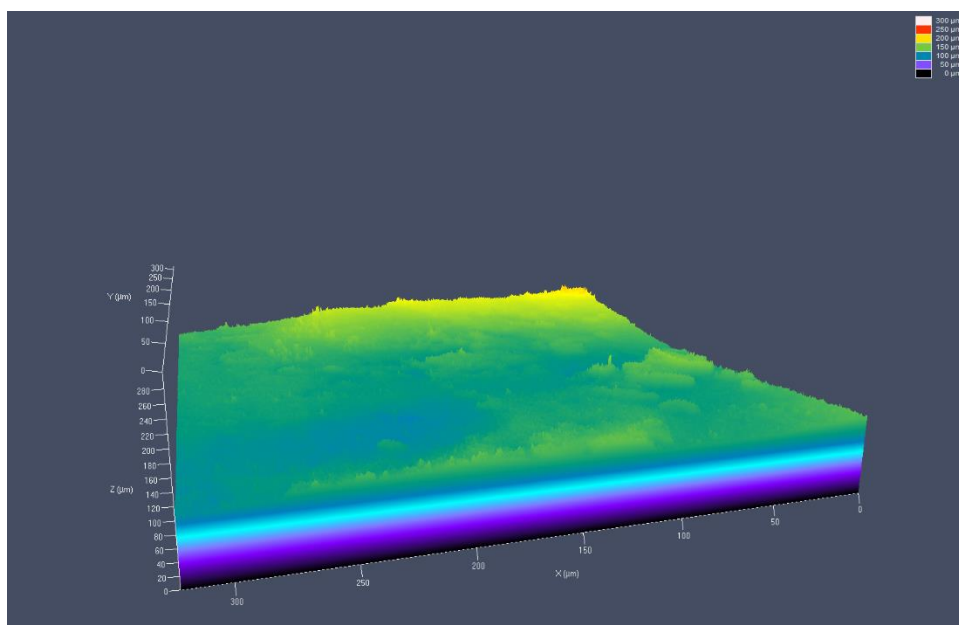
A Figura 16 mostra a superfície do agregado na condição natural. Observa-se uma topografia com vales e depressões bem definidos e alternados. Esse agregado apresentou melhor aderência na análise por microscopia eletrônica de varredura. Em contrapartida, a Figura 17 mostra a superfície do agregado pós-tratamento mecânico. A conformação da superfície, diferentemente do agregado antes do tratamento, apresenta uma área maior de depressão em relação aos vales. Ou seja, a topografia não é igualmente distribuída.

Figura 16. Topografia da superfície do agregado de concreto na condição natural por Microscopia Confocal.



Fonte: A autora (2024).

Figura 17. Topografia da superfície do agregado de concreto pós tratamento mecânico por Microscopia Confocal.

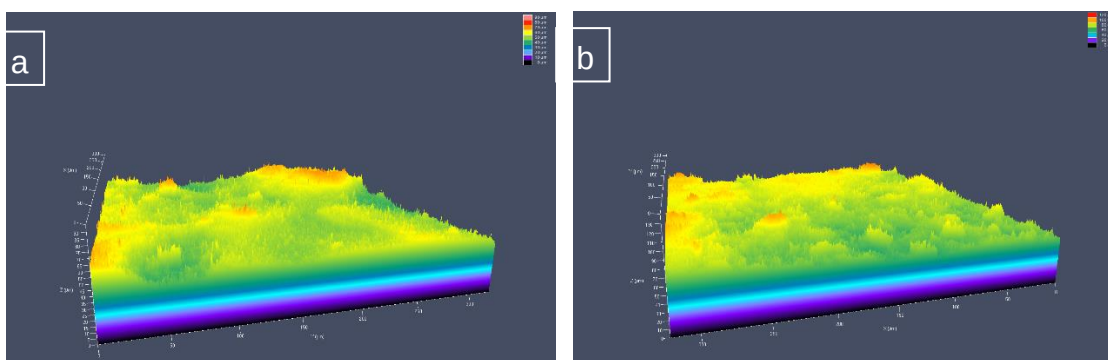


Fonte: A autora (2024).

Portanto, tanto nos agregados de tijolo cerâmico quanto nos 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 crucial para otimizar o desempenho dos agregados reciclados e garantir a integridade estrutural do concreto. A Figura 18 apresenta a semelhança do agregado de tijolo e de concreto com topografia favorável em relação à aderência pasta-agregado.

Figura 18. Semelhança na topografia da superfície do agregado de tijolo pós tratamento (a) e agregado de concreto na condição natural (b).



Fonte: A autora (2024).

4.2. Análises complementares

4.2.1. Resistência à compressão dos concretos

Os resultados de resistência à compressão dos concretos estão mostrados na Figura 20. As misturas com agregado natural obtiveram melhores resultados. Esse comportamento pode estar relacionado a composição variada dos agregados reciclados mistos e presença de materiais com resistência inferior à argamassa que envolve esses agregados. A Figura 19 mostra um corpo de prova com agregado reciclado não tratado após o ensaio e resistência à compressão. Em geral, os agregados possuem resistência superior à argamassa e permanecem com a estrutura inicial após o ensaio como é o caso dos agregados naturais, agregados de concreto velho e agregados de cerâmica para piso. Os agregados de cerâmica

vermelha possuem dois comportamentos observados nesse ensaio que é a ruptura do agregado e baixa aderência na superfície. Os agregados mais frágeis são facilmente desintegrados no ensaio, enquanto outra parte sofre a ruptura na zona de transição interfacial pasta-agregado.

Figura 19. Corpo de prova após o rompimento e identificação dos principais elementos que compõem o agregado reciclado utilizado na composição.

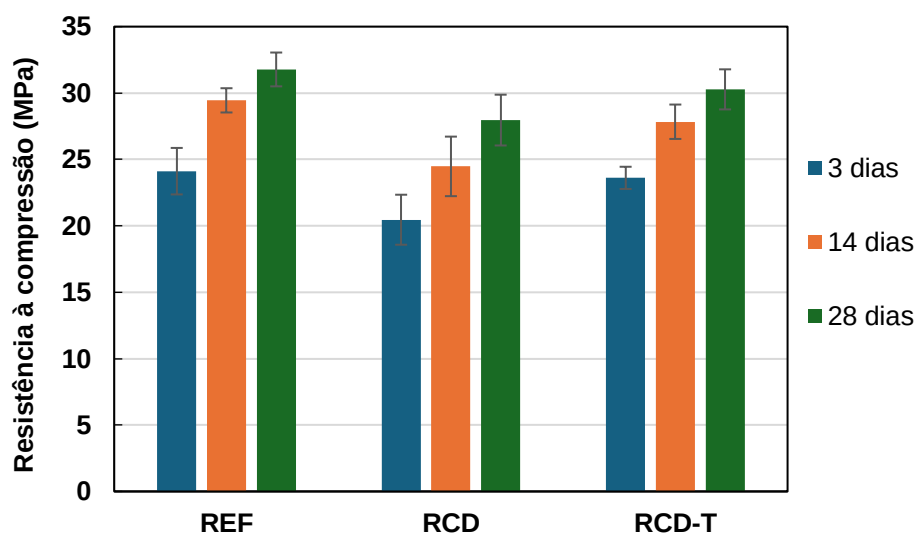


Fonte: A autora (2024).

Os corpos de prova que foram produzidos com resíduo misto sem tratamento apresentaram resistência inferior às demais misturas. O estudo buscou tratar os agregados de forma a fortalecer a zona de transição interfacial com o aumento da rugosidade superficial e retirar do sistema os agregados com baixa resistência mecânica. Os resultados mostraram que os concretos com agregado tratado melhoraram em 8,26% com tratamento mecânico de 20 minutos no misturador em relação ao concreto com agregado reciclado não tratado. Embora o concreto de referência ainda apresente melhores resultados, o tratamento mostrou eficiência em

um processo mecânico simples. O desvio padrão dos concretos com agregado reciclado apresentam valores maiores em relação ao de referência. Os concretos com agregados não tratados mostram maior valor de desvio padrão em todas as idades analisadas quando comparado ao concreto com agregado tratado. O Apêndice A mostra os resultados de resistência de cada amostra.

Figura 20. Resultados de resistência à compressão dos concretos.



Fonte: A autora (2024).

4.2.2. Resistência à compressão das argamassas

O teste *Flow Table* foi realizado para determinar a consistência de cada mistura de argamassa. O índice de consistência corresponde à média de três medidas de diâmetro, expressa em milímetros, e está disposta na Tabela 9 com a relação água/materiais seco correspondente. A Figura 21 mostra a execução dos testes nas três argamassas analisadas no estudo. O diâmetro de espalhamento diminui com a inserção de mais finos no sistema. A relação água/materiais secos apresentaram valores próximos em todas as misturas. Porém, a mistura de referência apresentou um aumento no diâmetro de espalhamento de 66,1% em relação à mistura PR-V e 75% em relação à mistura PR. A absorção do resíduo é significativamente maior que a da areia natural, e isso pode estar associado aos restos de argamassa antiga,

partículas finas de solo, microestrutura irregular e alta área superficial dos grãos(Feng, S. J. *et al.*, 2023).

Tabela 9. Resultado do teste de consistência das argamassas.

Mistura	Índice de consistência (mm)	Relação água/materiais secos
A-REF	301,6	0,21
A-PR-V	181,6	0,21
A-PR	171,6	0,22

Fonte: A autora (2024).

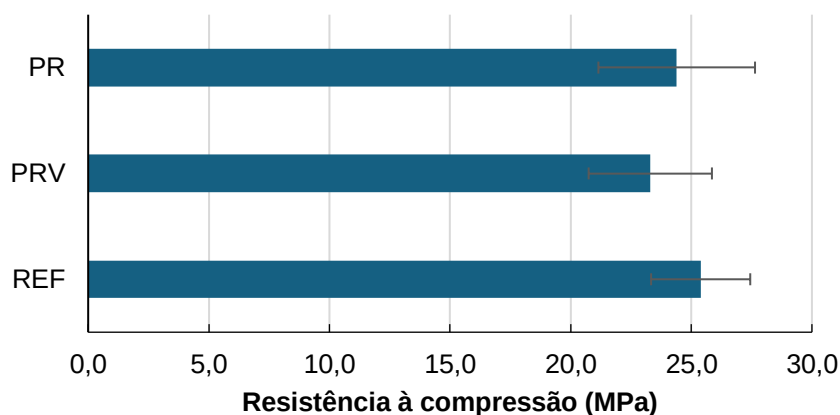
Figura 21. Teste na mesa para o teste de consistência nas amostras de argamassa a) REF, b) RP-V e c) RP.



Fonte: A autora (2024)

O ensaio de resistência à compressão investigou o efeito da substituição total da areia natural por pó de resíduo proveniente do tratamento mecânico de resíduos de construção e demolição. Ao substituir areia natural por areia reciclada, mostra que a resistência diminui em 3,8 % em relação às argamassas com mesmo consumo de cimento e 8,23% para as argamassas com consumo de cimento variável, como mostrado na Figura 22. Quando o pó é incorporado, reduz a formação de C-S-H (hidrato de silicato de cálcio) e hidróxido de cálcio no compósito (Wu, Wang e Ma, 2022).

Figura 22. Resultados de resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.



Fonte: A autora (2024).

4.2.3. Aspectos de toxicidade do pó

No processo de beneficiamento de RCD a parcela fina tem composição variada. Segundo Barbudo et al. (2012) que estudaram o potencial de lixiviação de resíduos de construção e demolição, mostraram que nenhum deles libera quantidades detectáveis de metais pesados. Em compensação, altas concentrações de compostos de SO_3 foram encontradas em agregados mistos proveniente de cerâmica e gesso. Nesse estudo, o teor de SO_3 permaneceu baixo, indicando a predominância de outros materiais no resíduo misto, como concretos e argamassas. O pó analisado nesse tópico consiste na parcela passante na peneira 75 μm , devido o alto poder de dispersão no ar. O pó analisado antes do tratamento foi extraído do RCD após a retirada na empresa de beneficiamento por peneiramento mecânico. O pó pós-tratamento também foi obtido por peneiramento mecânico após o tratamento na betoneira.

Quanto à composição química dos agregados reciclados de concreto, os elementos óxidos com maior percentual são o óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) (Martínez-García et al., 2021; Prošek et al., 2020) e óxidos alcalinos em menor proporção (Chen et al., 2020). A Tabela 10 mostra a composição química através do ensaio de Fluorescência de Raios X do pó proveniente do resíduo de construção e demolição antes e depois do tratamento mecânico. Como

relatado pelos autores, os três elementos óxidos possuem maior representatividade na composição em relação aos demais elementos. Ao contrário do cimento, o resíduo de concreto reciclado em pó tem quantidades relativamente altas de óxidos de silício, mas níveis ligeiramente mais baixos de óxido de cálcio. Isso se deve à presença abundante de CaCO_3 (Carbonato de cálcio) e quartzo no resíduo de concreto original. (Wu, Wang e Ma, 2022).

Comparativamente, o pó antes do tratamento apresenta um teor de SiO_2 mais elevado e pode estar associado a areia que também é inserida no processo devido ao armazenamento do resíduo diretamente no solo. O pó extraído após o tratamento possui um teor de CaO maior, e pode estar associado a argamassa aderida nos agregados reciclados de concreto e se desintegram no processo mecânico. A porcentagem de Al_2O_3 e óxido de ferro (Fe_2O_3) é maior para tamanhos de partícula menores que 0,075 mm em comparação com outros tamanhos. Isso confirma que as partículas predominantemente menores que 0,075 mm são partículas de cimento não hidratadas ou parcialmente hidratadas (Martínez-García *et al.*, 2021).

Tabela 10. Fluorescência de Raio X (FRX) do pó reciclado

Elementos óxidos	Teor do pó antes do tratamento (%)	Teor do pó pós-tratamento (%)
SiO_2	41,46	39,66
CaO	13,75	18,31
Al_2O_3	12,30	11,62
Outros óxidos	15,49	15,63
Perda ao fogo	17,00	14,78

Fonte: A autora (2024).

As seguintes fases podem ser identificadas no agregado reciclado através de ensaio de difração e raios-X: quartzo, calcita, albita, rutilo (TiO_2) e ilita. O pó de concreto reciclado consiste principalmente de quartzo, calcita e dolomita. O quartzo se origina principalmente da areia natural, enquanto a calcita e a dolomita vêm do agregado graúdo no concreto original (Wu, Wang e Ma, 2022). O difratograma do resíduo misto, mostrado na Figura 20, retrata a origem desses materiais. São constituídos basicamente por concreto, argamassa e cerâmica, que justifica a

presença de picos de quartzo (SiO_2) e carbonato de cálcio (CaCO_3) (Santos e Tubino, 2021).

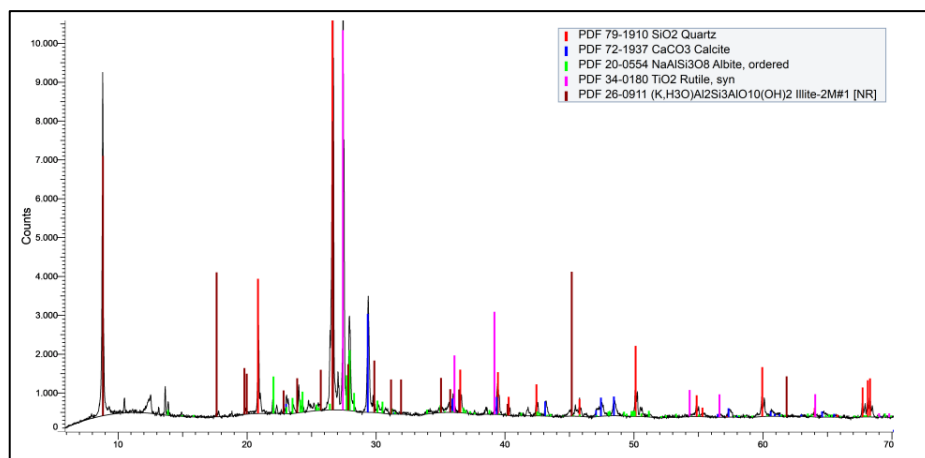
Nesse estudo, através da granulometria a laser, identificou que pelo menos 42,6% da massa está caracterizada como material particulado respirável com tamanho menor que $10\text{ }\mu\text{m}$, como apresentado na Figura 4. O aspecto do pó durante o tratamento, é mostrado na Figura a através da parte frontal da betoneira quando em operação. Nos estudos de (Xiao *et al.*, 2018) , o diâmetro médio das partículas do pó foi de $9,06\text{ }\mu\text{m}$, tamanho inferior às partículas do cimento. O aspecto do pó disperso durante o tratamento mecânico é retratado na Figura 23.

Figura 23. Aspecto do pó disperso no ar durante o tratamento mecânico.



Fonte: A autora (2024).

Figura 24. Difratoograma do pó reciclado.



Fonte: A autora (2024).

5 CONCLUSÕES

Em resumo, este estudo analisou a influência da rugosidade dos resíduos de construção e demolição na aderência pasta-agregado e evidenciou o efeito desse parâmetro na resistência à compressão no concreto com agregado graúdo de RCD. Através dos resultados, foram resumidas as conclusões.

- 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, por sua vez, responde 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 maximizar o desempenho do concreto. O tratamento mecânico e o lixamento devem ser realizados 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 crucial para a aderência entre a massa cimentícia e o agregado. Rugosidades moderadas, com vales e depressões bem definidas, promovem uma melhor penetração da massa e uma ligação interfacial mais forte. Rugosidades muito baixas ou excessivamente prejudicam essa adesão, criando falhas e comprometendo a integridade estrutural do concreto.
- Nos resultados de resistência à compressão dos concretos, o tratamento mecânico nos agregados graúdos melhorou o comportamento do material em 8,26% em comparação com concretos com agregados reciclados não tratados.

- As argamassas, fabricadas com 100% de agregado fino reciclado de tratamento mecânico, mostraram uma redução de apenas 3,8% na resistência em comparação com a argamassa de referência, considerando o mesmo consumo de cimento.
- 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 tratamento mecânico otimizou a aderência pasta-agregado de tijolo cerâmico, mas parece não melhorar significativamente essa propriedade nos agregados reciclados de concreto. O tratamento mecânico aumentou apenas 39,6% no valor de R_a para o agregado de tijolo cerâmico, enquanto o agregado de concreto apresentou uma ampliação de 110,6% no parâmetro de altura média aritmética.
- 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.
- Aspectos de toxicidade do material continuam sendo um tópico relevante e pouco explorado. Este estudo mostra uma quantidade significativa de material particulado respirável com tamanho menor que 10 μm . Essas partículas representam, em média, 42,6% do material fino após o tratamento, de acordo com a análise granulométrica.

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.

6 PERSPECTIVAS

Com base nas conclusões deste estudo, várias perspectivas podem ser exploradas para avançar na pesquisa e aplicar em estudos futuros com resíduos de construção e demolição (RCD):

- **Otimização dos Processos Mecânicos e Análise de Rugosidade:** Investigação de diferentes técnicas e parâmetros de tratamento mecânico para otimizar a eficiência na remoção da argamassa aderida e no alcance da rugosidade ótima dos agregados reciclados. Diante disso, pode ser desenvolvido maquinário específico que possa realizar o tratamento de forma mais eficaz e com menor consumo de energia.
- **Impactos Ambientais e de Saúde:** Avaliação mais detalhada dos impactos ambientais do tratamento mecânico, incluindo a pegada de carbono e a gestão de resíduos gerados durante o processo. Desenvolvimento de medidas de segurança e proteção para trabalhadores nesse novo processo associado à inalação de partículas respiráveis de sílica cristalina.
- **Modelagem e Simulação Computacional:** Desenvolvimento de modelos computacionais para prever o comportamento mecânico de concretos e argamassas com agregados reciclados tratados mecanicamente para otimização das dosagens. Utilização de simulações para entender os mecanismos de aderência e intertravamento entre pasta e agregados em diferentes condições de tratamento.
- **Estudos Econômicos e de Viabilidade Comercial:** Análise de custo-benefício do tratamento mecânico de agregados reciclados em comparação com outros métodos de reciclagem e com o uso de agregados naturais. Avaliação da viabilidade comercial do processo em larga escala, incluindo a identificação de potenciais barreiras e oportunidades no mercado da construção civil.
- **Normatização e Regulamentação:** Colaboração com órgãos reguladores para estabelecer normas e diretrizes específicas para o uso de agregados reciclados tratados mecanicamente em materiais cimentícios. Desenvolvimento de padrões de qualidade que garantam a consistência e a segurança dos materiais produzidos com RCD.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, A.; TANYU, B. F.; CETIN, B. Impact of aging on leaching characteristics of recycled concrete aggregate. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 20, p. 20835–20852, 1 out. 2016.
- ABED, M.; NEMES, R.; LUBLÓY, É. The impact of time on the heat resistance of self-compacting high-performance concrete incorporated with recycled martials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 138, n. 1, p. 35–45, 1 out. 2019.
- ABREMA. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, p. 34, 2023.
- ADESSINA, A.; FRAJ, A. BEN; BARTHÉLÉMY, J.-F. Improvement of the compressive strength of recycled aggregate concretes and relative effects on durability properties. *Construction and Building Materials*, v. 384, p. 131447, 27 jun. 2023.
- AKPINAR, P.; ATTAR, H. AL. A case study on the viability of using increased quantities of recycled concrete aggregates in structural concrete for extending environmental conservation in North Cyprus. *Environmental Earth Sciences*, v. 80, n. 9, p. 1–12, 1 maio 2021.
- AL-BAYATI, H. K. A. *et al.* Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 284–298, 1 jun. 2016.
- ALLUJAMI, H. M. *et al.* Mechanical properties of concrete containing recycle concrete aggregates and multi-walled carbon nanotubes under static and dynamic stresses. *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, p. e01651, 1 dez. 2022.
- ALQARNI, A. S. *et al.* Treatment of recycled concrete aggregate to enhance concrete performance. *Construction and Building Materials*, v. 307, p. 124960, 8 nov. 2021.
- _____. Influence of Treatment Methods of Recycled Concrete Aggregate on Behavior of High Strength Concrete. *Buildings*, v. 12, n. 4, 1 abr. 2022.
- AL-WAKED, Q. *et al.* Enhancement of mechanical properties of concrete with treated demolition waste aggregate. *Journal of Building Engineering*, v. 58, p. 105047, 15 out. 2022.

- AMORIM JÚNIOR, N. S. *et al.* Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test. *Construction and Building Materials*, v. 222, p. 108–118, 20 out. 2019.
- AMORIM JÚNIOR, N. S.; SILVA, G. A. O.; RIBEIRO, D. V. Effects of the incorporation of recycled aggregate in the durability of the concrete submitted to freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 723–730, 10 fev. 2018.
- ANTENOR, S.; SZIGETHY, L. Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos - Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade.
- ASHRAF, M. J.; IDREES, M.; AKBAR, A. Performance of silica fume slurry treated recycled aggregate concrete reinforced with carbon fibers. *Journal of Building Engineering*, v. 66, p. 105892, 1 maio 2023.
- ATYIA, M. M.; MAHDY, M. G.; ABD ELRAHMAN, M. Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, v. 304, p. 124655, 18 out. 2021.
- AZEVEDO, A. R. G. *et al.* Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW). *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 3, p. 5942–5952, 1 maio 2020.
- BARBUDO, A. *et al.* Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Management*, v. 32, n. 6, p. 1229–1235, 1 jun. 2012.
- BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 163, p. 496–507, 28 fev. 2018.
- CATHERINA VASANTHALIN, P.; CHELLA KAVITHA, N. Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural network and cuckoo search method. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 8480–8488, 1 jan. 2021.
- CEIA, F. *et al.* Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces. *Construction and Building Materials*, v. 109, p. 139–145, 15 abr. 2016.

- CHANG, Y. C. *et al.* Different influence of replacement ratio of recycled aggregate on uniaxial stress-strain relationship for recycled concrete with different concrete strengths. *Structures*, v. 42, p. 284–308, 1 ago. 2022.
- CHEN, S.; ZHAO, Y.; BIE, Y. The prediction analysis of properties of recycled aggregate permeable concrete based on back-propagation neural network. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 124187, 10 dez. 2020.
- CHEN, Z. *et al.* Push-off test on concrete-concrete interface with different types of concrete after elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 377, p. 131157, 9 maio 2023.
- DILBAS, H.; ÇAKIR, Ö. Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 254, p. 119216, 10 set. 2020.
- DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 228–235, 15 jan. 2018.
- FANG, X.; ZHAN, B.; POON, C. S. Enhancement of recycled aggregates and concrete by combined treatment of spraying Ca^{2+} rich wastewater and flow-through carbonation. *Construction and Building Materials*, v. 277, p. 122202, 29 mar. 2021.
- FENG, C. *et al.* Changing the soaking method of microbially induced calcium carbonate precipitation technology to improve the reinforcement effect of recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, v. 68, p. 106128, 1 jun. 2023.
- FENG, S. J. *et al.* Utilization potential of waste residue and dust powder from C&D waste. *Case Studies in Construction Materials*, v. 19, p. e02513, 1 dez. 2023.
- GENG, Y. *et al.* Influence of service time of recycled coarse aggregate on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 52, n. 5, p. 1–16, 1 out. 2019.
- GOMES, R. I. *et al.* Mortars with CDW Recycled Aggregates Submitted to High Levels of CO_2 . *Infrastructures 2021*, Vol. 6, Page 159, v. 6, n. 11, p. 159, 5 nov. 2021.
- GONG, Y. *et al.* Improvement of recycled aggregate properties through a combined method of mechanical grinding and microbial-induced carbonate precipitation. *Construction and Building Materials*, v. 342, p. 128093, 1 ago. 2022.

- GONZÁLEZ, J. S. *et al.* Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 507–514, 15 set. 2017.
- 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, p. 100949, 1 jan. 2020.
- HAKHEEM, I. Y. *et al.* Properties of sustainable high-strength concrete containing large quantities of industrial wastes, nanosilica and recycled aggregates. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 24, p. 7444–7461, 1 maio 2023.
- HONG, L.; GU, X.; LIN, F. Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete. *Construction and Building Materials*, v. 65, p. 338–349, 29 ago. 2014.
- HU, L. *et al.* Monitoring and optimizing the surface roughness of high friction exposed aggregate cement concrete in exposure process. *Construction and Building Materials*, v. 230, p. 117005, 10 jan. 2020.
- HUANG, T. *et al.* Investigation on the relationship between the surface texture index and the surface free energy of aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 325, p. 126759, 28 mar. 2022.
- HUSSEIN, Y. M. *et al.* Development and performance of sustainable structural lightweight concrete containing waste clay bricks. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 21, p. 4344–4359, 1 nov. 2022.
- IBRAHIM, N. M. *et al.* Performance of Lightweight Foamed Concrete with Waste Clay Brick as Coarse Aggregate. *APCBEE Procedia*, v. 5, p. 497–501, 1 jan. 2013.
- ISMAIL, S.; RAMLI, M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 464–476, 1 jul. 2013.
- _____. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 726–739, 15 out. 2014.
- JAMIL, S.; SHI, J.; IDREES, M. Effect of various parameters on carbonation treatment of recycled concrete aggregate using the design of experiment method. *Construction and Building Materials*, v. 382, p. 131339, 13 jun. 2023.

- JANKOVIC, K.; NIKOLIC, D.; BOJOVIC, D. Concrete paving blocks and flags made with crushed brick as aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 28, n. 1, p. 659–663, 1 mar. 2012.
- Jl, X. *et al.* Surface microscopic properties of various aggregates using laser scanning confocal microscope. *Construction and Building Materials*, v. 290, p. 123222, 5 jul. 2021.
- JOYKLAD, P. *et al.* Improvement of stress-strain behavior of brick-waste aggregate concrete using low-cost FCSM composites. *Construction and Building Materials*, v. 351, p. 128946, 10 out. 2022.
- KATKHUDA, H.; SHATARAT, N. Shear behavior of reinforced concrete beams using treated recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 63–71, 30 out. 2016.
- _____. Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment. *Construction and Building Materials*, v. 140, p. 328–335, 1 jun. 2017.
- KATZ, A.; KULISCH, D. Performance of mortars containing recycled fine aggregate from construction and demolition waste. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 50, n. 4, p. 1–16, 1 ago. 2017.
- KAZEMIAN, F.; ROOHOLAMINI, H.; HASSANI, A. Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 209, p. 690–700, 10 jun. 2019.
- KAZMI, S. M. S. *et al.* Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study. *Cement and Concrete Composites*, v. 104, p. 103398, 1 nov. 2019.
- KIM, H. S.; KIM, J. M.; KIM, B. Quality improvement of recycled fine aggregate using steel ball with the help of acid treatment. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 20, n. 2, p. 754–765, 1 abr. 2018.
- KOLAY, E.; KAYABALI, K. Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach. *Engineering Geology*, v. 86, n. 4, p. 271–284, 25 ago. 2006.
- KOU, C. *et al.* Physical and microstructural properties of recycled concrete aggregates treated by tetraethyl orthosilicate. *Construction and Building Materials*, v. 344, p. 128246, 15 ago. 2022.

KOU, S. C.; POON, C. S.; WAN, H. W. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 881–889, 1 nov. 2012.

KUANG, D. *et al.* Influence of angularity and roughness of coarse aggregates on asphalt mixture performance. *Construction and Building Materials*, v. 200, p. 681–686, 10 mar. 2019.

KUMAR, S.; SINGH, S.; BANERJEE, S. Solid waste management in developing countries. *Journal of Critical Reviews*, v. 7, n. 10, p. 1282–1285, 2020.

LAM, M. N. T.; NGUYEN, D. T.; NGUYEN, D. L. Potential use of clay brick waste powder and ceramic waste aggregate in mortar. *Construction and Building Materials*, v. 313, p. 125516, 27 dez. 2021.

LENG, Y. *et al.* Development of an environmental Ultra-High Performance Concrete (UHPC) incorporating carbonated recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 362, p. 129657, 2 jan. 2023.

LI, L.; XUAN, D.; SOJOBI, ADEBAYO OLATUNBSOUN; *et al.* Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 118, p. 103963, 1 abr. 2021.

LI, L.; XUAN, D.; CHU, S. H.; *et al.* Efficiency and mechanism of nano-silica pre-spraying treatment in performance enhancement of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 301, p. 124093, 27 set. 2021.

LI, L.; XUAN, D.; SOJOBI, A. O.; *et al.* Efficiencies of carbonation and nano silica treatment methods in enhancing the performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 308, p. 125080, 15 nov. 2021.

LI, Y. *et al.* Effects of carbonation treatment on the crushing characteristics of recycled coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 201, p. 408–420, 20 mar. 2019.

LIANG, C. *et al.* Chloride permeability and the caused steel corrosion in the concrete with carbonated recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 218, p. 506–518, 10 set. 2019.

LIU, X.; JING, H.; YAN, P. Statistical analysis and unified model for predicting the compressive strength of coarse recycled aggregate OPC concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 400, p. 136660, 10 maio 2023.

- LIU, Z.; CHIN, C. S.; XIA, J. Improving recycled coarse aggregate (RCA) and recycled coarse aggregate concrete (RCAC) by biological denitrification phenomenon. *Construction and Building Materials*, v. 301, p. 124338, 27 set. 2021.
- LOPES ESTOLANO, A. M. *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, p. e20220335, 28 abr. 2023.
- LOZ, P. H. F. *et al.* Roughness of natural aggregates by interferometry and its microstructure. *Construction and Building Materials*, v. 297, p. 123646, 23 ago. 2021.
- LU, B. *et al.* Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 233, p. 421–428, 1 out. 2019.
- LU, Z. *et al.* Properties investigation of recycled aggregates and concrete modified by accelerated carbonation through increased temperature. *Construction and Building Materials*, v. 341, p. 127813, 25 jul. 2022.
- LUO, S. *et al.* Carbonated recycled coarse aggregate and uniaxial compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 188, p. 956–965, 10 nov. 2018.
- MA, Z. *et al.* Utilizing heat-mechanical synergistic treatment for separating concrete waste into high-quality recycled aggregate, active recycled powder and new concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 68, p. 106161, 1 jun. 2023.
- MAHMOOD, W.; AYUB, T.; KHAN, A. UR R. Mechanical properties and corrosion resistance of recycled aggregate concrete exposed to accelerated and natural marine environment. *Journal of Building Engineering*, v. 66, p. 105867, 1 maio 2023.
- MARÍN-CORTÉS, S. *et al.* Experimental characterization data on aggregates from construction and demolition wastes for the assistance in sorting and recycling practices. *Construction and Building Materials*, v. 435, p. 136798, 12 jul. 2024.
- MARTÍNEZ-GARCÍA, R. *et al.* Evaluation of mechanical characteristics of cement mortar with fine recycled concrete aggregates (FRCA). *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 1, p. 1–23, 1 jan. 2021.
- MAZZUCCO, G.; SALOMONI, V. A.; MAJORANA, C. A cohesive contact algorithm to evaluate the mechanical behaviour of concrete ITZ at different roughness conditions. *Construction and Building Materials*, v. 294, p. 123479, 2 ago. 2021.

- MEDINA MARTINEZ, C. *et al.* Fillers and additions from industrial waste for recycled aggregate concrete. *The Structural Integrity of Recycled Aggregate Concrete Produced with Fillers and Pozzolans*, p. 105–143, 1 jan. 2022.
- MISTRI, A. *et al.* Performance of biocement treatment in improving the interfacial properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 369, p. 130509, 10 mar. 2023.
- NADERPOUR, H.; RAFIEAN, A. H.; FAKHARIAN, P. Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks. *Journal of Building Engineering*, v. 16, p. 213–219, 1 mar. 2018.
- NANDAL, M. *et al.* Morphological and physical characterization of construction and demolition waste. *Materials Today: Proceedings*, 16 nov. 2022.
- PAN, F.; OESER, M.; LIU, P. Atomic perspectives on the impact of aggregate surface roughness: Unraveling changes in bond strength and failure modes at the bitumen-aggregate interface. *Fuel*, v. 379, p. 133011, 1 jan. 2025.
- PANDURANGAN, K.; DAYANITHY, A.; OM PRAKASH, S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 212–221, 1 set. 2016.
- PASUPATHY, K.; RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J. 3D concrete printing of eco-friendly geopolymers containing brick waste. *Cement and Concrete Composites*, v. 138, p. 104943, 1 abr. 2023.
- PATRA, I. *et al.* Mechanical properties of concrete containing recycled aggregate from construction waste. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 53, 1 out. 2022.
- PENG, X. *et al.* Modification of construction waste derived recycled aggregate via CO₂ curing to enhance corrosive freeze-thaw durability of concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 405, p. 137016, 15 jun. 2023.
- PEPE, M. *et al.* Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*, v. 69, p. 124–132, 30 out. 2014.
- PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. DE. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 9, p. 1044–1052, 1 out. 2012.

- PIRANGI, L. *et al.* Desenvolvimento e caracterização de concreto sustentável com resíduos de conchas marinhas. *Ambiente Construído*, v. 24, p. e131502, 8 jan. 2024.
- PRASAD, D.; PANDEY, A.; KUMAR, B. Sustainable production of recycled concrete aggregates by lime treatment and mechanical abrasion for M40 grade concrete. *Construction and Building Materials*, v. 268, p. 121119, 25 jan. 2021.
- PROŠEK, Z. *et al.* Recovery of residual anhydrous clinker in finely ground recycled concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 155, 1 abr. 2020.
- PU, Y. *et al.* Improving recycled concrete aggregates using flue gas based on multicyclic accelerated carbonation: Performance and mechanism. *Construction and Building Materials*, v. 361, p. 129623, 26 dez. 2022.
- QIU, J.; TNG, D. Q. S.; YANG, E. H. Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation. *Construction and Building Materials*, v. 57, p. 144–150, 30 abr. 2014.
- QUDOOS, A. *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 and Building Materials*, v. 168, p. 946–957, 20 abr. 2018a.
- _____. 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 and Building Materials*, v. 168, p. 946–957, 20 abr. 2018b.
- ROSCA, B. Comparative aspects regarding concrete of structural grade made with recycled brick aggregate with / without fine particles from crushing. *Materials Today: Proceedings*, v. 60, p. 982–987, 1 jan. 2022.
- SANTOS, R. P.; TUBINO, R. Potential evaluation of the use of construction and demolition waste (CDW) in the recovery of degraded soils by mining in Brazil. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, v. 12, p. 200060, 1 dez. 2021.
- SANTOS, W. F. *et al.* Roughness, wettability and water absorption of water repellent treated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 146, p. 502–513, 15 ago. 2017a.
- _____. Roughness, wettability and water absorption of water repellent treated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 146, p. 502–513, 15 ago. 2017b.

SARAVANAKUMAR, P.; ABHIRAM, K.; MANOJ, B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*, v. 111, p. 611–617, 15 maio 2016.

SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. Durability assessment of concrete containing surface pretreated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 264, p. 120203, 20 dez. 2020.

SHABAN, W. M. *et al.* Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. *Construction and Building Materials*, v. 216, p. 632–647, 20 ago. 2019.

SHAMASS, R. *et al.* Mechanical and GWP assessment of concrete using Blast Furnace Slag, Silica Fume and recycled aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, p. e02164, 1 jul. 2023.

SHARMA, H. *et al.* Effect of various bio-deposition treatment techniques on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 66, p. 105868, 1 maio 2023a.

____. Effect of various bio-deposition treatment techniques on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 66, p. 105868, 1 maio 2023b.

SHARMA, N.; SHARMA, P.; PARASHAR, A. K. Use of waste glass and demolished brick as coarse aggregate in production of sustainable concrete. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 4030–4035, 1 jan. 2022.

SHEN, P. *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, p. 105235, 1 out. 2023.

SILVA, F. A. N. *et al.* Preliminary analysis of the use of construction waste to replace conventional aggregates in concrete. *Buildings*, v. 11, n. 3, p. 1–13, 2021.

SINGH, P. K.; RAJHANS, P. Experimental investigation and SVR model to predict the mechanical properties of RAC by enhancing the characteristic of RCA using surface treatment method along with modified mixing approach. *Construction and Building Materials*, v. 393, p. 132032, 22 ago. 2023.

SU, C. *et al.* Improving the mechanical properties and durability of steam-cured concrete by incorporating recycled clay bricks aggregates from C&D waste. *Powder Technology*, v. 438, p. 119571, 1 abr. 2024.

- SUN, C. *et al.* Contact behavior between cracked surfaces of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 1168–1178, 30 nov. 2017.
- SUN, E. *et al.* Characterization of the microstructure evolution features of various aggregates based on confocal laser scanning microscope. *Construction and Building Materials*, v. 424, p. 135933, 19 abr. 2024.
- TANG, B. *et al.* A comparison study of aggregate carbonation and concrete carbonation for the enhancement of recycled aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 371, p. 130797, 31 mar. 2023.
- TEJAS, S.; PASLA, D. Assessment of mechanical and durability properties of composite cement-based recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 387, p. 131620, 17 jul. 2023.
- WANG, J. *et al.* Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 355–366, 10 jul. 2017.
- WANG, J. *et al.* Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. *Construction and Building Materials*, v. 234, p. 117366, 20 fev. 2020.
- WANG, L. *et al.* An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 144, p. 432–441, 30 jul. 2017.
- _____. Consolidating recycled concrete aggregates using phosphate solution. *Construction and Building Materials*, v. 200, p. 703–712, 10 mar. 2019.
- WANG, R. *et al.* Surface modification of recycled coarse aggregate based on Microbial Induced Carbonate Precipitation. *Journal of Cleaner Production*, v. 328, p. 129537, 15 dez. 2021.
- WANG, X. *et al.* Effect of crystallizer treatment on chloride diffusion and microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 321, p. 126273, 28 fev. 2022.
- WANG, X.; CHIN, C. S.; XIA, J. Material Characterization for Sustainable Concrete Paving Blocks. *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 1197, v. 9, n. 6, p. 1197, 21 mar. 2019.
- WENZEL, B. *et al.* Physical and mechanical behavior of concrete specimens using recycled aggregate coated using recycled cement paste. *Construction and Building Materials*, v. 393, p. 132015, 22 ago. 2023.

WU, B.; CAO, H.; WU, Q. Compressive and shrinkage behaviors of recycled aggregate concrete containing recycled sand from weathered residual soil of granite and MgO expansion agent. *Journal of Building Engineering*, v. 68, p. 106154, 1 jun. 2023.

WU, C. R. *et al.* Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach. *Cement and Concrete Composites*, v. 94, p. 248–254, 1 nov. 2018.

_____. Pore size distribution and ITZ performance of mortars prepared with different bio-deposition approaches for the treatment of recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, v. 111, p. 103631, 1 ago. 2020.

WU, H.; WANG, C.; MA, Z. Drying shrinkage, mechanical and transport properties of sustainable mortar with both recycled aggregate and powder from concrete waste. *Journal of Building Engineering*, v. 49, 15 maio 2022.

WU, K. *et al.* Influence of carbonation treatment on the properties of multiple interface transition zones and recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 127, p. 104402, 1 mar. 2022.

WU, R. *et al.* Effects of Different Factors on the Performance of Recycled Aggregate Permeable Pavement Concrete. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 4566, v. 15, n. 13, p. 4566, 29 jun. 2022.

XIA, D. T. *et al.* Effects of maximum particle size of coarse aggregates and steel fiber contents on the mechanical properties and impact resistance of recycled aggregate concrete. *Advances in Structural Engineering*, v. 24, n. 13, p. 3085–3098, 1 out. 2021.

XIAO, J. *et al.* Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 188, p. 720–731, 1 jul. 2018.

_____. Fully utilizing carbonated recycled aggregates in concrete: Strength, drying shrinkage and carbon emissions analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 377, p. 134520, 1 dez. 2022.

XIE, D.; ZHANG, R.; WANG, J. The influence of environmental factors and precipitation precursors on enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) process and its application on modification of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 395, p. 136444, 1 abr. 2023.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 65, p. 67–74, 1 jan. 2016.

_____. Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 84, p. 214–221, 1 nov. 2017.

YANG, X. *et al.* Effect of brick-based construction and demolition waste on the performance and microstructure of lightweight aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 78, p. 107665, 1 nov. 2023.

YIN, J. *et al.* Influences of spraying sodium silicate based solution/slurry on recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 377, p. 130924, 9 maio 2023.

YOON, H. S. *et al.* Efficiency of dry calcination and trituration treatments for removing cement pastes attached to recycled coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 312, p. 125412, 20 dez. 2021.

YUAN, S. *et al.* Effects of brick-concrete aggregates on the mechanical properties of basalt fiber reinforced recycled waste concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 80, p. 108023, 1 dez. 2023.

YUNUSA, M. *et al.* Durability of Recycled Concrete Aggregates Prepared with Mechanochemical and Thermal Treatment. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 5792, v. 15, n. 16, p. 5792, 22 ago. 2022.

ZAETANG, Y. *et al.* Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 111, p. 15–21, 15 maio 2016.

ZENG, W. *et al.* Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 228, p. 116743, 20 dez. 2019.

ZHAN, B. J. *et al.* Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: Effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 104, p. 103360, 1 nov. 2019.

_____. Characterization of interfacial transition zone in concrete prepared with carbonated modeled recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 136, p. 106175, 1 out. 2020.

ZHANG, H. *et al.* Modifying recycled aggregate concrete by aggregate surface treatment using sulfoaluminate cement and basalt powder. *Construction and Building Materials*, v. 192, p. 526–537, 20 dez. 2018.

ZHANG, H.; JI, T.; *et al.* Improving the sulfate resistance of recycled aggregate concrete (RAC) by using surface-treated aggregate with sulfoaluminate cement (SAC). *Construction and Building Materials*, v. 297, p. 123535, 23 ago. 2021.

ZHANG, H.; XU, X.; *et al.* To improve the resistance of recycled aggregate concrete (RAC) to the internal steel corrosion by the pre-treatment of aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 306, p. 124911, 1 nov. 2021.

ZHANG, H.; LIU, W.; *et al.* To ameliorate the performance of recycled aggregate concrete (RAC) by pre-treating aggregate in sulfoaluminate cement slurry and water glass solution. *Journal of Building Engineering*, v. 44, p. 103364, 1 dez. 2021.

_____. A new look at the resistance of recycled aggregate concrete (RAC) to the external sulfate attacks: The influence of the multiple mesoscopic material phases. *Journal of Building Engineering*, v. 64, p. 105653, 1 abr. 2023.

ZHANG, H.; HE, B.; *et al.* Using diatomite as a partial replacement of cement for improving the performance of recycled aggregate concrete (RAC)-Effects and mechanism. *Construction and Building Materials*, v. 385, p. 131518, 3 jul. 2023.

ZHANG, R. *et al.* Optimization of sodium alginate aided bio-deposition treatment of recycled aggregates and its application in concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 139, p. 105031, 1 maio 2023.

ZHAO, M. Z. *et al.* Basic creep behavior and modeling of recycled coarse and fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 389, p. 131724, 31 jul. 2023.

ZHAO, Y. *et al.* Characterization of coarse aggregate morphology and its effect on rheological and mechanical properties of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, v. 286, p. 122940, 7 jun. 2021.

ZHENG, W. *et al.* Impact of coarse aggregate morphology and separation distance on concrete properties based on visual learning. *Journal of Building Engineering*, v. 89, p. 109254, 15 jul. 2024.

ZHU, P. *et al.* Durability evaluation of recycled aggregate concrete in a complex environment. *Journal of Cleaner Production*, v. 273, 10 nov. 2020.

APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS E ARGAMASSAS

Resultados do ensaio de Resistência à compressão em MPA para os concretos de Referência

	3 dias	14 dias	28 dias
REF 1	20,53	28,4	32,9
REF 2	24,9	29,09	30,2
REF 3	25,4	31,1	32,3
REF 4	25,9	28,4	30,2
REF 5	24	29,1	30,4
REF 6	23,2	30,2	33,1
REF 7	25,5	29,7	32,5
REF 8	23,5	29,6	32,6

	3 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
Média	24,11625	29,44875	31,775
Desvio padrão	1,750624	0,912382	1,273634
Coef. Var. (%)	7,259105	3,098203	4,008289

Resultados de Resistência à compressão em MPA para os concretos com agregado reciclado sem tratamento

	3 dias	14 dias	28 dias
RCD 1	18,65	20,01	26,6
RCD 2	21	24,3	29
RCD 3	20	23,4	25
RCD 4	23	25,7	28,5
RCD 5	17,5	25,2	28,7
RCD 6	22,63	27,9	29,5
RCD 7	21,2	24,3	25,9
RCD 8	19,7	25	30,5

	3 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
MÉDIA	20,46	24,47625	27,9625
Desvio padrão	1,883257	2,241989	1,912319
Coef. Var. (%)	9,20458	9,159853	6,83887

Resultados do ensaio de Resistência à compressão em MPa para os concretos com agregado reciclado com tratamento

	3 dias	14 dias	28 dias
RCD-T 1	22,2	25,3	30,5
RCD-T 2	23,4	28,3	29,1
RCD-T 3	23,3	28,6	32,2
RCD-T 4	24,3	28,9	29,9
RCD-T 5	23,7	29	32,2
RCD-T 6	24,1	26,9	28,3
RCD-T 7	24,9	27,1	28,8
RCD-T 8	23	28,6	31,2

	3 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
RCD-T	23,6125	27,8375	30,275
Desvio padrão	0,835699	1,293873	1,507837
Coef. Var. (%)	3,539223	4,647949	4,980468

Resultados do ensaio de Resistência à compressão em MPa para as argamassas com pó reciclado do tratamento mecânico aos 28 dias

A-REF 1	25,97
A-REF 2	24,80
A-REF 3	22,71
A-REF 4	24,24
A-REF 5	28,83
A-REF 6	25,77

PR-V 1	24,85
PR-V 2	25,16
PR-V 3	24,96
PR-V 4	18,95
PR-V 5	21,39
PR-V 6	24,50

PR 1	28,93
PR 2	28,06
PR 3	21,90
PR 4	22,05
PR 5	23,53
PR 6	21,90

MÉDIA	25,39
Desvio Padrão	2,05
Coef. Var. (%)	8,09

MÉDIA	23,30
Desvio Padrão	2,56
Coef. Var. (%)	10,97

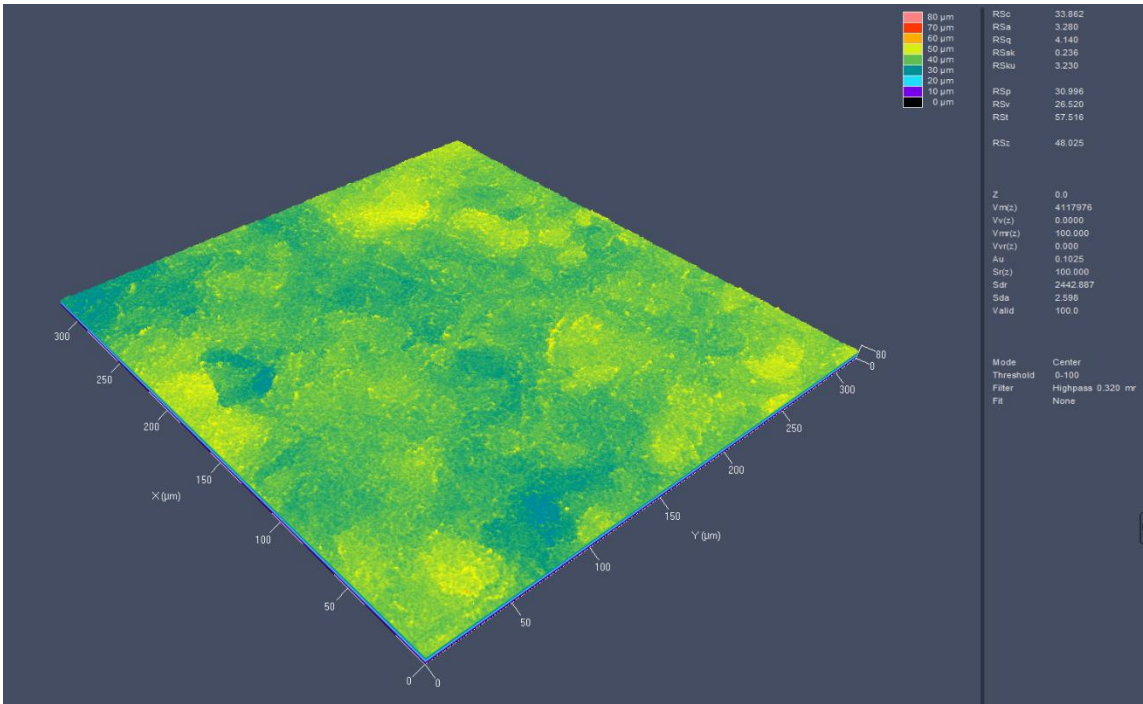
MÉDIA	24,40
Desvio Padrão	3,25
Coef. Var. (%)	13,31

APÊNDICE B – IMAGENS DA ANÁLISE DE ESTEREOSCOPIA E MICROSCOPIA CONFOCAL DOS AGREGADOS

Imagens do estereoscópio da superfície do agregado de tijolo reciclado com a) superfície natural.



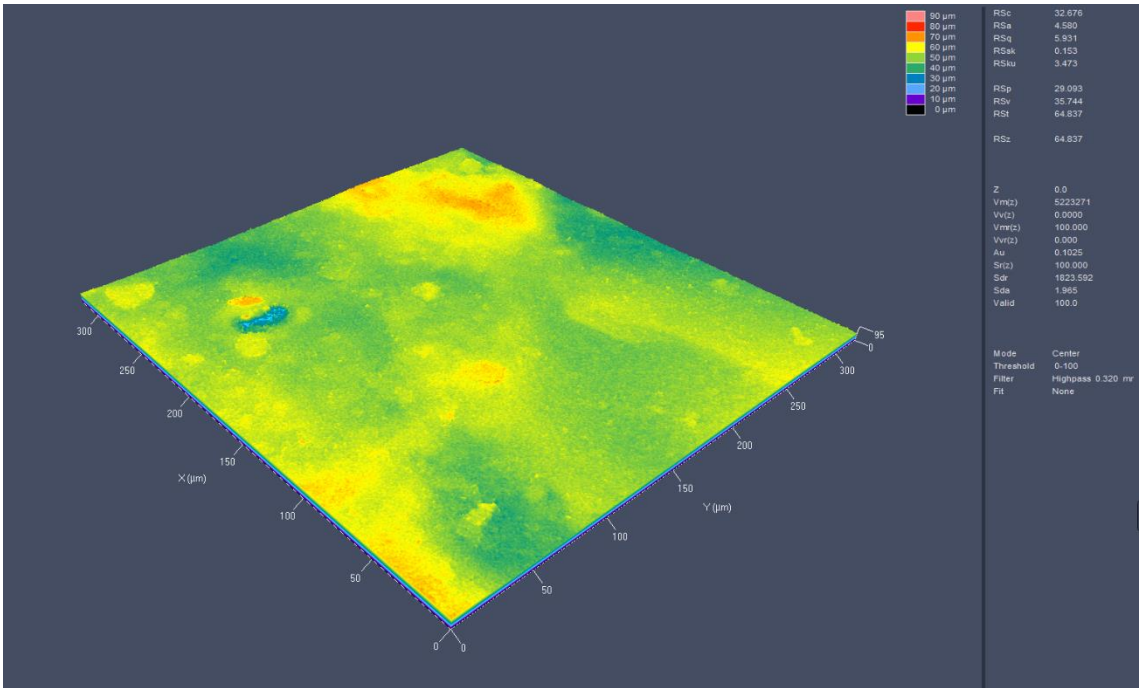
Imagens de microscopia confocal e parâmetros de rugosidade da superfície do agregado de tijolo reciclado com a) superfície natural.



Imagens do estereoscópio das superfícies do agregado de tijolo reciclado com b) superfície pós-tratamento mecânico.



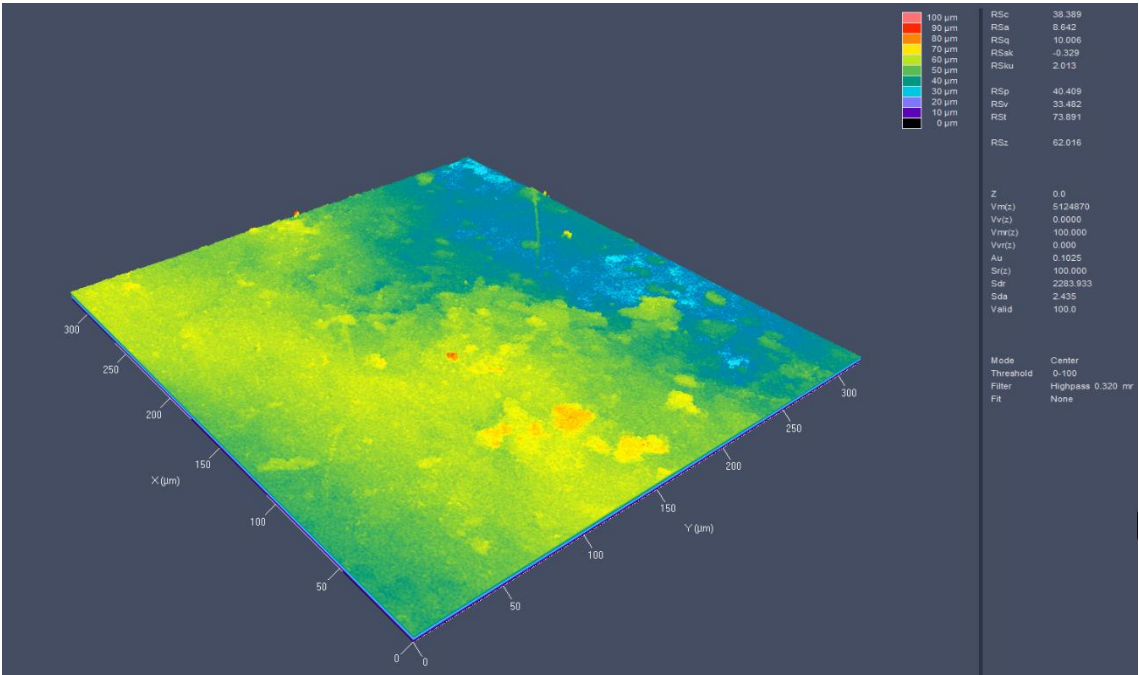
Imagens de microscopia confocal e parâmetros de rugosidade da superfície do agregado de tijolo reciclado com b) superfície pós-tratamento mecânico.



Imagens do estereoscópio das superfícies do agregado de tijolo reciclado com c) superfície pós lixamento simples



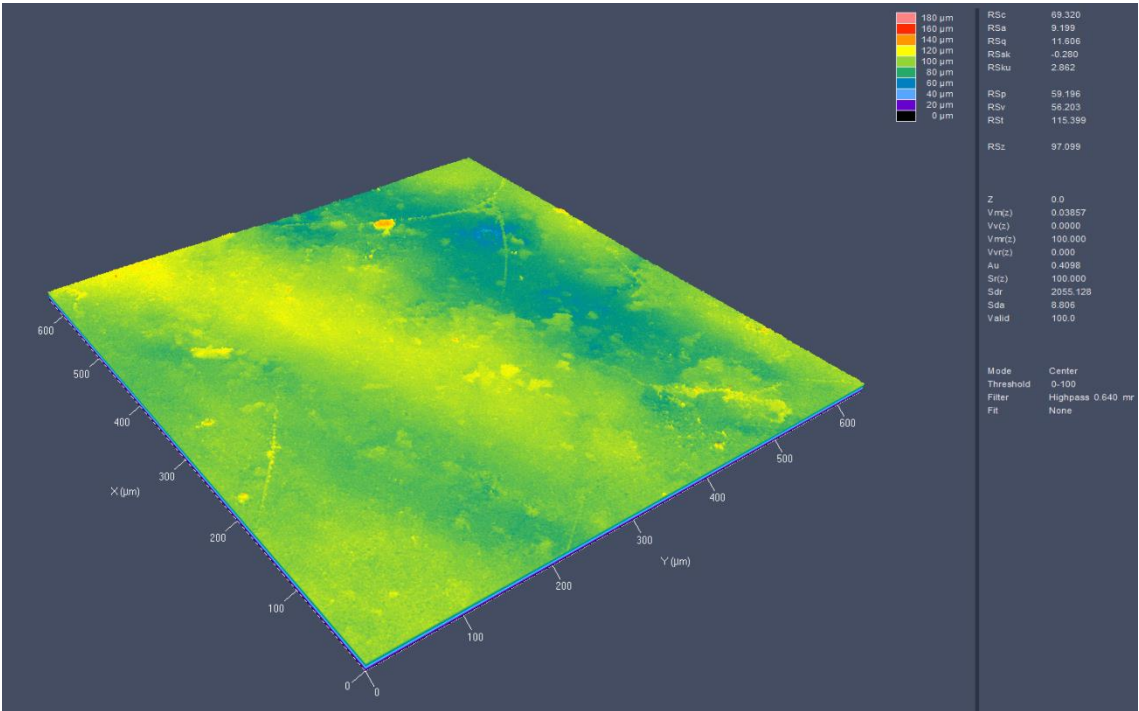
Imagens de microscopia confocal e parâmetros de rugosidade da superfície do agregado de tijolo reciclado com c) superfície pós lixamento simples



Imagens do estereoscópio das superfícies do agregado de tijolo reciclado com d) superfície pós lixamento duplo.



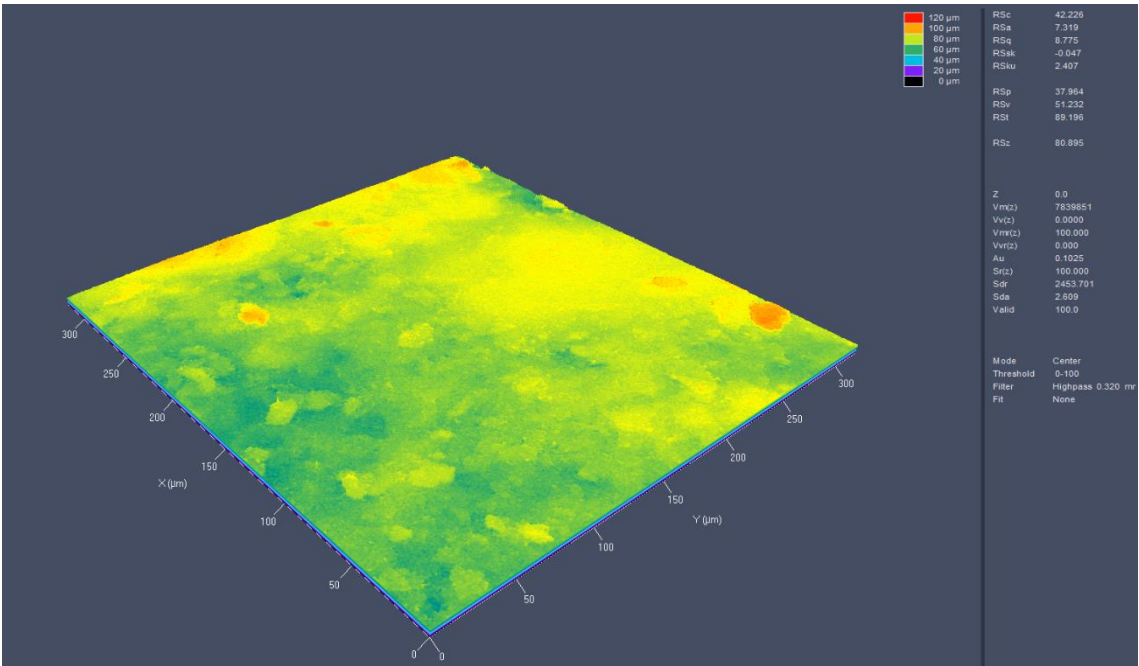
Imagens de microscopia confocal e parâmetros de rugosidade da superfície do agregado de tijolo reciclado com d) superfície pós lixamento duplo.



Imagens do estereoscópio das superfícies do agregado de concreto reciclado com a) superfície natural



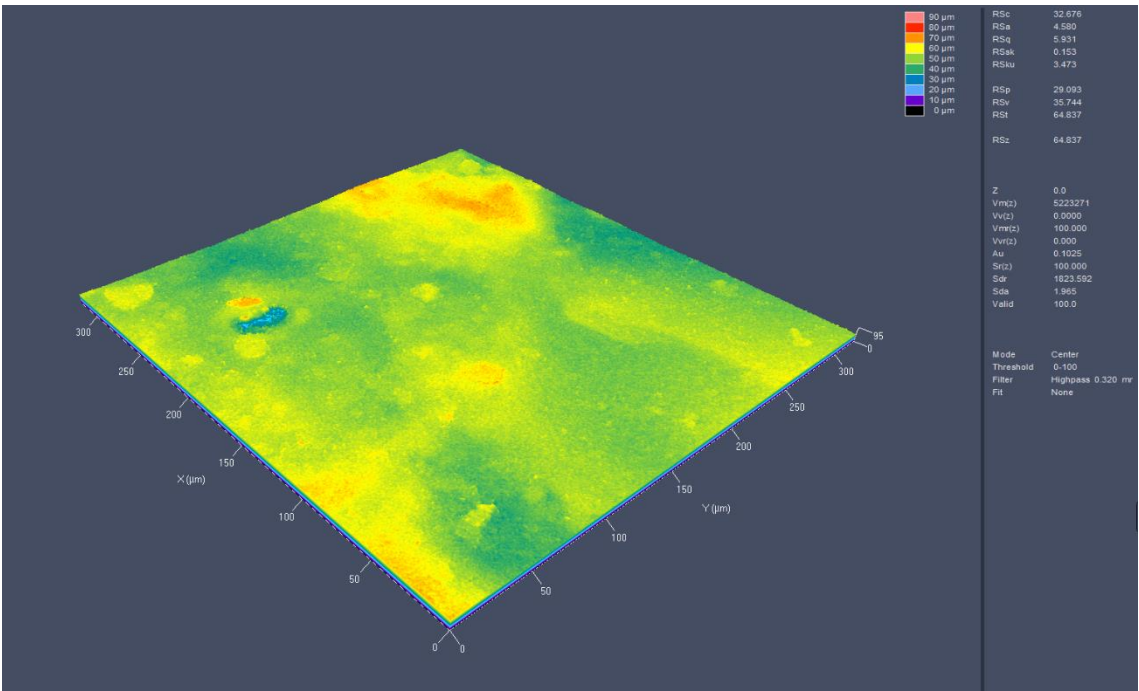
Imagens de microscopia confocal e parâmetros de rugosidade da superfície do agregado de concreto reciclado com a) superfície natural



Imagens do estereoscópio das superfícies do agregado de concreto reciclado com b) superfície pós-tratamento mecânico



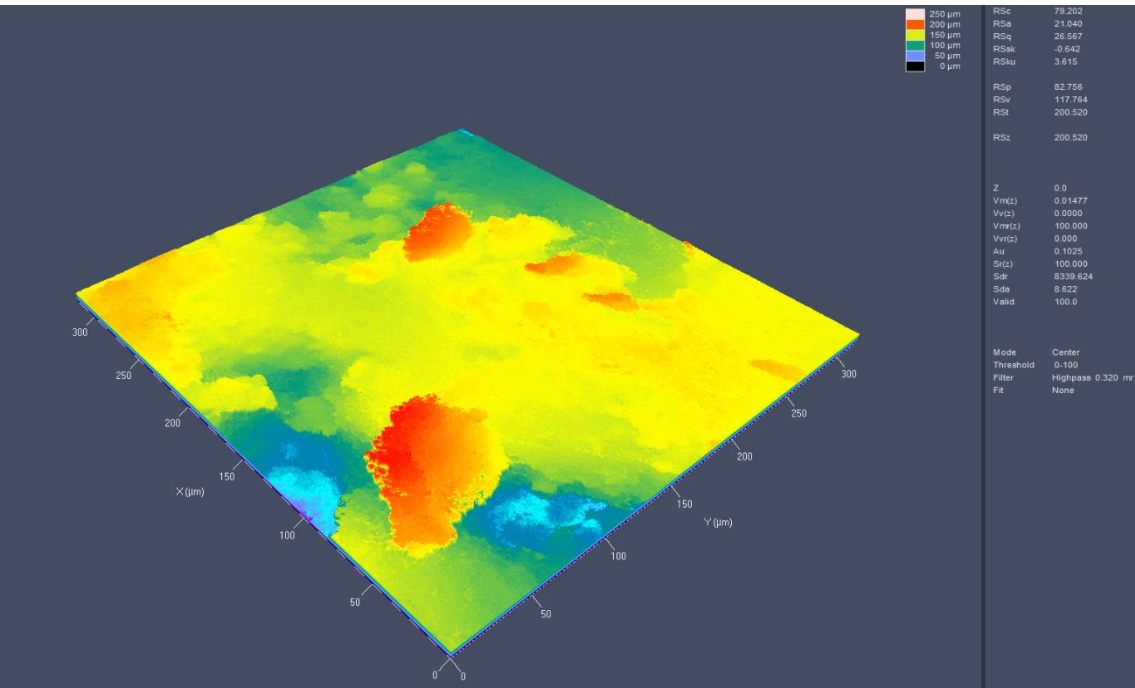
Imagens de microscopia confocal e parâmetros de rugosidade da superfície do agregado de concreto reciclado com b) superfície pós-tratamento mecânico



Imagens do estereoscópio das superfícies do agregado de concreto reciclado c) rugosidade pós lixamento simples.

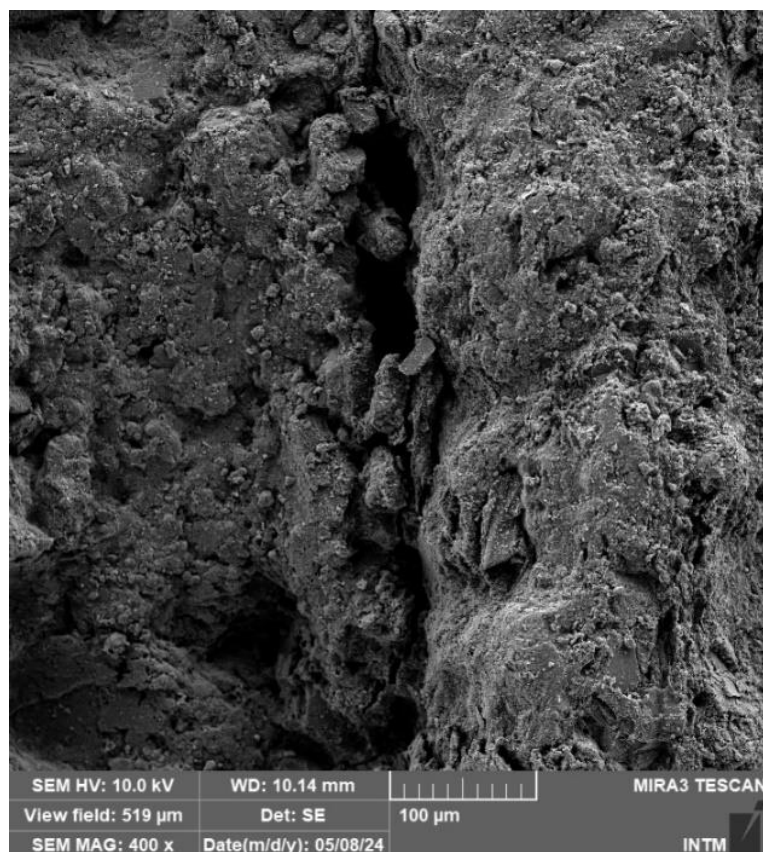
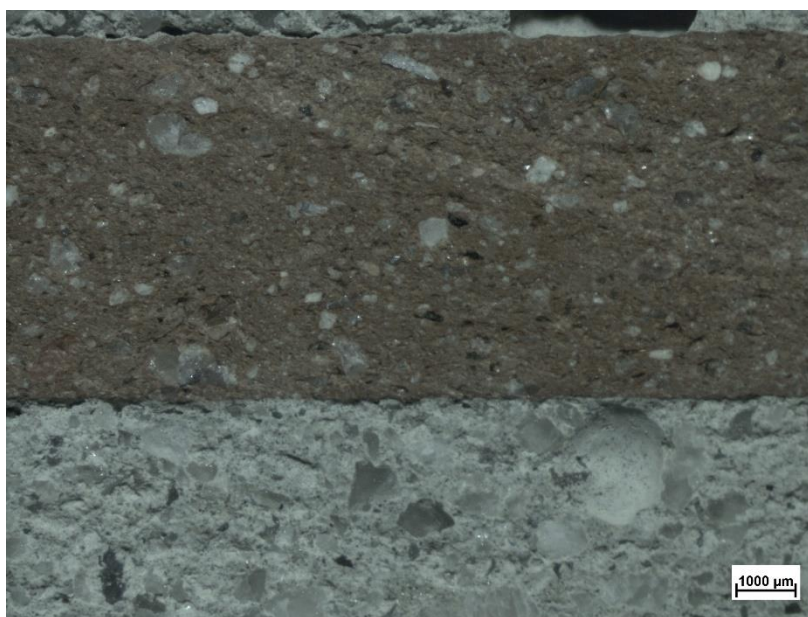


Imagens de microscopia confocal e parâmetros de rugosidade da superfície do agregado de concreto reciclado com c) rugosidade pós lixamento simples.

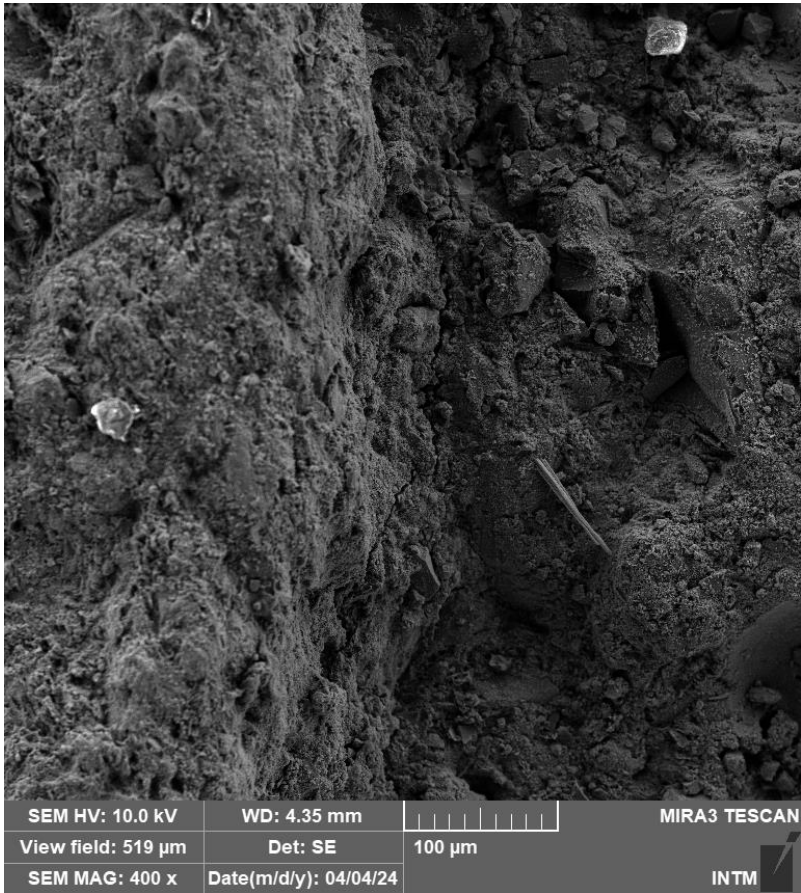


APÊNDICE C – IMAGENS DA ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL AGREGADO-ARGAMASSA NO ESTEREOSCÓPIO E MEV

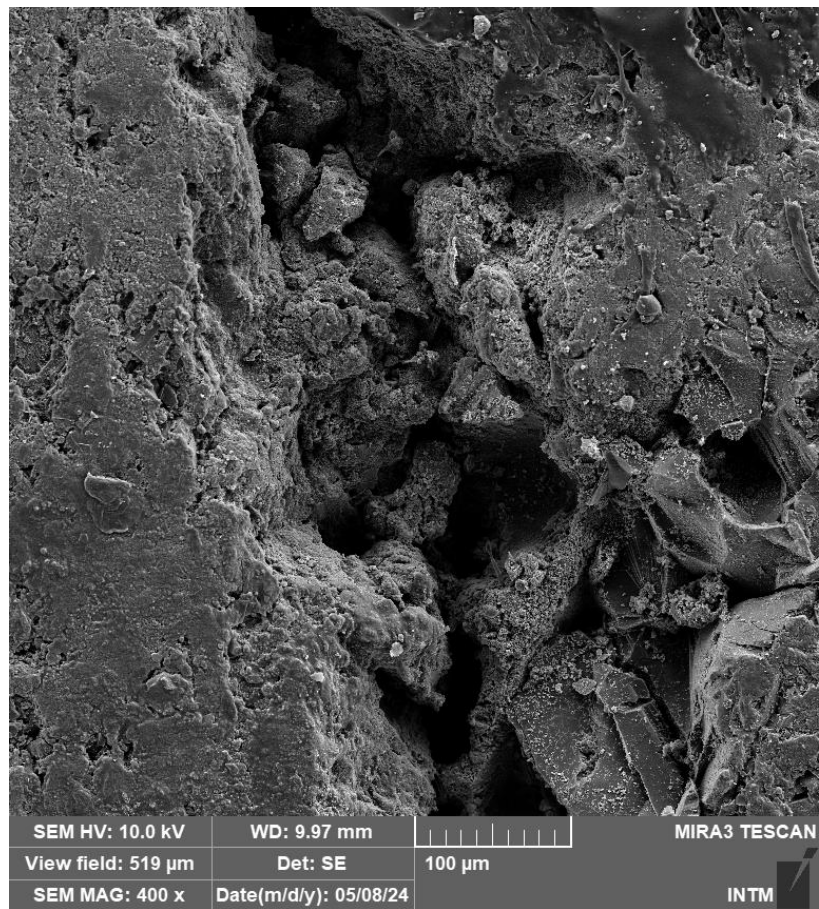
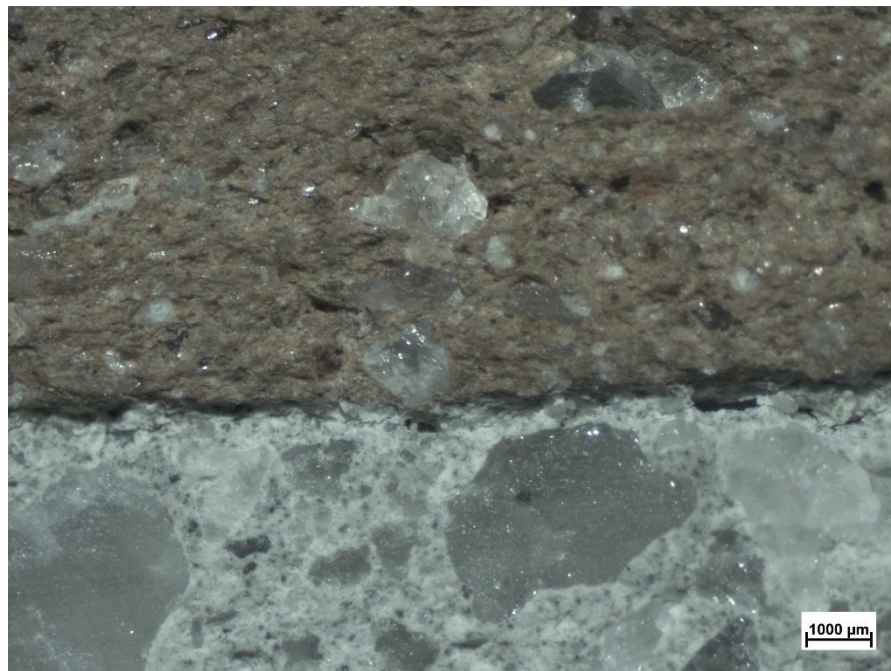
Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de tijolo cerâmico na condição (a) natural



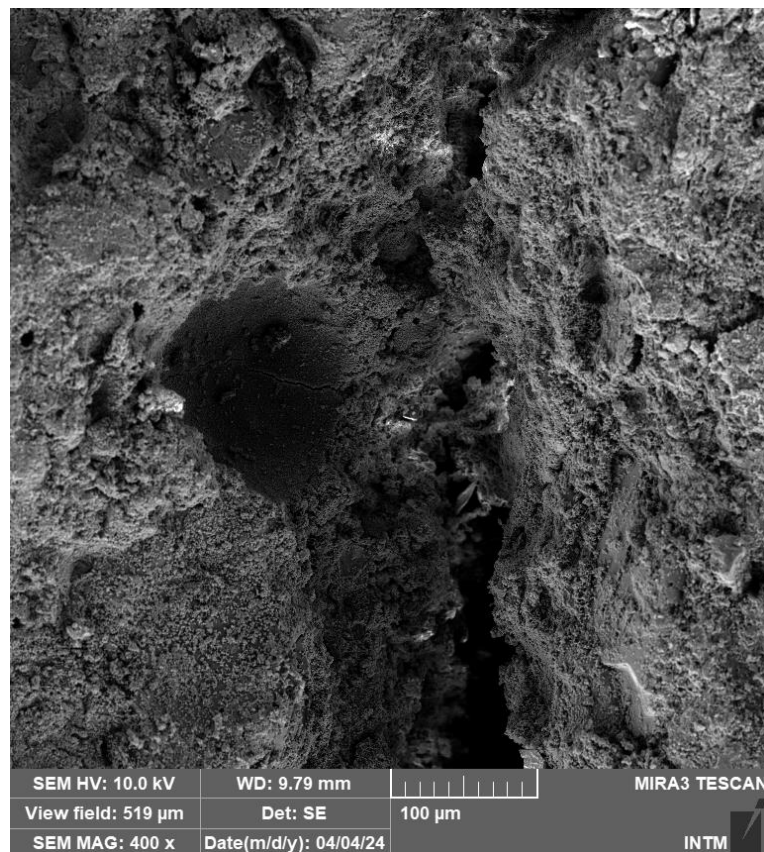
Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de tijolo cerâmico na condição b) com tratamento mecânico



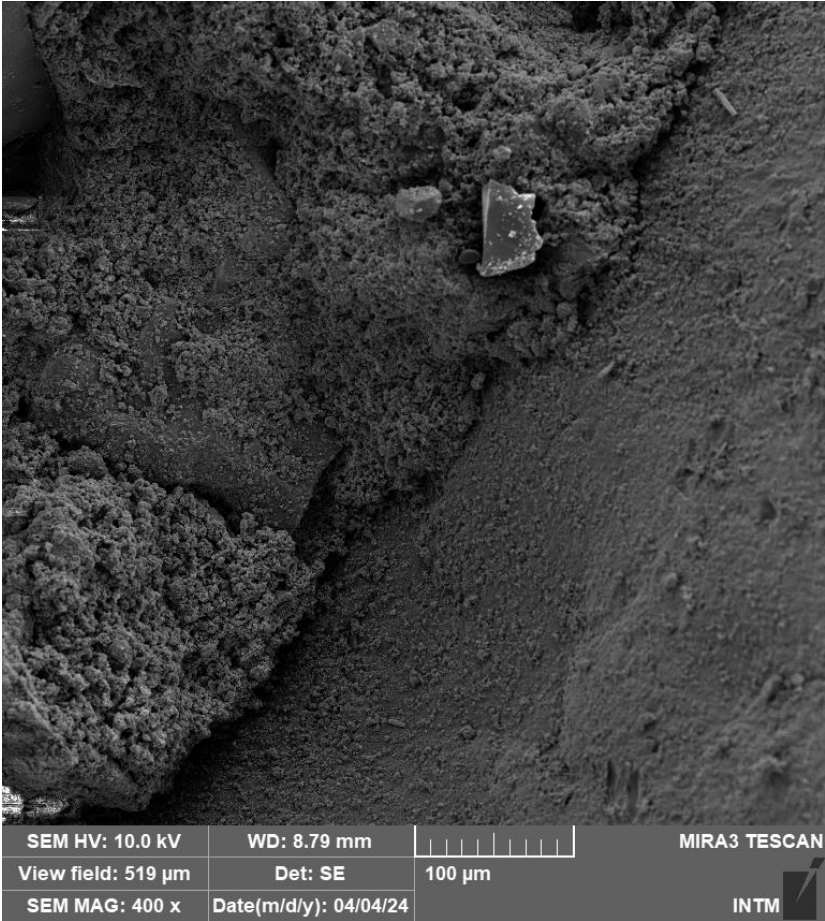
Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de tijolo cerâmico na condição c) com
lixamento simples



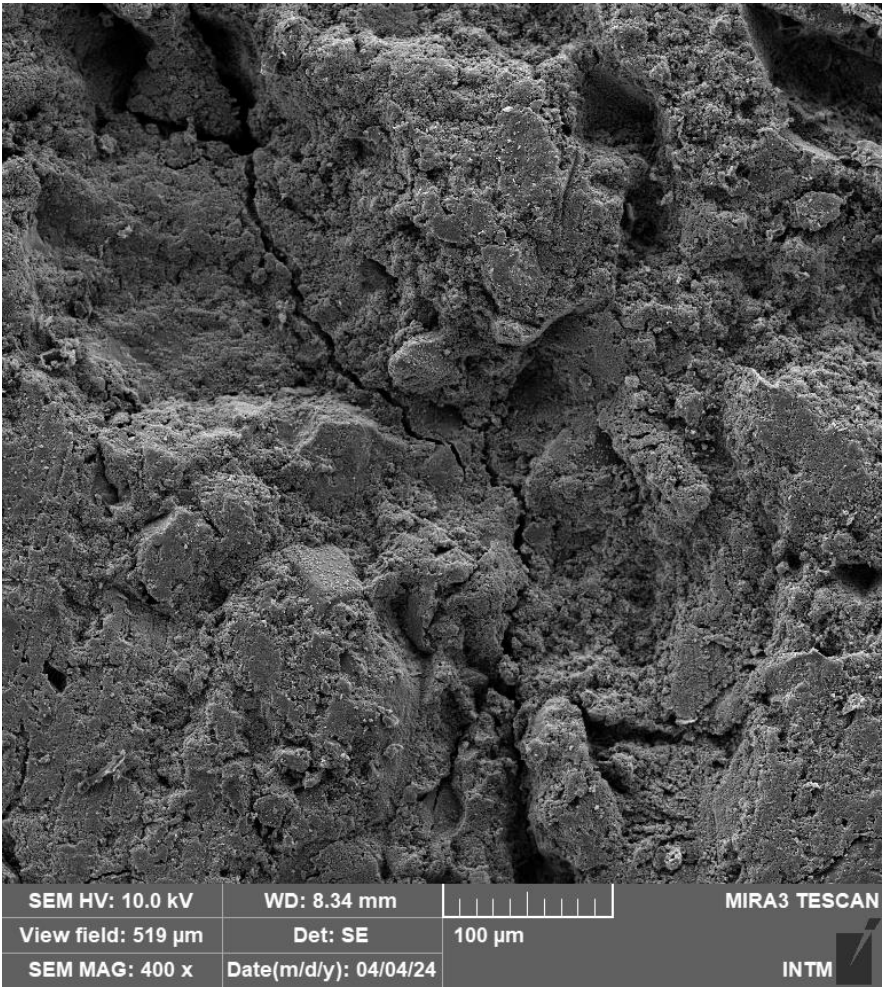
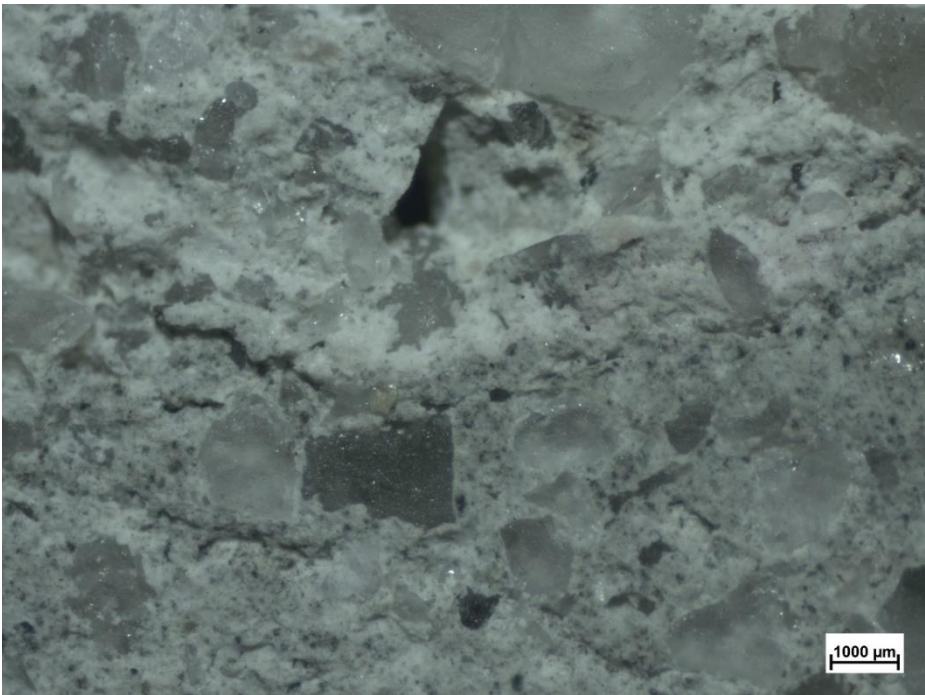
Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de tijolo cerâmico na condição d) com lixamento duplo.



Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de concreto na condição (a) natural



Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de concreto na condição b) com tratamento mecânico



Zona de Transição Interfacial do agregado reciclado de concreto na condição c) com lixamento simples

