

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

TABATA MOROZINI SIQUEIRA

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DE CONCRETOS E ARGAMASSAS
PRODUZIDOS COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS NATURAIS
POR RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA**

GUARAPUAVA

2021

TABATA MOROZINI SIQUEIRA

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DE CONCRETOS E ARGAMASSAS
PRODUZIDOS COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS NATURAIS
POR RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA**

**ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF CONCRETE AND MORTAR
PRODUCE WITH PARTIAL REPLECEMENT OF NATURAL AGGREGATES BY
RED CARAMIC WASTE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Me. Marcela Maier Farias Czap.

GUARAPUAVA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TABATA MOROZINI SIQUEIRA

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DE CONCRETOS E ARGAMASSAS
PRODUZIDOS COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS NATURAIS
POR RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 03/dezembro/2021

Marcela Maier Farias Czap
Mestra em Construção Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Géssica Katalyne Bicalti
Mestra em Materiais e Componentes da Construção
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rafaella Salvador Paulino
Mestra em Engenharia de Edificações e Saneamento
Faculdade Guarapuava

GUARAPUAVA

2021

Dedico este trabalho à minha família, por sempre me apoiarem e serem meus maiores incentivadores na realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me protegido nesta caminhada e me permitido realizar esse sonho.

Aos meus pais, Osmar e Roseli, por sempre acreditarem em mim, por todo o apoio e incentivo que me deram, vocês são os pilares do que sou hoje.

A minha irmã, Larissa, que foi a minha base e força para que eu alcançasse esse objetivo tão sonhado, sempre me motivando, ajudando e apoiando em momentos difíceis. Sem você eu não teria conseguido.

Ao meu namorado, Daniel, por toda a compreensão e apoio ao longo dessa jornada, tornando esse percurso mais leve.

A todos os meus familiares, que sempre me ajudaram e me motivaram, vocês tornaram meus dias melhores.

A minha orientadora, Marcela Maier Farias Czap, por todo conhecimento ofertado, por todo o tempo e paciência que dedicou comigo, você foi essencial para a realização deste trabalho.

A professora, Géssica Katalyne Bicalti, por todo conhecimento compartilhado e por me ajudar sempre que precisei da melhor maneira possível.

A todos os meus professores, por todo ensinamento ao longo dessa jornada acadêmica.

A todos os meus amigos e amigas, que sempre estiveram comigo tornando meus dias melhores.

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR-CT, em especial ao professor Alexandre, pelo excelente atendimento, comprometimento e por todo ensinamento compartilhado.

Ao Centro de Microscopia do Instituto Carlos Chagas – Fiocruz, em especial a Anny Kulig, pelo ótimo trabalho e atendimento.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela formação profissional e por tornar possível a realização deste trabalho.

A todos, de forma geral, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

A construção civil gera grande quantidade de resíduos, que quando descartados incorretamente, repercutem em impactos negativos para o meio ambiente e para economia. A fim de reduzir os impactos ambientais, uma alternativa é substituir os agregados naturais em concretos e argamassas por agregados reciclados, os quais são obtidos por meio da reciclagem e reaproveitamento dos resíduos da construção. Esse estudo tem como objetivo analisar a microestrutura, morfologia e análise química do concreto e da argamassa produzidos com a substituição parcial e total do agregado graúdo e do agregado miúdo, respectivamente, por resíduos de cerâmica vermelha (RCV). Para isso, foram analisadas amostras de concreto com teor de 0%, 5%, 15% e 25% de RCV e de argamassa com o teor de 0%, 20%, 50% e 100% de RCV através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a composição mineralógica pela difração de Raio-X (DRX). Os resultados revelaram que a microestrutura do concreto e da argamassa com incorporação do RCV na sua constituição não apresentou mudanças em sua composição mineralógica quando comparados com o material de referência. Entretanto, o concreto obteve alterações na sua composição química, o que não ocorreu de maneira relevante na argamassa. Portanto, conclui-se que o RCV se apresenta sugestivo a reações pozolânicas, podendo modificar a composição química do concreto e apresentando características de grande potencial para ser utilizado como agregado reciclado nas argamassas.

Palavras-chave: argamassa; cerâmica vermelha; concreto; microestrutura.

ABSTRACT

The construction industry generates a large amount of waste, which when incorrectly disposed of, has negative impacts on the environment and economy. In order to minimize it, an alternative is replacing the natural aggregates with recycled aggregates, which are obtained by recycling and reusing construction waste. This study aims to analyze the microstructure, morphology and chemical analysis of concrete and mortar produced with the partial and total replacement of coarse aggregate and fine aggregate, respectively, by red ceramic waste (RCW). For this purpose, concrete samples with 0%, 5%, 15% and 25% RCW content and mortar with 0%, 20%, 50% and 100% RCW content were analyzed through scanning electron microscopy (SEM) analysis and mineralogical composition by X-ray diffraction (XRD). The results revealed that the microstructure of concrete and mortar with incorporation of RCW in their constitution did not present changes in their mineralogical composition when compared to the reference material. Nonetheless, the concrete had changes in its chemical composition which did not occur in a relevant way in the mortar. Therefore, it is concluded that the RCW is suggestive of pozzolanic reactions, being able to modify the chemical composition of the concrete and presenting characteristics of great potential to be used as recycled aggregate in mortars.

Keywords: mortar; concrete; red pottery; microstructure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma das principais etapas do processo de fabricação dos produtos de cerâmica vermelha	17
Figura 2 - Coleta de resíduos de construção e demolição pelos municípios do Brasil	18
Figura 3 - Compostos hidratados da reação entre o sulfato de cálcio e aluminato de cálcio	26
Figura 4 - Taxa de liberação do calor do cimento Portland	27
Figura 5 - Etapas do processo de hidratação do cimento	28
Figura 6 - Porosidade da pasta de cimento hidratada	30
Figura 7 - Microestrutura heterogênea da pasta de cimento hidratada	32
Figura 8 – Fissuras com cristais de etringitas	33
Figura 9 - Seção transversal de um corpo de prova de concreto	34
Figura 10 - Zona de transição	35
Figura 11- Corpo de prova de concreto produzidas por Santos (2021).....	41
Figura 12 – Corpos de prova de argamassa produzidas por Becker (2021)	42
Figura 13 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	43
Figura 14 - Metalizadora	44
Figura 15 - Amostras de concreto para o MEV	44
Figura 16 - Amostras de argamassa para o MEV	45
Figura 17 – Difratometros de raios-x (DRX)	45
Figura 18- Moagem das amostras.....	46
Figura 19 – Amostras de concreto e RCV para o DRX	47
Figura 20 - Amostras de argamassa e RCV para o DRX	47
Figura 21 – MEV da microestrutura do RCV	48
Figura 22 – Microanálise do RCV.....	49
Figura 23 – Resíduos de tijolos cerâmicos.....	51
Figura 24 - Morfologia do concreto de referência	53
Figura 25 - Microanálise do concreto de referência	53
Figura 26 - Etringitas, monossulfoaluminatos, portlanditas e C-S-H	55
Figura 27 - Morfologia do concreto com 5% de RCV	56
Figura 28 - Microanálise de concreto produzido com 5% de RCV	57
Figura 29 – Morfologia do concreto com 15% de RCV	58
Figura 30 - Microanálise de concreto produzido com 15% de RCV	59
Figura 31 - Morfologia do concreto com 25%.....	60
Figura 32 - Microanálise de concreto produzido com 25% de RCV	61
Figura 33 – Morfologia da argamassa de referência	66
Figura 34 – Microanálise da argamassa de referência.....	67
Figura 35 - Morfologia da argamassa com 20% de RCV	68
Figura 36 - Monossulfoaluminatos cravados na pasta C-S-H	68

Figura 37 – Microanálise da argamassa com 20% de RCV	70
Figura 38 – Morfologia da argamassa com 50% de RCV	71
Figura 39 – Microanálise da argamassa com 50% RCV	71
Figura 40 – Morfologia da argamassa com 100% de RCV	73
Figura 41 – Microanálise da argamassa com 100% de RCV	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das argamassas	19
Quadro 2 - Principais compostos do cimento Portlandd	23
Quadro 3 - Reações química dos principais compostos do Cimento Portland	25
Quadro 4 – Reações que formam os cristais etringita e monossulfato	26
Quadro 5 - Principais fases sólidas da pasta de cimento hidratada	29
Quadro 6 -Classificação dos resíduos.....	36
Quadro 7 - Caracterização da amostra de concreto.....	40
Quadro 8 - Caracterização da amostra de argamassa.....	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-Análise qualitativa da composição química do RCV (MEV-EDS).....	49
Gráfico 2 - Difratoograma do RCV	52
Gráfico 3 – Microanálise do concreto de referência referente a Figura 25a.....	54
Gráfico 4 -Microanálise do concreto de referência referente a Figura 25b.....	55
Gráfico 5 – Microanálise do concreto com 5% de RCV referente a Figura 28	57
Gráfico 6 - Microanálise do concreto com 15% de RCV referente a Figura 30	59
Gráfico 7 - Microanálise do concreto com 25% de RCV referente a Figura 32	61
Gráfico 8 – Difratoograma das amostras de concreto	63
Gráfico 9 – Microanálise da argamassa de referência referente a Figura 34	67
Gráfico 10 – Microanálise da argamassa com 20% de RCV referente a Figura 37 ..	70
Gráfico 11 – Microanálise da argamassa com 50% de RCV referente a Figura 39 ..	72
Gráfico 12 – Microanálise da argamassa com 100% de RCV referente a Figura 41	74
Gráfico 13 - Difratoograma das amostras de argamassa.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo principal	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1	Cerâmica vermelha	16
3.1.1	Materiais cerâmicos.....	16
3.1.2	Fabricação da cerâmica vermelha.....	17
3.1.3	Resíduos da cerâmica vermelha	18
3.2	Argamassas	19
3.3	Concretos	20
3.4	Agregados	21
3.5	Cimento Portland	22
3.5.1	Hidratação do cimento Portland	24
<u>3.5.1.1</u>	<u>Silicatos de cálcio hidratado</u>	<u>30</u>
<u>3.5.1.2</u>	<u>Aluminato de cálcio hidratado</u>	<u>31</u>
3.6	Microestrutura	31
3.6.1	Zona de transição.....	34
3.7	A utilização de agregados reciclados na produção de concretos ...	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	Materiais	41
4.2	Métodos	42
4.2.1	Microscópico eletrônico de varredura (MEV).....	42
4.2.2	Difratômetro de Raio-X (DRX).....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	Caracterização do RCV	48
5.1.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)	48
5.1.2	Difração de Raio-X	51
5.2	Análise das amostras de concreto	52
5.2.1	Microscópico eletrônico de varredura (MEV).....	52
<u>5.2.1.1</u>	<u>Concreto de referência</u>	<u>52</u>
<u>5.2.1.2</u>	<u>Concreto com 5% de RCV</u>	<u>56</u>
<u>5.2.1.3</u>	<u>Concreto com 15% de RCV</u>	<u>58</u>

5.2.1.4	<u>Concreto com 25% de RCV</u>	<u>60</u>
5.2.2	Difração de Raio-X (DRX)	62
5.2.3	Resultados comparativos	64
5.3	Análise dos corpos de prova de argamassa.....	66
5.3.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	66
<u>5.3.1.1</u>	<u>Argamassa de referência</u>	<u>66</u>
<u>5.3.1.2</u>	<u>Argamassa com 20% de RCV</u>	<u>68</u>
<u>5.3.1.3</u>	<u>Argamassa com 50% de RCV.....</u>	<u>71</u>
<u>5.3.1.4</u>	<u>Argamassa com 100% de RCV.....</u>	<u>72</u>
5.3.2	Difração de Raio-X (DRX)	74
5.3.3	Resultados comparativos	75
6	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil se destaca na economia nacional em virtude ao aumento de investimentos em diversos setores de obras. A Câmara Brasileira de Indústria de Construção (CBIC) aponta que no ano de 2019 houve uma taxa de crescimento de 1,5% na construção civil. Embora o ano de 2020 apresente um decréscimo de 7%, possivelmente causado pela pandemia do Covid 19, no ano de 2021, nos dois primeiros trimestres do ano, o setor apresentou uma taxa de decréscimo de 0,7%, apontando uma retomada de crescimento da construção civil (CBIC, 2021).

Entretanto, o aumento das construções promove um aumento na geração de resíduos, logo, a má gestão das empresas e o descarte incorreto dos mesmos torna o setor um dos principais responsáveis pelos impactos ambientais e desperdícios econômicos (BERTOL, 2015). Sendo assim, a reciclagem é uma alternativa para minimizar a geração de resíduos nas construções, pois promove o reaproveitamento dos materiais reduzindo os desperdícios e os custos das obras. Esta prática resulta na transformação do entulho novamente em matéria-prima com grande potencialidade para uso (WADA, 2010).

Cabral *et al.* (2009) entende que a utilização de agregados reciclados tem se tornado uma prática comum. O autor ainda afirma que dentre os diversos resíduos da construção civil, para o uso em agregados reciclados destaca-se o resíduo de cerâmica vermelha (RCV), provenientes de tijolos, blocos e telhas cerâmicas.

Na produção da cerâmica vermelha são gerados cerca de 6,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos que podem ser adicionados na produção de componentes construtivos, como em concretos não estruturais, nos quais os agregados podem ser substituídos por RCV. Quando aplicados em matrizes cimentícias com um controle adequado da mistura e composição química podem ser incorporados como substituição parcial ao cimento ou como adições minerais (BALDIN C.; FILHO; BALDIN V., 2021; GARCIA; JUNIOR; QUARCIONI, 2014).

Sabendo que o concreto é o material mais usado na construção civil, BALDIN C., FILHO e BALDIN V. (2021) desenvolveram seu estudo com o propósito de analisar a substituição parcial do composto cimento por resíduos da cerâmica vermelha na aplicação em placas de fibrocimento. Com isso, obtiveram resultados positivos em relação a resistência do material. Cabral *et al.* (2009) também já tinha

estudado a substituição parcial de agregados miúdos e graúdos por RCV em concretos. O resultado da sua pesquisa foi que em agregados graúdos a resistência diminuiu, enquanto que em agregados miúdos aumentou. Além disso, Malta, Silva e Gonçalves (2013) realizaram seus estudos utilizando resíduos de construção e demolição como agregados nas argamassas e obtiveram que as argamassas recicladas apresentam menor resistência, devido a sua maior porosidade.

O material mais utilizado como aglomerante é o cimento Portland, que é formado pela mistura de clínquer com sulfato de cálcio. Os componentes principais do cimento são os aluminatos e silicatos que tendem a reagir com a água, precipitando e causando o endurecimento do material (NEVILLE, 2016). Logo, quando começa o processo de hidratação do cimento Portland, formam-se compostos que constituem a microestrutura do concreto e da argamassa (METHA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Metha e Monteiro (2008), a microestrutura do concreto e da argamassa é composta pelos agregados, pela pasta de cimento hidratada e a zona de transição. O autor ainda afirma que o entendimento de cada composto e das suas propriedades auxiliam nos procedimentos para realizar a melhora das propriedades dos materiais. Logo, a zona de transição é considerada a condição limitante para definir a resistência, pois é considerada a região mais frágil.

Portanto, devido ao crescimento do setor da construção civil e o aumento na geração de resíduos, o uso de agregados reciclados na produção dos concretos e argamassas influenciam na redução de desperdícios de materiais e reduz os impactos ambientais. Além disso, como são materiais muito utilizados em obras, a fim de apresentar uma melhora nas suas propriedades, em especial a resistência mecânica, justifica-se a importância do estudo da sua microestrutura, das características dos compostos hidratados e da zona de transição.

Este trabalho buscou analisar a microestrutura do concreto e da argamassa produzidos com a substituição parcial de agregados graúdos, no concreto, e de agregados miúdos, na argamassa, por RCV, com o propósito de comparar o comportamento dos materiais com a referência.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

Analisar a microestrutura de concretos e argamassas produzidos com a substituição parcial de agregados naturais graúdos e miúdos, respectivamente, por agregados de resíduos da cerâmica vermelha (RCV).

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analisar a microestrutura dos concretos produzidos com a substituição parcial de agregados graúdos por resíduos de cerâmica vermelha (RCV);
- Analisar a microestrutura dos concretos de referência;
- Comparar a microestrutura do concreto de referência com os concretos com RCV;
- Analisar a microestrutura das argamassas produzidas com a substituição parcial de agregados miúdos por resíduos de cerâmica vermelha (RCV);
- Analisar a da microestrutura das argamassas de referência;
- Comparar a microestrutura da argamassa de referência com as argamassas com RCV.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cerâmica vermelha

3.1.1 Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são utilizados em várias etapas da obra e se encontram em alta no mercado da construção civil. São materiais produzidos com argila branca ou vermelha sendo o resultado da ligação iônica entre materiais metálicos e não-metálicos (ABITANTE; LISBOA, 2017). A cerâmica é definida como todo material com características inorgânicas que é formada a partir do tratamento em altas temperaturas (ABCERAM, 2017).

A cerâmica branca consiste em materiais que são concebidos de um corpo branco e revestidos por uma camada vítrea transparente. Suas principais aplicações são em louças sanitárias, cerâmica artística e louças de mesa. A cerâmica vermelha, que é o foco desse estudo, abrange os materiais de coloração avermelhada utilizados na construção civil. Dentre suas aplicações, se destaca os tijolos, pisos, blocos e telhas (ABCERAM, 2017).

A cerâmica vermelha é produzida da argila que é um composto terroso com elevada plasticidade quando misturado com água. A argila é uma matéria-prima constituída principalmente por cristais muito pequenos, chamados de argilo-minerais (BAUER, 2011). São classificadas de acordo com seu arranjo estrutural, podendo ser laminar ou foliácela. As argilas de estrutura laminares são destaque para esse estudo, visto que são utilizadas para a formação de materiais cerâmicos (ABITANTE; LISBOA, 2017).

O uso da argila nos materiais de construção é considerado vantajoso devido suas propriedades, em que as principais são a plasticidade, que confere mobilidade ao material, efeito do calor, que promove resistência, dureza, formação de novos compostos e condutibilidade térmica, retração e dilatação em diferentes temperatura e porosidade, a qual está associada com a capacidade calorífica do material (BAUER, 2011).

Além disso, como a cerâmica possui alta compactação, são formadas principalmente por compostos iônicos, ânions e cátions, em que os ânions são maiores em tamanho. Dessa forma, podem apresentar os seguintes compostos em

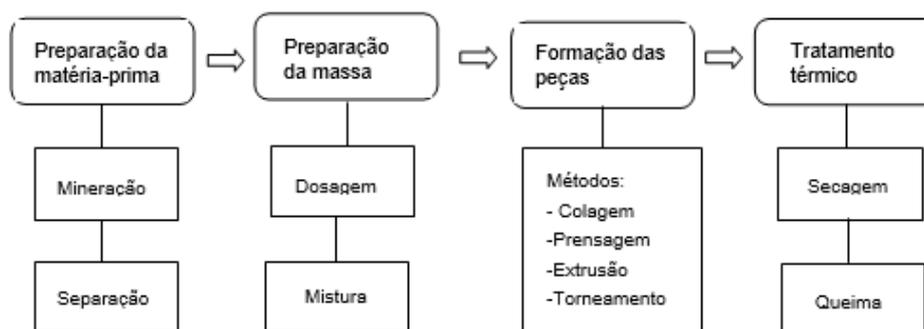
sua estrutura: cloreto de sódio (NaCl), cloreto de céσιο (CsCl) e sulfeto de zinco (ZnS) (ABITANTE; LISBOA, 2017).

3.1.2 Fabricação da cerâmica vermelha

A argila vermelha é extraída de laterais de rios ou barrancos. Para usá-la na fabricação da cerâmica vermelha, primeiramente ela deve ser preparada, a fim de eliminar as impurezas presentes que possam comprometer a qualidade do material. Posteriormente, é realizada a moldagem, secagem, cozimento e esfriamento (ABITANTE; LISBOA, 2017).

O fluxograma apresentado na Figura 1 mostra as principais fases do processo de fabricação de materiais de cerâmica vermelha. Primeiramente, é realizada a preparação da matéria-prima, que consiste na sua desagregação ou moagem. Em seguida é feita a preparação da massa, ou seja, dosagem e mistura dos compostos e, então, as peças são moldadas. A preparação das peças pode ser desempenhada de diferentes formas, varia de acordo com as características do produto, em que as principais são: colagem, prensagem, extrusão e torneamento. Por fim, é feito o tratamento térmico pelas etapas de secagem e queima, pelas quais são desencadeadas as propriedades finais dos produtos (ABCERAM, 2017).

Figura 1 - Fluxograma das principais etapas do processo de fabricação dos produtos de cerâmica vermelha



Fonte: Adaptado Abceram (2017)

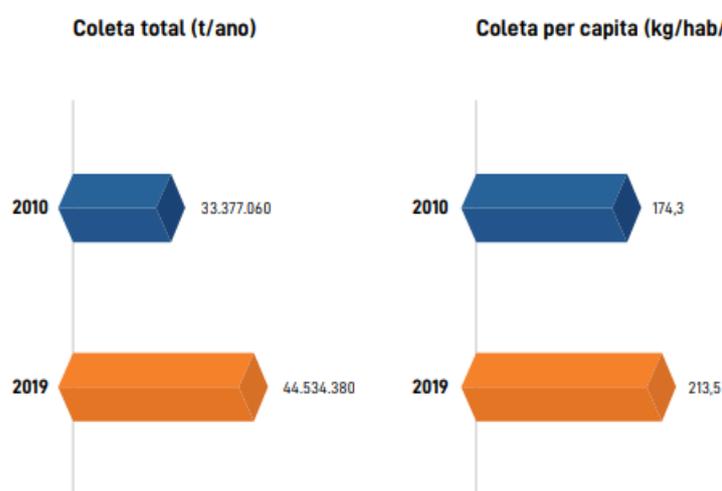
A moldagem da cerâmica para tijolos e telhas é feita com uma pasta seca ou semi-seca, com a adição de 4 a 10% de água, sendo moldada com prensas. A secagem é uma fase importante, visto que se a cerâmica for levada úmida ao forno resulta em tensões internas e, assim, em fendilhamentos. Dessa forma, para o tijolo, por exemplo, são necessárias de 3 a 6 semanas para a secagem ao ar livre. A

secagem também pode ser por ar quente-úmido e por radiação infravermelha, mas possui um custo alto. O cozimento, ou queima da cerâmica, é a fase final da sua produção, em que nas pequenas olarias são colocados manualmente nos fornos a lenha. O esfriamento não deve ser brusco devido à retração do material (CARVALHO *et al.*, 2018).

3.1.3 Resíduos da cerâmica vermelha

Dos resíduos urbanos, 50% são produzidos pela construção civil, demonstrando a importância do estudo e tomadas de medidas que visem sua redução, já que possuem um grande potencial de deterioração ambiental. (RODRIGUES *et al.*, 2013). De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2020), houve um acréscimo na geração de resíduos de construção e demolição (RCD) nos municípios do Brasil. Foi comparado o período de 2010 a 2019, onde a coleta desses resíduos aumentou de 174,3 kg para 213 kg por pessoa no ano, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Coleta de resíduos de construção e demolição pelos municípios do Brasil



Fonte: ABRELPE (2020)

Os resíduos cerâmicos são classificados como classe A. Segundo a Resolução CONAMA nº 448/12 os resíduos de classe A devem ser reaproveitados ou reciclados como agregados, caso não sejam, devem ser descartados em aterros próprios, onde são preservados para possível uso desses materiais no futuro.

De acordo com a ANICER – Associação Nacional de Indústria Cerâmica (2021), a indústria da cerâmica vermelha constitui 4,8% da indústria da construção

civil, sendo constituída por empresas de pequeno a médio porte, compreendendo aproximadamente 6.903 empresas e olarias por todo o Brasil, as quais geram 293 mil empregos diretos e cerca de 900 mil empregos indiretos com faturamento anual de 18 bilhões.

Além disso, a fabricação de cerâmica vermelha produz cerca de 6,5 milhões de toneladas de resíduos. Se houver o controle adequado da qualidade, da composição e da mistura, esses resíduos podem ser aplicados em matrizes cimentícias (GARCIA; JUNIOR; QUARCIONI, 2014).

3.2 Argamassas

As argamassas são materiais que podem ser utilizados para assentar tijolos e no rejunte das placas cerâmicas (ABITANTE; LISBOA, 2017). Segundo a ABNT NBR 13281:2005 a argamassa é formada por uma mistura homogênea entre agregados miúdos, aglomerantes e água. Os agregados usados podem ser agregados miúdos naturais, como a areia, ou agregados miúdos reciclados. Os aglomerantes mais comumente utilizados são a cal e o cimento, além disso, também podem ser adicionados aditivos à composição.

Existem diversas qualificações para as argamassas, como: resistência, aderência, impermeabilidade, trabalhabilidade, retração, retenção de água, entre outras. Essas propriedades dependem de para o que o material vai ser usado, logo, sua classificação se relaciona a diversos fatores, como o tipo do agregado utilizado, da relação água/cimento, tipo do aglomerante, etc., conforme mostrado no Quadro 1 (ABITANTE; LISBOA, 2017; KLASS; OLIVEIRA, 2012). Suas aplicações podem ser em revestimentos de paredes e tetos, rebocos, chapisco, em contra pisos e em assentamento de tijolos (ABITANTE; LISBOA, 2017).

Quadro 1 – Classificação das argamassas

Crítérios	Função da argamassa
Natureza do aglomerante	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa aérea; • Argamassa hidráulica.
Tipo de aglomerante	<ul style="list-style-type: none"> • Cal; • Cimento; • Mista (cimento e cal); • Gesso; • Mista (gesso e cal).
Concistência	<ul style="list-style-type: none"> • Seca; • Plástica; • Fluída.

Plasticidade	<ul style="list-style-type: none"> •Pobre ou magra; •Média ou cheia; •Rica ou gorda.
Densidade	<ul style="list-style-type: none"> •Leve; •Normal; •Pesada.
Forma de preparo	<ul style="list-style-type: none"> •In loco, na obra; •Semipronta; •Industrial.

Fonte: Adaptado de Abitante e Lisboa (2017)

Antigamente as argamassas eram constituídas somente com cal e areia. Mas, com o tempo passaram a ser constituídas também pelo aglomerante cimento Portland, dessa forma, o material ganhou mais resistência e aderência nas primeiras idades (CEOTTO; BANDUK; NAKAKURA, 2005).

As argamassas de cimento comparadas às argamassas de cal, são mais utilizadas devido às suas propriedades de favorecer uma melhor resistência ao sistema e ajudar no enrijecimento. Entretanto, possui uma baixa trabalhabilidade, por isso pode-se adicionar cal para torná-la mais plástica. São utilizadas em alvenarias e chapiscos, enquanto que a argamassa só de cal é mais utilizada em reboco e emboço (FRANCISCON, 2007).

3.3 Concretos

O concreto é definido como uma mistura da argamassa com os agregados graúdos, no qual ocorre o processo de hidratação após o contato entre os aglomerantes com a água, gerando reações químicas que são responsáveis por propriedades importantes do concreto (CARNEIRO; GIL; NETO, 2011).

O material mais utilizado na construção civil é o concreto, devido a sua capacidade de atingir várias formas e tamanhos, baixo custo e grande disponibilidade no mercado. É constituído pela mistura de cimento Portland, água e agregados, em que dos agregados graúdos os mais utilizados são as britas e dos agregados miúdos a areia (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Com o objetivo de melhorar as propriedades dos concretos e possibilitar uma economia mais satisfatória à obra, tem sido desenvolvida novas técnicas usando a substituição dos agregados naturais pelos reciclados (CABRAL *et al.*, 2009).

Sendo assim, o concreto é um material poroso composto por estruturas microscópicas e macroscópicas. A mistura da pasta de cimento hidratada com os agregados constitui a escala macroscópica do material e a escala microscópica é

construída pelos compostos que não são visíveis ao olho nu (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Teixeira (2020), o cimento, que compõe a estrutura do concreto, é o material que mais afeta os processos físicos e químicos do material, pois a relação água/cimento e a estrutura porosa do concreto são responsáveis pela durabilidade do material. Desse modo, a resistência do concreto é relacionada ao volume de vazios contidos nele, ou seja, à sua porosidade. Logo, a resistência tem interferência a partir dos vazios ocasionados pelo ar, poros capilares, poros de gel, e pelo o ar incorporado, quando utilizado (NEVILLE, 2016).

3.4 Agregados

Os agregados apresentam grande influência nas propriedades do concreto e da argamassa, tanto na resistência, como na durabilidade e no desempenho estrutural. Podem ser classificados conforme sua granulometria, em dois grupos: agregados miúdos e graúdos. Geralmente a areia é o agregado miúdo mais utilizado, com dimensão inferior a 4 mm. O agregado graúdo deve ter dimensão mínima de 5 mm e a separação dos mesmos é feita pela peneira ASTM N° 4 que possui uma abertura de 4,75 mm (NEVILLE, 2017).

De acordo com o autor Arnold (2011) não existe uma norma própria para caracterizar os agregados utilizados em argamassas, logo, pode ser utilizada a NBR 7211:2005, a mesma utilizada para concretos. Conforme essa norma, fatores como a massa específica e unitária, as formas dos grãos, granulometria e espaços vazios são fatores para a escolha dos agregados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Os agregados constituem 3/4 do volume do concreto e auxiliam no seu comportamento no estado fresco e rígido. Correspondente ao principal influente na massa unitária, na sua estabilidade dimensional e no seu módulo de elasticidade. Não interfere diretamente na propriedade de resistência do concreto, entretanto, quanto maior for o agregado e com o formato achatado e alongado, mais enfraquecida será a zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.5 Cimento Portland

O cimento é um material com propriedades coesivas e adesivas que é apto a unir fragmentos minerais. Na área da construção civil, é descrito como um material aglomerante composto de calcário, pois reagem quimicamente com a água. É denominado como “Cimento Portland (CP)” devido a sua equivalência na cor e qualidade do cimento enrijecido com a pedra de Portland. Essa nomenclatura é usada até hoje para descrever o cimento obtido a partir da mistura de materiais calcários e argilosos ou de outros materiais que possuam alumina, óxidos de ferro e sílica e com a consecutiva moagem do clínquer resultante (NEVILLE, 2016). Classifica-se de I a V dependendo dos compostos e da resistência à compressão que o material possui (LOPES, 2016).

Desse modo, o processo de fabricação do cimento Portland consiste em três etapas, sendo a primeira a extração das matérias-primas das jazidas naturais, as quais são transportadas até a indústria onde serão armazenadas e homogeneizadas. A segunda etapa consiste na moagem e aquecimento da mistura em que se dá origem ao principal material utilizado para a produção de todos os tipos de cimentos, o clínquer, por fim, a última etapa consiste no processo de moagem e adições (AMBROZEWICZ, 2012).

Sendo assim, o clínquer é formado por meio da moagem e mistura das matérias-primas que são submetidas a temperaturas elevadas em fornos rotativos. Em seguida, é resfriado e adiciona-se um baixo teor de sulfato de cálcio, conhecido como gipsita. Por fim é moído até formar um pó bastante fino que resulta no cimento Portland. Logo, o cimento anidro é ausente de água e sua composição varia de 45% a 60% de silicato tricálcico, de 15% a 30% de silicato dicálcico, de 6% a 12% de aluminato tricálcico e 6% a 8% de ferroaluminato (NEVILLE, 2016; METHA; MONTEIRO, 2008).

A composição do cimento é formada por quatro principais compostos. Esses componentes, sua composição e abreviaturas estão listados no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3CaOSiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaOSiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaOAl_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF

Fonte: Neville (2016)

Os silicatos constituintes no cimento não são compostos puros, pois possuem óxidos secundários em sua composição sólida, os quais trazem efeitos importantes no arranjo atômico, nas propriedades dos silicatos e na forma dos cristais. Além disso, o cimento possui compostos secundários em sua composição, os quais fazem parte de um pequeno percentual da massa de cimento. Dentre esses compostos, destaca-se os óxidos de sódio (Na_2O) e os óxidos de potássio (K_2O), conhecidos como álcalis, pois eles podem reagir com alguns agregados gerando uma desintegração do concreto (NEVILLE, 2016).

De acordo com Ambrozewicz (2012) a dosagem e preparo de misturas adequadas são fundamentais para os componentes no clínquer, por isso, os compostos são britados, moídos, dosados, misturados e então submetidos a análises laboratoriais.

Assim sendo, todos os materiais ativos que façam a ligação entre o grão e o agregado a partir de uma pasta porosa, derivada da mistura de água com material aglutinante, são classificados como aglomerantes. Logo, o cimento, constituído por um pó fino, quando misturado com a água desencadeia uma reação química que é capaz de gerar o seu endurecimento (AMBROZEWICZ, 2012).

A finura do cimento é definida nas suas últimas etapas de fabricação, que é a moagem do clínquer com o sulfato de cálcio. A velocidade da hidratação do cimento depende da finura dos seus grãos, visto que a hidratação tem início na superfície das partículas de cimento, portanto, para que haja um rápido desenvolvimento da resistência é preciso uma finura maior dos grãos (NEVILLE, 2016).

Entretanto, o aumento da finura dos grãos do cimento demanda um aumento na quantidade do sulfato de cálcio para retardar a pega, visto que quanto mais fino for o cimento, maior a concentração de C_3A no início da hidratação. Além disso,

implica no aumento da quantidade de água para que mantenha a sua consistência, mas também, melhora a trabalhabilidade do concreto (NEVILLE,2016).

Além disso, o cimento Portland possui propriedades aglomerantes que combinadas com os agregados são capazes de proporcionar uma maior resistência e caracteriza-se por ser impermeável e proteger a estrutura (TEIXEIRA, 2020).

3.5.1 Hidratação do cimento Portland

Na composição do cimento Portland encontram-se os principais compostos pertencentes ao clínquer: C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF , os quais adquirem suas propriedades aglomerantes a partir da adição da água. Quando o clínquer e o sulfato de cálcio, que são anidros, se misturam com a água surge sua estrutura cristalina OH^- que gera as reações de hidratação (LOPES, 2016). Sendo assim, os silicatos e aluminatos são os principais componentes do cimento Portland que reagem com a água formando produtos hidratados que resultam na pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016).

O endurecimento do concreto e da argamassa, ou seja, o processo de pega, se relaciona com as reações de hidratação do cimento Portland. Considerando os principais componentes do clínquer citados anteriormente, os silicatos se hidratam mais lentamente que os aluminatos, portanto a perda de consistência da pasta consiste das reações de hidratação dos aluminatos, enquanto que a hidratação dos silicatos tem importância na determinação das características do endurecimento (METHA; MONTEIRO, 2008).

A pega corresponde a mudança de estado da pasta de cimento de fluída para sólida. Os dois primeiros componentes do cimento ao reagirem com a água são o C_3A e C_3S , liberando hidróxido de cálcio na solução. Sendo o aluminato de cálcio responsável pela pega instantânea, mas para que aja um atraso na pega o sulfato de cálcio é adicionado em mistura ao clínquer, e por isso o C_3S inicia a pega antes (METHA; MONTEIRO, 2008).

Logo após o contato direto do cimento com a água começa uma troca iônica entre os compostos de fase sólida e líquida. Alguns compostos do cimento possuem solubilidade elevada o que resulta no aumento rápido da concentração dos sulfatos, aluminatos de cálcio, e álcalis na fase líquida (TEIXEIRA, 2020).

O Quadro 3 mostra as reações químicas dos principais compostos do cimento no processo de hidratação.

Quadro 3 - Reações química dos principais compostos do Cimento Portland

Nome do composto	Reação química
Silicato tricálcico	$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$
Silicato dicálcico	$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$
Aluminato tricálcico	$C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$
Ferroaluminato tetracálcico	$C_4AF + 2Ca(OH)_2 + 10H \rightarrow C_3AH_6 + C_3FH_6$

Fonte: Neville (2016)

A hidratação do cimento é complexa, visto que cada fase tem uma reação característica com a água e todas interferem na hidratação de todo o concreto (LOPES, 2016). Os compostos de cálcio e o sulfato de cálcio começam a reagir liberando íons e a fase líquida se torna saturada. Em pouco tempo de hidratação, a interação entre os compostos de íons hidroxilas, cálcio, sulfato e aluminato precipitam em cristais aciculares chamados de trissulfoaluminatos de cálcio hidratados, mais conhecidos como etringitas. Além disso, o silicato tricálcico começa a reagir formando o gel C-S-H (METHA; MONTEIRO, 2008).

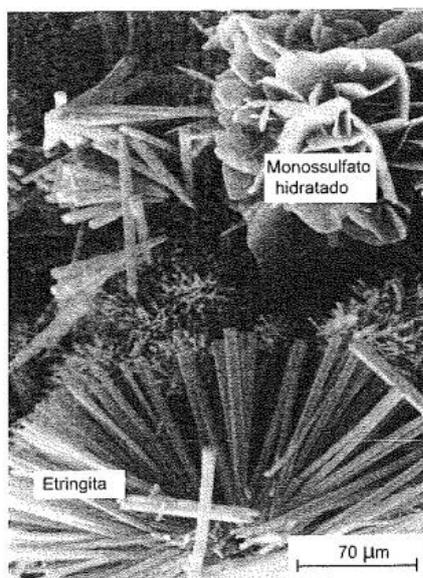
A etringita, trissulfoaluminatos de cálcio hidratado, é originada a partir do primeiro contato entre a água e o cimento Portland, ou seja, sendo o primeiro composto hidratado a cristalizar. Resulta do processo de hidratação entre o aluminato tricálcico, sulfato de cálcio e a água. Além disso, também pode ser formada de forma mais tardia, ou seja, quando há a reação entre a água, os sulfatos e aluminatos (MELO, 2010; METHA; MONTEIRO, 2008).

Em seguida, a partir de algumas horas, partículas de hidróxido de cálcio e de silicatos de cálcio hidratados começam a ocupar os espaços vazios que eram ocupados por água e cimento que estavam sendo dissolvidos. Após alguns dias, as etringitas se tornam instáveis até formar o composto monossulfoaluminato hidratado, o qual possui um formato de placa hexagonal (METHA; MONTEIRO, 2008). A Figura 3 mostra a imagem obtida de um ensaio de micrografia eletrônica de varredura, na qual se encontram os componentes gerados pela mistura entre o sulfato de cálcio e aluminato de cálcio. Além disso, o Quadro 4 mostra as reações que formam os cristais de etringita e monossulfato.

Quadro 4 – Reações que formam os cristais etringita e monossulfato

Produto hidratado	Reações
Trissulfoaluminato de cálcio	$C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (sulfato de cálcio/gipsita) + $27H_2O \rightarrow C_3A_3CaSO_4 \cdot 33H_2O$ (etringita)
Monossulfoaluminato	$2C_3A + C_3A_3CaSO_4 \cdot 33H_2O$ (etringita) + $9H_2O \rightarrow C_3A_3CaSO_4 \cdot 14H_2O$ (monossulfato)

Fonte: Neville (2016)

Figura 3 - Compostos hidratados da reação entre o sulfato de cálcio e aluminato de cálcio

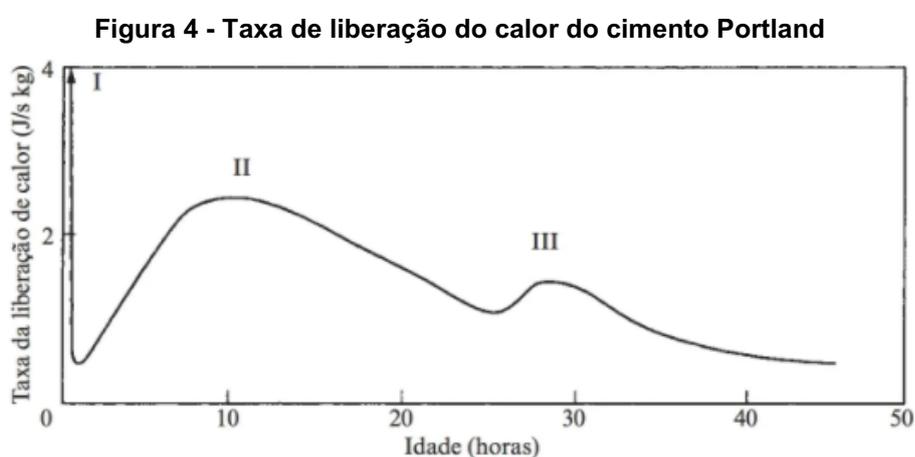
Fonte: Metha e Monteiro (2008)

O processo de hidratação ocorre de maneira contínua e sua velocidade diminui sucessivamente, de forma que mesmo depois de um longo período, ainda exista cimento anidro na sua composição, ou seja, cimento que não reagiu com a água. É possível analisar a evolução da hidratação de diversas maneiras, como: pela quantidade de hidróxido de cálcio na pasta de cimento, pelo calor de hidratação liberado, massa específica da pasta, quantidade de cimento anidro, resistência da pasta hidratada e pela quantidade de água quimicamente combinada (NEVILLE, 2016).

Neste contexto, têm-se três picos na velocidade de hidratação dentre os três primeiros dias desde o primeiro contato da água com o cimento anidro. O primeiro pico possui uma duração bem curta, caracterizada pela a hidratação inicial da superfície dos grãos de cimento e o composto C_3A , seguida de um período de dormência que dura em torno de uma a duas horas, onde a velocidade é muito baixa (NEVILLE, 2016).

Posteriormente, em certo momento a camada superficial dos grãos de cimento é rompida por osmose ou pelos cristais de hidróxido de cálcio. A liberação

de calor vai aumentando lentamente, e os precipitados dos grãos individuais interagem entre si, resultando na pega. Geralmente, após cerca de 10 horas, a velocidade de hidratação atinge o segundo pico, entretanto, às vezes esse pico é atingido somente em quatro horas. Em seguida, a velocidade de hidratação reduz por um longo período e, então, ocorre o terceiro pico onde há a retomada da velocidade de hidratação em torno de 18 e 30 horas, de forma que é menor que nos anteriores. O terceiro pico é onde ocorre a retomada da reação do C_3A , depois do esgotamento do sulfato de cálcio. A Figura 4 exemplifica os três picos da velocidade de hidratação do cimento com relação água/cimento igual a 0,4 citadas anteriormente (NEVILLE, 2016).



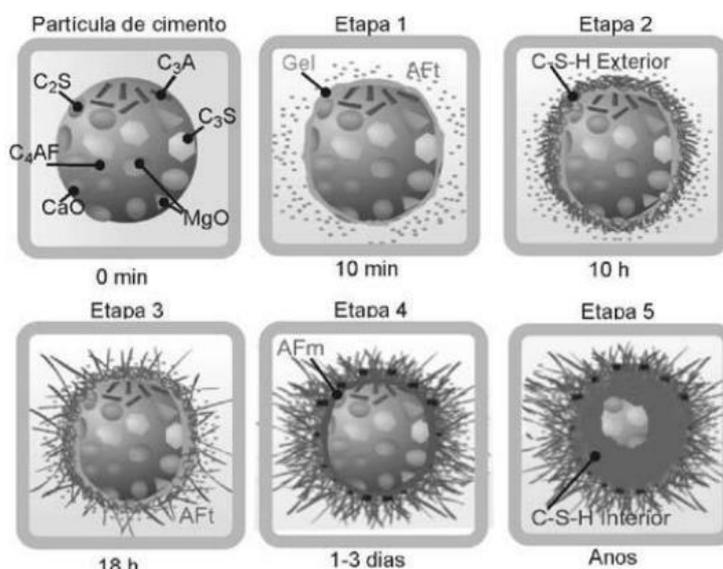
Fonte: Neville (2016)

Dessa forma, caracteriza-se em três etapas o processo de hidratação do cimento. A primeira etapa consiste na precipitação inicial, onde a água reage com o aluminato tricálcico e sulfato de cálcio precipitando o composto da etringita (AFt), além disso, também começa a hidratação dos silicatos, os quais geram um gel amorfo (C-S-H). Essas reações liberam hidróxido de cálcio na solução que reage e precipita em forma de cristais (SCRIVENER, 2004 *apud* TEIXEIRA, 2020).

Em seguida, na segunda etapa consiste na hidratação do silicato de cálcio que continua precipitando uma nova camada ao redor das partículas de cimento. Além disso, ocorre uma hidratação secundária entre os compostos de C_3A e C_4AF . Na terceira etapa, a precipitação da etringita continua e os compostos hidratados já estão ocupando os espaços vazios, e então, a porosidade da pasta tende a diminuir. Na quarta etapa, a reação já está ocorrendo de forma mais lenta, e o composto monosulfoaluminato de cálcio (Afm) é precipitado. Por fim, na última etapa, a reação

dura por anos, onde continua precipitando o gel amorfo no interior das reações (SCRIVENER, 2004 *apud* TEIXEIRA, 2020). A Figura 5 mostra as etapas da hidratação do cimento.

Figura 5 - Etapas do processo de hidratação do cimento



Fonte: Scrivener (2004) *apud* Teixeira (2020)

A fase AFm representa os produtos de hidratação entre aluminatos e/ou ferritas e/ou sulfatos, na qual aponta a presença de monossulfoaluminatos. Enquanto a fase AFt é caracterizada por possuir forma de agulhas prismáticas, sendo mais cristalina, na qual destaca-se a formação de etringitas. Quando o pico de enxofre e silício se encontram semelhantes indica a transição entre essas duas fases (MELO, 2010).

Os silicatos tricálcico e dicálcico são os principais compostos cimentícios, logo, a conduta física da hidratação do cimento é muito semelhante à conduta de hidratação desses dois compostos. Devido à similaridade entre as reações de hidratação dos silicatos e do cimento, mesmo antes das reações de hidratação estarem terminadas obtém-se uma resistência considerável, visto que uma pequena porção dos compostos hidratados aderem fortemente os compostos anidros, e então geram uma posterior hidratação, o que resulta em um acréscimo na resistência (NEVILLE, 2016).

No Quadro 5 está descrita as quatro principais fases sólidas encontradas na matriz da pasta hidratada e suas respectivas características.

Quadro 5 - Principais fases sólidas da pasta de cimento hidratada

Fases sólidas da pasta de cimento hidratada	Características
Silicato de cálcio hidratado	<ul style="list-style-type: none"> •A abreviatura da fase silicato de cálcio é C-S-H; •Compõe 50 a 60% do volume da pasta de cimento toda hidratada; •Fase mais importante, pois determina as propriedades da pasta; •A morfologia do C-S-H varia de fibras poucos cristalinas até redes reticulares; •Podem ser citados como gel de C-S-H ; •Possui uma superfície com grande área; •É um arranjo irregular com espaços interlamelares de diferentes formas e tamanhos.
Hidróxido de cálcio	<ul style="list-style-type: none"> •Também conhecidos por potlandita; •Compõe 20 a 25% do volume da pasta de cimento toda hidratada; •Forma grandes cristais com configuração prismática hexagonal; •Contribuição limitada na resistência; •Área superficial baixa; •Morfologia varia de indefinível a grandes pilhas de placas;
Sulfoaluminatos de cálcio	<ul style="list-style-type: none"> •Compõe 15 a 20% do volume da pasta de cimento toda hidratada; •Na fase inicial da hidratação o sulfato de cálcio reage com o aluminato de cálcio (reação iônica sulfato/alumina) gerando o trissulfato hidratado, $C_6AS_3H_{32}$, também conhecido como etringita; •Quando a etringita se torna instável se decompõe e forma o monossulfato hidratado, C_4ASH_{18}, que forma placas hexagonais; •A presença do monossulfato hidratado no cimento Portland faz com que o concreto seja vulnerável aos sulfatos; •Tanto a etringita quanto o monossulfato hidratado possuem poucas quantidades de ferro em sua composição, que podem substituir os íons de alumínio na estrutura dos cristais.
Grãos de clínquer não hidratados	<ul style="list-style-type: none"> •Mesmo depois de muito tempo do processo de hidratação, pode ser encontrado na pasta grãos de clínquer não hidratado; •No processo de hidratação as partículas menores se dissolvem primeiro e desaparecem no sistema e as partículas maiores se tornam menores; •Devido a disponibilidade de espaço entre as partículas serem limitados, os produtos precipitados tendem a se cristalizar em torno das partículas de clínquer em hidratação fazendo um revestimento em sua superfície;

Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro (2008)

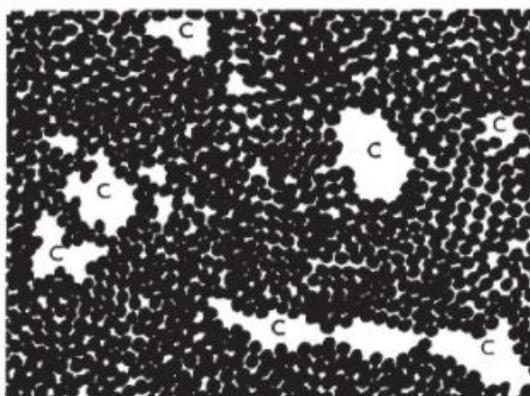
Conforme vai ocorrendo o desenvolvimento da hidratação, a porosidade tende a diminuir. Ou seja, os espaços vazios vão se tornando preenchidos pelos compostos hidratados, o que reduz o coeficiente de permeabilidade do concreto

refletindo em benefícios nas suas propriedades comuns (TEIXEIRA, 2020).

O volume total da pasta de cimento hidratada consiste no volume do cimento seco mais o volume de água adicionado. A Figura 6 representa a estrutura da pasta de cimento hidratada, na qual os pontos sólidos representam as partículas de gel, os espaços entre o gel são os poros de gel e os espaços marcados pela letra “C” representam os poros capilares (NEVILLE, 2016).

Os poros capilares que constituem a estrutura da pasta de cimento representam os vazios que não foram preenchidos pelos produtos da hidratação. Conforme a hidratação vai ocorrendo o volume desses poros capilares vai reduzindo. Logo, o que influencia na porosidade capilar da pasta é a relação água/cimento e o grau de hidratação (TEIXEIRA, 2020).

Figura 6 - Porosidade da pasta de cimento hidratada



Fonte: Neville (2016)

3.5.1.1 Silicatos de cálcio hidratado

Na hidratação dos silicatos de cálcio C_3S e C_2S os mesmos interagem entre si afetando a velocidade de hidratação. Nos casos dos concretos, argamassas ou da pasta de cimento em que é colocada uma quantidade limitada de água, supõe-se que o C_3S sofra hidrólise, precipitando um silicato de cálcio de menor basicidade C_3S_2H com liberação de cal na forma de hidróxido de cálcio. Atualmente, os silicatos de cálcio hidratados são, em geral, denominados como gel C-S-H. Além disso, ambos os silicatos precisam de aproximadamente a mesma quantidade de água para a hidratação, entretanto, o C_2S produz metade da quantidade de portlandita ($Ca(OH)_2$) que o C_3S (NEVILLE, 2016).

Os silicatos de cálcio hidratados existem de diversas formas, sendo destaque as partículas fibrosas, que possuem geralmente as seguintes medidas:

entre 0,5 a 2 μm de comprimento e menos de 0,2 μm de largura (NEVILLE, 2016).

3.5.1.2 Aluminato de cálcio hidratado

Nos cimentos o composto C_3A encontra-se em uma quantidade pequena, no entanto, possui influência significativa no comportamento do cimento. A hidratação do aluminato tricálcico precipita um material intersticial prismático escuro, que frequentemente pode se apresentar em forma de placas circundadas pelos silicatos de cálcio hidratado (NEVILLE, 2016).

O contato do C_3A puro com a água gera reações que resultam no endurecimento instantâneo da pasta de cimento. Entretanto, para evitar que a pega instantânea ocorra é adicionado o sulfato de cálcio ao clínquer. A precipitação dessa reação gera o aluminato de cálcio hidratado C_4AH_6 . O qual contribui apenas na resistência da pasta de cimento nas primeiras idades. Quando o sulfato reage com a pasta endurecida há a precipitação de sulfoaluminato de cálcio o que pode gerar uma desagregação da pasta de cimento (NEVILLE, 2016).

Logo, o sulfato de cálcio reage com o aluminato tricálcico formando o sulfoaluminato de cálcio e, além disso, reage com o ferroaluminato tetracálcico formando o sulfoferrito de cálcio o que faz com que aumente a velocidade de hidratação dos silicatos (NEVILLE, 2016).

3.6 Microestrutura

A microestrutura do concreto e argamassa é heterogênea e complexa, constituídas pela pasta de cimento, agregado e a zona de transição. Podem ser analisadas similarmente visto que a composição do concreto é constituída da mistura de argamassa e agregado graúdo (SILVA; LIBRORIO, 2002).

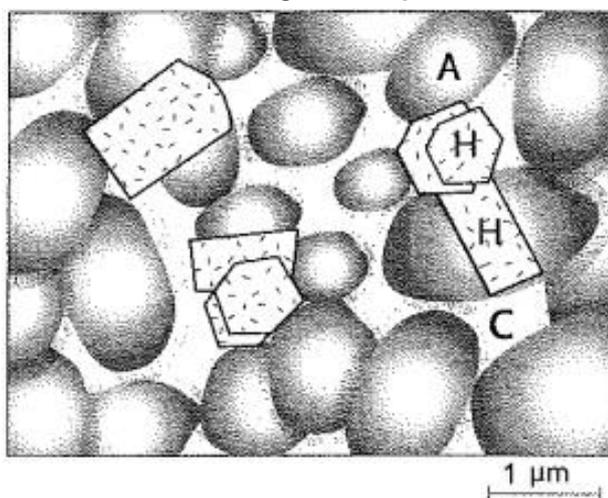
As propriedades mecânicas do cimento e do concreto endurecido dependem mais da estrutura física dos produtos de hidratação do que da composição química do cimento hidratado, o que torna o estudo das propriedades físicas do gel de cimento de extrema importância. Com isso, a microestrutura interna do concreto e da argamassa obteve maior reconhecimento pelo fato de originar suas propriedades (METHA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

A microestrutura da pasta de cimento hidratada é heterogênea, conforme a Figura 7 demonstra. Como é possível visualizar na imagem, a mistura dos

compostos não é distribuída uniformemente e eles não possuem o mesmo tamanho e nem mesma configuração. Na figura a simbologia “A” representa partículas de C-H-S poucas cristalinas, o “H” simboliza os produtos hexagonais como os monossulfoaluminatos hidratados e trissulfoaluminatos de cálcio hidratados (etringita), a letra “C” indica os vazios capilares, ou seja, quando espaços que eram ocupados com água ainda não foram totalmente ocupados por produtos gerados da hidratação do cimento (METHA; MONTEIRO, 2008).

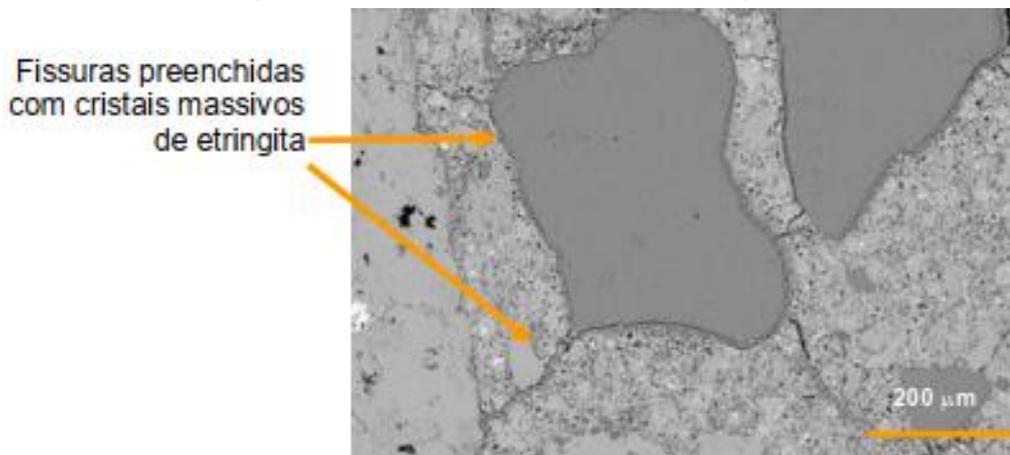
O gel C-S-H composto de silicato de cálcio hidratado constitui grande parte do volume da pasta de cimento em concretos e argamassas, apresentando uma morfologia variando entre fibras poucas cristalinas e um reticulado cristalino. O hidróxido de cálcio (CH) tende a formar grandes cristais em forma de prismas hexagonais distintos. Os sulfoaluminatos de cálcio se apresentam em formas aciculares na forma de etringita e de hexágonos na forma de monossulfoaluminatos. Além disso, na pasta é possível encontrar grãos de clínquer não hidratados (SILVA; LIBRORIO, 2002).

Figura 7 - Microestrutura heterogênea da pasta de cimento hidratada



Fonte: Monteiro (2008)

De acordo com Scherer (1999) os materiais cristalinos se relacionam com a porosidade encontrada no material, o autor ainda afirma que a supersaturação do local gera o aumento de cristal. Além disso, o surgimento de etringita tardia e dos hidróxidos de cálcio (portlandita) em concretos e argamassas se associam ao surgimento de fissuras, as quais contornam os agregados e os ligam entre si, conforme a Figura 8 (THOMAS *et al.*, 2008).

Figura 8 – Fissuras com cristais de etringita

Fonte: Thomas *et al.* (2008)

Os componentes do cimento hidratado permanecem com sua identidade no gel de cimento. Logo, o teor de compostos pertencentes a pasta de cimento endurecidas indicam as propriedades que serão obtidas. Dessa forma, a composição do gel de cimento controla a velocidade de liberação de calor de hidratação e a sua resistência (TEIXEIRA, 2020).

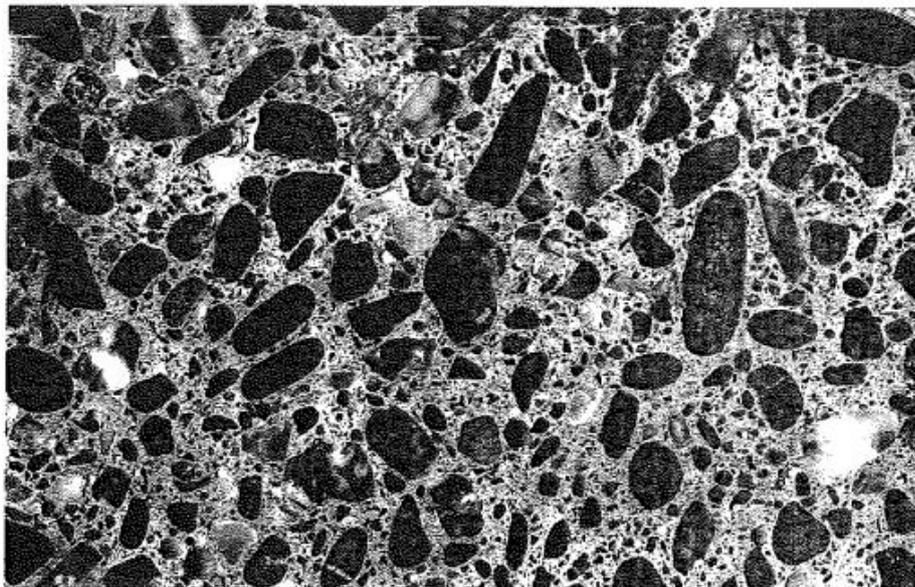
De acordo com Neville (2016), existe uma diferença entre as velocidades iniciais de hidratação dos silicatos C_3S e C_2S , onde o silicato tricálcico libera mais calor nas primeiras quatro semanas, sendo o principal responsável pela resistência nesse período, e então, o silicato dicálcico passa a interferir no ganho da resistência. Com aproximadamente um ano, os dois compostos que são os principais influentes na propriedade da resistência começam a agir de maneira igual, visto que no início o C_2S tem pouca interferência (NEVILLE, 2016).

Portanto, segundo Neville (2016), é possível afirmar que todos os compostos pertencentes ao cimento Portland hidratado influenciam de alguma maneira a resistência, pois todos os produtos gerados da hidratação contribuem no preenchimento dos espaços vazios, reduzindo a porosidade. O autor ainda afirma que o ganho de resistência da pasta é relativo ao aumento do volume do gel.

Um dos fatores que influenciam na resistência do concreto e argamassa é a aderência entre o agregado e a pasta de cimento hidratada. Mesmo que seja aplicado diferentes agregados na produção de concretos, a influência que eles têm sobre a resistência é a mesma (NEVILLE, 2016). A Figura 9 revela a seção

transversal de um corpo de prova do concreto, onde é possível verificar o agregado em diversas formas e dimensões e a pasta de cimento entre eles.

Figura 9 - Seção transversal de um corpo de prova de concreto



Fonte: Metha e Monteiro (2008)

De acordo com Metha e Monteiro (2008) a microestrutura da matriz da pasta de cimento hidratada é muito diferente da microestrutura da pasta presente nas proximidades das superfícies dos agregados. Dessa forma, na região de conexão, definida como interface, entre os agregados e a pasta de cimento se encontra a zona de transição. Sendo assim, a região de ligação entre a pasta de cimento e as partículas de agregado graúdo é muito similar com a zona nos agregados miúdos, mas com espessura mais fina (NEVILLE, 2016).

3.6.1 Zona de transição

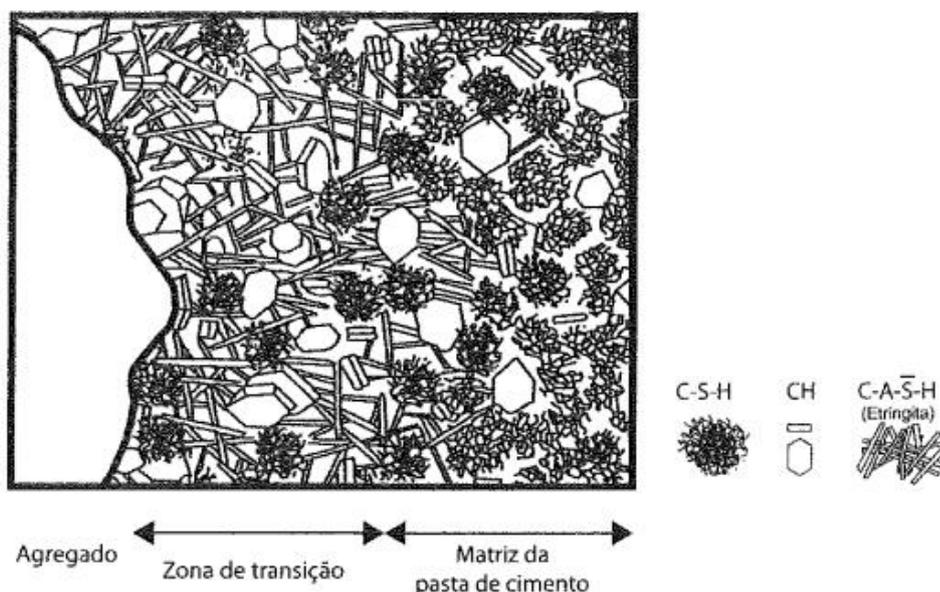
A zona de transição é a região de contato entre os agregados e a pasta de cimento, sendo considerada a zona mais fraca dos concretos e argamassas. Sua microestrutura apresenta como características uma elevada porosidade, poros grandes e pode conter cristais grandes de hidróxido de cálcio. Além disso, apresenta maior volume de etringita e hidróxido de cálcio do que fora da região de zona de transição, ou seja, na matriz da pasta de cimento (SILVA; LIBRORIO, 2002). Contudo, essa região tem pouco gel C-S-H, comprometendo na resistência do concreto. Logo, essa região pode ser definida como a zona crítica, onde inicia-se as fissurações (METHA; MONTEIRO, 2008).

A microestrutura da zona de transição começa a ser desenvolvida quando é lançado o concreto e a argamassa, ou seja, no seu estado fresco. Quando inicia a hidratação forma uma camada de água ao redor das partículas de agregados. Nesse caso, a relação água/cimento é maior na zona de interface do que mais distante dos agregados (METHA; MONTEIRO, 2008). Logo, os atributos encontrados na zona de transição são diferentes aos encontrados na matriz cimentícia (TEIXEIRA, 2020). Com isso, a porosidade na interface é maior do que na matriz da pasta e a característica da região de zona de transição apresenta cristais de portlandita e etringita, sendo melhores definidas na zona de interface do que na matriz da pasta.

Além disso, é constituída por uma camada de Ca(OH)_2 cristalina cobrindo a superfície do agregado, onde atrás dela possui uma camada do gel C-H-S proveniente da reação de hidratação dos silicatos. Na região mais afastada do agregado se encontra os produtos de hidratação do cimento com cristais de hidróxido de cálcio e não possui partículas de cimento anidro. (NEVILLE, 2016).

A Figura 10 mostra a região de zona de transição, na qual se encontra os principais componentes pertencentes a essa interface, e a matriz da pasta mais afastada do agregado. Com isso, é possível visualizar que próximo ao agregado o número de vazios é maior do que na matriz da pasta, além disso, a aglomeração de componentes cristalinos também é maior nessa região. O que caracteriza a zona de transição como o elo mais fraco do concreto (METHA; MONTEIRO, 2008).

Figura 10 - Zona de transição



Fonte: Metha e Monteiro (2008)

Na zona de contato entre os agregados e a pasta de cimento surgem microfissurações, pois durante a mistura, as partículas secas do cimento não conseguem aderir completamente aos agregados grandes. Dessa forma, o cimento disponível para hidratar e preencher os vazios são reduzidos, tornando a região de zona de transição mais porosa que a pasta de cimento hidratada mais longe do agregado, logo, é a região com menor resistência do concreto (NEVILLE, 2016).

3.7 A utilização de agregados reciclados na produção de concretos

Segundo a Resolução do CONAMA nº 307/02, os resíduos da construção civil (RCC) são definidos como todos os resíduos gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras, sendo eles: tijolos, telhas, blocos cerâmicos, concretos em geral, madeira, metais, tintas, argamassa, gesso, entre outros.

Classificam-se como resíduos recicláveis para agregados os tijolos, telhas, concreto, argamassa, areia e pedra. (TESSARO; SÁ; SCREMIN, 2012). Além disso, a Resolução do CONAMA nº 307/02 classifica os resíduos conforme o Quadro 6.

Quadro 6 -Classificação dos resíduos

Classificação	Descrição
Classe A	São os resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados como agregados.
Classe B	São os resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados para outras destinações, como: plásticos, madeira, vidros, papéis, gesso, entre outros.
Classe C	São resíduos que não apresentam medidas economicamente viáveis para serem reciclados ou reaproveitados.
Classe D	São os resíduos perigosos, como: tinta, solventes, óleos, materiais oriundos de reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Fonte: Adaptado de Resolução do CONOMA nº 307/02

Ainda conforme a Resolução nº 307/02, o agregado reciclado é definido como todo material granular oriundo do beneficiamento de resíduos, que possam ser aplicados em obras de engenharia. Portanto, os agregados reciclados são adquiridos do processo de reciclagem de resíduos provenientes da construção civil, e o material que era considerado um detrito se transforma em um agregado podendo ser reaproveitado (PELLISSARI, 2016).

A ABNT NBR 15116:2004 é responsável por determinar as exigências necessárias para a utilização de agregados reciclados em pavimentações e na elaboração de concretos que não possuem função estrutural. Estabelece que a reciclagem de resíduos sólidos de classe A, originam agregados reciclados, os quais são classificados como agregado de resíduo de concreto (ARC) ou agregado de resíduo misto (ARM). Se diferem pela proporção de fragmentos à base de cimento Portland e rocha, em que no ARC deve possuir no mínimo 90% e no ARM menos de 90%. Ainda, determina que o agregado reciclado aplicado deve ser submetido a uma pré-saturação, adotando aproximadamente 80% da absorção total do agregado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

O uso de agregados reciclados de RCC têm se tornado cada vez mais utilizados em obras, principalmente em preparações de concretos, contudo, o setor da construção civil ainda apresenta certa objeção na sua aplicação (FROTTE; NÚBILA, 2015). Explica-se pelo módulo de elasticidade e pela resistência dos concretos fabricados com agregados reciclados serem menores que em concretos produzidos com agregados naturais (PELLISSARI, 2016).

Vários estudos vêm sendo realizados com a aplicação de agregados reciclados de RCC. Por exemplo, Wada (2010) realizou a substituição parcial de agregados miúdos por resíduos da cerâmica vermelha (RCV) na preparação do concreto, com o objetivo de aplicá-lo em estacas pré-moldadas. Para o seu estudo, foram realizadas substituições de areia por RCV nas seguintes proporções: 20%, 40%, 60% e 80%. Com isso, ele comparou as resistências obtidas nas estacas produzidas com concretos de agregado miúdo reciclado com as estacas fabricadas de concretos convencionais e obteve que o RCV apresentou melhoras nas propriedades mecânicas do concreto, sendo possível aplicá-los nas estacas.

Pelissari (2016), em seu estudo, analisou a substituição de agregados naturais por agregados graúdos reciclados na elaboração de concretos com resistência à compressão de 30 MPa. Inicialmente, foram obtidas as características e granulometria do agregado reciclado e, então, foi comparado com as propriedades do agregado natural. Dessa maneira, foram realizados estudos a fim de diminuir os efeitos do absorvimento de água pelo agregado reciclado, além disso, foram realizadas substituições com diferentes teores. Por fim, a pesquisa demonstrou que mesmo que tivesse existido a diminuição da resistência do concreto com agregados

gráudos reciclados, em comparação aos concretos de referência, ainda assim eles atingiriam a resistência desejada de 30 MPa.

O estudo realizado por Taube (2019) visou analisar blocos de concretos estruturais provenientes de resíduos de classe A. Para a substituição dos agregados naturais por agregados reciclado foram realizadas em cinco teores diferentes, como: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Com isso, obteve que os blocos aderiram uma maior absorção de água e apenas nos blocos produzidos com a substituição parcial de 20% que não mostraram uma redução significativa em suas propriedades.

Cabral *et al.* (2009), aplicou agregados reciclados de cerâmica vermelha em concretos e analisou seu desempenho. Sua pesquisa tinha como objetivo analisar propriedades como a porosidade, módulos de deformação e a resistência do concreto. Dessa forma, a pesquisa mostrou que a substituição de agregados miúdos naturais por agregados reciclados com RCV apresenta um ganho na resistência à compressão, enquanto que para a substituição dos agregados gráudos naturais há uma redução. Além disso, demonstrou que o agregado gráudo reciclado tem maior influência nas propriedades do concreto.

A aplicação de agregados reciclados em concretos tem sido estudada há muitos anos. Leite (2001), fez uma avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados. Para a obtenção de seus resultados, foram utilizadas cinco proporções diferentes da relação água/cimento e cinco proporções de substituições diferentes de agregados miúdos e agregados gráudos. Logo, obteve resultados analisando concretos no estado fresco e endurecidos onde apresentaram características positivas para a aplicação de agregados reciclados.

Pimentel e Paes (2020) analisaram a incorporação de areias de rios como agregados reciclados na produção de argamassas, com o objetivo de avaliar a resistência, aderência e microestrutura dos novos compostos. Para a substituição dos agregados naturais foi utilizado areia do Rio Amazonas. Com isso, percebeu que a argamassa ganhou um aumento na resistência a tração e que os sedimentos do rio ocasionaram uma produção de cristais tornando-a mais estável, sendo assim, um material com grande potencial para uso em obras.

Como foi verificado nos estudos expostos anteriormente, os agregados reciclados interferem nas propriedades do concreto e da argamassa e, conseqüentemente, no seu desempenho. Por isso, é importante ressaltar a

importância de pesquisas em que são realizadas a substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados de resíduos da construção civil e também do estudo de seus parâmetros e características (FROTTE; NÚBILA, 2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa busca analisar a microestrutura de concretos e argamassas que foram produzidos com substituição parcial de agregados miúdos e graúdos por resíduos de cerâmica vermelha (RCV).

As amostras de concretos utilizadas para a análise foram coletadas de Santos (2021) e as de argamassa de Furtado (2021), logo, foram estudadas amostras de concretos, argamassas e RCV. Os concretos tinham teores de substituição de agregado graúdo por RCV de 0%, 5%, 15% e 25% e as amostras de argamassa possuíam teores de substituição de agregado miúdo por RCV de 0%, 20%, 50% e 100%, as quais foram produzidas conforme as especificações mostradas nos Quadros 7 e 8, respectivamente.

Quadro 7 - Caracterização da amostra de concreto

Amostra	Cimento	Brita	RCV	Areia	Relação água/cimento (a/c)	Traços em massa c:b:a:rcv
REF (0%)	Cimento II F-32	Brita 1 (19 mm)	Agregado miúdo peneirado na peneira de 4,75 mm	Agregado miúdo peneirado na peneira de 4,75 mm	0,43	1: 1,1: 1,7
5% de RCV					0,43	1: 0,9: 1,8: 0,1
15% de RCV					0,43	1: 0,9: 1,6: 0,2
25% de RCV					0,43	1: 0,9: 1,4: 0,3

*c:c:a:rcv - cimento : brita : areia: resíduo de cerâmica vermelha
Fonte: adaptado Santos (2021)

Quadro 8 - Caracterização da amostra de argamassa

Amostra	Cimento	Cal	RCV	Areia	Relação água/materiais secos (a/ms)	Traços em massa c:c:a:rcv
REF (0%)	Cimento II F-32	CH-III	Agregado miúdo peneirado na peneira de 4,75 mm	Agregado miúdo peneirado na peneira de 4,75 mm	1,53	1: 0,9: 9,9
20% de RCV					1,53	1: 0,9: 7,9: 2,2
50% de RCV					1,53	1: 0,9: 5: 5,6
100% de RCV					1,53	1: 0,9: 0: 11,1

*c:c:a:rcv - cimento : cal : areia: resíduo de cerâmica vermelha
Fonte: adaptado Furtado (2021)

Os corpos de provas foram adquiridos após o rompimento de 28 dias do processo de hidratação e, então, foram realizadas as análises microestruturais a partir dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difratômetro de Raio-X (DRX). Os métodos experimentais foram elaborados no laboratório Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Curitiba. As metalizações em ouro para o preparo das

amostras para o MEV foram realizadas no Centro de Microscopia do Instituto Carlos Chagas (ICC/ Fiocruz), na cidade de Curitiba.

4.1 Materiais

As amostras utilizadas para as análises laboratoriais foram obtidas dos corpos de provas de concretos e argamassas ilustrados nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Foram adquiridas logo após o rompimento do material aos 28 dias de cura. Os teores de substituição de agregados por RCV estão representados nas imagens.

Figura 11- Corpo de prova de concreto produzidas por Santos (2021)



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 12 – Corpos de prova de argamassa produzidas por Becker (2021)



Fonte: Autoria própria (2021)

4.2 Métodos

4.2.1 Microscópico eletrônico de varredura (MEV)

A análise da microestrutura foi desenvolvida a partir do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) combinada com espectroscopia por energia dispersiva de raio-x (EDS). O aparelho utilizado foi o modelo EVO MA 15, o qual possui uma fonte que reflete elétrons na amostra fazendo uma varredura em sua superfície. O equipamento, demonstrado na Figura 13, gerou imagens em alta resolução em que foi possível visualizar a microestrutura do material.

Figura 13 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

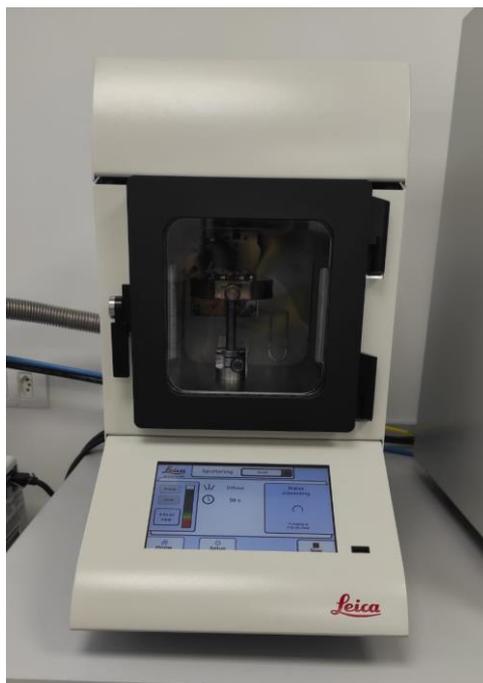


Fonte: UTFPR (2021)

Para o estudo da microestrutura dos concretos e argamassas produzidas com a substituição parcial dos agregados por RCV foram realizadas análises morfológicas das amostras a partir da microscopia eletrônica de varredura. Para uma análise qualitativa da composição química dos materiais foram realizadas microanálises por meio do equipamento EDS que se encontra acoplado ao MEV, no qual os resultados obtiveram a corroboração de estudos de referências.

Para o preparo da amostra foi adquirido pedaços em torno de 12,7 mm de dimensão, colocados em um suporte utilizado para o MEV e na metalizadora. A metalização foi feita em ouro a uma intensidade de 30 mA pelo método difuso em 50 segundos, a Figura 14 mostra o equipamento Leica EM ACE 200 no qual o procedimento foi realizado. Sendo assim, foi adquirida uma amostra de cada teor de 0%, duas amostras de 5% para o concreto, 15% e 25%, conforme a Figura 15. Para a argamassa foi obtida uma amostra de cada teor de 0%, 20%, 50% e 100% conforme a Figura 16 e, além disso, foram adquiridas amostras do RCV.

Figura 14 - Metalizadora



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 15 - Amostras de concreto para o MEV



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 16 - Amostras de argamassa para o MEV



Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.2 Difratorômetro de Raio-X (DRX)

A difração de raio-x tem como objetivo determinar as estruturas cristalinas de um material. O aparelho usado foi o modelo XRD-7000, o qual consiste em ondas eletromagnéticas que interagem com os arranjos atômicos dos cristais da amostra analisada. O equipamento, ilustrado na Figura 17, gerou imagens em alta resolução em que foi possível visualizar a cristalinidade do material.

Figura 17 – Difratorômetros de raios-x (DRX)



Fonte: UTFPR (2021)

Além disso, segundo Tashima (2006), tem como objetivo obter a composição mineralógica do material em estudo onde os picos correspondem a presença de materiais cristalinos. Para essa caracterização foi comparado o difratograma com padrões de referência, como: bancos de dados com informações cristalográficas ou com autores que obtiveram os mesmos picos para a amostra de referência.

A preparação das amostras foi feita pelo processo da moagem e então peneiradas para que ficassem em pó, conforme mostra a Figura 18. Foi realizada para todas as amostras de concreto, argamassa e RCV.

Figura 18- Moagem das amostras



Fonte: Autoria própria (2021)

Com isso, foram obtidas amostras em pó de RCV e de concreto nos teores de 0%, 5%, 15% e 20%, mostradas na Figura 19, e de argamassas nos teores de 0%, 20%, 50% e 100%, demonstradas na Figura 20.

Figura 19 – Amostras de concreto e RCV para o DRX



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 20 - Amostras de argamassa e RCV para o DRX



Fonte: Autoria própria (2021)

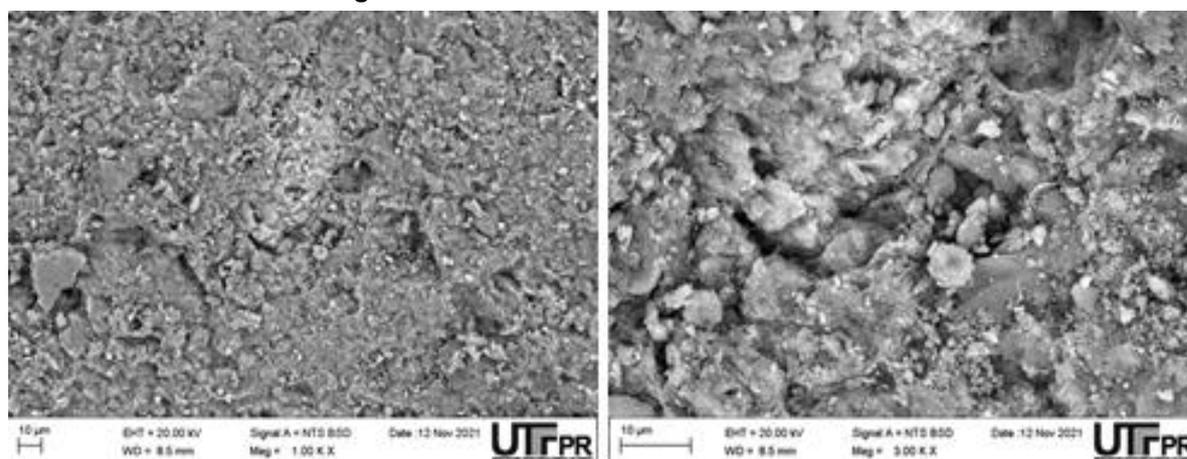
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do RCV

5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)

Na Figura 21 observam-se as imagens obtidas pelo MEV, na qual foi possível verificar que as partículas constituintes ao RCV possuem forma e textura irregular. Sendo assim, é possível verificar que a microestrutura do material possui uma aparência pulverulenta, o que pode resultar na necessidade de maiores quantidades de água para o amassamento na mistura de materiais com base de RCV, estando de acordo com estudos realizados por Cassol (2015).

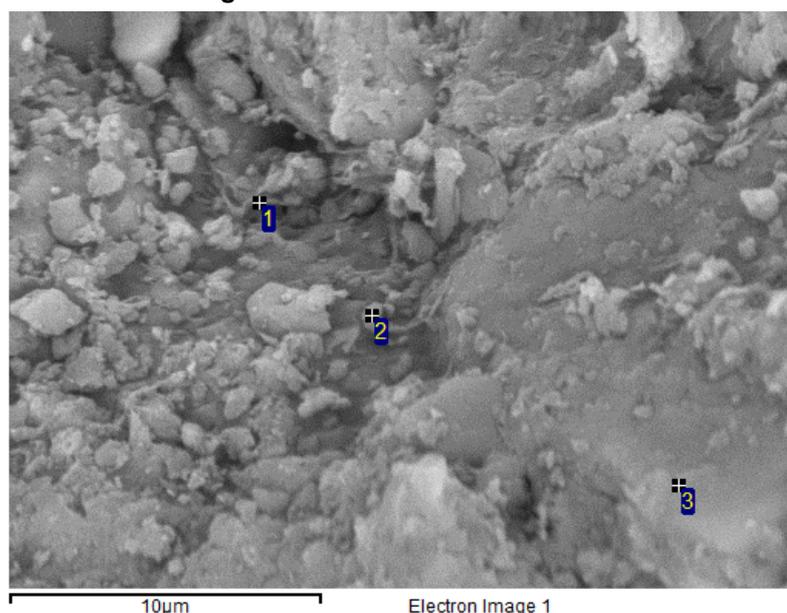
Figura 21 – MEV da microestrutura do RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

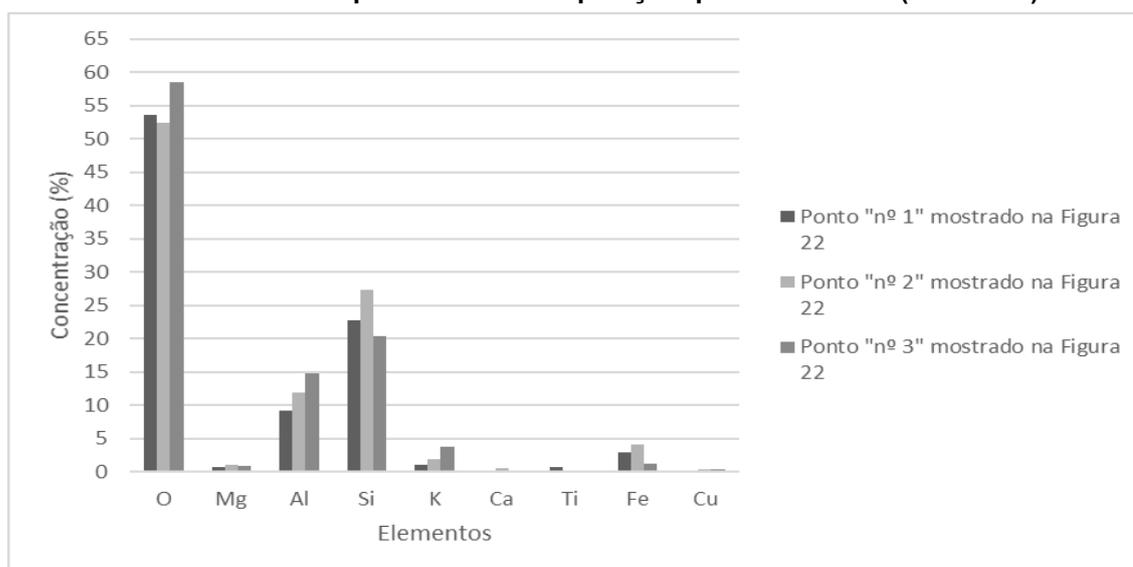
Para a microanálise foi adotado três pontos na amostra, o “n°1”, “n°2” e “n°3” mostrados na Figura 22 e, além disso, os teores dos elementos químicos presentes em cada um desses pontos para a verificação da composição do RCV estão representados no Gráfico 1.

Figura 22 – Microanálise do RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 1-Análise qualitativa da composição química do RCV (MEV-EDS)



Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa forma, os resultados encontrados no Gráfico 1 mostram que os principais compostos visualizados no RCV são: silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), titânio (Ti), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e oxigênio (O), ou seja, os mesmos elementos encontrados na composição da argila, que é a principal matéria prima na produção da cerâmica, apresentando-se em conformidade com estudos feitos por Junior (2020). Isso pode ser explicado de acordo com estudos realizados por Garcia *et al.* (2015) que afirma que as propriedades que esses elementos

proporcionam à argila podem ser relacionados as propriedades da composição do RCV.

Com isso, foi possível observar quantidades significativas de alumínio (Al), oxigênio (O) e silício (Si), além disso, em proporções menores foram encontrados principalmente ferro (Fe) e potássio (K). Os resultados encontrados estão em conformidade com estudos realizados pelos autores Garcia *et al.* (2015), Cassol (2015) e Lavat, Trezza e Pooggi (2009) que determinaram a caracterização química do RCV.

Além disso, a soma da concentração de alumínio, silício e oxigênio correspondem a 85,59% no ponto “nº1”, 91,70% no ponto “nº2” e 93,68% no ponto “nº3” o que sugere a presença de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) que podem ser confirmadas pela difração de raio-x. A presença de sílica pode ser associada a compostos que proporcionam resistência ao material e a alumina pode ser relacionada com minerais usados na fabricação do material. Logo, o comparecimento predominante desses compostos na amostra sugere que a partícula analisada pertence à família dos filossilicatos, que são compostos que possuem suas estruturas em camadas, o que também foi verificado nos estudos realizados por Araújo (2017).

As proporções de ferro (Fe) e titânio (Ti) mais baixas e de alumínio (Al) mais alta sugerem a coloração mais clara e alaranjada do RCV, conforme se comprova na Figura 23, este ocorrido justifica-se a partir de estudos realizado por Dutra *et al.* (2005). Enquanto o aparecimento do potássio (K) indica a presença de óxidos alcalinos utilizados na produção do RCV, como a caulinita. Tal fato pode ser justificado através de estudos efetuados por Junior (2020).

Figura 23 – Resíduos de tijolos cerâmicos



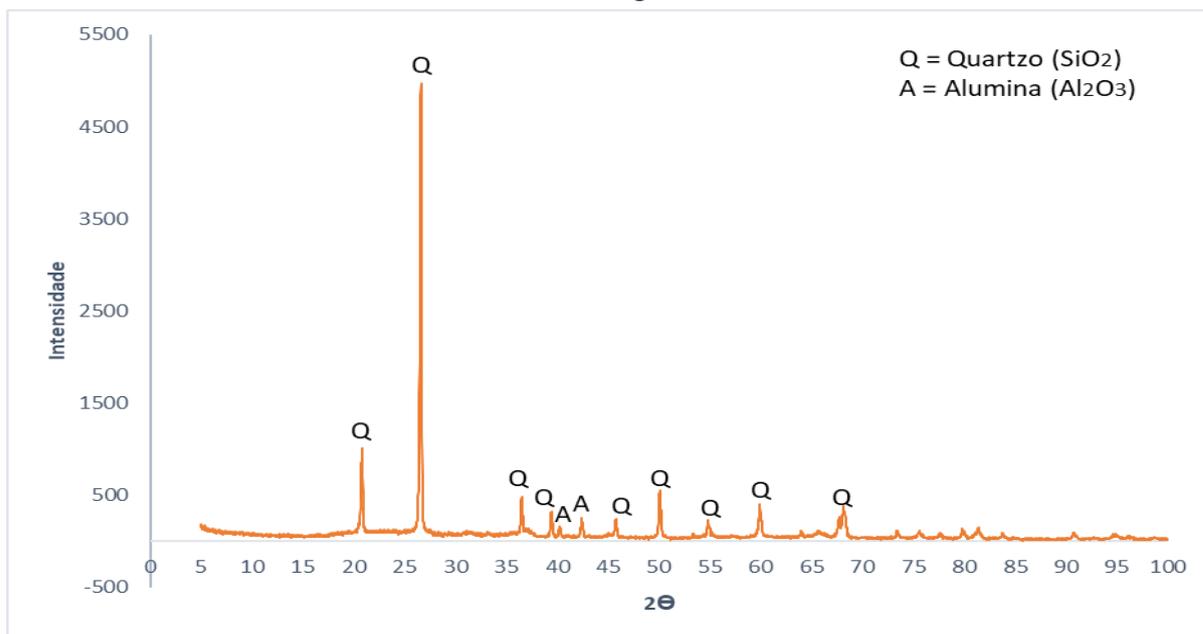
Fonte: A autoria própria (2021)

5.1.2 Difração de Raio-X

Estudos realizados por Cassol (2015) sobre a caracterização dos resíduos de cerâmica vermelha na produção de materiais cimentícios apresentaram a análise da composição mineralógica do RCV por meio da difração de raio-x e obtiveram como resultado a presença de materiais cristalinos como alumina e quartzo.

Para a análise dos resultados obtidos no difratograma do RCV foi utilizado o estudo de Cassol (2015) como referência, visto que comparando os picos entre o ângulo 2θ encontram-se resultados semelhantes, com o maior pico entre 20 a 30° de quartzo e entre 40 a 45° encontra-se a alumina, conforme apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Difratoograma do RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Mediante aos resultados obtidos, apresentam-se em conformidade com a análise qualitativa realizada pelo EDS. A presença de alumina e quartzo no material mostra que ele é produzido a partir de argilominerais. Além disso, como o material possui baixo teor alcalino, o que segundo Araújo (2017), são materiais vantajosos na produção de concretos e argamassas por serem suscetíveis às reações álcali-agregados.

5.2 Análise das amostras de concreto

5.2.1 Microscópico eletrônico de varredura (MEV)

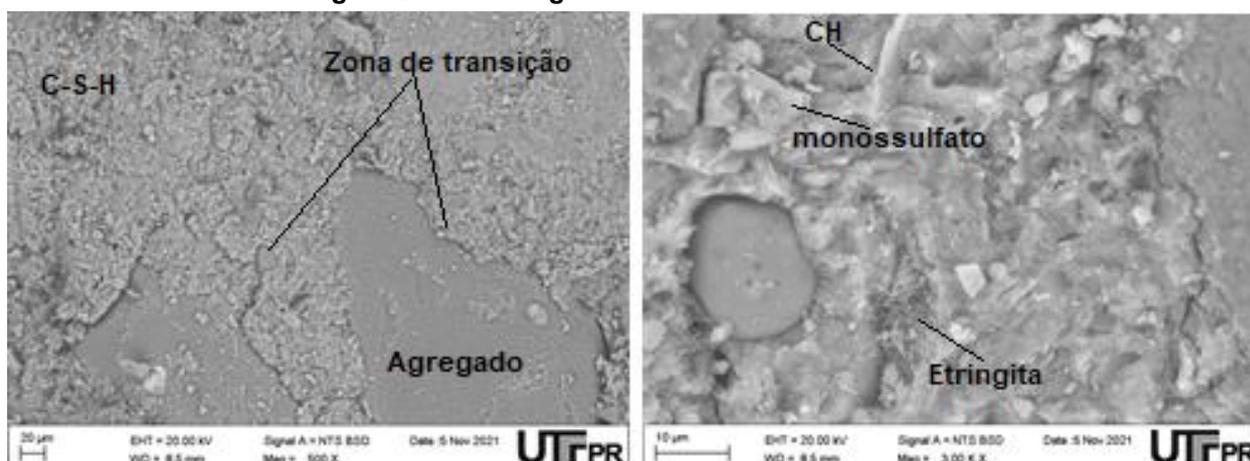
Na análise de microscopia eletrônica foi possível verificar a composição química do material devido à análise qualitativa realizada através do EDS e, além disso, a morfologia da microestrutura do material pelas imagens. Foram analisadas diferentes aproximações para cada amostra.

5.2.1.1 Concreto de referência

A Figura 24 representa imagens obtidas da amostra do concreto de referência, na qual é possível observar, em uma ampliação de 1000X, a formação morfológica da zona de transição, da pasta de gel C-S-H e dos agregados. Na lente da microscopia com maior aproximação, sendo 3000X, nota-se a presença de

cristais de monossulfato, devido as suas características hexagonais, da etringita devido ao formato acicular de agulhas delgadas e longas e também do CH, de acordo com sua morfologia de grandes cristais em formato de hexagonais. Dessa forma, estudos elaborados por Lopes (2016), Teixeira (2020) e Melo (2010), que demonstraram as características típicas dos constituintes da microestrutura do concreto, corroboram para a análise dos resultados obtidos.

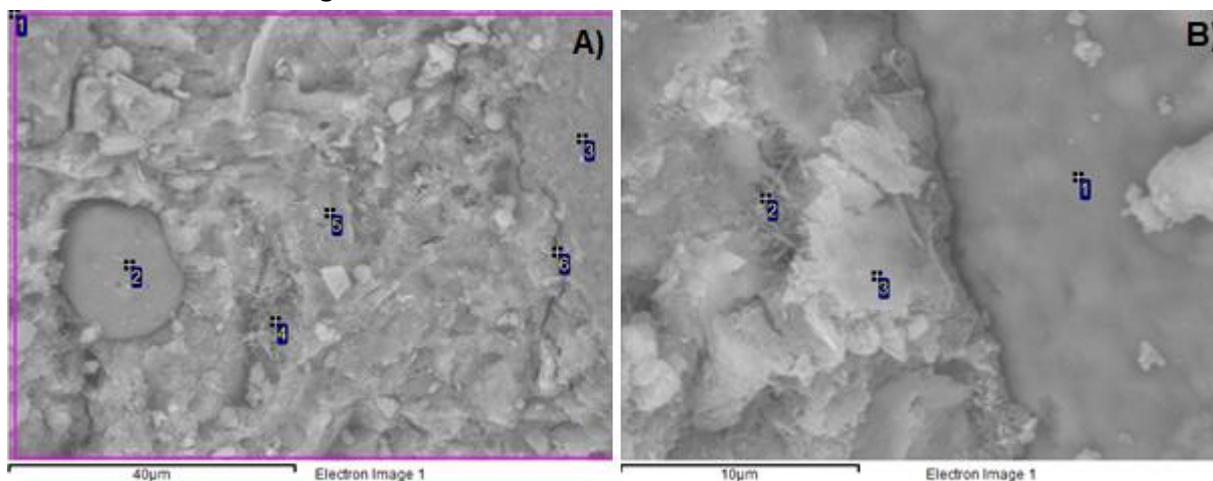
Figura 24 - Morfologia do concreto de referência



Fonte: Autoria própria (2021)

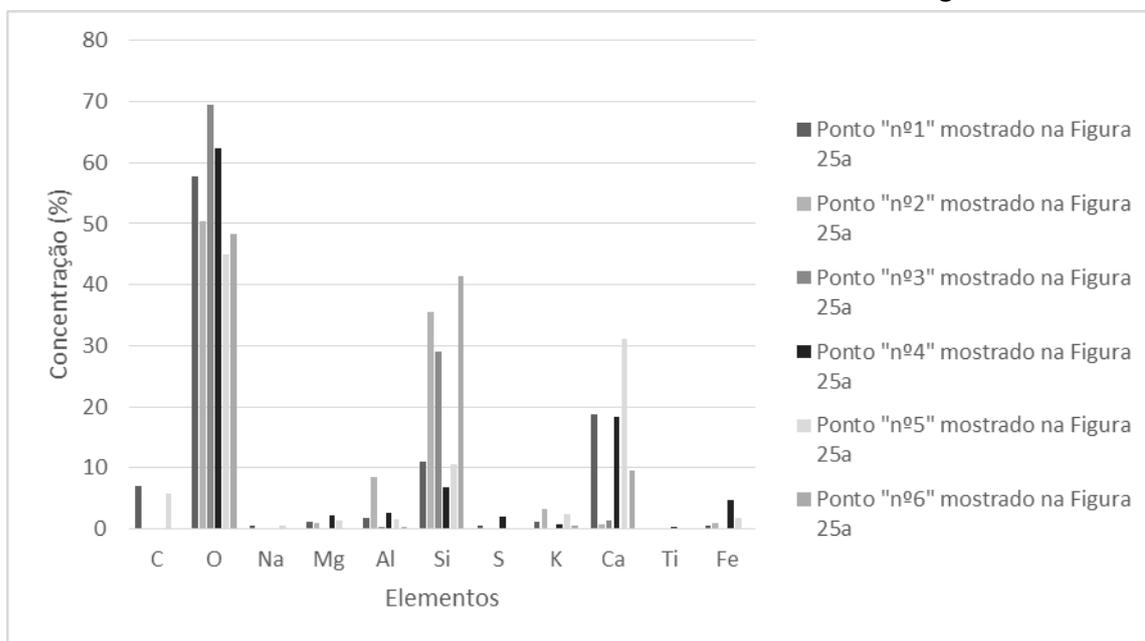
A microanálise foi obtida a partir de alguns pontos adotados na amostra, demonstrados na Figura 25a e Figura 25b, no qual os teores dos elementos presentes em cada um desses pontos estão mostrados no Gráfico 3 e Gráfico 4, respectivamente.

Figura 25 - Microanálise do concreto de referência



Fonte: Autoria própria (2021)

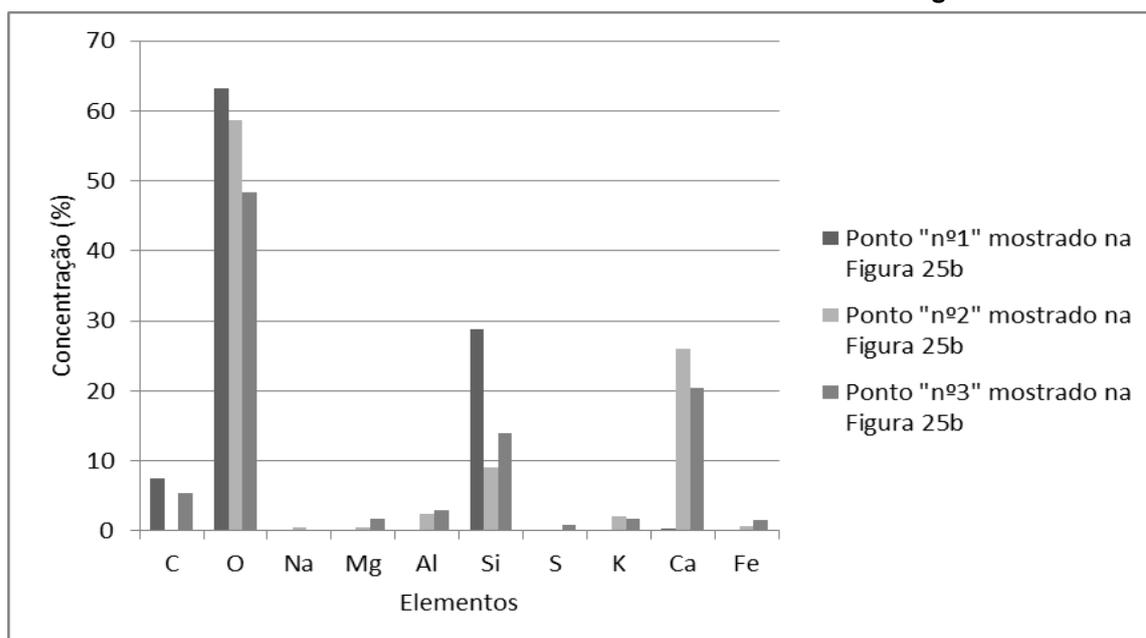
Gráfico 3 – Microanálise do concreto de referência referente a Figura 25a



Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 3 verificou-se que o “nº1” possui como elementos mais significativos o oxigênio (O), cálcio (Ca) e silício (Si) que correlacionado com as características morfológicas de aspecto fibrilar e com a presença de cristais de portlandita cravados em sua estrutura, nota-se a presença do gel C-S-H. Já o “nº2” sugere-se que é um agregado grão devido ao elevado teor de oxigênio (O) e silício (Si) com traços de alumínio (Al) e pouco magnésio (Mg), além de possuir uma superfície mais sólida, caracterizando-se como brita. O “nº3” possui um alto teor de silício (Si) e oxigênio (O) e uma superfície sólida o que indica a existência de grãos de areia. O “nº4” possui quantidades significativas de oxigênio (O) e cálcio (Ca), com traços de silício (Si), ferro (Fe) e alumínio (Al) constituído de cristais aciculares com elevada porosidade, pois apresenta espaços vazios presentes, logo, as características descritas são indicativas do cristal etringita. O “nº5” possui características semelhantes ao “nº1”, sendo sugestivo de C-S-H e o “nº6” possui alto teor de oxigênio (O) e silício (Si) com traços de cálcio (Ca) indicando ser um grão de areia, visto que se apresenta na interface com a pasta.

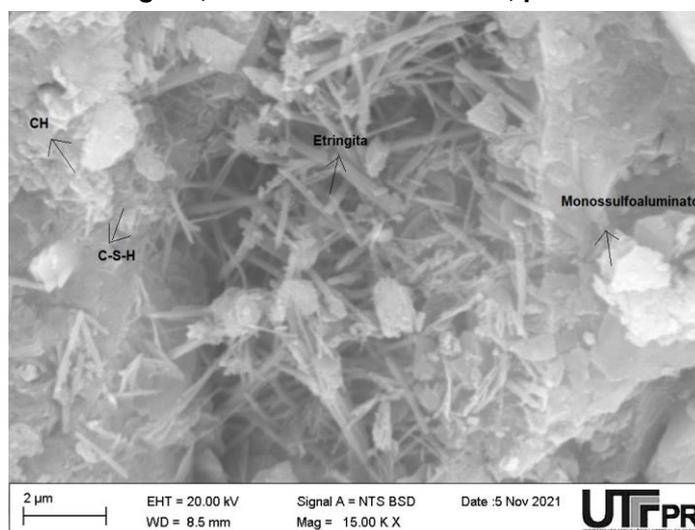
Gráfico 4 -Microanálise do concreto de referência referente a Figura 25b



Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 4, o composto “nº1” apresentou como elementos principais o oxigênio (O) e silício (Si) com traços de carbono (C), correlacionando com seu aspecto sólido, verifica-se a presença de grão de areia. O “nº2” mostra um teor alto de oxigênio (O), silício (Si), cálcio (Ca), com teores de alumínio (Al) e ferro (Fe) o que indica ser etringitas, devido ao aspecto acicular. O “nº3” apresentou uma concentração elevada de oxigênio (O), cálcio (Ca) com traços de carbono (C) e alumínio (Al) com características de grandes cristais hexagonais, demonstrando a presença de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Figura 26 - Etringitas, monossulfoaluminatos, portlanditas e C-S-H



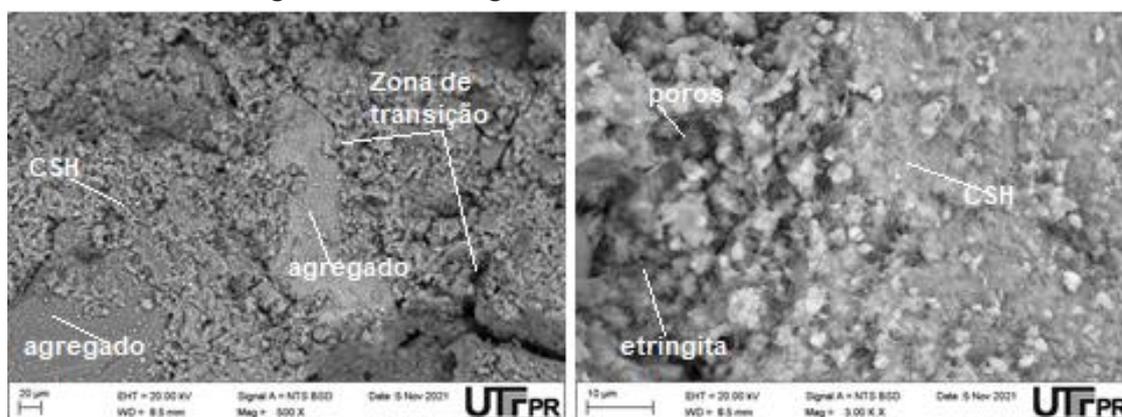
Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 26 demonstrou um poro com etringita de aspectos aciculares e, além disso, apresenta cristais de formato hexagonal mostrando a presença de monossulfoaluminatos alojados no gel C-S-H e conglomerados de grandes cristais de portlanditas.

5.2.1.2 Concreto com 5% de RCV

A Figura 27 representa a morfologia, em uma ampliação de 500X da microestrutura do concreto com 5% de RCV, no qual mostra a pasta C-S-H, a zona de transição e os agregados, os quais possuem superfícies sólidas. Na lente com ampliação de 3000X foi possível observar cristais de etringitas com formato de agulha alojados nos poros e o C-S-H que possui a superfície esponjosa.

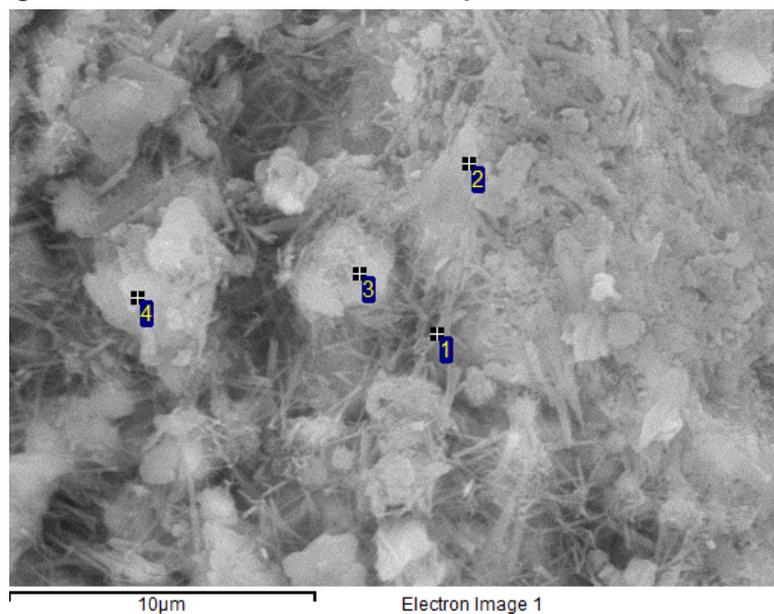
Figura 27 - Morfologia do concreto com 5% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

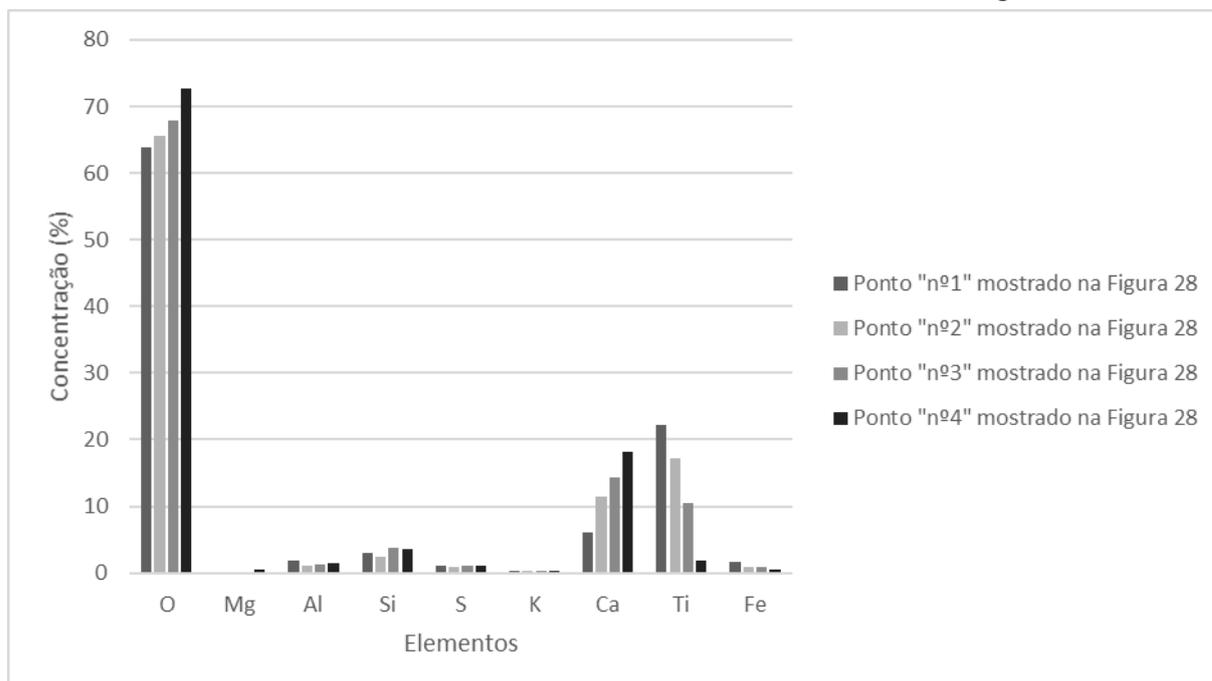
Logo, a Figura 28 representa os pontos adotados na amostra para a microanálise pelo EDS para a obtenção da composição química do material, conforme os resultados obtidos no Gráfico 5.

Figura 28 - Microanálise de concreto produzido com 5% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 5 – Microanálise do concreto com 5% de RCV referente a Figura 28



Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com os resultados obtidos no Gráfico 5 foi possível observar os níveis de titânio na amostra, isso se deve a composição inicial de RCV, estando em conformidade com o estudo obtido por Junior (2020). Notou-se no “nº1” a presença de cristais aciculares em poros e com teores de cálcio (Ca), oxigênio (O), silício (Si), enxofre (S) e alumínio (Al) o que indica o comparecimento de etringita. O “nº2”, “nº3”

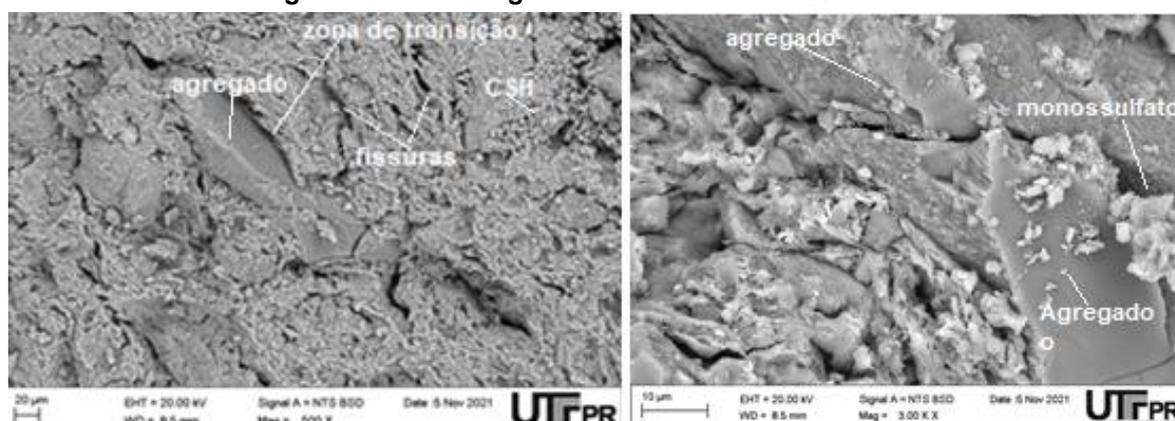
e “nº4” apresentaram suas constituições químicas similares, as quais mostram a presença de monossulfoaluminato devido ao formato hexagonal e sua composição química.

Dessa forma, comparando os resultados encontrados no concreto com teor de 5% de substituição do agrado gráudo natural por RCV com o concreto de referência, nota-se que a morfologia não apresenta mudanças significativas, visto que apresenta cristais de etringitas nos poros nas duas amostras.

5.2.1.3 Concreto com 15% de RCV

A Figura 29 apresentou a morfologia do concreto com 15% de RCV com ampliação de 500X, no qual mostrou a pasta C-S-H com fissurações, a zona de interface entre a pasta e os agregados. Na lente com ampliação de 3000X foi possível observar, agregados e cristais de monossulfoaluminato com formato hexagonal, entretanto, não foi possível verificar cristais de etringitas.

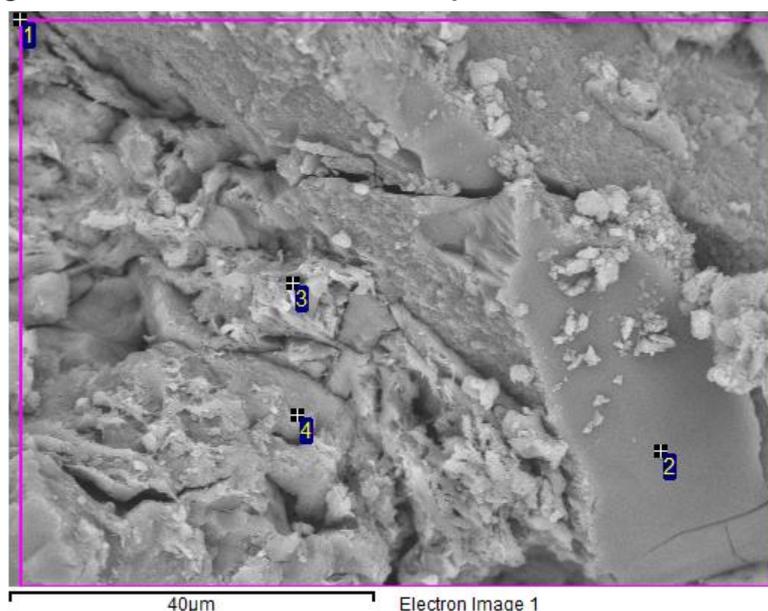
Figura 29 – Morfologia do concreto com 15% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

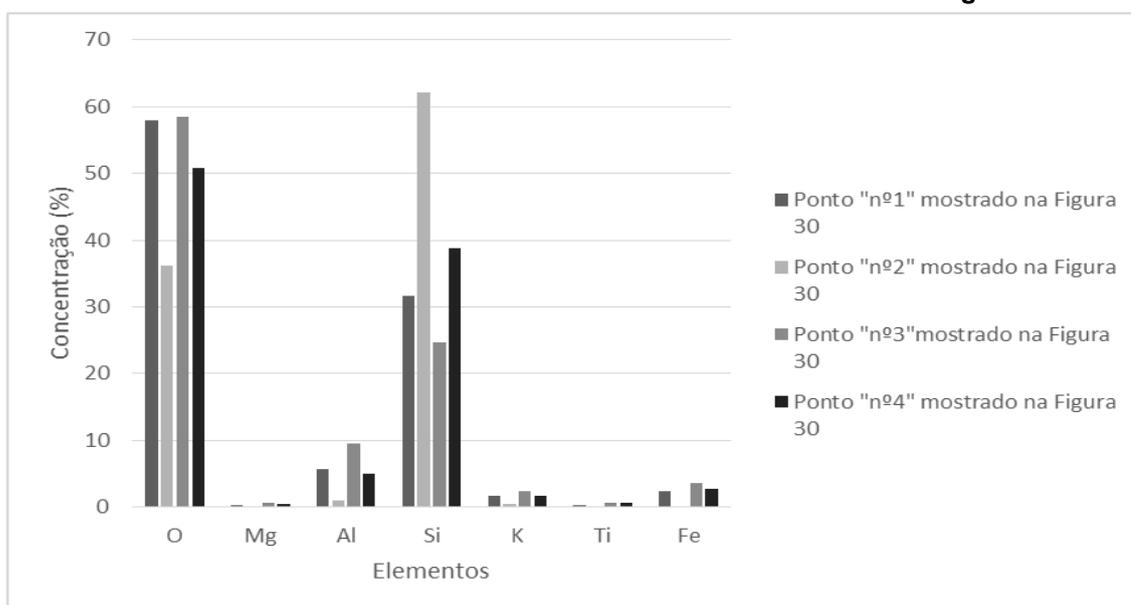
A Figura 30 representa a microanálise de pontos selecionados na microestrutura do concreto com substituição parcial de 15% dos agregados gráudos por RCV. Sendo assim, foi obtido a partir do Gráfico 6 uma análise qualitativa da composição química dos compostos.

Figura 30 - Microanálise de concreto produzido com 15% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 6 - Microanálise do concreto com 15% de RCV referente a Figura 30



Fonte: Autoria própria (2021)

Na análise dos resultados obtidos na composição química da amostra com substituição de 15% de agregado graúdo por RCV observou-se que os pontos “nº1” e “nº4” possuem uma superfície sólida e composições semelhantes, com a predominância do silício (Si) e oxigênio (O) com traços de alumínio (Al), ferro (Fe), potássio (K) e titânio (Ti), o que sugere a presença de um RCV. No “nº2” os teores elevados de silício (Si) e oxigênio (O) indicam a presença de um grão de areia. O

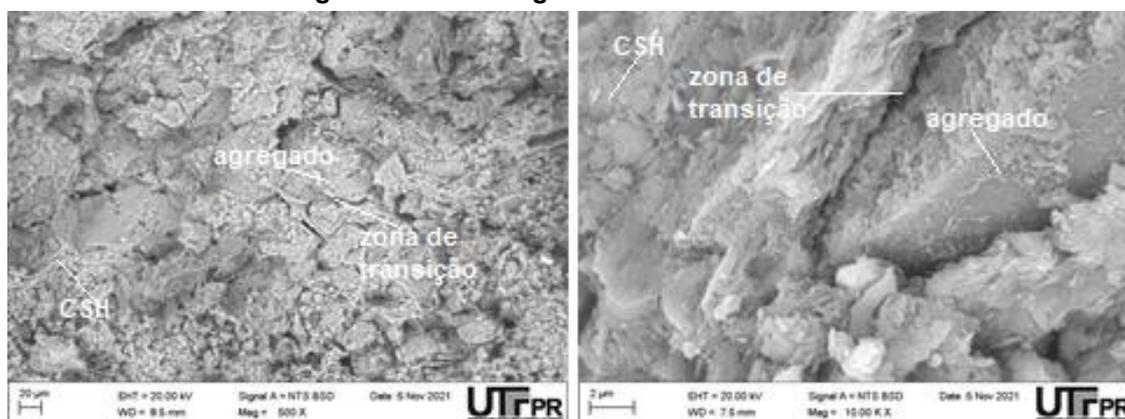
“nº3” apresentou principalmente os compostos silício (Si), alumínio (Al) e oxigênio (O) o que sugere a presença de um alumino-silicato, como a mulita.

Dessa forma, a amostra com 15% de RCV não apresenta etringitas em sua morfologia como no concreto de referência, sendo possível que a etringita tenha sido consumida, visto que é um material instável que pode reagir com sulfatos e transforma-se em outro composto tardiamente, como os monossulfatos. Além disso, o aparecimento de mulita sugere a reação do agregado reciclado, pois surge devido a reação entre alumina e quartzo, podendo ser verificada com a dissolução do quartzo.

5.2.1.4 Concreto com 25% de RCV

A Figura 31 mostra a morfologia do concreto com 25% de RCV, na lente de 500X de ampliação verificou-se a presença da pasta C-S-H, agregados e a zona de transição. Com a ampliação de 3000X foi possível analisar de perto esses compostos.

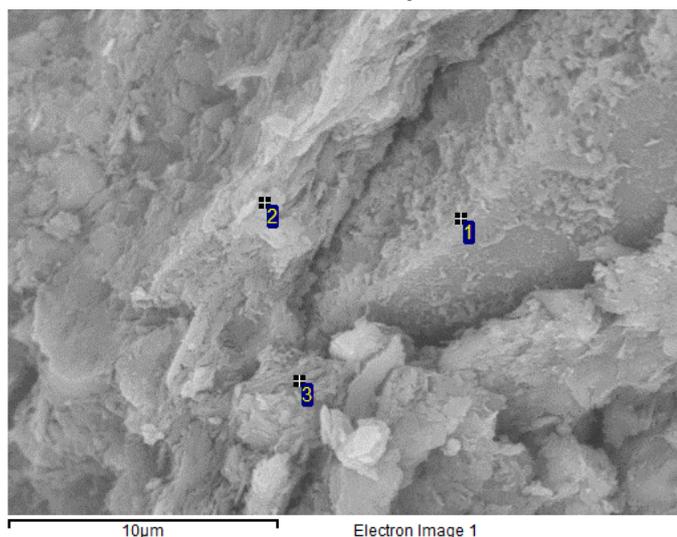
Figura 31 - Morfologia do concreto com 25%



Fonte: Autoria própria (2021)

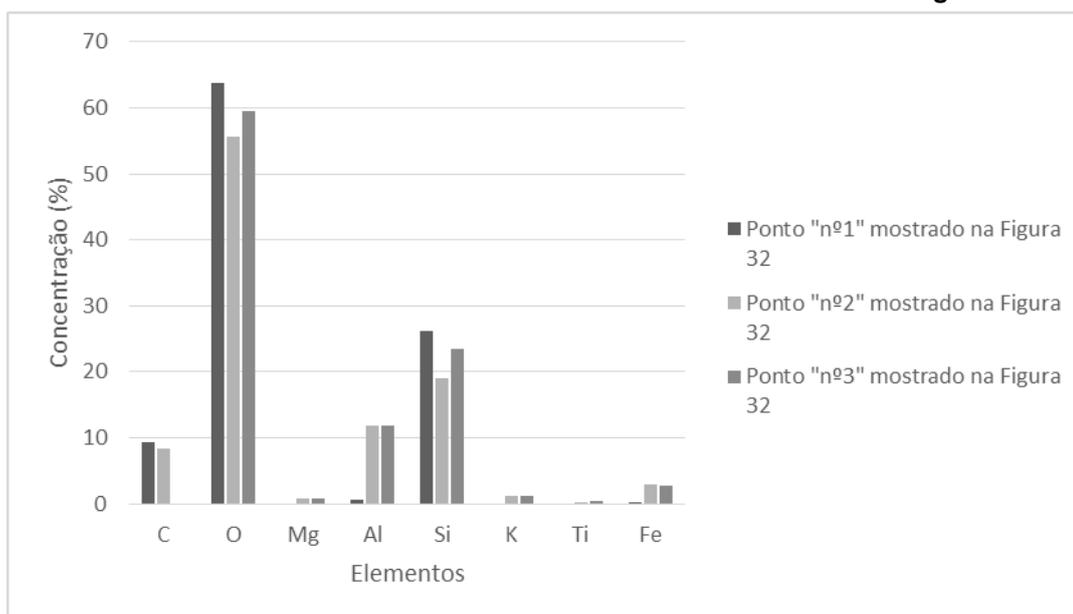
A microanálise foi obtida através do EDS, no qual os resultados apresentam-se no Gráfico 7 relacionados aos pontos marcados na Figura 32.

Figura 32 - Microanálise de concreto produzido com 25% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 7 - Microanálise do concreto com 25% de RCV referente a Figura 32



Fonte: Autoria própria (2021)

Nos resultados encontrados para a amostra com substituição de 25% de agregado graúdo por RCV verificou-se que o “nº1” possui a predominância dos elementos silício (Si) e oxigênio (O) o qual é sugestivo de ser uma partícula de areia. O “nº2” e “nº3” apresentaram principalmente o composto silício (Si), alumínio (Al) e oxigênio (O) o que sugere a presença de produtos de reação pozolânica como a mulita. Estudos realizados por Silva (2005) corroboram com os resultados encontrados, pois, segundo o autor, quando o quartzo se dissolve parcialmente há a

formação da mulita, o que pode ser verificado no DRX o qual apresentou uma redução na intensidade do quartzo.

Sendo assim, comparando os resultados obtidos pela análise qualitativa química e morfológica das amostras, pode-se observar que a presença de mulita começou na amostra de 15% de RCV, também sendo verificada na amostra de 25% de RCV o que não pode ser verificado na amostra de referência e na de 5% de RCV, logo, nota-se que à medida que aumenta o teor de RCV pode aumentar as reações pozolânicas do concreto.

5.2.2 Difração de Raio-X (DRX)

As análises qualitativas das fases cristalinas foram feitas através do método de difração de raio-x, no qual a caracterização do difratograma foi realizada pelo *software Xpert HighScore Plus*, que consta com um banco de dados da *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*, correlacionando com os resultados de autores que utilizaram amostras de concreto de referência.

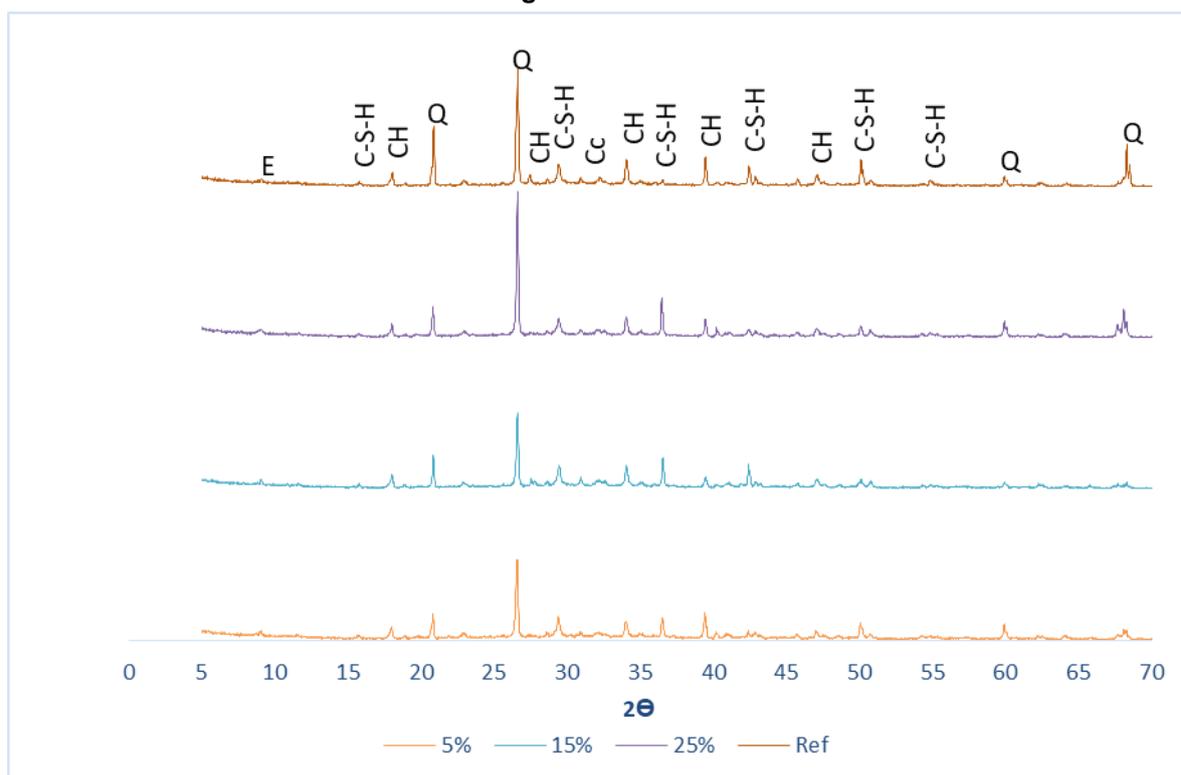
Logo, picos analisados através do *software* estão representados no Gráfico 8 no difratograma do concreto de referência. Os resultados encontrados estão de acordo com estudos realizados em concretos por Duart (2008), o qual buscou analisar a variações de CH e C-S-H. Além disso, estudos de Melo (2010) sobre a formação de etringitas também corroboram com os resultados encontrados, no qual segundo o autor, as mesmas possuem difícil visualização no DRX devido a sua cristalinidade ser prejudicada com a moagem.

Sendo assim, o Gráfico 8 demonstra o difratograma obtido na análise do concreto de referência e com substituição parcial de 5%, 15% e 25% de agregados graúdos por resíduos de cerâmica vermelha, no qual os compostos encontrados são o “CH” que representa um pico de portlandita, “Cc” a calcita, “E” a etringita, “C-S-H” a pasta de gel de silicato de cálcio hidratado e o “Q” o quartzo.

Melo (2010) obteve em seu estudo que picos com predominância de oxigênio (O), silício (Si) e cálcio (Ca) sugerem a presença de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) o que corrobora com os resultados obtidos. Além disso, segundo Silva (2005), na hidratação do silicato tricálcico e dicálcico há a formação de cristais de portlandita, logo, picos com destaque em cálcio (Ca) e oxigênio (O) com traços definidos de silício (Si) e carbono (C) sugerem a presença desses compostos, compactuando com os resultados adquiridos. Altos picos de silício (Si) e oxigênio

(O) sugerem o comparecimento do quartzo, apresentando-se em conformidade com Silva (2004), o qual afirma que os cimentos e as areias utilizadas como agregados possuem grande teor desse composto, justificando a presença desse composto nos resultados.

Gráfico 8 – Difratograma das amostras de concreto



Fonte: Autoria própria (2021)

Os difratogramas obtidos na análise de cada amostra, apresentados no Gráfico 8, permitem verificar que por mais que aja a substituição do agregado graúdo por RCV as amostras permanecem com a mesma composição mineralógica, quando comparados com o concreto de referência, pois, os picos estão na mesma posição. No entanto, existe um aumento no teor de quartzo entre 25 a 30°, principalmente na amostra de 25% de RCV, o que mostra uma alteração na composição química do material demonstrando o potencial pozolânico do agregado reciclado, compactuando com os resultados obtidos pela análise do MEV-EDS. Porém, mostra-se contrário aos estudos de Ugioni e Godinho (2017) e Romano *et al.* (2016), os quais obtiveram que o RCV não apresenta mudanças no material.

Comparando os resultados obtidos através da difração de raio-x do concreto de referência com os concretos com substituição por agregado de RCV, percebe-se uma diminuição do quartzo no ângulo em torno de 27°, tanto na amostra de 5% e

15%, o que possivelmente ocorreram devido a reação álcali-agregado. No entanto, percebe-se um aumento na amostra de 25% e visto que há uma diminuição da portlandita em torno do ângulo de 28° e no 39°, e um aumento do C-S-H em torno do ângulo 37°, mostra que conforme aumenta o teor do RCV gera um aumento no potencial pozolânico. Esse ocorrido justifica-se devido ao RCV ser um argilomineral, ou seja, existe predominância de sílica e aluminas, os quais se dissolvem preenchendo os poros e podendo resultar na redução da porosidade ao ocupar espaços vazios. Logo, é possível associar com os resultados obtidos pelo MEV, dessa forma, compactuando com estudos elaborados por Pedrozo (2008) e Araújo (2017) e Duart (2008).

5.2.3 Resultados comparativos

A partir da caracterização do RCV obteve-se pela análise morfológica através do MEV que a microestrutura do resíduo cerâmico possui aspecto pulverulento e irregular, sendo capaz de absorver mais água que o agregado natural. Além disso, possui em sua composição química um alto teor de alumínio e silício, sendo caracterizado como um argilomineral caracterizado como um filossilicato. Logo, os resultados encontrados estão em conformidade com o DRX, onde é possível observar os picos de quartzo e alumina. Percebe-se que o material possui características cristalinas, o que os torna suscetíveis às reações álcali-agregados, estando de acordo com estudos realizados por Cassol (2015) e Araújo (2017).

Devido o concreto possuir agregados graúdos, agregados miúdos, cimento Portland e água em sua composição, sabendo que o RCV possui como matéria-prima a argila sabe-se que a mesma possui influência nas propriedades do resíduo. Além disso, o mesmo pode ser suscetível a reagir com os álcalis gerados na mistura, logo, foi possível concluir que o agregado reciclado interfere nas propriedades do concreto.

Estudos realizados por Melo (2010) corroboram nos resultados obtidos, visto que o autor afirma que compostos sulfoaluminatos que originam a etringita se associam com a quantidade dos elementos sulfatos e alumínio por meio da relação SO_3/Al_2O_3 . A autora ainda afirma, que picos dos compostos dos elementos alumínio (Al), enxofre (S), Cálcio (Ca) com traços de silício (Si) sugerem a presença de monossulfoaluminatos, os quais podem apresentar-se cravados ou misturados ao C-

S-H. Além disso, os picos de alumínio (Al), enxofre (S), Cálcio (Ca) e silício (Si) são característicos da etringita. Entretanto, a composição química da etringita pode ser distinta em poros ou na região de interface entre agregados e a pasta de cimento.

Além disso, o estudo de Voziniak (2019) também pode ser correlacionado com os resultados obtidos, pois o autor justifica que a presença de um conglomerado com grandes cristais sugere a presença de hidróxido de cálcio, o qual apresenta em sua composição química picos maiores de carbono (C), oxigênio (O) e cálcio (Ca) e traços de silício (Si). Já que em locais com aspecto fibrilar pressupõe a existência de formação morfológica de C-S-H.

Dessa forma, correlacionando os resultados obtidos no MEV com os do DRX, foi possível observar que na amostra com substituição de 5% dos agregados por RCV, apresentou etringita em sua morfologia, sendo semelhante à amostra do concreto de referência. Entretanto, as amostras de 15% e 25% não apresentaram cristais de portlandita e nem de etringita em sua morfologia, o que pode ter ocorrido com o surgimento da mulita, a qual preenche os poros vazios sugerindo a redução da porosidade, o que foi possível visualizar nos resultados obtidos pelo EDS. Dessa forma, as análises pelo MEV-EDS e DRX estão em conformidade entre si, pois é possível verificar no DRX que conforme aumenta o teor de RCV há primeiramente uma queda no quartzo e então o composto aumenta, mostrando que está havendo uma reação pozolânica, o que pode ser verificada através da análise química.

Dessa forma, estudos elaborados por Melo (2010) afirmam que o surgimento de cristais tem relação com a porosidade do material, o que corrobora com os resultados obtidos, pois quanto mais RCV aplicado como agregado, menor a visualização dos cristais, conforme apresentado nas imagens do MEV e na análise química do EDS. Os resultados encontrados podem ser justificados de acordo com estudos de Ugioni e Godinho (2017), os quais obtiveram que o RCV possui maior índice de absorção de água devido a sua porosidade corroborando com os resultados da caracterização do RCV.

De acordo com Silva (2005) a mulita é um cristal com alto teor de alumina e sílica com origem dos elementos que compõe a argila, matéria-prima que origina o RCV, o qual é formado quando o quartzo é dissolvido preenchendo os poros. Dessa forma, justifica-se a variação da intensidade dos picos de quartzo no DRX para os concretos com RCV relacionando com as análises químicas do EDS, no qual a mulita encontra-se no concreto com 15% e 25%.

Com isso, os picos no DRX apresentam-se no mesmo local, apenas com variações na intensidade dos elementos, logo, o uso de agregados de RCV não modificam a composição mineralógica do material. Portanto, os resultados obtidos estão em conformidades com os resultados obtidos por Baldin C., Filho e Baldin V. (2021) e Ugioni e Godinho (2017).

5.3 Análise dos corpos de prova de argamassa

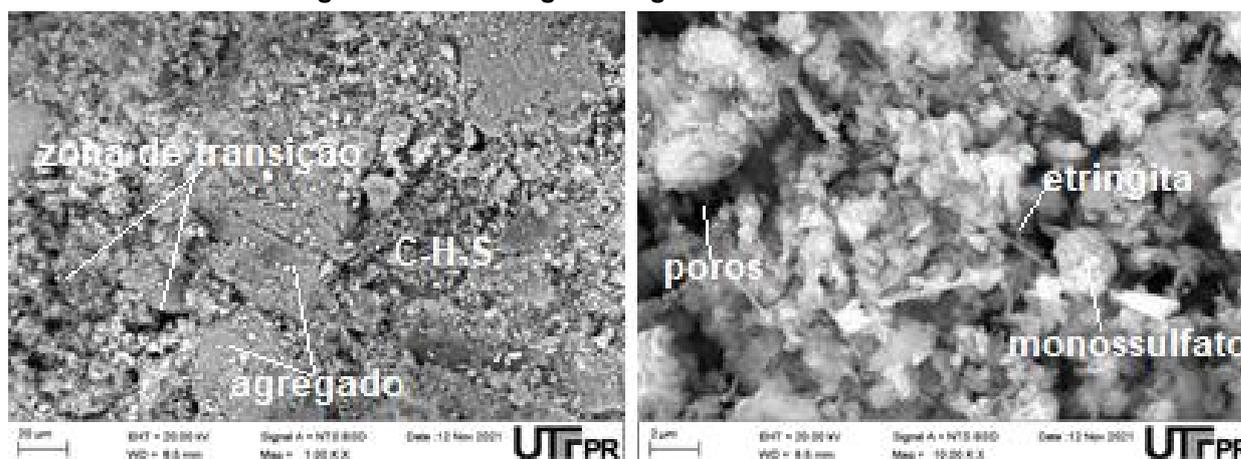
5.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

5.3.1.1 Argamassa de referência

As análises das amostras de argamassas foram obtidas similarmente as de concreto. Logo, a Figura 33 mostra a morfologia encontrada na microestrutura da argamassa de referência. Na qual é possível observar a zona de transição entre os agregados e a matriz cimentícia a partir de uma aproximação de 1000X. Além disso, foi possível visualizar cristais de etringita e monossulfato através da lente com aproximação 10.000X.

Logo, foi possível verificar o C-S-H devido as suas características fibrilares e aspecto esponjoso. A zona de transição é a região de interface com os agregados, a etringita é um cristal com formato acicular e o monossulfato possui o formato de placas hexagonais.

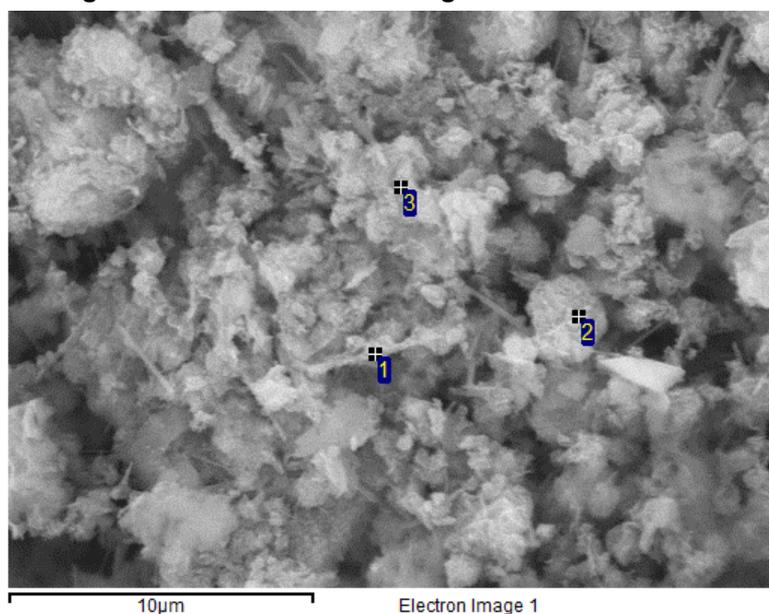
Figura 33 – Morfologia da argamassa de referência



Fonte: Autoria própria (2021)

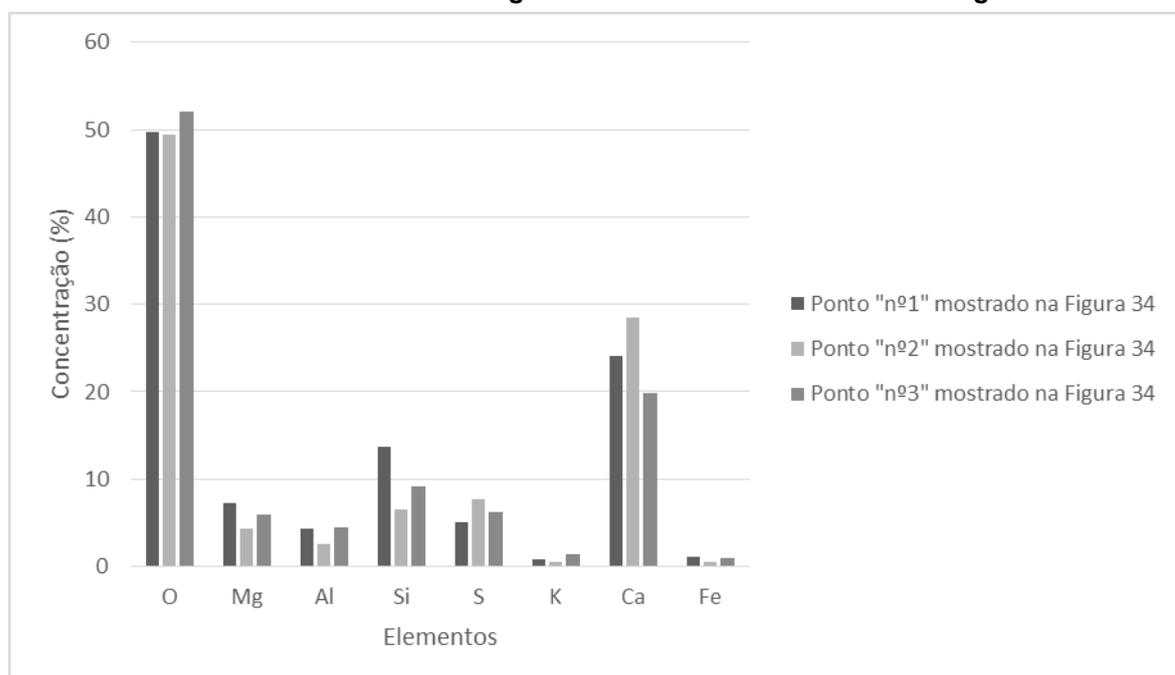
A microanálise realizada por EDS foi obtida a partir dos pontos marcados na amostra de referência demonstrados na Figura 34 e a análise química obtida encontra-se no Gráfico 9.

Figura 34 – Microanálise da argamassa de referência



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 9 – Microanálise da argamassa de referência referente a Figura 34



Fonte: Autoria própria (2021)

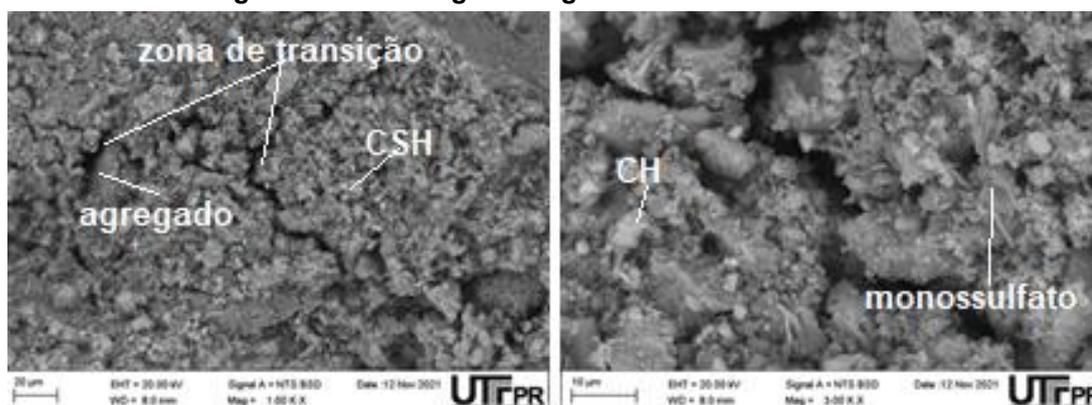
No Gráfico 9 verifica-se que o “nº1” apresentou picos mais elevados de cálcio (Ca), oxigênio (O) com traços de silício (Si), alumínio (Al) e enxofre (S) e, além

disso, possui um aspecto de agulha longa o que indica a presença de etringita. O “nº2” e “nº3” apresentaram formato hexagonal e uma análise química semelhante contendo picos de oxigênio (O), cálcio (Ca), enxofre (S) e silício (Si) o que mostra a presença de monossulfoaluminatos.

5.3.1.2 Argamassa com 20% de RCV

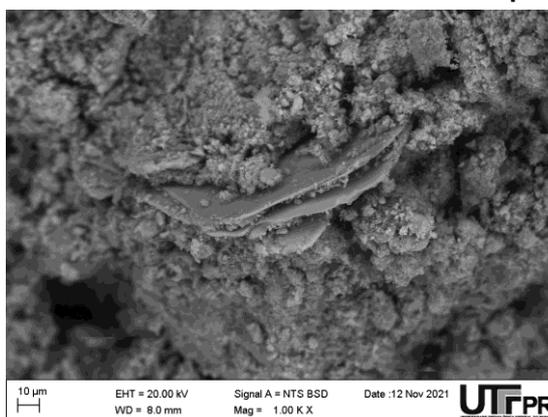
A morfologia da argamassa com 20% de substituição dos agregados miúdos por RCV apresenta-se na Figura 35. Foi possível verificar a microestrutura contendo a zona de transição, a pasta de cimento e os agregados através da lente de ampliação de 1000X. Para uma visualização mais ampla foi aproximado em 3000X, no qual se verificou a presença de cristais portlandita e monossulfato, no entanto, não apareceram etringitas. Além disso, foi possível verificar a morfologia de monossulfoaluminatos cravados na pasta C-S-H, em formato de placas hexagonais, como mostrado na Figura 36.

Figura 35 - Morfologia da argamassa com 20% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 36 - Monossulfoaluminatos cravados na pasta C-S-H

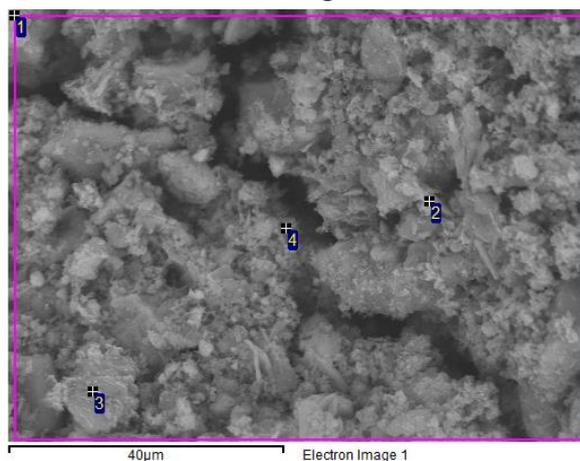


Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 37 representa a microanálise realizada na amostra com 20% de RCV em substituição ao agregado miúdo e o Gráfico 10 mostra os resultados obtidos no EDS. Dessa forma, foi possível verificar no “nº1” a presença de oxigênio (O), alumínio (Al), silício (Si) e cálcio (Ca) que é sugestivo de um alumino-silicato, como a gismondina (C-A-S-H). Este ocorrido explica-se de acordo com estudos elaborados por Araújo (2017) o qual explica que a gismondina é uma reação entre o C-S-H com um aluminato de cálcio, o que ocorre devido à reação pozolânica, visto que o RCV é um filossilicato. O “nº2” apresentou picos elevados de oxigênio (O), cálcio (Ca) e traços de carbono (C), visto que possui formato hexagonal e encontra-se alojado na pasta, nota-se o comparecimento da portlandita. O “nº3” indicou picos de oxigênio (O), silício (Si), cálcio (Ca) com traços de alumínio (Al), enxofre (S) e ferro (Fe), que também devido ao seu formato de placas hexagonais sugere-se a presença de monossulfato. O “nº4” demonstrou em sua composição carbono (C), oxigênio (O), alumínio (Al), silício (Si) e cálcio (Ca) com aspecto fibrilar e próximo da zona de transição o que indica ser C-A-S-H.

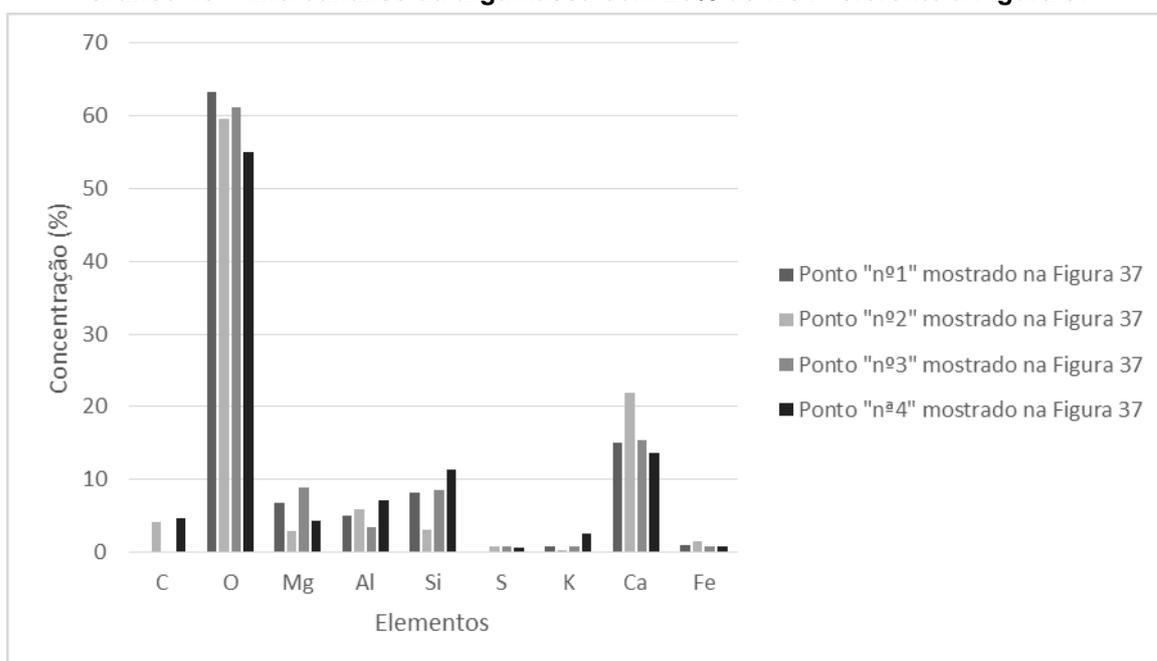
Estudos elaborados por Metha Monteiro (2008) mostram que o quartzo age como material inerte ou como preenchimento nas pastas de cimento dos concretos e argamassas e depois atua com características pozolânicas, corroborando com o presente estudo. De acordo com estudos elaborados por Silva (2005), as polozanas são materiais feitos de sílica e alumina que reagem com a portlandita e a água. O autor ainda afirma que para que o material atinja características pozolânicas o mesmo precisa estar moído, então a sílica combinada com a portlandita na presença de água forma silicatos. Quando há a reação entre silicatos de cálcio hidratados com algum aluminato forma-se gismondina, o que ocorre devido à presença do agregado filossilicato RCV, visto que foram encontrados elementos químicos que sugerem a presença de gismondina, o que pode ser justificado devido aos resultados encontrados na composição química pelo EDS. Logo, encontra-se em conformidade com os estudos obtidos por Araújo (2017).

Figura 37 – Microanálise da argamassa com 20% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 10 – Microanálise da argamassa com 20% de RCV referente a Figura 37



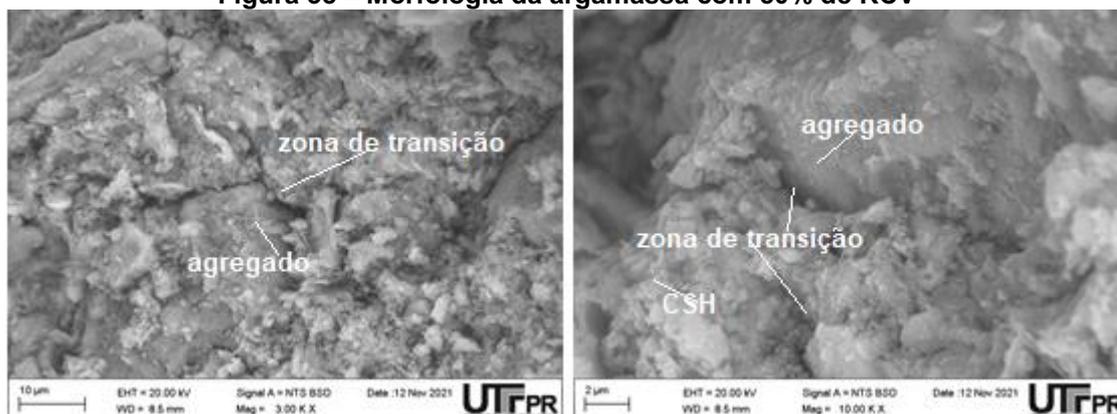
Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa forma, a amostra com 20% de RCV quando comparada ao concreto de referência apresenta-se muito similar, entretanto, a presença de gismondina indica o potencial pozolânico do resíduo em estudo que pode ter ocasionado reações que contribuem na hidratação dos compostos. Logo, não apresenta mudanças significativas na composição química do material.

5.3.1.3 Argamassa com 50% de RCV

A Figura 38 apresenta, em uma ampliação de 3000X, a zona de transição da argamassa na região de ligação entre o agregado e a pasta. Além disso, foi possível verificar, em uma ampliação de 10.000X, que a região, na qual não apresentou etringitas.

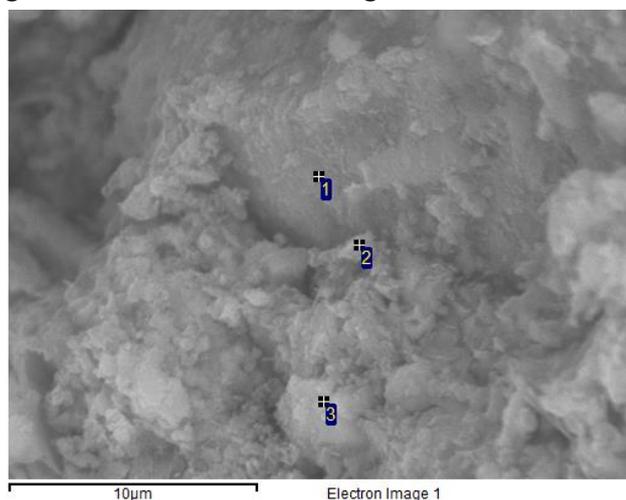
Figura 38 – Morfologia da argamassa com 50% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

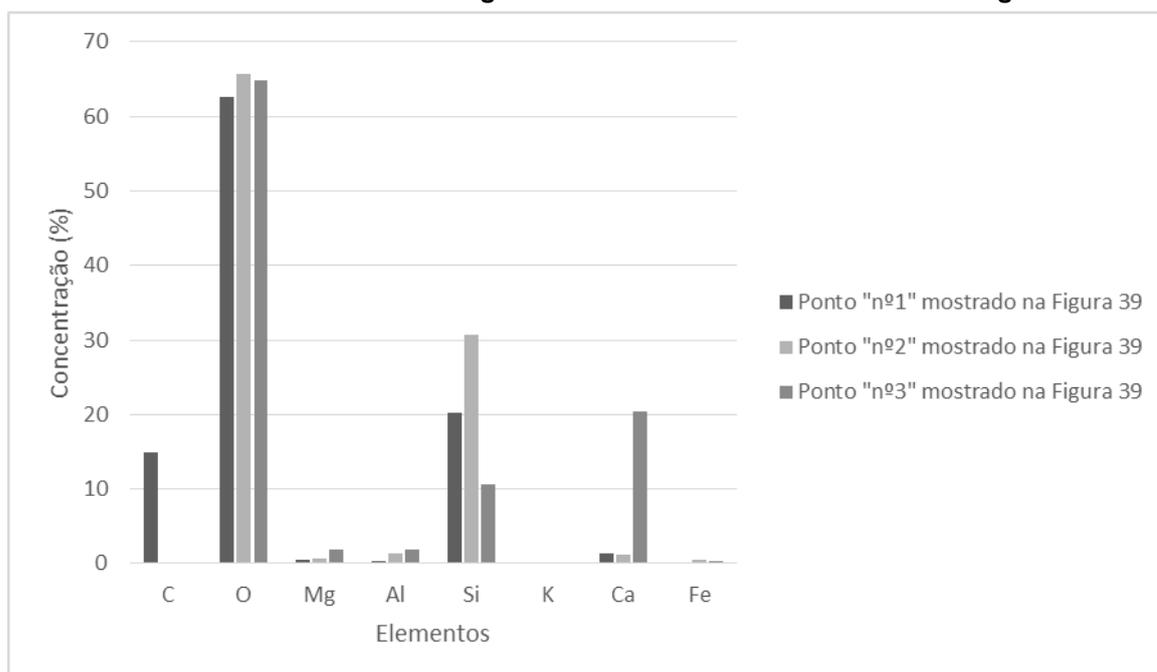
A Figura 39 mostra os pontos adotados para a microanálise da amostra com 50% de RCV, no qual os resultados encontrados estão demonstrados no Gráfico 11.

Figura 39 – Microanálise da argamassa com 50% RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 11 – Microanálise da argamassa com 50% de RCV referente a Figura 39



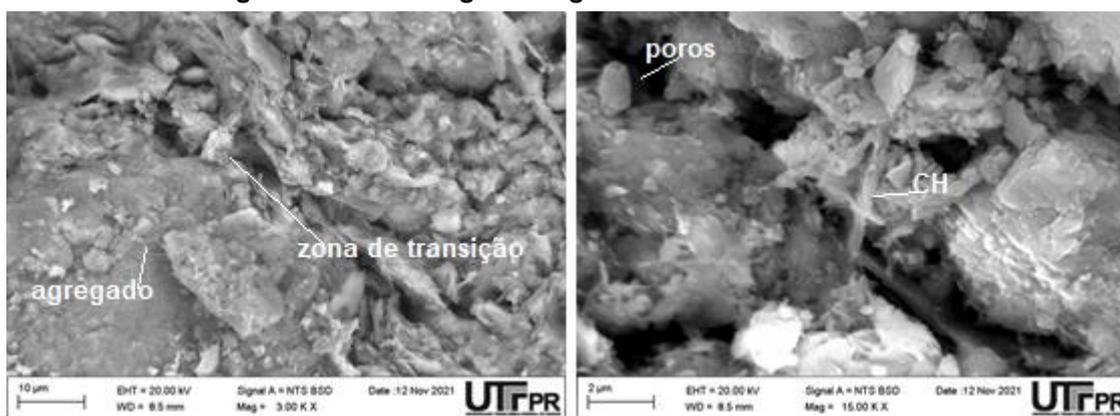
Fonte: Autoria própria (2021)

Logo, o “nº1” apresentou uma superfície sólida com picos de carbono (C) e principalmente de silício (Si) e oxigênio (O), o que se sugere a presença de um grão de areia. O “nº2” e “nº3” apresentaram-se semelhantes, com características fibrilares e picos de silício (Si), oxigênio (O), cálcio (Ca) e traços de alumínio (Al) o que indica o comparecimento de C-A-S-H e, além disso, está localizada próxima a zona de interface com o agregado.

5.3.1.4 Argamassa com 100% de RCV

Para a amostra de argamassa com 100% de substituição de agregado miúdo natural por agregado reciclado de RCV foi possível verificar a microestrutura do material na Figura 40, a uma ampliação de 3000X, na qual observa-se que a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Além disso, encontrou-se portlandita nos poros, a uma aproximação de 15.000X.

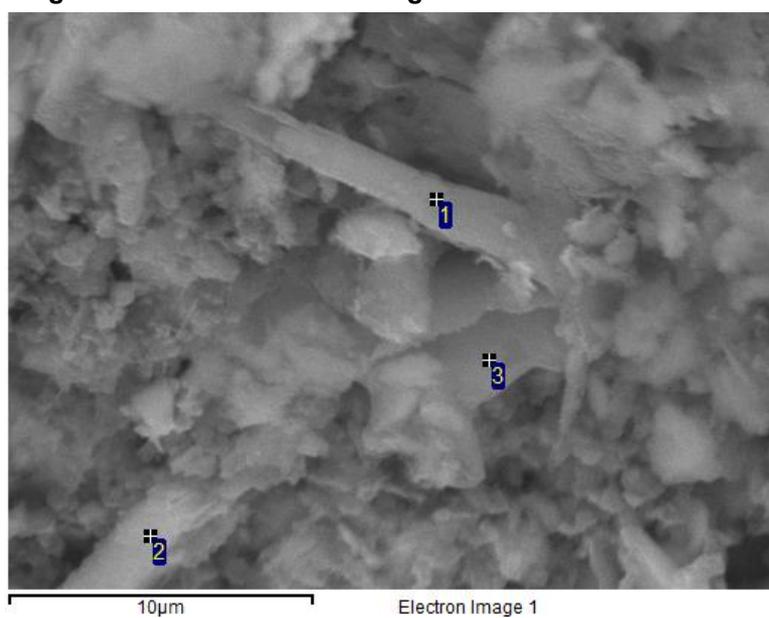
Figura 40 – Morfologia da argamassa com 100% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

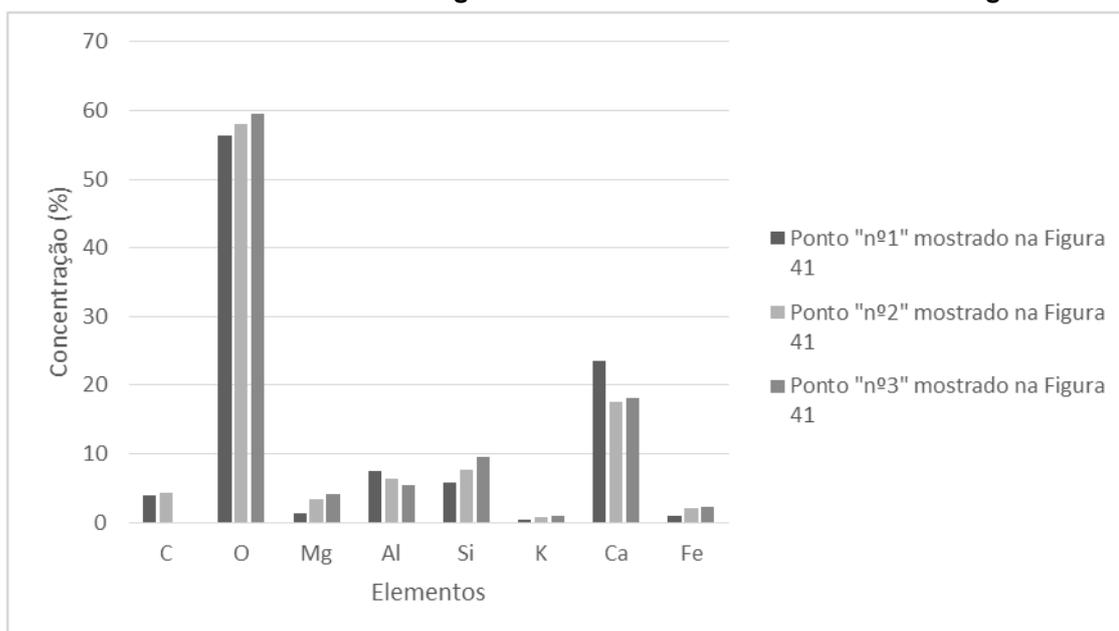
A Figura 41 mostra os pontos adotados para a microanálise da argamassa com 100% de RCV, com suas respectivas composições químicas mostradas nos resultados obtidos no Gráfico 12.

Figura 41 – Microanálise da argamassa com 100% de RCV



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 12 – Microanálise da argamassa com 100% de RCV referente a Figura 41



Fonte: Autoria própria (2021)

Logo, para o “nº1” e o “nº2” o Gráfico 12 apresentou um pico de oxigênio (O) e cálcio (Ca), com traços de silício (Si), de carbono (C) e de alumínio (Al) devido ao seu formato grande, indicando a presença de portlandita. O “nº3” demonstrou características sólidas e predominância dos elementos oxigênio (O), silício (Si), cálcio (Ca) e alumínio (Al) o que é sugestivo de C-A-S-H.

5.3.2 Difração de Raio-X (DRX)

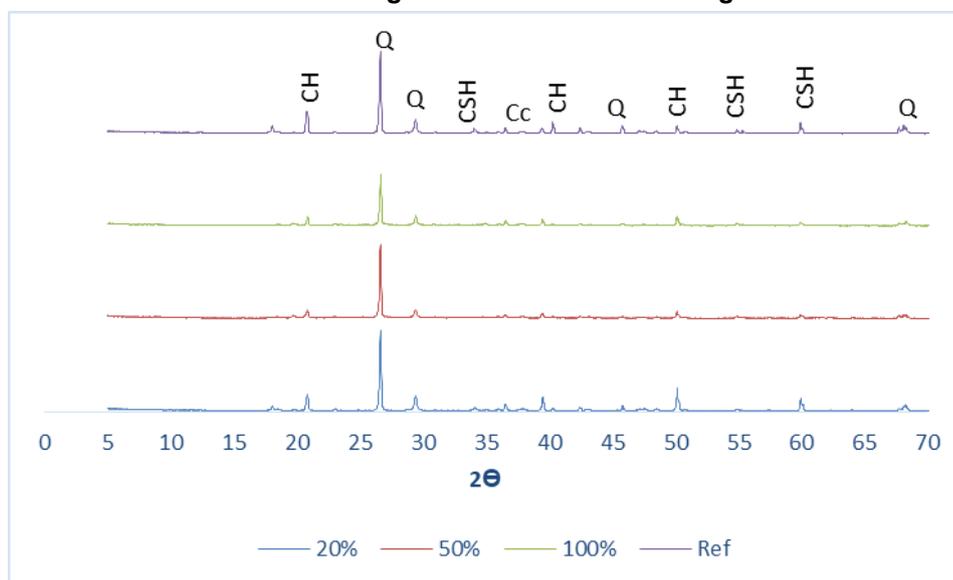
As análises qualitativas das fases cristalinas foram feitas similarmente ao concreto, no qual a caracterização do difratograma foi realizada correlacionando os resultados obtidos no *software Xpert HighStore Plus*, que consta com um banco de dados da *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*, e com os resultados de autores que utilizaram amostras de argamassas de referência aos 28 dias.

Dessa forma, Araújo (2017) realizou seus estudos sobre a utilização de resíduos de cerâmica vermelha nas propriedades da argamassa mista, o qual corroborou para os resultados obtidos no difratograma da argamassa de referência, além disso, foi comparado com os resultados obtidos no *software*.

Sendo assim, o Gráfico 13 demonstra o difratograma obtido na análise da argamassa de referência e com substituição parcial de 20%, 50% e 100% de agregados miúdos por resíduos de cerâmica vermelha. No qual os compostos

encontrados são o “CH” que representa um pico de portlandita, “Cc” a calcita, “C-S-H” a pasta de gel de silicato de cálcio hidratado e o “Q” o quartzo.

Gráfico 13 - Difratoograma das amostras de argamassa



Fonte: Autoria própria (2021)

Mediante aos resultados obtidos no difratograma, apresentado no Gráfico 13, percebe-se que, comparando à argamassa de referência com as argamassas com RCV, não houve mudanças nas composições mineralógicas, pois os picos só apresentam pequenas variações nas suas intensidades que podem ser consideradas insignificantes. Além disso, Melo (2010) afirma em seus estudos que em pastas hidratadas curadas é muito comum encontrar C-S-H, entretanto, devido ao processo de moagem da amostra para o DRX dificulta a visualização da etringita, logo justifica-se os resultados obtidos. A presença de quartzo justifica-se pela composição mineralógica das areias utilizadas como agregados miúdos, conforme Rato (2006).

5.3.3 Resultados comparativos

De acordo com os resultados obtidos pelo MEV-EDS e DRX foi verificado que o RCV utilizado como agregado na argamassa possui características pozolânicas, pois sua composição principal constitui alumina e sílica e apresentam-se moídas devido ao processo de moagem realizado no preparo da amostra. Além disso, quando combinadas com a portlandita reagem na presença de água podendo

formar silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, estando em conformidade com estudos elaborados por Araújo (2017) e Silva (2005).

Pode ocorrer aumento da resistência e durabilidade, visto que o aumento da reação álcali-agregado permite um preenchimento e aceleração da hidratação do cimento. Similarmente aos concretos, a argamassa também apresenta maior absorção de água devido ao RCV, mostrado na caracterização do resíduo. Dessa forma, correlacionando os resultados obtidos no MEV com os do DRX, foi possível observar que na microscopia comparada com a argamassa de referência que apresentou apenas em sua morfologia etringitas, as amostras de 20%, 50% e 100% não apresentaram, o que pode ser justificado pelo estudo de Melo (2020) que afirma que o surgimento de cristais tem relação com a porosidade do material, ou seja, devido ao aumento de absorção de água pelo agregado reciclado, a argamassa pode ter se tornando menos porosa.

Além disso, foi observado através do MEV-EDS alterações na análise qualitativa das amostras com RCV, onde apresentaram características de silicato de cálcio hidratado com presença de alumínio, o que sugere que pode ter ocorrido reação entre o silicato e o aluminato formando a gismondina devido ao potencial pozolânico que o resíduo possui. No entanto, não se percebe nenhuma modificação na composição mineralógica do material no DRX e também nenhuma alteração química significativa.

Com isso, percebe-se que a aplicação do RCV como agregado possivelmente gera uma reação pozolânica nas argamassas, pois é utilizado moído. Entretanto, como não apresenta, em nenhuma das amostras comparadas a de referência, uma alteração relevante na composição mineralógica, pode-se afirmar que o RCV pode ser utilizado como agregado.

6 CONCLUSÃO

Esse estudo fundamentou-se na substituição dos agregados graúdos do concreto por resíduos de cerâmica vermelha na proporção de 0%, 5%, 15% e 25% e dos agregados miúdos na argamassa por RCV com teor de 0%, 20%, 50% e 100% e compararam-se os resultados com o concreto de referência, a fim de avaliar a microestrutura e comportamento desses materiais. Com base nos resultados obtidos foi possível concluir:

- O RCV aplicado como agregado reciclado em concretos e argamassas não altera suas propriedades mineralógicas;
- Na amostra de 25% de RCV no concreto foi verificado um aumento de quartzo o que pode indicar atividade pozolânica do resíduo estudado, sendo necessário um estudo sobre a pozolanicidade do RCV;
- As argamassas não apresentaram reduções significativas no ensaio de DRX, o que corrobora que a granulometria dos resíduos empregados não afetaram a química dos compostos, o que pode indicar um potencial para agregado em argamassas.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM. Associação Brasileira de Cerâmicas. **Informações técnicas - definição e classificação**. Disponível em: < <http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/> >. Acesso em: 15 de outubro de 2021.
- ABITANTE, A.L.; LISBOA, E.S. **Materiais de construção**. Porto Alegre: SAGAH EDUCAÇÃO S.A, 2017.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama**. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama/> >. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- AMBROZEWICZ, P.H.L. **Materiais de Construção: normas, especificações, aplicações e ensaios de laboratório**. São Paulo: Pini, 2012.
- ANICER. Associação Nacional de Indústria Cerâmica. **Dados oficiais**. Disponível em: < <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/> >. Acesso em: 15 de outubro de 2021.
- ARAÚJO, R.A. **Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- ARNOLD, D.C.M. Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas. 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos**. São Paulo: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211: Agregado para concreto – Especificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- BALDIN, C.R.B; FILHO, J.I.P.; BALDIN, V. Estudo da influência da substituição do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha na fabricação de placas de fibrocimento. **Revista Materia**, v.26, n.1, 2021.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. Ed. v.2. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- BERTOL, M. **Estudos dos impactos da reutilização de resíduos da construção civil**. 2015. Dissertação (Graduação) - Curso de Graduação em Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2015.

CABRAL, A.E.B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D.C.C.; RIBEIRO, J.L.D.; RAVINDRARAJAH, R.S. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica. **Revista Cerâmica** **55**, p.448-460, 2009.

CARNEIRO, G.V.H.S; GIL, L.K.D.S; NETO, M.P.C. **Calor de hidratação no concreto**. 2011. Dissertação (Graduação) – Curso de Graduação em Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

CARVALHO, A.M.; ROGGIA, F.G.; JARDIM, M.C.; HUYER, A. **Materiais e tendências**. Porto Alegre: SAGAH EDUCAÇÃO S.A, 2018.

CASSOL, G. **Caracterização e utilização de resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes**.2015. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2015.

CBIC. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Banco de dados**. Disponível em: < <http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil> >. Acesso em: 12 de outubro de 2021.

CEOTTO, L.H.; BANDUK, R.C.; NAKAKURA E.H. **Revestimento de argamassa boas práticas em projeto, execução e avaliação**. v.1. Porto Alegre: ANTAC, 2005.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002. **Resolução** nº 307, 05 de Julho de 2002.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2012. **Resolução** nº 448, 18 de Janeiro de 2012.

DUART, M.A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

DUTRA, R.P.S.; ARAÚJO, P.A.S.; GOMES, U.U.; NASCIMENTO, R.M.; PASKOCIMAS, C.A.; PONTES, L.R.A. Estudo da variação da tonalidade de materiais cerâmicos tradicionais, parte III: Efeito da composição química das argilas. **XXI ENTMME**, p. 388-394, Novembro, 2005.

FRANCISCON, M.; Tecnologia da argamassa. 2007. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil. Universidade São Francisco, Itatiba, 2007.

FROTTE, C.; NÚBILA, C.S.A.D. **Estudo das propriedades de concretos com substituição parcial de agregado natural por RCD**. 2015. Dissertação (Graduação) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

FURTADO, G.B. **Influência da substituição do agregado miúdo por resíduo de cerâmica vermelha na produção de argamassa para revestimento**. 2021. Dissertação (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2021.

GARCIA, E.; JUNIOR, M.C.; QUARCUINI, V.A. Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): Uma alternativa como material pozolânico. **Cerâmica Industrial**, p. 31-38, Janeiro, 2014.

GARCIA, E.; JUNIOR, M.C.; QUARCUINI, V.A.; CHOTOLI, F.F. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica** **61**, p. 251-258, 2015.

JUNIOR, J.A. **Caracterização e reciclagem de resíduos cerâmicos de construção civil para aplicação como adição pozolânica e como componente de clínqueres visando novos cimentos**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2020.

KLASS, H.C.; OLIVEIRA, P.S. **Estudo das propriedades de argamassa de base química**. 2012. Dissertação (Graduação) - Tecnologia em Concreto, Universidade Tecnológico Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LAVAT, A.E; TREZZA, M.A.; POGGI, M. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. **Elsevier**, v. 29, p. 1666-1674, May, 2009.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LOPES, T.B. **Comparação da microestrutura do concreto auto adensável com o concreto convencional**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2016.

MALTA, J.O; SILVA, V.S; GONÇALVES, J.P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v.1, n.2, p. 176-188, 2013.

MELO, S.K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação de cimento**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3 Ed. São Paulo: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.

NEVILLE, A.M.; **Propriedades de concreto**. 5 ed. BOOKMAN, 2016.

PEDROZO, R.F.E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PELLISSARI, V. **Propriedades de concretos produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PIMENTEL, M.G.; PAES, I.N.L. Análise microestrutural de argamassa de revestimento com substituição parcial do agregado natural por sedimento do Rio Amazonas. **Ambiente Construído**, v.20, n.3, p. 319-330, 2020.

RATO, V.N.P.M. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas**. 2006. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.

RODRIGUES, F.; CARVALHO M.T.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J.D. Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v.52, p. 438-445, 2013.

ROMANO, R.C.O.; FUJII, A.L.; SOUZA, R.B.; TAKEASHI, M.S.; PILEGG, R.G.; CINCOTTO, M.A. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica** 62, p. 215-223, 2016.

SANTOS, J. **Análise de desempenho do concreto com a substituição parcial do agregado graúdo por resíduos de cerâmica vermelha**. 2021. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2021.

SCHERER, G.W. Crystallization in pores. **Cement and concrete research**, v. 29, p. 1347-1358, 1999.

SILVA, V.S.; LIBRORIO, J.B. Estudo da microestrutura da interface argamassa/substrato de concreto através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. 2002, Natal. **CBECIMAT** Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2002. P. 287-293.

SILVA, V.S. **Aderência de chapisco em concretos estruturais-melhoria da microestrutura da zona de interface pela adição da sílica da casca de arroz**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SILVA, G.J.B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

TAUBE, A.D.S.; **Caracterização de blocos estruturais de concreto com agregados reciclados**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

TASHIMA, M.M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2006.

TEIXEIRA, E.D.C.; **Estudo da zona de transição de concretos preparados com metacaulim através de análise nanomecânica**. 2020. Tese (Doutorado) –

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Paraná, João Pessoa, 2020.

TESSARO, A.B.; SÁ, J.S.D.; SCREMIN, L.B. Quantificação dos resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.12, n.2, p. 121-130, abr./jun. 2012.

THOMAS, M.; FOLLIARD, K.; DRIMALAS, T.; RAMLOCHAN, T. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structure. **Cement and concrete research**, v. 38, p.841-847, 2008.

UGIONI, V.M.; GODINHO, D.S.S. **Análise das propriedades mecânicas do concreto produzido com substituições parciais e totais dos agregados graúdos e miúdos por agregados reciclados**. 2017. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2017.

WADA, P.H. **Estudo de incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso de estacas moldadas in loco**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, Ilha Solteira. 2010.