https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.064

Congresso Brasileiro de Patologia das Construções

INFLUÊNCIA DA ETRINGITA SECUNDÁRIA FORMADA EM ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO NA DURABILIDADE DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Patricia Kruger[1]*, Eduardo Pereira[2]; Adriana A.S. Chinelatto
*Autor de contato: pkruger@uepg.br (marcado com um asterisco entre os autores)

[1] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil
[2] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil
[3] Departamento de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil

RESUMO

A formação de etringita secundária na matriz cimentícia pode afetar negativamente a durabilidade das argamassas. Isto ocorre desde que a pressão de cristalização seja maior que a resistência à tração da matriz. O objetivo principal deste trabalho é apresentar possíveis efeitos da formação de etringita secundária na matriz cimentícia de argamassas de RCD. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais e das argamassas no estado endurecido através de ensaios macro e microestruturais. A pesquisa concluiu que a granulometria e a tipologia do agregado de RCD influenciaram as propriedades no estado endurecido das argamassas. O fator preponderante está relacionado à quantidade de argamassa aderida ao grão ou ao efeito de cura interna da partícula cerâmica. Observou-se que, quando a solução no interior dos poros está pouco saturada, os cristais formados são maiores e, quando formados em espaços restritos podem causar tensões internas e afetar a durabilidade das argamassas.
Palavras-chave: Etringita secundaria; argamassa aderida; efeito de cura interna.

ABSTRACT

The formation of secondary ettringite in the cement matrix can affect the durability of mortars. This occurs as long as the crystallization pressure is greater than the tensile strength of the matrix. The main objective of this work is to present possible effects of secondary ettringite formation in the cement matrix of RCD mortars. Characterization tests of the materials and mortars in the hardened state were carried out through macro and microstructural tests. The research concluded that the granulometry and the typology of the RCD aggregate influenced the properties in the hardened state of the mortars. The preponderant factor was related to the amount of mortar adhered to the grain or to the internal curing effect of the ceramic particle. It was observed that when the solution inside the pores is slightly saturated, the crystals formed are larger. And when formed in restricted spaces, they can cause internal stresses and affect the durability of mortars.
Keywords: secondary ettringite; mortar adhered; internal curing effect.

1. INTRODUÇÃO

A etringita secundária formada na matriz cimentícia pode ser formada por reação de sulfato interno ou externos com aluminatos anidros ou hidratados e tem caráter expansivo (MUNOZ-RUIPERES *et al*., 2016). Em RCD, o alumínio pode estar associado aos sulfoaluminatos de cálcio presentes em compostos cimentícios hidratados da argamassa aderida ao grão do agregado de resíduo de concreto ARC (FERREIRA *et al*., 2019) ou pode ser proveniente da interação entre sulfato de aluminato de cálcio com hidróxido de cálcio e gipsita (COLLEPARDI, 2003). Quanto menor a granulometria, maior a quantidade de argamassa aderida e maior será a absorção de água pelo grão (GÜNEYISI *et al*., 2014; ISMAIL; RAMLI, 2013).
Segundo Liu *et al*. (2017), a porosidade do agregado pode interferir na retração autógena, sendo que agregados com maior porosidade podem absorver maior quantidade de água em seu interior e funcionar como um agente de cura interna, reduzindo a autodessecação da argamassa. Segundo Vieira *et al*. (2016), grande quantidade de água é consumida para a formação da etringita secundária e por conta disso pode ocorrer maior tensão nos poros capilares, aumentando a retração autógena da argamassa.
Para que ocorra a fissuração da matriz devido à formação de cristais de etringita secundária, é preciso que a tensão exercida pelo cristal sobre a parede do poro seja em torno de 8 MPa, que é maior que a resistência de tração da matriz (3 a 4 MPa). Isto pode ocorrer devido à pressão de cristalização (crescimento do cristal de etringita secundária) e pela pressão de dilatação (elevada adsorção de água e estado de microcristalização). Em ambos os casos é mais provável que ocorra a formação de fissuras com perda de resistência se pequenos cristais de etringita secundária se formarem em espaços restritos, como poros menores que 10 a 50 nm ou na pasta (MÜLLAUER; BEDDOE; HEINZ, 2013).
Segundo Min e Mingshu (1994), quanto maior a quantidade de água livre, menor é a saturação da solução e quanto menor a quantidade de argamassa aderida, menor serão os pontos de nucleação com sulfoaluminatos anidros ou hidratados. Neste cenário, os cristais podem ser formados tanto na pasta quanto no poro e possuem maior dimensão. Cristais formados em poros maiores, muitas vezes não crescem o suficiente para causar tensão nas paredes e existem dois fatores limitantes a esta tensão. O primeiro fator é a resistência ao escoamento, pois se o cristal ceder, se espalhará lateralmente no poro. E o segundo é a tendência à deformação, caso o cristal não ceda, ele pode apresentar flambagem, curvando para melhor se acomodar (SCHERER, 2004). O crescimento dos cristais de etringita secundária dentro dos poros maiores gera uma tensão de cristalização menor, insuficiente para gerar fissuras e ainda proporcionam a colmatação dos poros, com consequente aumento da resistência e redução da absorção (PEREIRA, 2018).
O objetivo geral deste trabalho é demonstrar a formação de etringita secundária em argamassas produzidas com RCD e os possíveis efeitos que esta formação pode causar na durabilidade desses compósitos.

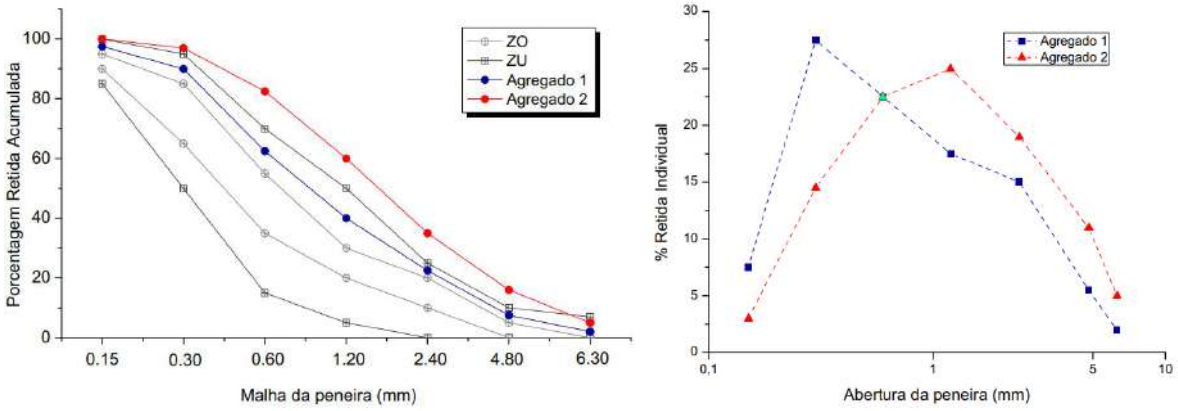
2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

Neste artigo está sendo apresentado um estudo em argamassas produzidas com dois tipos de agregado de resíduo de construção, sendo um constituído somente por agregados de resíduos de concreto (ARC) e outro constituído de agregados de resíduo misto (ARM), onde neste caso é incorporado 20% de resíduo cerâmico ao resíduo de concreto. Para cada tipologia de agregado será utilizada duas granulometrias distintas, conforme apresentadas na Figura 1a. Na Figura 1b é possível observar que o Agregado 1 apresenta maior quantidade de partículas de fração 0,3-0,6

mm enquanto o Agregado 2 apresenta maior quantidade de partículas com granulometrias acima da fração 1,2mm. Complementando a composição da curva granulométrica dos agregados foi estipulada a porcentagem de material pulverulento (partículas menores que 75 µm) em 10% da massa total de agregado. A Tabela 1 apresenta a Dimensão Máxima Característica (DMC) e Módulo de Finura (MF) dos agregados. O cimento utilizado foi o CP II F – 32 e o aditivo foi o superplastificante sintético de alto desempenho de polímero policarboxilato.

Figura 1 - Curvas granulométricas (a); porcentagem retida individual x abertura da peneira(b)



(a) (b)

Obs: ZU (Zona Utilizável, ABNT, 2019); ZO (Zona Ótima, ABNT, 2019)

Fonte: os autores.

Tabela 1 - Granulometria dos agregados

Curva Granulométrica	DMC (mm)	MF
Agregado 1	6,30	3,22
Agregado 2	6,30	3,96

Fonte: os autores.

2.2 Traço e consumo de materiais por metro cúbico

Foi definido um traço padrão de 1:3,2:0,60 (cimento:agregado miúdo:relação água/cimento), onde não se considerou a água de pré-umedecimento. A consistência das argamassas foi mantida constante, com índice de consistência médio de 250mm ± 5mm. Para obtenção deste índice constante foi feita a dosagem com aditivo superplastificante de policarboxilato. Definiu-se que a quantidade de água de pré-umedecimento em relação à massa total de agregado (agregado+material pulverulento) seria de 4,1% para o ARC e 5% para o ARM. O consumo de materiais/metro cúbico de argamassa está apresentado na Tabela 2 e o teor de ar aprisionado calculado segundo a NBR 9833 (ABNT, 2008) na Tabela 3.

Tabela 2 - Consumo de materiais das argamassas produzidas, em kg/m³

Tratamentos	Agregado 1		Agregado 2	
	ARC	ARM	ARC	ARM
Cimento CP-II F*	358,51	356,37	380,31	367,45
Agregado	1261,94	1254,41	1338,68	1293,42
Agua (a/c)	215,10	213,82	228,18	220,47
Água de umedecimento	52,20	62,13	55,37	64,06
Aditivo	7,17	8,91	7,8	7,72

*Obs: no consumo de cimento foi descontado o volume de teor de ar aprisionado

Fonte: os autores.

Tabela 3 - Teor de ar incorporado das argamassas

Tratamentos	Agregado 1		Agregado 2	
	ARC	ARM	ARC	ARM
Teor de ar (%)	7,0	6,8	3,7	4,9

Fonte: os autores.

2.3 Métodos de ensaio

2.3.1 Análise dos materiais

No agregado miúdo de resíduo foram feitas as seguintes análises: massa específica NBR NM 52 (ABNT, 2009a), massa unitária/índice de vazios NBR NM 45 (ABNT, 2006), absorção NBR NM 30 (ABNT, 2001), fluorescência de raios-X (FRX-WDS) e teor de argamassa aderida. O ensaio de FRX foi realizado em espectrômetro modelo Rigaku ZSX Primus II, instalado no Complexo de Laboratório Multiusuário (C-LABMU-UEPG). O procedimento de ensaio para determinação do teor de argamassa aderida consiste na dissolução da pasta de cimento aderida quando o agregado reciclado é imerso em uma solução de ácido clorídrico (ISMAIL; RAMLI, 2013).

2.3.2 Análise das argamassas

Para análise de propriedades físicas e mecânicas das argamassas foram moldados cinco corpos de prova para cada traço e por idade de avaliação dos resultados. Para o ensaio de variação dimensional foram produzidos prismas de argamassa de 25 x 25 x 285 mm e para os demais ensaios, corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Foram realizados ensaios de variação dimensional NBR 15261 (ABNT, 2005b), absorção por imersão NBR 9778 (ABNT, 2009b) e resistência à compressão axial NBR 7215 (ABNT, 2019b). Para complementar as análises, foram caracterizadas por difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).
O ensaio de DRX foi realizado em um difratômetro Rigaku Ultima IV, instalado no C-LABMU-UEPG. O passo adotado foi de 0,02º e tempo por passo de 1s, o intervalo de varredura foi de 5º e 75º (2θ). Utilizou-se a radiação Cu-Kα (40 kV, 30 mA) e fenda divergente de 1º. As fases químicas minerais foram identificadas por comparação com os padrões do ICDD (International Centre for Diffraction Data). As imagens de MEV foram obtidas com o microscópio FEG SEM, Tescan, Mira 3, com detectores SE, BSE, instalado no C-LABMU-UEPG, com metalização superficial das amostras em ouro. Para resistência à compressão axial foi utilizada prensa SOLOCAP, Modelo CI de 100 ton de capacidade, com controle de velocidade de aplicação de carga. Os corpos de prova, foram submetidos à cura úmida por 28 dias e posteriormente, cura em ambiente externo expostas ao envelhecimento até 180 dias. Para a análise estatística dos dados foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos materiais

Os ensaios de caracterização física dos agregados demonstraram que tanto a mudança de granulometria quanto a tipología do material constituinte influenciam em suas propriedades.

Tabela 4 - Propriedades físicas dos agregados reciclados de concreto

Agregado	Curva Granulométrica	MU (g/cm³)	ME (g/cm³)	Índice de vazios (%)	Absorção (%)
ARC	Agregado 1	1,38	2,38	41,87	10,88
	Agregado 2	1,45	2,41	39,79	8,16

Fonte: os autores.

A distribuição das partículas de parcela cerâmica do ARM (Tabela 5) fez com que os resultados obtidos apresentassem um cenário diferente do observado no ARC (Tabela 4). Quanto maior a granulometria maior também será a incidência de grãos de cerâmica e argamassa (grãos menos densos) com dimensões maiores. Esse fator pode causar a redução da densidade do conjunto de grãos constituintes da distribuição granulométrica e também aumentar a absorção do grão (Tabela 5). A mudança de distribuição granulométrica de um agregado reciclado é suficiente para alterar sua massa específica (CORREA; PEREIRA; RÊGO, 2020; LOPES; PEÇANHA; CASTRO, 2020).

Tabela 5 - Propriedades físicas dos agregados reciclados misto

Agregado	Curva Granulométrica	MU (g/cm³)	ME (g/cm³)	Índice de vazios (%)	Absorção (%)
ARM	Agregado 1	1,37	2,38	42,19	11,87
	Agregado 2	1,36	2,38	42,73	9,43

Fonte: os autores.

Outro dado relevante do agregado é o teor de argamassa aderida do residuo de concreto. A Tabela 6 apresenta o resultado do teor de argamassa aderida em cada fração. Analisando por faixa de frações granulométricas, observou que quanto menor o tamanho da partícula, maior é o teor de argamassa aderida. Os dados demonstram que as frações entre 0,5-1,2mm possuem maior concentração de argamassa aderida, com média de valores próxima a 34%. As frações 1,2-4,8 mm apresentaram média de valores próxima a 11% e as frações > 4,8mm com média de 2,4%.

Tabela 6 – Teor de argamassa aderida (TAA) em cada fração granulométrica

Peneira (mm)	0,15	0,3	0,6	1,2	2,4	4,8	6,3	9,5
TAA (%)	27,3	38,9	32,7	36,4	15,2	7,9	2,0	2,8

Fonte: os autores.

Analisando o conjunto de frações que corresponde a cada uma das curvas granulométricas estudas, pode se observar que os agregados de menor granulometria apresentaram maior teor de argamassa aderida (Tabela 7). Este resultado confirma o citado na literatura, onde agregados de maior granulometria apresentam menor teor de argamassa aderida (GÜNEYISI *et al*., 2014).

Tabela 7 – Teor de argamassa aderida em função da curva granulométrica

Curva Granulométrica	Teor de argamassa aderida (%)
Agregado 1	28,9
Agregado 2	26,5

Fonte: os autores.

O cimento e o resíduo de concreto possuem em sua constituição química maior concentração de óxido de cálcio e sílica segundo o ensaio de FRX (Tabela 8). Contêm ainda teores de alumina e sulfato que se estiverem disponíveis e reativos podem contribuir pra formação de etringita numa fase de hidratação inicial. O resíduo de cerâmica é composto em grande parte por sílica e alumina. Contém ainda teores de óxido de cálcio, óxido de ferro e óxido de magnésio.

Tabela 8 - FRX dos materiais (teor em %)

Óxidos/materiais	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Outros teores*
Cimento	14,5	3,55	2,64	68,9	4,82	3,81	1,78
RCD concreto	24,4	8,25	3,01	57,6	3,75	0,87	2,12
RCD cerâmica	61,9	21,1	4,9	7,85	1,24	-	3,01

Obs: óxidos com teores inferiores a 1%

Fonte: os autores.

A Tabela 9 apresenta o resumo do potencial de aluminatos e sulfatos que estão presentes nos materiais, sendo que uma parcela pode estar disponível no sistema para promover as reações químicas e formação de cristais de etringita. Os sulfatos disponíveis podem estar associados ao gesso incorporado ao cimento no processo de fabricação ou aos compostos cimentícios hidratados presentes na argamassa aderida ao grão de ARC.

Tabela 9 – Potencial de sulfato e aluminato presente nos materiais que compõem as argamassas

Tratamentos	Percentual de óxidos por m³ de argamassa	
	Aluminatos (Al_2O_3)	Sulfatos (SO_3)
ARC	7,21	1,52
ARM	8,74	1,42

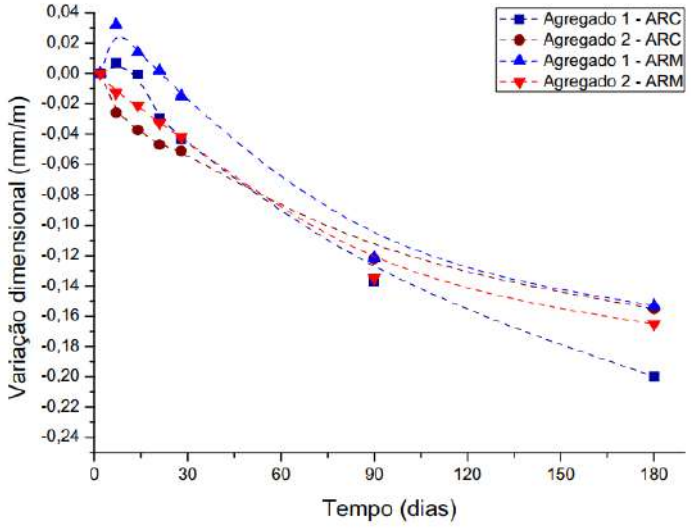
Fonte: os autores.

3.2 Análise macroestrutural das argamassas

No estado endurecido, primeiramente se analisou a variação dimensional das argamassas, verificando o comportamento em função da mudança de tipologia e granulometria do agregado constituinte. Nas primeiras idades se observa (Figura 3) que o efeito de expansão ocorre apenas nas argamassas produzidas com agregados de granulometria mais fina (Agregado 1). A absorção de água pelo grão, quando da formação de novos cristais pode influenciar no aumento de volume e por consequência, na expansão das argamassas.

Observa-se que todas as argamassas apresentaram retração após a data de 28 dias. A retração observada nesta fase pode ser considerada retração por secagem, pois após a idade de 28 dias, as argamassas saíram de um ambiente submerso e foram expostas à umidade ambiente, inferior a 100% da UR e então começaram a perder água e retrair. Após os 28 dias a retração foi mais acentuada para agregados de ARC e com granulometria mais fina.

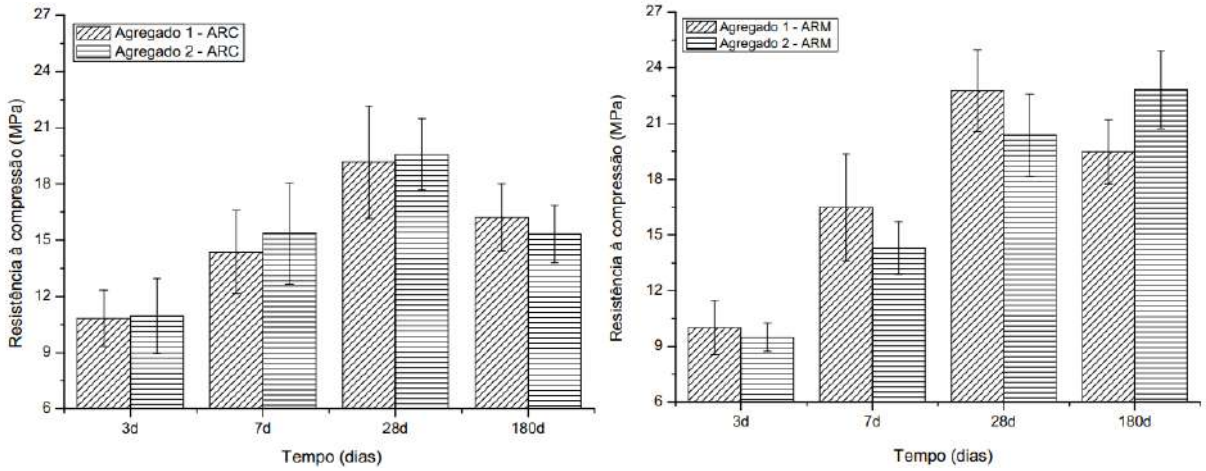
Figura 3 - Variação dimensional das argamassas até 180 dias



Fonte: os autores.

Analisando os dados de resistência a compressão por data de análise, percebe-se que a granulometria não teve influencia significativa sobre a resistência mecânica. Quanto à tipologia do agregado, observou-se diferente comportamento entre as argamassas produzidas com ARC e ARM, sendo que as argamassas produzidas com ARC apresentaram menores valores de resistência em comparação com as argamassas produzidas com ARM (Figura 4). Quanto à temporalidade, observou-se que nas primeiras idades (até 28 dias) o valor de resistência foi evoluindo de forma gradativa para todos os tratamentos. Este comportamento é esperado devido à formação de cristais que densificam a matriz e que são formados pela hidratação dos compostos do cimento. Após 28 dias, ocorreu uma mudança de ambiente de exposição e observou-se uma queda de resistência (principalmente para os tratamentos com ARC), muito provavelmente devido à retração por secagem já observada anteriormente.

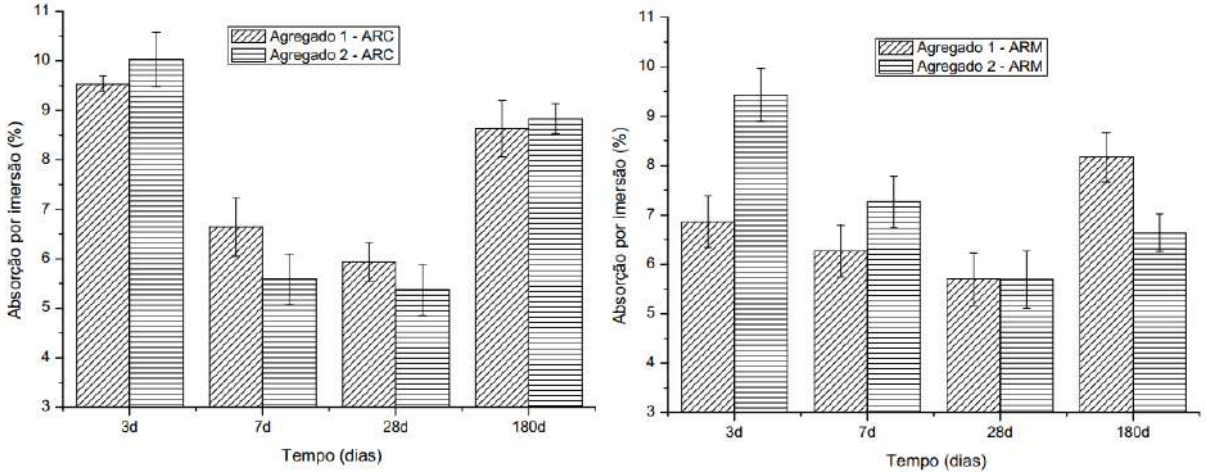
Figura 4 - Resistência mecânica das argamassas



Fonte: os autores.

Para a absorção por imersão não foi possível identificar um padrão único de comportamento em função da granulometria. De forma geral, as argamassas produzidas com ARC apresentaram maior tendência à absorção do que as produzidas com ARM (Figura 5).

Figura 5 - Absorção das argamassas



Fonte: os autores.

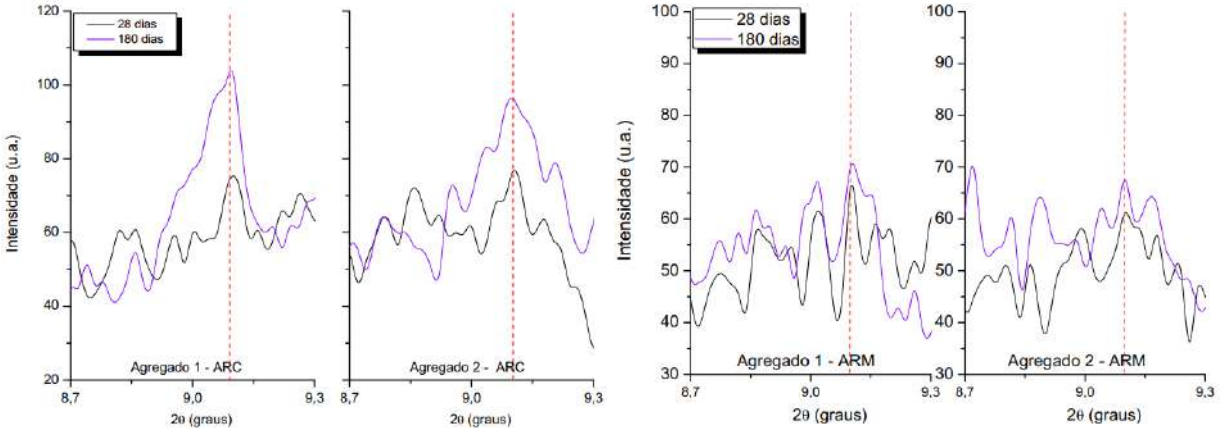
Quanto à temporalidade, observou que nas primeiras idades (até 28 dias) o valor de absorção foi diminuindo de forma gradativa para todos os tratamentos, confirmando o esperado em função da análise da resistência, pois com a densificação da matriz, ocorre a redução da porosidade. A partir dos 28 dias, houve aumento da absorção, em função da formação de fissuras causadas pela retração.

3.3 Análise microestrutural das argamassas

A análise macroestrutural demonstrou que de forma geral, a argamassa produzida com ARC, em comparação à argamassa produzida com ARM, apresentou menor resistência à compressão, maior absorção por imersão e maior retração. A análise microestrutural demonstra que este cenário está relacionado à maior quantidade de argamassa aderida do ARC, que acarreta em maior absorção, maior teor de sulfato, maior quantidade de núcleos de hidratação retardados e maior incidência de zona de transição mais frágil (FERREIRA *et al.;* 2019). Uma questão relevante é que os tratamentos com ARM podem ter uma melhora nas propiedades em função do efeito de cura interna da parcela cerâmica (LIU *et al.*; 2017).

Outro fator que pode explicar a diferença de comportamento entre as argamassas produzidas com ARC e ARM e relacionado com a variação dimensional é a quantidade de cristais de etringita secundária existentes. Analisando os difratogramas das argamassas produzidas com ARC e ARM (Figura 6) foi possível observar um aumento da intensidade de pico de difração de etringita (2θ = 9,10º) para argamassas produzidas com ARC entre as idades de 28 e 180 dias. Para as argamassas produzidas com ARM foi observada uma menor intensidade dos picos de difração de etringita secundária, sem diferença significativa em função da granulometria ou temporalidade.

Figura 6 – Intensidade de picos de difração de etringita secundária para argamassas de ARC e ARM aos 28 e 180 dias



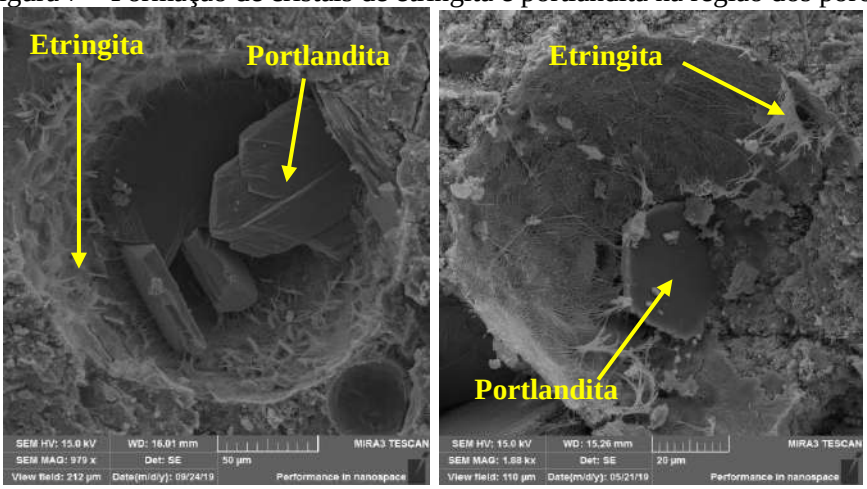
Fonte: os autores.

A redução de desempenho das argamassas observada após 28 dias, em especial as produzidas com ARC, está em parte associada à retração que ocorreu com a alteração do ambiente de cura de totalmente submerso para ambiente natural, mas também a dessorção de água pelos cristais de etringita secundária e a retração de auto-secagem ocasionada pela redução da água de cristalização na estrutura destes cristais. Este efeito de retração observado gerou tensão interna e provocou o surgimento de fissuras, que ocasionaram o aumento da rede de poros conectados e consequentemente, aumento da absorção de água das argamassas.

Ao ocorrer a secagem, primeiramente é reduzido o líquido de poros maiores e depois de poros menores, então é mais provável que os cristais se precipitem nos poros menores. Se estes poros forem menores que 10 a 50nm, os cristais podem causar tensão devido à pressão de cristalização e se esta tensão for maior que a resistência à tração da matriz, pode gerar fissura (MÜLLAUER; BEDDOE; HEINZ, 2013).

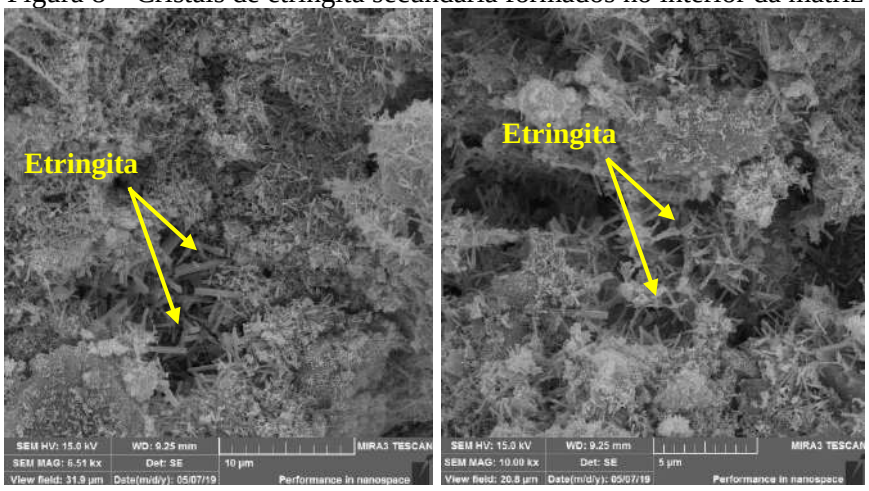
As micrografías mostram a formação de cristais de etringita secundária e portlandita no interior dos poros (Figura 7) e pequenos cristais de etringita secundária na região da pasta de cimento da argamassa nas microfissuras existentes (Figura 8). Os cristais de etringita secundária são formados nestes meios restritos e o seu crescimento causa tensões internas que podem provocar fissuras e queda de resistência mecânica e/ou aumento da absorção.

Figura 7 – Formação de cristais de etringita e portlandita na região dos poros



Fonte: os autores.

Figura 8 – Cristais de etringita secundária formados no interior da matriz



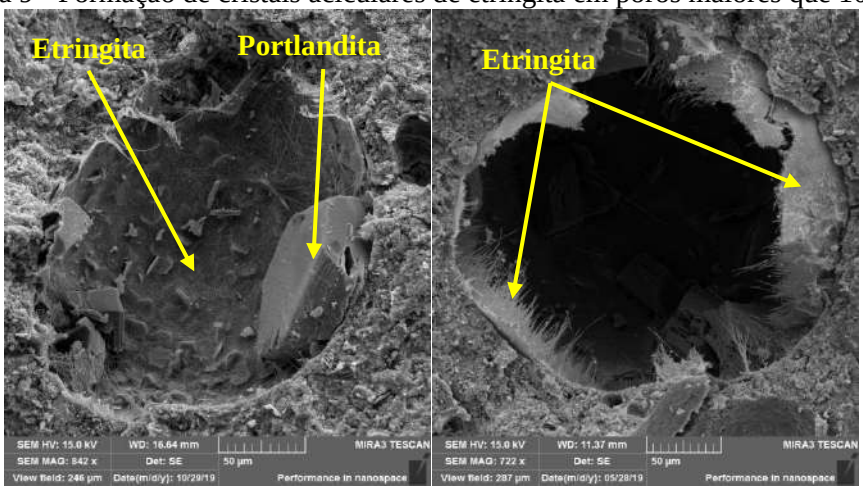
Fonte: os autores.

O melhor desempenho para as argamasas produzidas com ARM pode estar relacionado à porosidade característica do grão de cerâmica que proporciona armazenamento para o procedimento de cura interna (SENISSE, 2015). Segundo Cachim (2009), as partículas de blocos de cerâmica vermelha (tijolos), em função de sua porosidade, podem reter quantidade de água da mistura por períodos mais longos e liberá-las para a hidratação do cimento em fases posteriores. A penetração de água pela cura externa está limitada à cadeia de poros interconectados da argamassa, enquanto pela cura interna pelo agregado, a água tem capacidade de se manter distribuída uniformemente na matriz cimentícia, auxiliando na eficiência da ocorrência das reações de hidratação, bem como na mitigação do fenômeno de retração, decorrente da variação de umidade interna no compósito cimentício (SENISSE, 2015).

As micrografias (Figura 9) mostraram a formação de grandes cristais aciculares de etringita secundária em poros maiores que 100 µm. Estes cristais absorvem grande quantidade de água para sua formação e crescimento, provocando o efeito de inchamento. Porém, estes cristais se formaram no interior de poros de grande dimensão, com espaço disponível para este crescimento, então a expansão não provocou tensões suficientes para gerar fissuras. Foi constatado que poros que continham portlandita e etringita secundária em seu interior proporcionavam um ambiente propício ao crescimento longitudinal das agulhas de etringita secundária até que formasse um invólucro, favorecendo a colmatação do poro, como é possível observar na Figura 10. A combinação de uma maior quantidade de hidratos e sulfatos disponíveis, possível reação pozolânica da partícula fina de cerâmica, reação expansiva do reação álcali-agregado (RAA) do

grão de cerâmica e liberação de água residual de forma gradativa por um maior período de tempo, permite que haja uma contínua formação de cristais dentro da matriz.

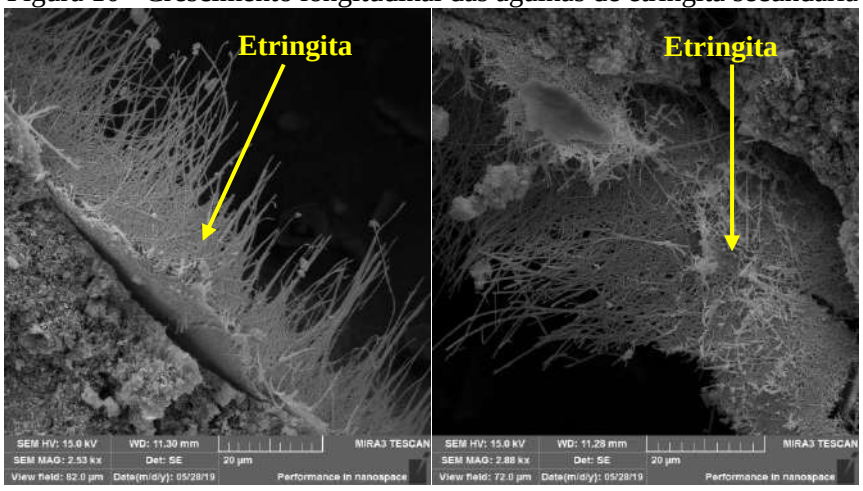
Figura 9 - Formação de cristais aciculares de etringita em poros maiores que 100 µm



Fonte: os autores.

Ressalta-se ainda o fato de que este cenário pode estar ocorrendo no interior da matriz, em locais onde não se observa uma rede de poros conectados à superfície do corpo de prova. Então numa situação em que normalmente não haveria o fator umidade, necessário para ocorrer as reações, tem-se a água armazenada no interior dos poros do agregado para cumprir este papel no mecanismo de expansão.

Figura 10 - Crescimento longitudinal das agulhas de etringita secundária



Fonte: os autores.

4. CONCLUSÕES

A granulometria e a tipologia do agregado tiveram influência sobre as propriedades das argamassas no estado endurecido. A quantidade de argamassa aderida, que pode vir a interferir na quantidade de água livre e na quantidade de núcleos de hidratação existentes na argamassa antiga. E a combinação de uma maior quantidade de hidratos e sulfatos disponíveis e o efeito de cura interna das partículas cerâmicas, permite que haja uma contínua formação de cristais dentro da matriz.

O ambiente de exposição (submerso e ambiente natural) afeta de forma diferente as propriedades das argamassas e em função da saturação da solução e o nível de saturação podem ter influência sobre a quantidade de cristais de etringita secundária formados, sobre sua morfologia e local de formação.

Quanto menor a saturação da solução, os cristais formados são maiores e, se formados em espaços mais restritos, podem causar tensões internas e fissuras devido à pressão de cristalização e de dilatação. Quanto a UR fica menor que 100%, a saturação aumenta, os cristais formados são menores e formados em poros menores. Porém estes se dissolvem em favor de cristais maiores e então ocorre o relaxamento da pressão de cristalização. Neste momento ocorre o aumento da resistência e redução da absorção.
Por fim, o estudo corroborou com a visão holística do fenômeno de ataque por sulfato interno, onde afirma que um dos mecanismos de deterioração e por consequência redução da durabilidade do concreto, pode ser atribuído a existência de microfissuras no interior dos compósitos cimenttícios, com liberação tardia de sulfatos constituintes do agregado reciclado.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos pelo apoio da Fundação Araucária, Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao CLABMU-UEPG.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2019a. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 2019b. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009b. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005b. 10p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: Agregado miúdo – determinação da absorção de água. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 6 p.

CACHIM, P.B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. Construction and Building Materials, v. 23, n. 3, p. 1292–1297, 2009.

COLLEPARDI, M.A. State-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 4–5 SPEC, p. 401–407, 2003.

CORREA, C.R.; PEREIRA, C.H.; RÊGO, J.H.S. Influência das frações granulométricas de agregados miúdos reciclados no comportamento de argamassas de cimento. Ambiente Construído, v.20, n.4, p. 305–317, 2020.

FERREIRA, R.L.S.; ANJOS, M.A.S.; PEREIRA, J.E.S.; FONSECA, N.J.M.; NÓBREGA, A.K.C. Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (<150 μm) do agregado reciclado de RCD. Cerâmica, v. 65, n. 373, p. 139–146, 2019.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; ALGIN, Z.; YAZICI, H. Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. Construction and Building Materials, v. 64, p. 172–183, 2014.

ISMAIL, S.; RAMLI, M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. Construction and Building Materials, v. 44, p. 464–476, 2013.

LIU, J., SHI, C., MA, X., KHAYAT, K. H., JHANG, J., WANG, DEHUI, An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement- based materials. Construction and Building Materials, v. 146, pp. 702-712, 2017.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. DE. Considerations on the efficiency of Portland cement concrete mixtures based on the particle packing concept. Revista Materia, v. 25, n. 1, 2020.

MIN, D; MINGSHU, T. Formation and expansion of ettringite crystals. Cement Concrete Research. 24. 119-126. 1994.

MÜLLAUER, W.; BEDDOE, R. E.; HEINZ, D. Sulfate attack expansion mechanisms. Cement and Concrete Research. v. 52, p. 208–215, 2013.

PEREIRA, E. Efeito da reação álcali-agregado (raa) associada ao ataque interno por sulfato (isa) na absorção e porosidade de compósito de matriz cimentícia. Dissertação (Mestrado). Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Estadual de Ponta Grossa. 207p. Ponta Grossa. 2018.

SCHERER, G. W. Stress from crystallization of salt. Cement and Concrete Research. v. 34, p. 1613–1624, 2004.

SENISSE, J.A.L. Estudo do efeito do agregado ceramic com diferentes propriedades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida, visando o uso de residues de construção e demolição como agente de cura interna. Mestrado (Dissertação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 297p. Rio Grande do Sul, 2015.

VIEIRA, T.; ALVES, A.; BRITO, J.; CORREIA, J.R.; SILVA, R.V. Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. Materials and Design, v. 90, p. 767–776, 2016.