

Estudo da corrosão e da microestrutura no compósito cimentício autoadensável com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro

Study of corrosion and microstructure in self-compacting cementitious composite with replacement of fine aggregate by glass residue

Estudio de corrosión y microestructura en composite cementoso autocompactante con sustitución de árido fino por residuo de vidrio

Recebido: 05/07/2022 | Revisado: 15/07/2022 | Aceito: 17/07/2022 | Publicado: 24/07/2022

Rafael Gonçalves Torres

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9926-154X>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: rafael.gtorres@yahoo.com.br

Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9668-7799>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
e-mail: mirianmottamelo@unifei.edu.br

Vander Alkmin dos Santos Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0260-2454>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: vanderalkmin@gmail.com

Valquíria Claret dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7744-3262>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: valquiria@unifei.edu.br

Adhimar Flávio Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2586-7359>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: adhimarflavio@unifei.edu.br

Resumo

O objetivo desse trabalho é investigar a corrosão e a microestrutura no compósito cimentício autoadensável com a substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro. Uma das patologias mais frequentes encontradas no concreto armado é a corrosão de armaduras que envolve riscos à segurança da estrutura. Entre as várias técnicas para se estudar e avaliar a corrosão neste trabalho foi escolhida a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) que caracteriza uma grande variedade de sistemas eletroquímicos. Foram moldados corpos de prova no traço de 1:1:0,1:0,43 sendo um de referência (sem adição de resíduo), outros com substituição de 5%, 10%, 15% e 20% em resíduo de vidro, em relação ao agregado miúdo. A escolha do circuito equivalente foi diferente dependendo da quantidade de materiais utilizados, para a amostra referência foi utilizado um circuito resistivo em série com um segundo circuito em paralelo composto por uma resistência R e um elemento de fase CPE. Para as misturas com resíduo de vidro foi acrescentado mais um circuito paralelo R/CPE. Também foram realizadas micrografias obtidas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS). Os resultados demonstraram que a amostra referência apresenta um circuito proposto por Randles e as amostras 5% a 20% apresentam um circuito equivalente de Christensen. A análise do EDS para todas as amostras observou-se como o Fe que é um dos elementos constituintes regulares da matriz de cimento e também o Ca, C, Mg, Na, Al, Si que são os elementos constituintes do vidro.

Palavra-chave: Corrosão; Compósito cimentício; Resíduo de vidro; Espectroscopia de impedância eletroquímica.

Abstract

The objective of this work is to investigate corrosion and microstructure in self-adhesive cement composite with the replacement of the kid aggregate by glass residue. One of the most frequent pathologies found in reinforced concrete is corrosion of reinforcements that involves risks to the safety of the structure. Among the various techniques to study and evaluate corrosion in this work was chosen the electrochemical impedance spectroscopy (EIE) that characterizes a wide variety of electrochemical systems. Specimens were molded in the trace of 1:1:0,1:0.43 being a reference (without adding residue), others with substitution of 5%,15% and 20% in glass residue, in relation to the kid aggregate. The choice of the equivalent circuit was different depending on the number of materials used, for the reference sample a series resistive circuit was used with a second parallel circuit composed of an R resistance and a CPE phase element.

For mixtures with glass residue, another R /CPE parallel circuit was added. Micrographs obtained through scanning electron microscopy (SEM) and X-ray dispersive energy spectrometry (EDS) were also performed.

The results showed that the reference sample presents a circuit proposed by Randles and the samples 5% to 20% present an equivalent circuit of Christensen. The analysis of the EDS part of all samples was observed as the Fe which is one of the regular constituent elements of the cement matrix and also the Ca, C, Mg, Na, Al, Si which are the constituent elements of the glass.

Keywords: Corrosion; Cementum composite; Glass residue; Electrochemical impedance spectroscopy.

Resumen

Este trabajo monitorea la corrosión del compuesto cementicio autoadmisible con residuos de vidrio mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE). Una de las patologías más frecuentes que se encuentran en el hormigón armado es la corrosión de los refuerzos que conlleva riesgos para la seguridad de la estructura. Entre las diversas técnicas para estudiar y evaluar la corrosión en este trabajo se eligió la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) que caracteriza una amplia variedad de sistemas electroquímicos. Los ejemplares fueron moldeados en la traza de 1:1:0,1:0.43 siendo una referencia (sin añadir residuo), otros con sustitución del 5%, 15% y 20% en residuos de vidrio, en relación al agregado de cabrito. La elección del circuito equivalente fue diferente dependiendo de la cantidad de materiales utilizados, para la muestra de referencia se utilizó un circuito resistivo en serie con un segundo circuito paralelo compuesto por una resistencia R y un elemento de fase CPE. Para las mezclas con residuos de vidrio, se agregó otro circuito paralelo R/CPE. También se realizaron micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de energía dispersiva de rayos X (EDS). Los resultados mostraron que la muestra con un 5% de residuos de neumáticos y un 15% de residuos metacalinos: presentó valores de potencial más bajos en comparación con las otras dos muestras. El análisis EDS para todas las muestras se observó como elementos comunes de la matriz de cemento como: C, Ca, Al, Si, Fe, Cr, Ni, Mg y K.

Palabra clave: Corrosión; Hormigón; Residuos neumáticos; Espectroscopia de impedancia electroquímica.

1. Introdução

O concreto armado é um dos materiais de construção mais utilizados na construção civil, no Brasil e no mundo, pela facilidade de assumir formas diferentes e por proteger a armadura de ações externas e, assim, garantir sua durabilidade. Porém, a construção civil passou a confrontar-se, a partir da segunda metade do século XX, com problemas relativos à deterioração das estruturas. Os problemas associados à durabilidade das estruturas de concreto tendem a se acentuar quando grande parte das edificações completa uma idade em que os custos de manutenção e reparos são mais constantes.

No entanto, um projeto ou construção inadequados, a falta de compreensão do ambiente de serviço ou a manutenção inadequada de estruturas de concreto podem permitir a entrada de cloretos no concreto, resultando na destruição do filme passivo que protege a armadura e no consequente início da corrosão do aço. A corrosão da armadura provoca fissuração e deslocamento do concreto de cobrimento, diminui a área da seção transversal de uma barra de aço e afeta o desempenho mecânico da estrutura de concreto (Ribeiro et al., 2022).

A corrosão da armadura é uma das causas mais graves de danos às estruturas de concreto, devido à sua prevalência e à rapidez do mecanismo de deterioração que depende das condições do concreto e do meio ambiente. Portanto, é vital que as estruturas danificadas pela corrosão da armadura, seja pelo ataque de cloretos ou por ataque de dióxido de carbono (CO_2), sejam reparadas o mais rápido possível, a fim de evitar mais degradações e recuperar suas funções (Santos, 2022)

A argamassa autoadensável (AAA) é parte integrante do concreto autoadensável (CAA) e é usado principalmente em reforço estrutural, reabilitação e reparo de estruturas, reboco e produção de concreto transmissor de luz. De acordo EFNARC (2002), concreto autoadensável (CAA) é “concreto que é capaz de fluir sob seu próprio peso e preencher completamente a cofragem, mesmo na presença de reforço denso, sem a necessidade de qualquer vibração, mantendo homogeneidade” (Tuaum et al., 2018).

Várias investigações foram realizadas sobre a utilização de resíduos de vidro como agregados e também substituição parcial do cimento Portland em compósitos cimentícios. A implementação bem-sucedida de vidro reciclado em materiais de construção pode reduzir o descarte de vidro no fim da vida útil em aterros sanitários e reduzir os problemas ambientais das

indústrias de construção e pedreiras. A pesquisa sobre agregado de vidro e seu impacto no desempenho do concreto mostra resultados promissores que oferecem alternativas aos agregados e ao cimento Portland. No entanto, uma grande desvantagem reside na possibilidade de expansão e fissuração pós-cura devido à reação álcali-sílica (ASR) dos agregados de vidro (Mahmood & Kashani, 2022). A utilização de resíduos de vidro em compósitos cimentícios também reduz o consumo de energia, matérias-primas naturais e emissão de CO₂ (Adesina et al., 2022).

O objetivo desse trabalho é investigar a corrosão e a microestrutura no compósito cimentício autoadensável com a substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro.

2. Materiais e Métodos

O método utilizado para pesquisa é a Experimental, pois envolve qualquer tipo de experimento que auxilie no desenvolvimento da pesquisa. E o estudo se configura numa abordagem quantitativa, pois após a aplicação da pesquisa e de posse dos dados coletados, chega-se à última etapa do trabalho, que é a apresentação dos resultados obtidos. Eles são compostos por números, dados, quadros e gráficos, que vão mostrar os resultados de forma quantitativa (Novaes et al., 2019).

Os materiais utilizados na dosagem do compósito cimentício com resíduo de vidro foram o cimento Portland, areia lavada comum, resíduo de vidro moído, sílica ativa, superplastificante e água. Será apresentado com detalhes as propriedades de cada um dos constituintes. O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPV ARI de alta resistência inicial, ARI segundo classificação da NBR 16697 (2018) e segundo a (ASTM C150/C150M – 18, n.d.) e a Tabela 1 apresenta as características físicas e químicas do cimento.

Tabela 1 - Característica do Aglomerante obtido na ficha técnica do fabricante.

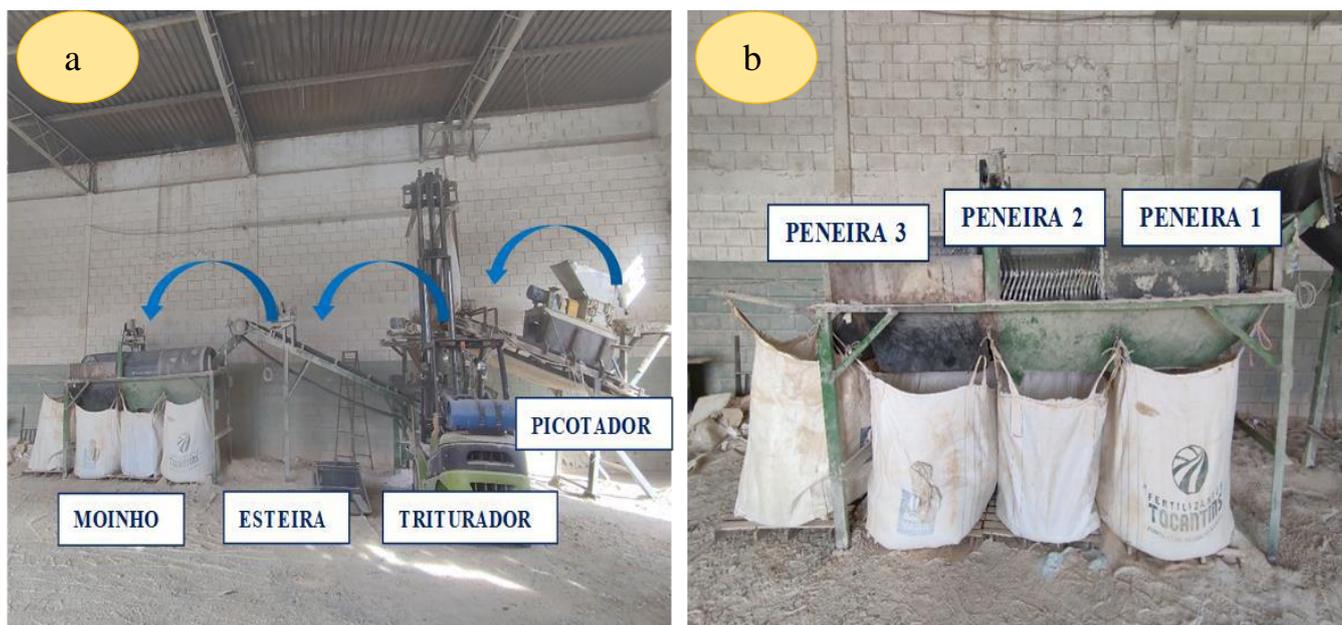
Ensaio	Metodologia	Valor	Unidade
Massa Específica Aparente	ABNT NBR 23:2001	0,9 a 1,2	g/cm ³
Massa Específica Absoluta	ABNT NBR 23:2001	$2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2$	g/cm ³

Fonte: Adaptado de Votorantim (2020).

O agregado miúdo utilizado foi a areia média com granulometria abaixo de 4,8mm e tem origem no município de Itajubá, localizado no estado de Minas Gerais.

O resíduo de vidro triturado foi adquirido na empresa Raneri situada no município de Varginha-MG na qual realiza serviço de trituração de resíduos de vidro dos tipos laminado, temperado, espelho e para brisa de carros e revende para empresas de piso cerâmico e Jateamento. Para chegar no estado final, os resíduos de vidro passam pelo processo de trituração na qual se inicia com o picotador, onde é colocado os resíduos de vidro que chegam na empresa, em seguida passam pelo triturador, conforme mostrado na Figura 1(a) e através de uma esteira vão para o moinho na qual possui três peneiras, separando o vidro em três granulometrias diferentes para comercialização, conforme mostrado na Figura 1(b).

Figura 1: Serviço de trituração de resíduos de vidro (a) e a peneira com três granulometrias diferentes (b).



Fonte: Autores (2022).

Cada um desses sacos da Figura 1(b) armazena vidro com granulometria diferentes de acordo com que passam pelas peneiras. A primeira peneira possui abertura de 5 a 10mm, a segunda peneira possui abertura de 1 a 5mm e a terceira é de 0 a 1mm. O saco da esquerda armazena o resíduo que não passou pelas peneiras no qual é colocado no triturador passando novamente pelo processo até conseguir passar pelas peneiras. Para este trabalho será utilizado o resíduo de vidro triturado da peneira 3 com a menor granulometria, na qual possui um aspecto de areia, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2: Resíduo de vidro triturado.



Fonte: Autores (2022).

A Sílica Ativa é um produto de origem metalúrgica, sendo um pó fino obtido através do processo de fabricação do ferro silício ou silício metálico. Por causa do alto teor de SiO_2 (no formato amorfo não cristalino) e da elevada finura (partículas esferas menores que $1\mu\text{m}$), a sílica ativa apresenta altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, fazendo com que os concretos e argamassas possuam melhor desempenho.

A sílica ativa utilizada como agregado nesta pesquisa foi fornecida pela empresa Tecnosil. A Tabela 2 mostra as características físicas e químicas da Sílica Ativa obtido na ficha técnica do fabricante.

Tabela 2 - Características físicas e químicas da Sílica Ativa obtido na ficha técnica do fabricante.

Propriedades	Resultado	Unidade
Teor de SiO₂	> 90	%
Massa Específica	2.220	Kg/m ³
Superfície Específica	19.000	m ² /Kg
Formato da Partícula	Esférico	-
Massa Unitária – Nao Densificado	< 350	Kg/m ³
Massa Unitária – Densificado	> 350	Kg/m ³

Fonte: Adaptado do Grupo Tecnosil (2022).

Um aditivo com efeito superplastificante de alta tecnologia ADITIBRAS ADI-SUPER H25 foi utilizado durante a confecção do concreto autoadensáveis. Este aditivo é formulado a base de polímeros de éteres carboxílicos modificados e uma das especialidades do ADI-SUPER H25 é para concreto autoadensáveis, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Características físicas e químicas do superplastificante obtido na ficha técnica do fabricante.

Propriedades	Metodologia	Resultado	Unidade
Aparência	ABNT NBR 11768:2019	Líquido Castanho Claro	-
Massa Específica	ABNT NBR 11768:2019	1,055 ± 0,020	g/cm ³
Ph	ABNT NBR 11768:2019	5,50 ± 1,0	-

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica ADI-SUPER25 (2021).

Para obter o traço referência (TR) de AAA com a substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro, foi adotado como base o traço desenvolvido por Silva (2019), onde foi utilizado o método proposto por Tutikian (2004).

A partir do traço desenvolvido por Silva (2019), o traço referência foi acertado fazendo as devidas adequações, começando com uma relação a/c de 0,30 e 0,50% de superplastificante em relação ao peso do cimento.

Após definido o TR, foram adicionados os resíduos de vidro reciclado (VR) em substituição do agregado miúdo, sendo o primeiro traço começando com proporção de 5% (T5) e os traços seguintes com 10% (T10), 15% (T15), 20% (T20), conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Traço referência e com resíduo de vidro.

Mistura	% Vidro	Cimento	Sílica	Vidro	Areia	a/c	SP
TR	0	1	0,10	0,0	1,0	0,45	1,51
T5	5	1	0,10	0,05	0,95	0,45	1,51
T10	10	1	0,10	0,10	0,90	0,45	1,51
T15	15	1	0,10	0,15	0,85	0,45	1,51
T20	20	1	0,10	0,20	0,85	0,45	1,51

Fonte: Autores (2022).

Após executar o traço, os ensaios do estado fresco e moldar os corpos de prova, espera-se pelo mínimo 24 horas para desmoldar esses corpos de prova os quais foram submersos para uma cura úmida. De modo a garantir as características de argamassa autoadensável, os ensaios no estado fresco são os primeiros a serem feitos nos corpos de prova para verificar a sua característica autoadensável.

Os corpos de provas foram analisados através de medidas de espectroscopia de impedância, para verificar o potencial de corrosão. Para tanto as amostras em formato cilíndrico foram colocadas entre duas placas metálicas, de geometria cilíndrica recobertas com ouro, para o melhor contato elétrico entre a interface das amostras e os contatos elétricos. As medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) foi realizada para verificar o comportamento das amostras com relação a corrosão. Para isso, foi utilizado o Potenciostado/Galvanostato modular da marca Autolab conforme mostrado na Figura 3 (a), juntamente com o software de aquisição de dados NOVA 2.1 e seus acessórios, que permitiu medir as impedâncias real e complexa entre as frequências de 1×10^{-1} a 5×10^5 Hz. As amostras foram preparadas no formato de disco e com isso foi possível colocá-las entre dois eletrodos condutores recobertos com uma camada de ouro. Para esta medida foram utilizados o eletrodo de trabalho em uma face e os eletrodos de referência e contra eletrodo na outra face da amostra conforme a Figura 3 (b).

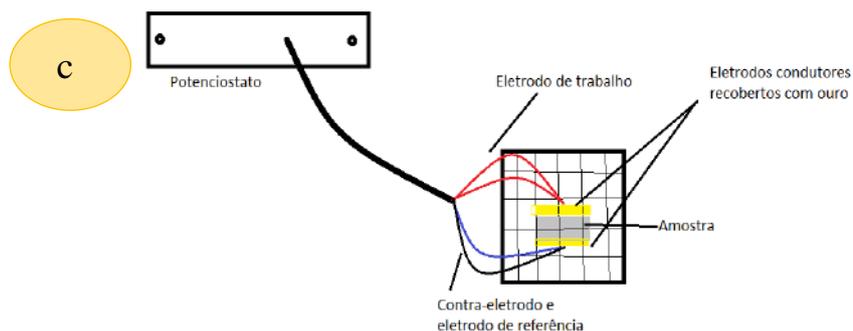
Todo o conjunto foi colocado no interior de uma gaiola de Faraday para evitar ruídos eletromagnéticos externos, como mostrado na Figura 3 (c). Na Figura é possível observar o Potenciostado que é conectado a dois eletrodos condutores recobertos com um filme de ouro e a amostra ao centro. Todo o conjunto é colocado no interior de uma gaiola de Faraday, com o objetivo de reduzir interferências eletromagnéticas externas.

Figura 3: Potenciostado/Galvanostato modular da marca Autolab (a) e Eletrodo de trabalho: na face inferior, os eletrodos de referência e contra eletrodo na outra face (b).



Fonte: Autores (2022).

Figura 3 (C): Montagem do experimento para a realização das medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica.



Fonte: Autores (2022).

A escolha do circuito equivalente foi realizada levando em conta o número de componentes misturados além da amostra referência. Com isso, para amostra referência foi utilizado um circuito resistivo em série com um segundo circuito em paralelo composto por uma resistência R e um elemento de fase CPE . Para as demais amostras foi acrescentado mais um circuito paralelo R/CPE para cada elemento acrescentado, como resíduo de vidro.

As micrografias foram obtidas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) Modelo EVO MA15 da marca Carl Zeiss em 10 KV e ampliação de 1000KX. A espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS) foi realizada com um espectrômetro da marca Oxford INCA Energy.

3. Resultados e Discussão

Para analisar o comportamento de corrosão das amostras examinadas, em primeiro lugar, é intrinsecamente exigido determinar os números de constantes de tempo para correlacionar com cada reação que está ocorrendo. Para entender o mecanismo de corrosão, é importante os números das constantes de tempo predominantes em cada sistema examinado. Em primeiro lugar, isso ajuda a determinar as reações que ocorrem em um sistema eletroquímico e selecionar um circuito elétrico

equivalente e avaliar seus os parâmetros. Estes contribuem para uma análise quantitativa e permitem a participação de cada elemento no mecanismo de corrosão (Meyer et al., 2022).

Considerando as parcelas da Espectroscopia de impedância Eletroquímica (EIE), existem três regiões distintas que definem o comportamento eletroquímico no concreto (Mohamed et al., 2015; Meyer et al., 2021). Em 10^5 Hz e $\sim 10^3$ Hz é a alta frequência descrevendo a resistência do eletrólito do concreto e entre as frequências $\sim 10^3$ Hz e $\sim 10^0$ Hz forma um segundo arco (Ghorbani et al., 2018).

Uma terceira região é caracterizada em baixa frequência, comumente inferior a 10^0 Hz (até a 10^{-2} Hz), que descreve as reações de interface entre a superfície da barra de aço com o eletrólito penetrado no concreto (pasta) com suas características (íons porosos, agregados e intermediários) (Osorio et al., 2009; Hu et al., 2022).

No formato Nyquist, os dados de impedância são gráficos no plano complexo, constituído de uma componente real (Z' - resistiva) e uma componente imaginária (Z'' - capacitiva). O diagrama de Nyquist, também conhecido como representação de Argand ou Colo-Cole, consiste em uma série de pontos, cada um representando a grandeza e a direção do vetor de impedância para uma frequência em particular.

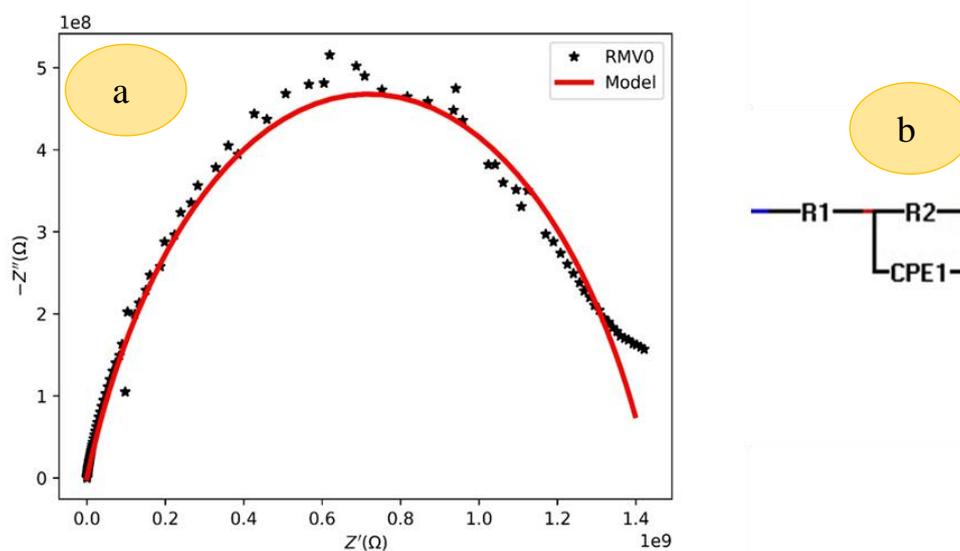
O diagrama é um plano complexo (real imaginário) de coordenadas cartesianas, em que se tem na abscissa a parte real (termos resistivos) e na ordenada a parte imaginária (termos capacitivos ou indutivos) (Ribeiro, 2015).

A Figuras 4 (a) mostra o diagrama de Nyquist típico, acompanhado do seu circuito equivalente de Randles para a amostra referência. A presença de semicírculos deslocados sugere um comportamento não ideal do capacitor, conduzindo à introdução do elemento de fase constante (CPE) nos circuitos equivalentes. Sagüés et al., (1995) introduziram esse elemento em sistemas que exibem processos de polarização simples. Eles concluíram que alguma melhoria é obtida se o CPE é usado em vez de um capacitor ideal. Em outro trabalho, Feliu et al., (1998) propuseram um sistema mais complexo e introduziram um CPE e parâmetros difusionais no circuito equivalente. Isso conduziu a um aumento na precisão da determinação da resistência de polarização quando isso era possível.

Uma vez construído o diagrama de Nyquist, faz-se a extrapolação da parte direita do semicírculo até encontrar o eixo horizontal. O diâmetro do semicírculo é a resistência à transferência de carga (R_t), equivalente à resistência de polarização (R_p). Assim, quanto maior o diâmetro deste semicírculo, maior a resistência R_p e, conseqüentemente, menor a taxa de corrosão (Hope et al., 1986).

O circuito equivalente típico da Figura 4 (b) proposto por Randles sendo que mostra a correlação entre o fenômeno de corrosão e o circuito equivalente e que é bastante aceita em diversas pesquisas. O diagrama equivalente, apresentado na Figura 4 (b), está associado a uma resistência “offset aparente” (R_1) em série com a rede da argamassa (R_2Q_2) (Ribeiro, 2015).

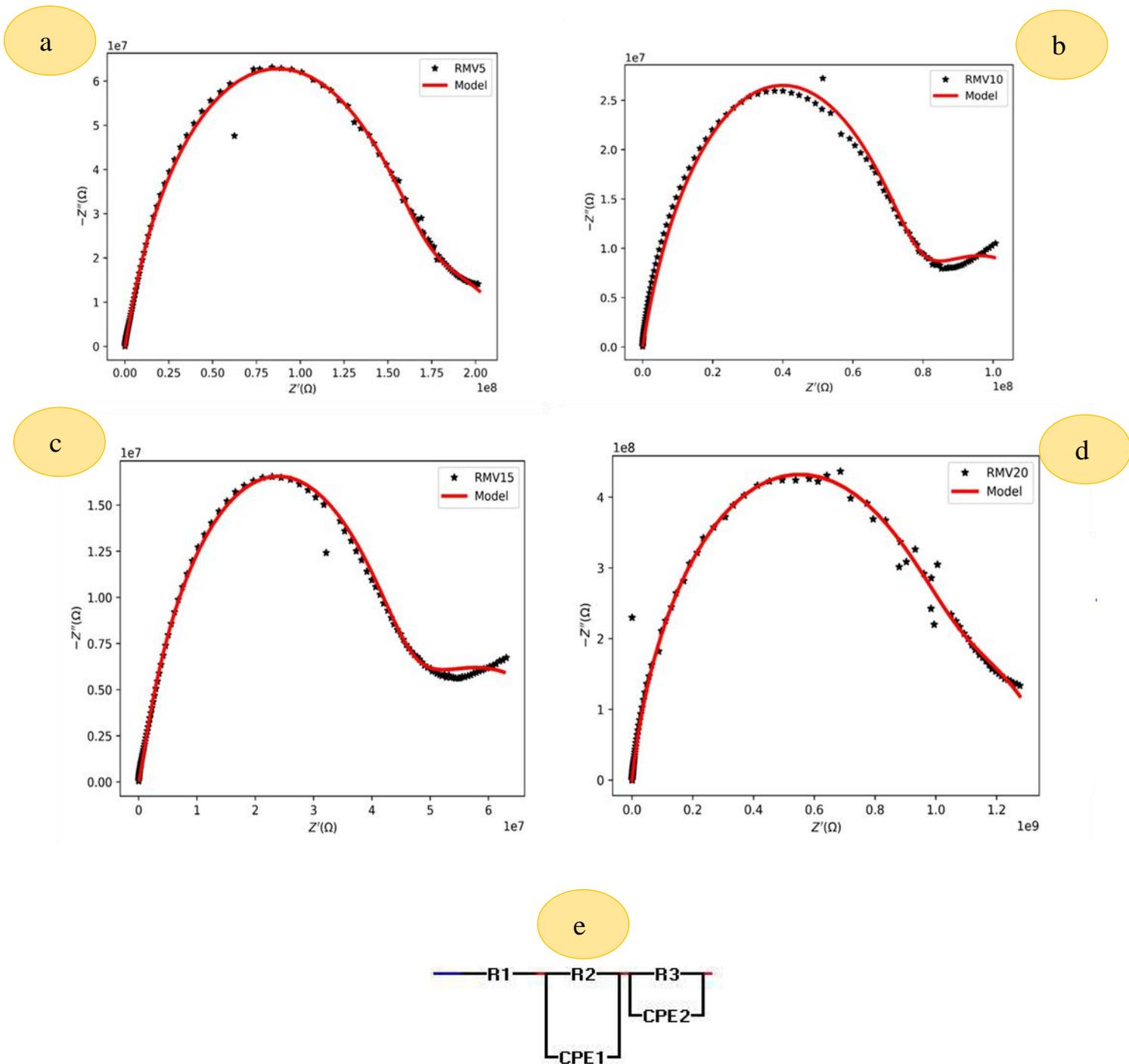
Figura 4: Diagrama de Nyquist (a) e circuito equivalente típico proposto por Randles (b) para a amostra referência.



Fonte: Autores (2022).

As Figuras 5 (a) a 5 (d) mostram um diagrama de Nyquist típico, acompanhado do seu circuito equivalente de Christensen, conforme mostrado na Figura 5 (e), para a amostra com 5% a 20% de resíduo de vidro. Com base no características do material (concreto) e as possibilidades sugerido na literatura com o circuito equivalente típico proposto por Christensen, o circuito equivalente apresentado nas Figuras, onde R_1 , R_2 e R_3 representam, respectivamente, a um resistor de contato (R_1) conectada em série com a rede da argamassa (R_2Q_2) e conectada, também em série, com a rede do resíduo de vidro (R_3Q_3).

Figura 5: Diagramas de Nyquist típico de (a) para (d), acompanhado do seu circuito equivalente de Christensen (e) para as amostras 5% a 20%.



Fonte: Autores.

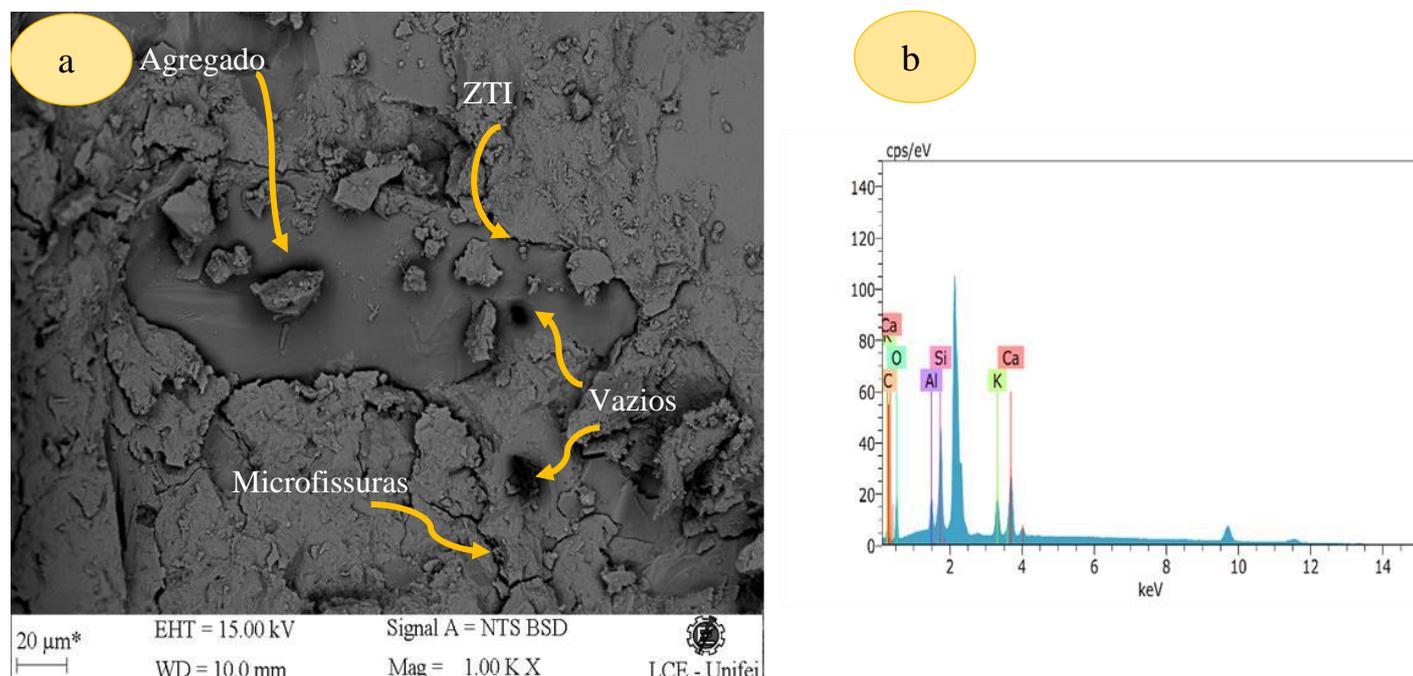
Na Figura 6 (a) e (b) mostra a microestrutura e o EDS do concreto referência. O concreto consiste em três partes: agregado, zona de transição interfacial (ITZ) e pasta de cimento. A ITZ é uma casca fina que envolve a superfície do agregado, é a parte de menor resistência do concreto, cuja microestrutura determina o desempenho concreto. Na zona de transição interfacial indica uma maior porosidade no entorno dos grãos dos agregados graúdos. A zona de transição é também é considerada o elo

fraco do conjunto, estando sujeita à microfissuração muito facilmente, com pequenos acréscimos de carregamento, variações de volume e umidade.

Na Figura 6 (a) observa-se microfissuras no concreto referência. Na maioria dos casos em que há combinação entre o concreto e o resíduo da borracha, encontra-se como problema principal a fraca aderência entre a matriz do concreto e o material inerte, afetando na formação do concreto e favorecendo o aparecimento de microfissuras (Albuquerque, 2009). Mehta e Monteiro (2008) explicam que o concreto sujeito às cargas de trabalho sofre microfissuras e que estas podem alterar a permeabilidade do concreto, facilitando dessa maneira a corrosão das armaduras. A corrosão ocupa um volume maior que o original resultando em tensões internas maiores trazendo assim a fissuração do concreto. Observa-se também vazios capilares ou pequenos poros de ar incorporado em uma seção de concreto provocados pela água que “sobra” da relação a/c.

Na Figura 6 (b) mostra a análise do EDS e observa-se elementos como Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, O e C que são os constituintes regulares da matriz de cimento.

Figura 6: Micrografia e EDS da amostra referência.



Fonte: Autores (2022).

A Figura 7 (a) mostra cristais de CH que estão organizados em forma de camadas podendo ser responsável por controlar a alcalinidade. A Sua morfologia é bem definida, formando cristais prismáticos, sendo que o tamanho dos cristais aumenta conforme também aumenta o espaço livre (aumento da relação água/cimento). O hidróxido de cálcio contribui pouco para a resistência da pasta de cimento endurecida e em virtude de sua baixa superfície específica, que lhe confere um baixo poder de adesão, é facilmente carregado pela água. Aparentemente, o único aspecto positivo da presença do hidróxido de cálcio é a alcalinidade conferida ao meio, responsável pela passivação das armaduras.

A Figura 7 (b) também mostram vazios capilares em uma seção de concreto provocados pela água que “sobra” da relação a/c. Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada e apresentam formato bastante irregular. Em pastas de cimento bem hidratadas e com baixa relação água/cimento (a/c), os vazios

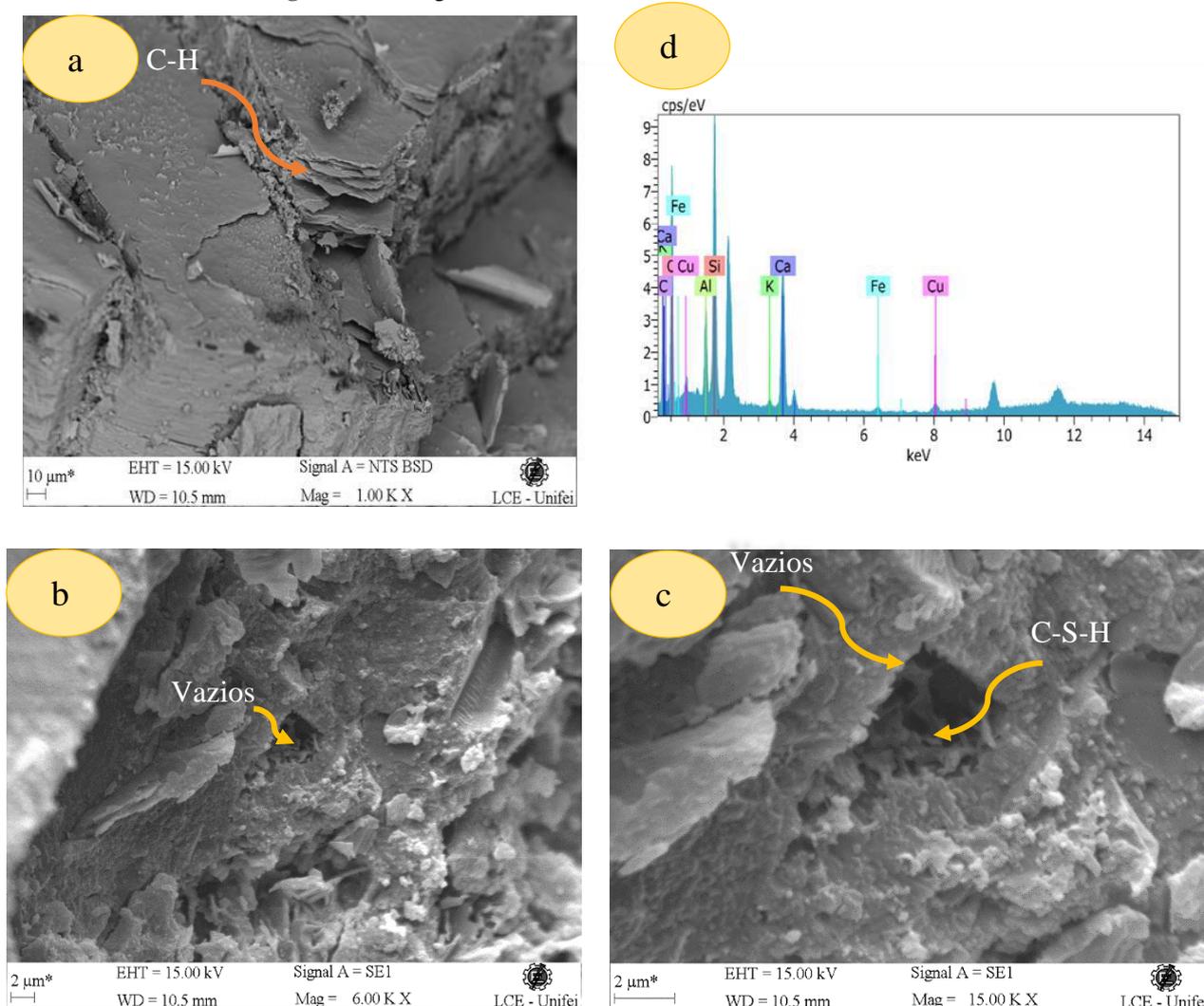
capilares podem variar de 10 a 50 nm, enquanto em pastas de elevada relação a/c, os vazios capilares podem ser tão grandes quanto a 5 μm (Mehta & Monteiro, 2014).

A Figura 7 (c) mostra um vazio capilar e no seu interior cristas de CSH. Na microestrutura pode ocorrer quatro tipos diferentes de vazios. Do menor ao maior, há o espaço intercamada CSH, poros capilares, ar aprisionado e ar aprisionado. O poro intercamada de CSH é o espaço entre as partículas de CSH. Este espaço realmente não pode ser evitado, pois são formados durante a criação do CSH e não afetam tanto o concreto. Esses vazios são muito pequenos, cerca de 0,5-2,5 nm e realmente não afetam a permeabilidade ou resistência do concreto.

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), a pasta de cimento hidratada contém muitos tipos de vazios que têm influência suas propriedades. O espaço interlamelar no CSH corresponde a 28% da porosidade no CSH sólido. Devido ao tamanho de poro pequeno, acaba não tendo efeito adverso sobre a resistência e permeabilidade da pasta de cimento hidratado.

As pontes de hidrogênio podem reter água nesses pequenos vazios e sua remoção pode contribuir para a retração por secagem e fluência. Os vazios capilares são os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada e são irregulares na forma. Em pastas bem hidratadas, de baixa relação a/c, os espaços vazios capilares podem variar de 10 a 50 nm.

Figura 7: Micrografia e EDS da amostra com 5% de resíduo de vidro.



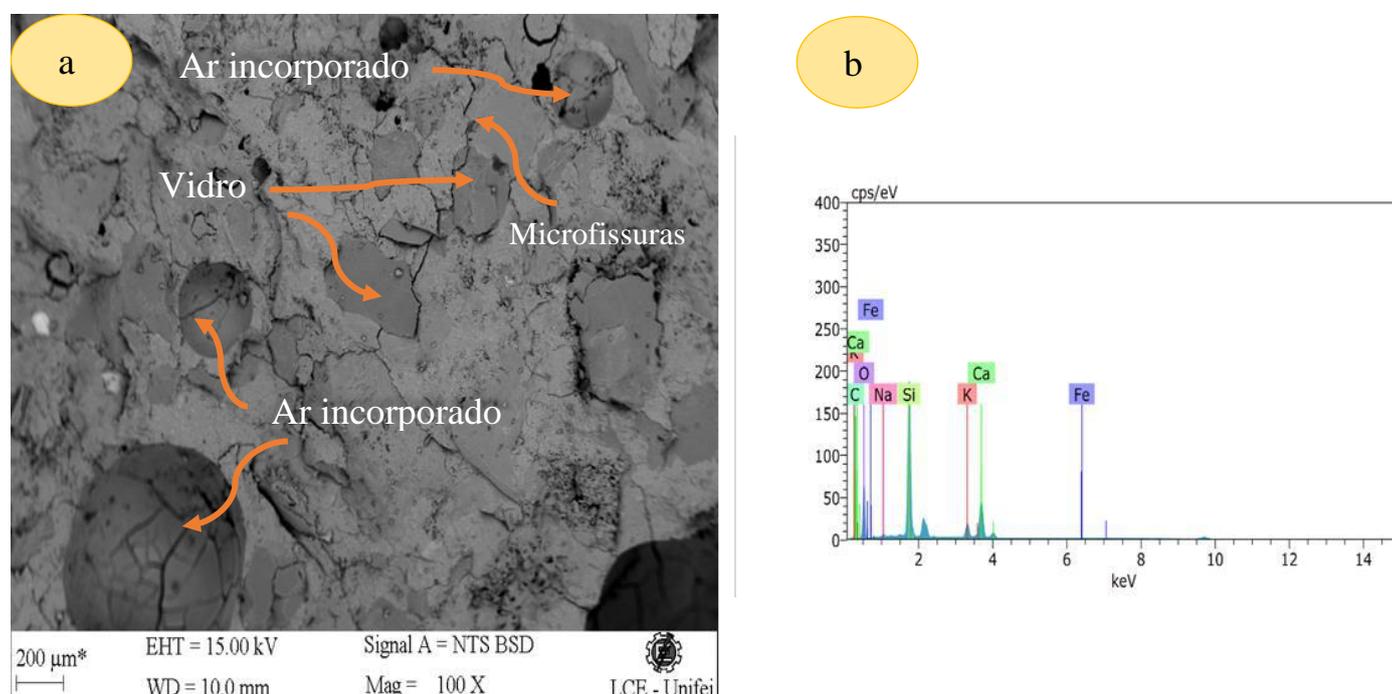
Legenda: CSH=Silicato de cálcio Hidratado, CH= Hidróxido de Cálcio. Fonte: Autores (2022).

A Figura 8 (a) mostra poros de ar incorporado. Os poros de ar incorporado possuem forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares. Podem ser decorrentes de uma má vibração do concreto ou terem sido intencionalmente incorporados. Devido a suas grandes dimensões reduzem bastante a resistência do concreto e aumentam a permeabilidade.

Na Figura 8 (a) observa-se também microfissuras na microestrutura. Quando o concreto é carregado nas primeiras idades, as microfissuras tendem a se propagar na zona de transição bastante porosa, conforme também mostrado na Figura 8 (a)

Entretanto, com o tempo, a zona de transição é preenchida com produtos da hidratação e as fissuras passam a se propagar pelo filme de hidróxido de cálcio depositado sobre o agregado (Mehta & Monteiro, 2014). Através da análise do EDS na Figura 8 (b) observa-se elemento como o Fe que é um dos elementos constituintes regulares da matriz de cimento e também o Ca, C, Al, Si que são os elementos constituintes do vidro.

Figura 8: Micrografia da amostra com 10% de resíduo de vidro.



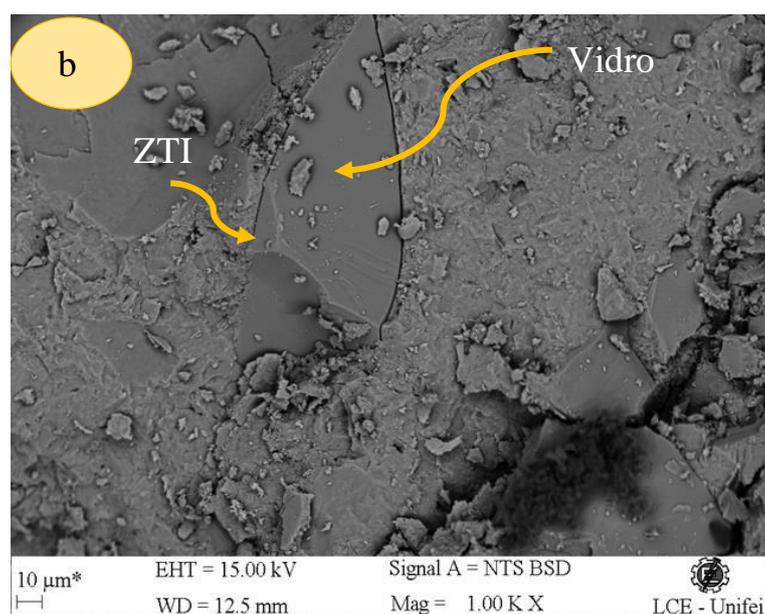
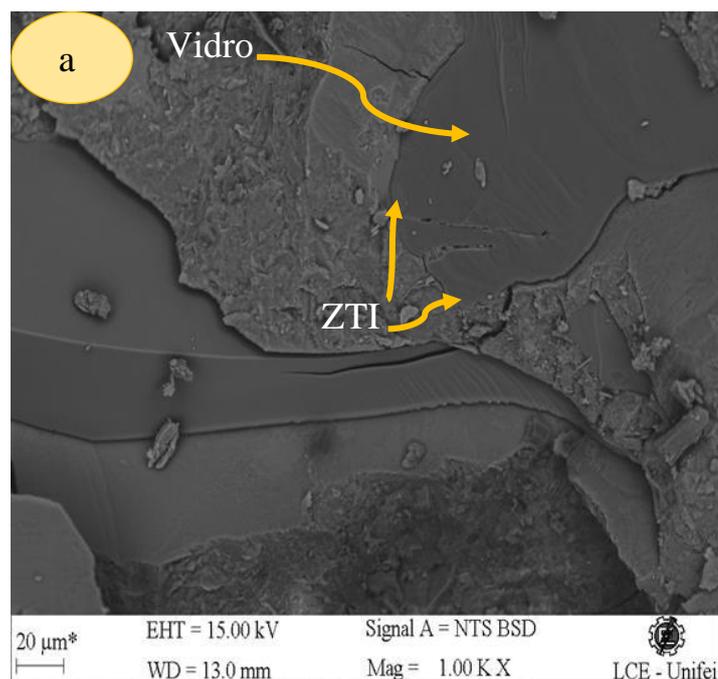
Fonte: Autores (2022).

As Figuras 9 (a) e 9 (b) mostram a microestrutura do compósito cimentício com 15% e 20% de resíduo de vidro que possui partículas com um forma alongada e plana. Isso diferencia o resíduo de vidro da areia, que normalmente tem partículas mais regulares. Isso sugere que as partículas do vidro possuem uma área de superfície específica maior do que as partículas de areia. Isso, juntamente com a diferença entre a densidade do vidro e da areia, é outra razão que explicaria a menor liquidez da argamassa com o vidro porque uma área de superfície específica causa uma maior demanda de água (Luo et al., 2022). Os vazios de ar também podem se formar mais facilmente entre as partículas de agregados irregulares, consequentemente necessita de mais pasta de cimento para preenchê-los, o que pode resultar em menores parâmetros de resistência da argamassa (Czapik & Kuza, 2021).

Através da análise do EDS nas Figuras 9 (c) e 9 (d) observa-se elemento como o Fe que é um dos elementos constituintes regulares da matriz de cimento e também o Ca, C, Mg, Na, Al, Si que são os elementos constituintes do vidro conforme mostrado na Figura 9 (e) e 9 (f).

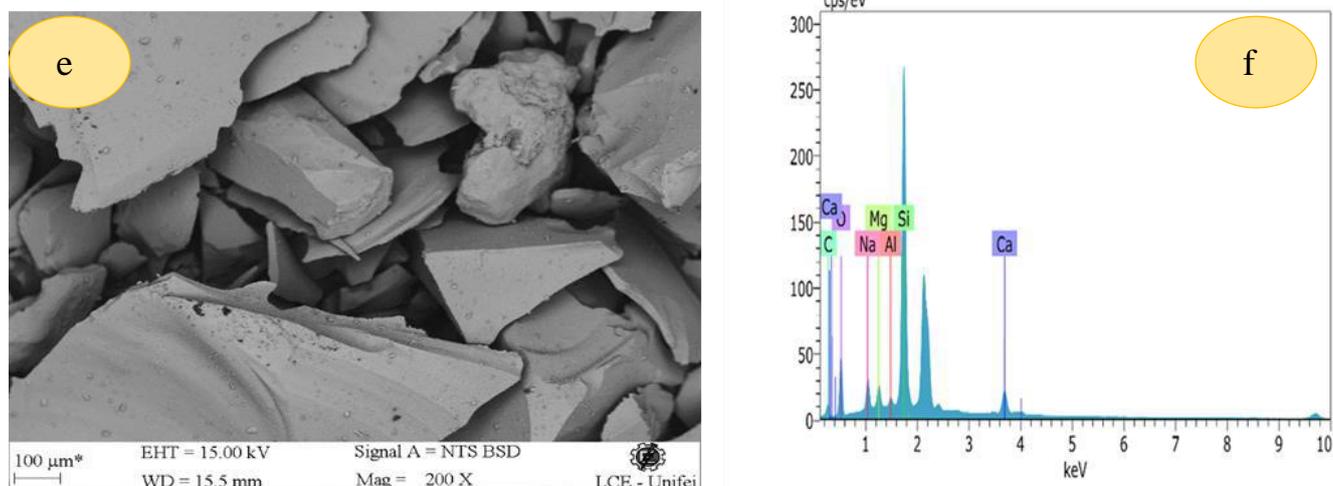
Nas Figuras 9 (a) e 9 (b) observa-se na microestrutura da argamassa com resíduo de vidro, partículas finas de vidro que são visíveis e podem ser incorporadas na fase CSH. A fase CSH resultante obteve uma forma fibrosa ou “favo de mel”, o que é característico do processo de fixação de cimento sem aditivos minerais. Um análise da composição elementar da fase de CSH revelou indícios significativos de silício, o que pode ser atribuído à presença de partículas de vidro dispersas na matriz da pasta de cimento (Czapik & Kuza, 2021).

Figura 9 : Micrografia e EDS da amostra com 15% de resíduo de vidro: (a) e (c), 20% de resíduo de vidro: (b) e (d)



Fonte: Autores (2022).

Figura 9: Micrografia e EDS do resíduo de vidro: (e) e (f).



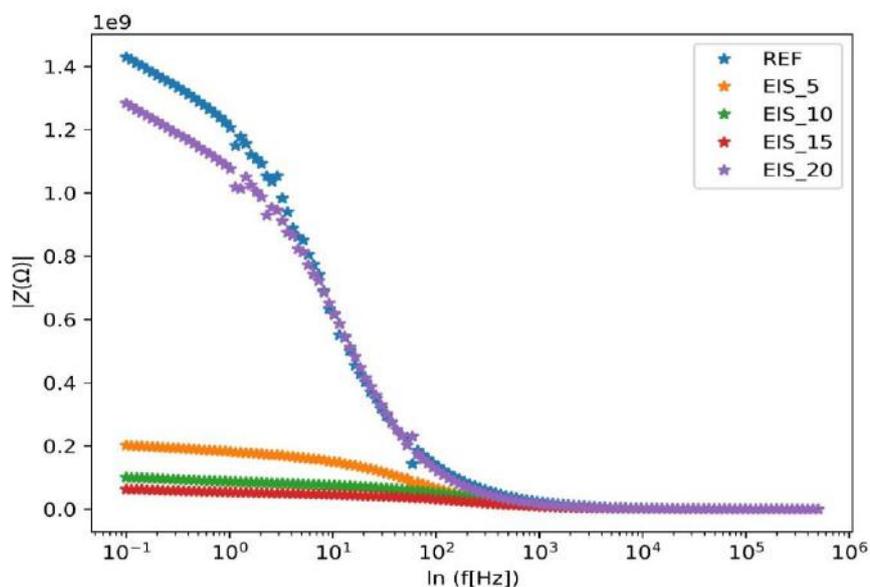
Fonte: Autores (2022).

A Figura 10 mostra os diagramas de Bode, afirma-se brevemente que esses diagramas são um gráfico de coordenadas semilogarítmicas da função de transferência de um sistema linear invariante no tempo versus frequência.

No diagrama de Bode distingue-se claramente a três regiões: região de alta frequência caracterizada pela presença de películas de passivação e outros tipos de revestimento sobre a armadura, a região de frequência média, que reflete a mudança de condutividade elétrica do revestimento durante exposição em meio corrosivo, conforme mostrado na Figura 10 e, finalmente, a região de baixa frequência (10^0 Hz and 10^{-2} Hz), onde a reação de corrosão na interface metal/revestimento pode ser estudada.

A partir do diagrama de bode, observa-se que a resistividade elétrica diminui com o aumento em frequência. Isso indica que as amostras estão agindo como um capacitor de cargas dentro dele (Santos, 2022).

Figura 10: Diagrama de Bode para a amostra referência a amostra com 20% de resíduo de vidro.



Fonte: Autores (2022).

4. Conclusão

Para a amostra referência mostra o circuito equivalente típico proposto por Randles sendo que mostra a correlação entre o fenômeno de corrosão e o circuito equivalente está associado a uma resistência “offset aparente” (R_1) em série com a rede da argamassa (R_2Q_2).

Para as amostras com 5% a 20% de resíduo de vidro mostram um diagrama de Nyquist típico, acompanhado do seu circuito equivalente de Christensen. Com base no características do material (concreto) e as possibilidades sugerido na literatura com o circuito equivalente típico proposto por Christensen, o circuito equivalente representa um resistor de contato (R_1) conectada em série com a rede da argamassa (R_2Q_2) e conectada, também em série, com a rede do resíduo de vidro (R_3Q_3).

Para a amostra referência mostra uma zona de transição interfacial entre o agregado e o concreto. Na zona de transição interfacial indica uma maior porosidade no entorno dos grãos dos agregados graúdos. Também se observa à microfissuras e também vazios capilares ou pequenos poros de ar incorporado em uma seção de concreto provocados pela água que “sobra” da relação a/c.

Para a amostra com 5% de resíduo de vidro mostram vazios capilares em uma seção de concreto provocados pela água que “sobra” da relação a/c e no seu interior cristas de CSH.

Para a amostra com 10% de resíduo de vidro observa-se poros de ar incorporado com forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares e também microfissuras na microestrutura.

Para as amostras com 15% e 20% mostram na microestrutura do compósito cimentício resíduo de vidro que possui partículas com uma forma alongada e plana.

Para sugestões de trabalhos futuros sugere-se investigar a microestrutura e relacioná-las com as propriedades físicas e mecânicas do concreto convencional. Também desenvolver estudo, utilizando os mesmos teores de resíduo de vidro, com monitoramento do concreto para várias idades, correlacionando a carbonatação com outros parâmetros de durabilidade assim como resistividade elétrica do concreto.

Referências

- Adesina, A., Azevedo, A. R. G. De, Amin, M., Hadzima-nyarko, M., Saad, I., Zeyad, A. M., & Tayeh, B. A. (2022). Fresh and mechanical properties overview of alkali-activated materials made with glass powder as precursor. *Cleaner Materials*, 3(October 2021), 100036. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100036>
- ADI-SUPER25. (2021). *ADI-SUPER ADI-SUPER Superplastificante para concreto* –. 20–21.
- Albéria Cavalcanti de Albuquerque. (2009). *Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- EFNARC. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. *Magazine of Concrete Research*, 1–32. <https://doi.org/10.1680/macrc.10.00167>
- Feliu, V., González, J. A., Andrade, C., & Feliu, S. (1998). Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. I. experimental evidence and theoretical predictions. *Corrosion Science*, 40(6), 975–993. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00036-5)
- Ghorbani, S., Taji, I., Tavakkolizadeh, M., Davodi, A., & de Brito, J. (2018). Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, 185, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.066>
- Hope, B. B., Page, J. A., & Ip, A. K. C. (1986). Corrosion rates of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 16(5), 771–781. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90051-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90051-7)
- Hu, J. Y., Zhang, S. S., Chen, E., & Li, W. G. (2022). A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures. *Construction and Building Materials*, 325, 126718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126718>
- Luo, T., Hua, C., Liu, F., Sun, Q., Yi, Y., & Pan, X. (2022). Effect of adding solid waste silica fume as a cement paste replacement on the properties of fresh and hardened concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01048. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01048>
- Mahmood, A. H., & Kashani, A. (2022). 9 - Recycled glass as a concrete component: possibilities and challenges. In F. Colangelo, R. Cioffi, & I. Farina (Eds.), *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management* (pp. 187–209). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821730-6.00015-2>
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2014). *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais* (Ibracon (ed.)).

- Meyer, Y. A., Menezes, I., Bonatti, R. S., Bortolozzo, A. D., & Osório, W. R. (2022). EIS Investigation of the Corrosion Behavior of Steel Bars Embedded into Modified Concretes with Eggshell Contents. *Metals*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/met12030417>
- Meyer, Y., Bonatti, R., Bortolozzo, A., & Osório, W. (2021). Electrochemical behavior and compressive strength of Al-Cu/xCu composites in NaCl solution. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 25, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04890-x>
- Mohamed, I., Aliabdo, A., & Diab, A. (2015). Corrosion behaviour of reinforced steel in concrete with ground limestone partial cement replacement. *Magazine of Concrete Research*, 67, 1–15. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00156>
- NBR 16697. (2018). Cimento Portland — Requisitos. *Abnt*, 1–9.
- Novaes, A. H., Duarte, F., Riveiro, L. O., & Santos, T. E. (2019). Metodologia Científica Teoria e aplicação na educação a distância. In *Petrolina - PE Universidade Federal do Vale do São Francisco* (Vol. 53, Issue 9). <http://portais.univasf.edu.br/dacc/noticias/livro-univasf/metodologia-cientifica-teoria-e-aplicacao-na-educacao-a-distancia.pdf>
- Osorio, W., Peixoto, L., & Garcia, A. (2009). Electrochemical corrosion behaviour of a Ti-IF steel and a SAE 1020 steel in a 0.5 M NaCl solution. *Materials and Corrosion*, 61, 407–411. <https://doi.org/10.1002/maco.200905420>
- Przemysław Czapik, Dominik Kuza, M. B. (2021). Influence of the waste glass uses on the cement mortar properties. *Physical Sciences*, February, 1–8. <https://doi.org/10.30540/sae-2021-005>
- Ribeiro, D. V. (2015). Uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto armado. *RIEM - IBRACON Structures and Materials Journal*, 8(4).
- Sagüés, A. A., Kranc, S. C., & Moreno, E. I. (1995). The time-domain response of a corroding system with constant phase angle interfacial component: Application to steel in concrete. *Corrosion Science*, 37(7), 1097–1113. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-938X\(95\)00017-E](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-938X(95)00017-E)
- ASTM C150/C150M – 18. <https://doi.org/10.1520/C0150>
- Tuaum, A., Shitote, S., & Oyawa, W. (2018). Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate. *Buildings*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/buildings8020015>
- Tutikian, B. F. (2004). *Método para dosagem de concretos auto- método para dosagem de concretos autoadensável*.
- Ribeiro, V. A.S, Oliveira A. F; Santos V C; Silva L R R; Torres, R. G.; Souza, M H B. (2022). Uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto com resíduo de pneu e Metacaulim e investigação da sua microestrutura Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIE) for monitoring corrosion in co. *Research, Society and Development*, 11(7), 1–13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29826>
- Votorantim. (2020). *Ficha de informações de segurança de produtos químicos – FISPQ – Revisão n°00 06/01/2020*.