

## Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais

### Mechanical performance and reinforcement steel corrosion process in concrete containing ornamental rock waste

Yustane Paula Dietrich<sup>1</sup>, Cláudia Rodrigues Teles<sup>1</sup>,  
Geilma Lima Vieira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFES (PPGEC/UFES); Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC/UFES) - Centro Tecnológico - Av. Fernando Ferrari s/nº - Campus Goiabeiras, CEP 29075-910, Vitória - ES

e-mail: yustane@gmail.com; clauteles@hotmail.com; geilma.vieira@gmail.com

---

#### RESUMO

Neste trabalho é avaliado o processo de corrosão das armaduras induzido pela ação de íons cloreto em concretos produzidos com adição do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO). No estudo de caracterização, foram avaliadas propriedades físicas, químicas e mineralógicas do RBRO. Foram produzidos concretos com três níveis de relação água/cimento - 0,45; 0,55 e 0,65 – e quatro níveis de adição de RBRO - 0, 5, 10 e 15% - em relação à massa de cimento. No estado fresco foi avaliada a propriedade de consistência do concreto; no estado endurecido foi avaliada a resistência à compressão axial; as propriedades relacionadas com a durabilidade estudadas foram absorção de água por imersão e fervura, absorção por capilaridade, além de ciclos semanais de indução e aceleração da corrosão por ataque de cloretos e monitoramento do potencial de corrosão. Por último, foi feito o ensaio colorimétrico por aspersão do indicador  $\text{AgNO}_3$  a 0,1 mol/L. Os resultados mostraram que a adição de RBRO é vantajosa no teor de 5% de RBRO do ponto de vista da resistência mecânica e de durabilidade frente à ação de cloretos.

**Palavras-chave:** durabilidade de concreto armado; corrosão eletroquímica; potencial de corrosão; método colorimétrico; Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO).

---

#### ABSTRACT

This research evaluates the reinforcement steel corrosion process induced by chloride ions in concrete containing ornamental rock waste (ORW) as mineral addition. Physical, chemical, mineralogical analysis and particle size distribution of ORW were performed. Concrete mixtures were produced with three levels of water / cement ratio - 0.45; 0.55 and 0.65 – and four levels of ORW addition - 0, 5, 10 and 15% - by weight of the binder. Consistency of fresh concrete and compressive strength of hardened concrete were evaluated; water absorption and capillary absorption of concrete were performed as durability features. The concrete specimens were exposed to wet and dry cycles and corrosion potential monitoring test. Finally, the colorimetric method ( $\text{AgNO}_3$  of 0,1 mol/L) was performed. Results show that the 5% ORW content ratio is beneficial to concrete at mechanical and durability perspectives against chloride ion attack.

**Keywords:** Reinforced concrete durability; electrochemical corrosion; corrosion potential, colorimetric method; ornamental rock waste.

---

#### 1. INTRODUÇÃO

Em estruturas de concreto armado o pH alcalino do concreto propicia a formação de película passiva na superfície das armaduras, a qual as protege contra a corrosão. Todavia, o concreto de cobrimento é susceptível à penetração de íons e umidade, agentes que podem desencadear a formação da pilha eletroquímica. O meca-

nismo de corrosão nessas estruturas ocorre em meio aquoso e é caracterizado pela transferência de elétrons e íons entre regiões catódicas e anódicas na extensão do metal. Ocorrem, simplificada, a oxidação do ferro nas áreas anódicas e a redução do oxigênio nas áreas catódicas.

Os cloretos são íons agressivos responsáveis por romper a película passiva do aço mesmo em pH alcalino, estão presentes em altas concentrações na água marinha e sua penetração no concreto exerce influência na vida útil das estruturas de concreto armado, pois causam corrosão localizada por pite. O pite trata-se de uma cavidade que se desenvolve rapidamente deteriorando as propriedades mecânicas das armaduras. Além disso, os cloretos não são consumidos de forma permanente pelas reações eletroquímicas, subsistindo livres para reagirem novamente, acelerando a corrosão.

Vários trabalhos evidenciam a utilização de resíduos industriais na produção de concretos modificados tendo como objetivo a melhora das propriedades de durabilidade, esta é altamente dependente da estrutura e da distribuição de poros formados durante a hidratação do cimento. Adições minerais como cinzas volantes e escória de alto forno retardam a penetração dos íons cloreto na matriz cimentícia [1]; também promovem melhora na propriedade de resistência à penetração de cloretos em concretos confeccionados com resíduos de construção civil (RCC) [2]. A utilização da lama vermelha, proveniente da exploração da bauxita para produção de alumina ( $Al_2O_3$ ), como adição mineral em concretos pode contribuir com a durabilidade do concreto armado retardando o processo de despassivação das armaduras [3].

O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) é abundante no estado do Espírito Santo, e vem sendo estudado para aplicação na indústria de construção civil. Estudos foram publicados atestando a eficiência deste resíduo na construção civil como substituição de agregado miúdo [4, 5, 6] e como substituto parcial do cimento [7, 8], como adição em concretos [9], entre outras aplicações.

Observou-se que o RBRO acarreta melhora na resistência à compressão quando utilizado até o teor de 10%; proporciona diminuição da porosidade e maior resistência à corrosão por ataque de cloretos nos concretos com 5% de adição do resíduo [9]. Também foi constatada melhora na propriedade de resistência à compressão até o teor de 15% de RBRO; as misturas com 5, 10 e 15% do resíduo mostraram desempenho equivalente ao concreto de referência no ensaio de resistência à penetração de cloretos, todavia, teores maiores provocam maior susceptibilidade ao ingresso dos íons [6]. Notou-se relativa diminuição da absorção de água dos concretos modificados quando comparados com os concretos de controle; os finos possivelmente promoveram a descontinuidade da estrutura de poros e diminuíram o volume dos mesmos [5].

Embora os estudos acima tenham relatado a influência do RBRO frente à corrosão por cloretos, sua aplicação como adição inerte em concretos expostos a ambientes de alta agressividade ambiental ainda necessita de abordagem complementar. Sendo assim, neste trabalho é avaliado o processo de corrosão das armaduras induzido pela ação de íons cloreto, em concretos produzidos com adição de RBRO. O estudo envolve os ensaios de potencial de corrosão e método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata ( $AgNO_3$ ). O primeiro é um procedimento não destrutivo e qualitativo que fornece a probabilidade de despassivação e de corrosão das armaduras embutidas no concreto; o segundo trata-se de técnica para analisar a profundidade da frente de contaminação por cloretos pela aspersão de indicador químico sobre superfície de concreto recém-fraturada.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização dos agregados

O agregado miúdo empregado para a fabricação dos concretos foi areia natural quartzosa extraída de jazida. Esta apresentou módulo de finura de 2,53, conforme NBR NM 248, massa específica de 2,64 g/cm<sup>3</sup> conforme NBR NM 52; e massa unitária de 1,42 g/cm<sup>3</sup> conforme NBR NM 45. O agregado graúdo escolhido foi pedra britada, proveniente de rocha granítica, que apresentou módulo de finura de 3,68, conforme NBR NM 248; massa específica de 2,76 g/cm<sup>3</sup>, conforme NBR NM 53; e massa unitária de 1,49 g/cm<sup>3</sup>, conforme NBR NM 45. A distribuição granulométrica dos agregados, determinada segundo a NBR NM 248 é apresentada pela Figura 1.

### 2.2 Preparação do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO)

O RBRO é foi preparado a partir da lama do beneficiamento de rochas ornamentais proveniente da etapa de desdobramento de rochas em teares de fios diamantados. O material foi doado por serraria situada no município da Serra- ES apresentando teor de umidade inicial de 38,27%, aferido conforme NBR NM 24. A lama foi colocada para secagem ao ar por 48 horas, foi destorroada e quarteada. As amostras foram colocadas para

secagem em estufa ventilada a 100°C até constância de massa. Ao final do processo foi obtido o Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO), apresentando umidade de 0,04%.

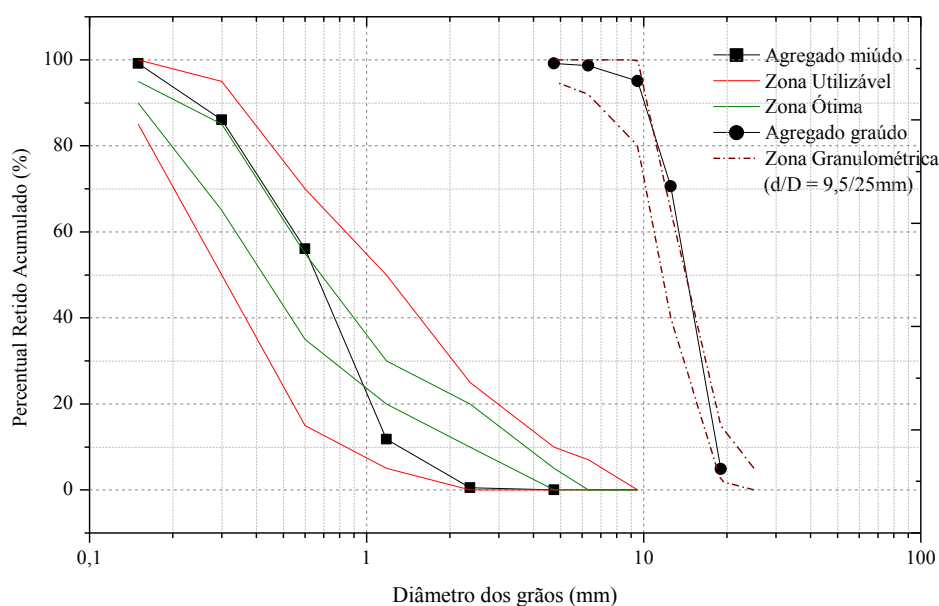


Figura 1: Distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo utilizados.

### 2.3 Caracterização do RBRO e do cimento CP V-ARI

Foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V-ARI, escolhido por conter menor teor de adições ativas entre os disponíveis no mercado local. A Tabela 1 traz a caracterização física do RBRO e do cimento CP V-ARI utilizados para a produção dos concretos.

Tabela 1: Caracterização física do cimento CP V-ARI e do RBRO.

ENSAIO	RBRO	CP V-ARI	NORMA
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,5253	2,823	NBR NM 23
Massa unitária (g/m <sup>3</sup> )	766,284	-	NBR NM 12127
Área específica pelo método de Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	6179,3	4459,0	NBR NM 76
Material retido na peneira N <sup>o</sup> 200 (%)	3,08	0,10	NBR 11579

Foi elaborada a granulometria a laser do RBRO e do cimento CP V-ARI, com a utilização do granulômetro da marca Cilas pertencente ao Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) de Criciúma/SC. A caracterização química do RBRO foi realizada por meio da técnica de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX), por equipamento EDX-720 da marca Shimadzu do Laboratório de Análises Químicas do Centro de Tecnologia do Gás (CTGÁS) do SENAI/RN. A análise mineralógica foi conduzida por meio da técnica de difração de raios X (DRX), em equipamento XRD 6000 da Shimadzu no Laboratório de Materiais Carbonosos e Plasmas Térmicos (LMC/LPT) do Centro de Ciências Exatas (CCE) da UFES.

### 2.4 Preparação das famílias de concreto e dos corpos-de-prova

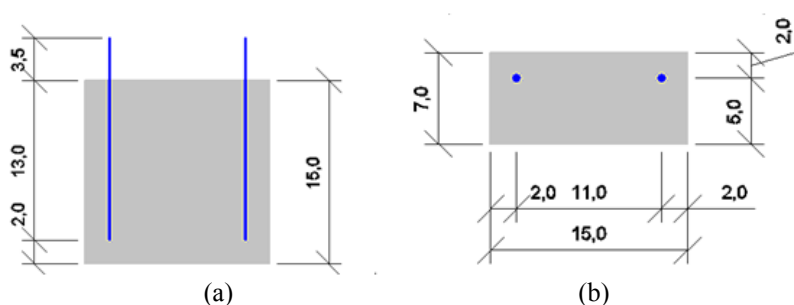
Foram produzidos concretos com três níveis de relação água/cimento - 0,45; 0,55 e 0,65 – e quatro níveis de adição de RBRO - 0, 5, 10 e 15%- em relação à massa de cimento. Os traços e famílias de concreto foram definidos conforme Tabela 2.

Foram produzidos corpos-de-prova conforme NBR 5738; os corpos de prova cilíndricos possuem di-

âmetro de 10 cm e altura de 20 cm, estes foram confeccionados para avaliação da resistência à compressão axial aos 28 dias, absorção de água por imersão e absorção capilar. Os corpos-de-prova prismáticos produzidos possuem dimensões de 15x15x7 cm e duas barras de aço CA-50 embutidas, de diâmetro nominal de 6,3 mm e comprimento de 16,5 cm, conforme Figura 2 (a) e (b). As armaduras foram preparadas para avaliação da corrosão conforme norma ASTM G1[10] e identificadas.

**Tabela 2:** Famílias de concretos e respectivos traços unitários.

PERCENTUAL DE ADIÇÃO	FAMÍLIA	CIMENTO	AREIA	BRITA	RBRO	RELAÇÃO a/c	CONSUMO DE CIMENTO REAL (kg/m <sup>3</sup> )
0% RBRO (referência)	CREf 45	1	1,46	2,18	-	0,45	465,66
	CREf 55	1	2,06	2,72	-	0,55	374,47
	CREf 65	1	2,67	3,25	-	0,65	313,13
5% RBRO	CR5 45	1	1,46	2,18	0,044	0,45	465,66
	CR5 55	1	2,06	2,72	0,044	0,55	374,47
	CR5 65	1	2,67	3,25	0,044	0,65	313,13
10% RBRO	CR10 45	1	1,46	2,18	0,089	0,45	465,66
	CR10 55	1	2,06	2,72	0,089	0,55	374,47
	CR10 65	1	2,67	3,25	0,089	0,65	313,13
15% RBRO	CR15 45	1	1,46	2,18	0,133	0,45	465,66
	CR15 55	1	2,06	2,72	0,133	0,55	374,47
	CR15 65	1	2,67	3,25	0,133	0,65	313,13



**Figura 2:** Geometria dos corpos-de-prova para os ensaios de durabilidade (a) em corte e (b) em planta.

Após o desmolde os corpos-de-prova foram colocados em processo de cura saturada em cal, de acordo com a NBR 5739, até atingirem a idade de 28 dias. Tomou-se o cuidado de proteger as armaduras expostas com esmalte sintético antes de colocar os corpos-de-prova prismáticos em cura saturada. Após a cura os corpos-de-prova permaneceram protegidos em ambiente de laboratório até o início dos ciclos de indução da corrosão. Conforme RIBEIRO *et al.* [3], a idade dos corpos-de-prova para início dos ciclos de indução da corrosão é aquela em que há formação da camada passiva de proteção das armaduras, detectada pela medida do potencial de corrosão (Ecor > -0,124 V); também é importante que a pasta de cimento adquira estrutura física bem desenvolvida e alto grau de hidratação.

## 2.5 Consistência do concreto fresco

A consistência dos concretos foi avaliada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme NBR NM 67. Foi especificado o abatimento de  $70 \pm 10$  mm para que a mistura tivesse trabalhabilidade adequada para a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos.

## 2.6 Propriedades do concreto endurecido

A propriedade de resistência à compressão axial foi avaliada conforme as normas NBR 5739, por meio de

seis corpos-de-prova cilíndricos para cada família de concreto na idade de 28 dias. Três corpos-de-prova por família de concreto foram submetidos a ensaios de absorção de água por imersão, conforme NBR 9778, e outros três corpos-de-prova por família foram submetidos absorção de água por capilaridade conforme NBR 9779. Ambos os ensaios de absorção foram iniciados aos 28 dias de idade dos concretos.

### 2.7 Potencial de corrosão ( $E_{cor}$ )

Dois corpos-de-prova prismáticos por família de concreto, contendo cada um duas barras de aço embutidas, foram submetidos a ciclos semanais de indução e aceleração da corrosão por ataque de cloretos. O ciclo foi adaptado de ANDRADE e BUJÁK [1], consiste em imersão parcial por dois dias em solução agressiva e secagem em estufa ventilada a 50°C, por cinco dias. A concentração utilizada para a imersão parcial foi 5% de cloreto de sódio [11].

Foi realizado o ensaio de potencial de corrosão normalizado pela ASTM C-876 [12]; método fornece apenas a probabilidade de despassivação e de corrosão da armadura. É necessário um multímetro de alta impedância; um eletrodo de referência; uma esponja de alta condutividade e conexões elétricas. É medida uma diferença de potencial (ddp) nos eletrodos de trabalho (armaduras) com relação a um eletrodo de referência.

O eletrodo de referência utilizado foi o de calomelano saturado – ECS. A Tabela 3 apresenta a correlação entre a probabilidade de ocorrência de corrosão e os intervalos de potenciais nos eletrodos de trabalho (armaduras), tomando o eletrodo de calomelano saturado como referência [3]. Os potenciais de corrosão foram medidos após imersão parcial e após secagem dos corpos-de-prova. Os ciclos foram interrompidos quando constatada a probabilidade maior que 90% de haver corrosão nos eletrodos de trabalho, em dois ciclos consecutivos.

**Tabela 3:** Probabilidade de ocorrência de corrosão da armadura em função do potencial, tendo como referência o eletrodo de calomelano saturado – ECS [3].

ELETRODO DE CALOMELANO SATURADO (ECS)	ZONA DE PROBABILIDADE DE CORROSÃO		
	< 10%	10% - 90%	> 90%
Hg, Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> / KCl (saturado)	> - 0,124 V	-0,124 V a -0,274 V	< - 0,274 V

### 2.8 Método Colorimétrico por aspersão de nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>)

O método colorimétrico consiste na aspersão de solução de AgNO<sub>3</sub> a 0,1 mol/L na superfície recém-fraturada de concreto. As reações químicas entre os íons Ag<sup>+</sup>, presentes na solução, e Cl<sup>-</sup> ou OH<sup>-</sup>, presentes no concreto, resultam nos precipitados AgCl (branco), e Ag<sub>2</sub>O (marrom) [13]. O precipitado AgCl se forma na região onde são encontrados cloretos livres (nocivos às armaduras) deixando o local esbranquiçado. Já o precipitado Ag<sub>2</sub>O é formado onde há cloretos combinados e faz com que a área tome a cor marrom.

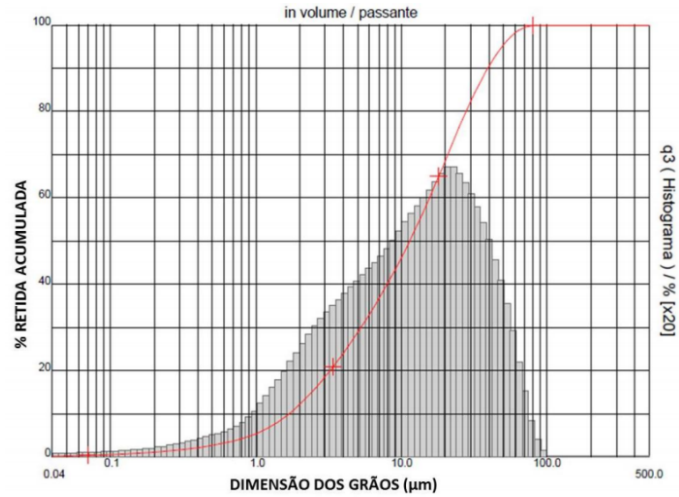
Foi feito registro fotográfico dos corpos-de-prova e, por meio da ferramenta AutoCad®, dez profundidades de penetração de cloretos, equidistantes entre si, foram aferidas em cada corpo-de-prova prismático, totalizando 20 profundidades para cada família de concreto estudada.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

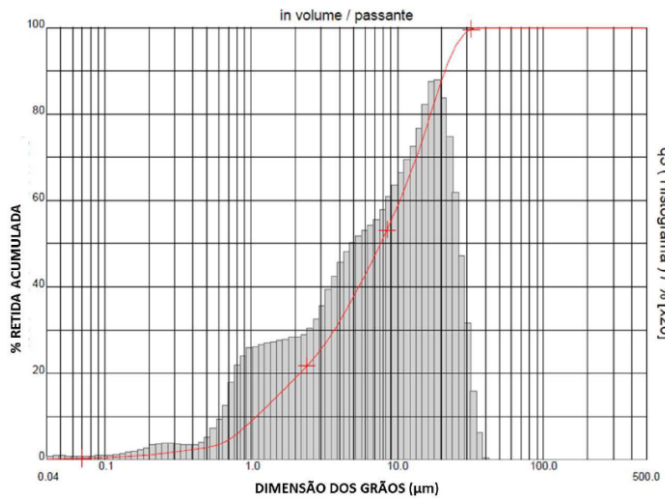
### 3.1 Caracterização do RBRO e do CP V-ARI

As curvas de distribuição granulométrica do RBRO e do cimento CP V-ARI estão apresentadas pela Figura 3. Observa-se que o diâmetro dos grãos de RBRO, Figura 3 (a), equivalentes ao D10 está na ordem de 1,7µm, o D50 na ordem de 11,0 µm e o D90 na ordem de 40µm. Ainda pela Figura 3 (b), verifica-se que os grãos do cimento apresentam valores de D10 na ordem de 1,1 µm; os valores de D50 na ordem de 7,8 µm e D90 na faixa 22,5 µm.

A Tabela 4 apresenta a caracterização química dos materiais. O RBRO é composto predominantemente por quartzo sílica (SiO<sub>2</sub>) e por feldspato alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sendo, portanto, um material sílico-aluminoso. Ainda na Tabela 4, pode ser visualizada a caracterização química do cimento Portland CP V-ARI, que foi doada pelo fabricante. A caracterização mineralógica é apresentada pela Figura 4, notam-se os picos definidos, ou compostos cristalinos estáveis de sílica (SiO<sub>2</sub>), com baixa possibilidade de atividade reativa.



(a)



(b)

Figura 3: Curvas de distribuição granulométrica do (a) RBRO e (b) do cimento CP V-ARI.

Tabela 4: Composições químicas do RBRO e do cimento CP V-ARI.

	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	C	TiO <sub>2</sub>	PF	RI
RBRO	66,80	3,44	0,93	13,50	3,79	3,83	3,50	0,06	-	1,11	0,16	3,50	-
CP V-ARI	18,5	63,72	0,75	4,91	2,97	0,80	-	2,87	7,66	-	-	3,84	0,75

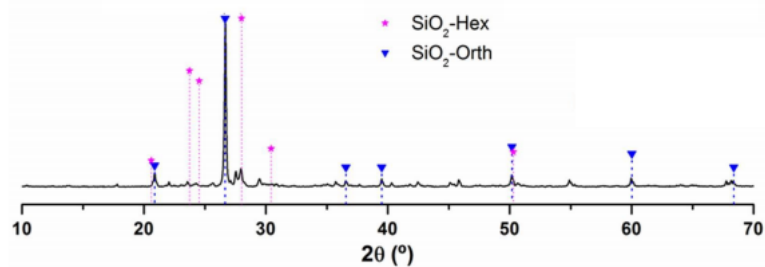


Figura 4: Difratoograma de raios X obtido para amostra de RBRO.

### 3.2 Consistência do concreto fresco

Pelos resultados de abatimento de tronco de cone pode-se notar a tendência de perda de abatimento, isto é, o concreto apresenta consistência menos fluida à medida que o percentual de RBRO aumenta, conforme Tabela 5. Os resultados encontrados corroboram com os de AL-AKHRAS *et al.* [7], CHI-CONG KOU *et al.* [2], VIJAYALAKSHMI *et al.* [6] e RANA *et al.* [14]. A elevada superfície específica dos finos demanda maior quantidade de água para manter a consistência do concreto fresco [2]. As partículas angulares do resíduo de rocha também oferecem maior atrito interno na mistura [14]. Os concretos que não atingiram o abatimento esperado (70 mm) apresentaram aspecto coeso e com trabalhabilidade apropriada para a moldagem dos corpos-de-prova.

**Tabela 5:** Resultados dos ensaios de abatimento do concreto no estado fresco; resultados médios de resistência à compressão axial, absorção de água por imersão e absorção capilar dos concretos produzidos.

	CREF 45	CR5 45	CR10 45	CR15 45	CREF 65	CR5 65	CR10 65	CR15 65	CREF 65	CR5 65	CR10 65	CR15 65
Abatimento (mm)	75	70	60	35	80	70	45	40	65	100	90	55
Resistência à compressão axial $f_{c28}$ (MPa)	51	56	50	50,5	45,5	45,5	40,5	42	34	37	34	33,5
Absorção por imersão (%)	5,91	6,04	6,12	6,49	6,26	5,91	5,72	6,15	6,56	6,36	6,29	6,06
Absorção capilar ( $g/cm^2$ )	1,21	1,28	1,29	1,11	1,27	1,20	1,22	1,23	1,25	1,34	1,24	1,24

### 3.3 Análise de Variância

As propriedades de resistência à compressão axial, absorção de água, absorção capilar, potencial de corrosão e profundidade de penetração de cloretos foram analisadas por Análise de Variância (ANOVA) com o auxílio da ferramenta computacional Statgraphics®. A ANOVA verifica o grau de diferença entre os concretos estudados sobre a variável resposta considerando sua distribuição próxima da normal. A Tabela 6 mostra a contribuição de cada variável independente – relação a/c, percentual de RBRO (%RBRO) e sua interação – sobre as variáveis respostas com o nível de confiança de 95,0%. O valor p testa a significância estatística de cada um dos fatores, quando o mesmo é inferior a 0,05 o fator tem um efeito estatisticamente significativo sobre a propriedade estudada.

**Tabela 6:** Resultado de Análise de Variância – valor p e significância – das variáveis sobre as propriedades estudadas.

VAR.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL		ABSORÇÃO DE ÁGUA		ABSORÇÃO CAPILAR		POTENCIAL DE CORROSÃO		PENETRAÇÃO DE CLORETOS	
A: a/c	0,000	S	0,0003	S	0,2566	NS	0,0001	S	0,0000	S
B: % RBRO	0,000	S	0,0318	S	0,1535	NS	0,6227	NS	0,0157	S
Interação AB	0,000	S	0,0001	S	0,1454	NS	0,0326	S	0,8532	NS

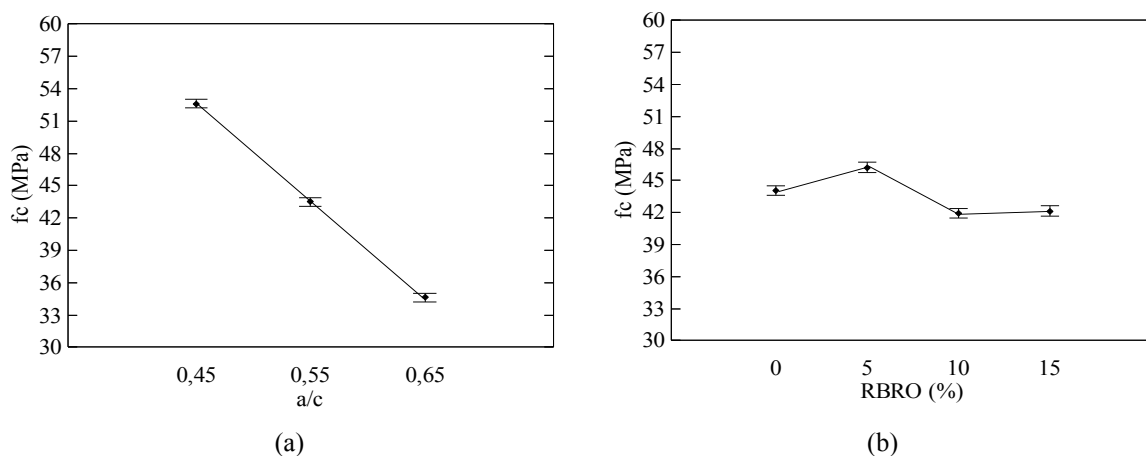
Obs.: VAR.: variável; S: significativo; NS: não significativo.

#### 3.3.1 Resistência à compressão axial

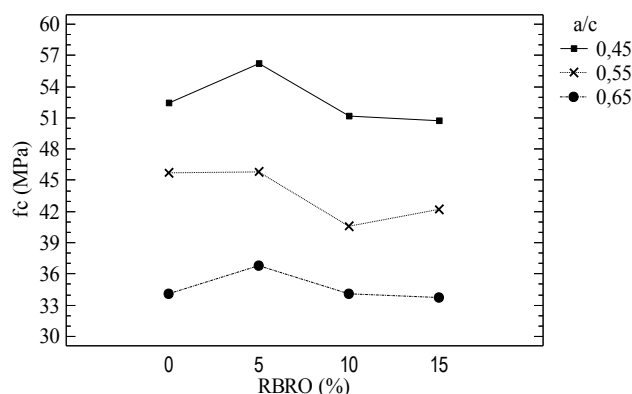
A Tabela 6 apresenta a contribuição estatisticamente significativa das variáveis independentes (relação a/c, %RBRO e a interação a/c\*%RBRO) sobre a variável resistência à compressão axial aos 28 dias ( $f_c$ ). O efeito isolado da relação a/c sobre a propriedade de resistência à compressão axial aos 28 dias ( $f_c$ ) é mostrado pela Figura 5 (a). Como pode ser observado, o aumento da quantidade de água no traço diminui a resistência do concreto devido ao enfraquecimento da matriz pela elevação da sua porosidade [15].

A Figura 5 (b) apresenta o efeito isolado da variável percentual de RBRO (%RBRO) sobre a resistência à compressão. Percebe-se que a adição de 5% de RBRO é responsável pelo incremento da resistência, enquanto o teor de 10% e 15% de RBRO reduz timidamente a resistência dos concretos quando comparados a referência. Pela Tabela 5, os concretos CR5 45 e CR5 65 tiveram acréscimo na resistência à compressão de 9,8% e 8,8% respectivamente, enquanto o CR5 55 permaneceu equivalente ao concreto de referência. Resul-

tados semelhantes foram encontrados por ELMOATY [9], que verificou que a adição de resíduos de granito nos teores de 7,5 e 10% pode ocasionar ganho na propriedade de resistência à compressão axial dos concretos de 11,9% e 12,2%, respectivamente, devido ao efeito filler. Como substituto do cimento o RBRO inerte tende a diminuir a resistência do concreto, entretanto, o teor de 5% demonstrou pequeno aumento no desempenho quanto à resistência à compressão possivelmente devido ao efeito de empacotamento de partículas [16]. Como substituto parcial do agregado ALMEIDA *et al.* [4] afirmam que o conteúdo de 5% de RBRO possibilitou maior resistência à compressão devido ao empacotamento de partículas, melhores condições para a hidratação do cimento em virtude da maior dispersão entre estas partículas e reduzido espaço para água livre.



**Figura 5:** Efeito isolado da variável (a) relação a/c e (b) percentual de RBRO (%RBRO) sobre a resistência à compressão axial.



**Figura 6:** Resistência à compressão axial ( $f_c$ ) em função da interação entre a relação a/c e %RBRO.

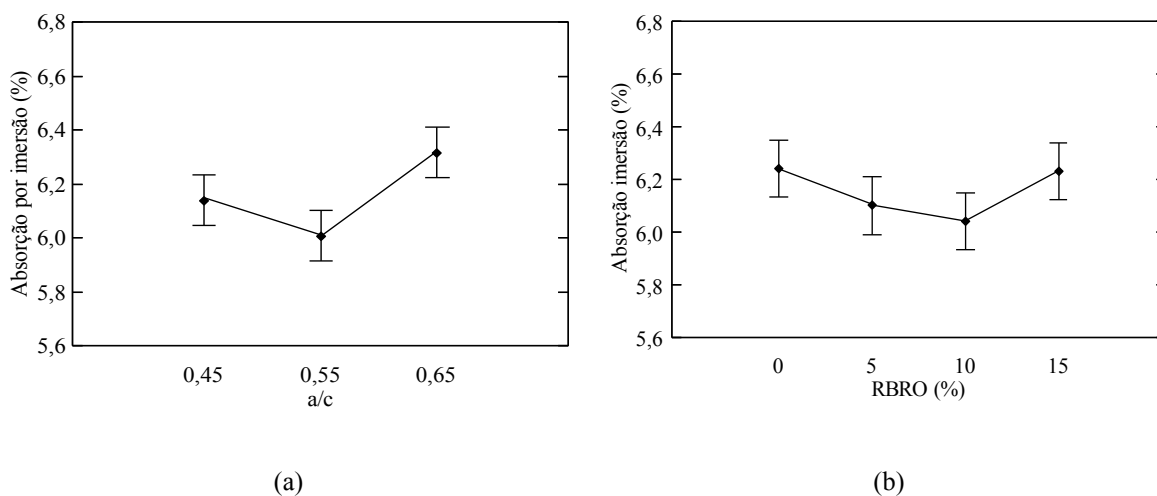
A Figura 6 relaciona a resistência à compressão axial em função da interação a/c\* %RBRO. Observa-se que os teores 10 e 15% de RBRO acarretam a perda de resistência à compressão quando associados a todos os níveis de relação a/c. Entretanto, o teor de 5% de RBRO apresentou aumento de resistência principalmente em conjunto com a relação a/c 0,45 e 0,65, possivelmente devido ao empacotamento de partículas.

### 3.3.2 Absorção de água por imersão

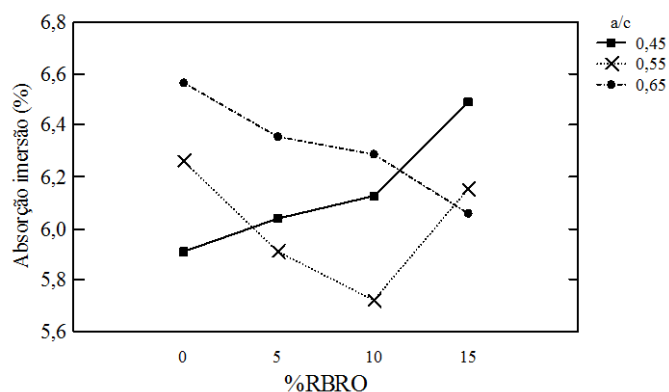
A Tabela 6 apresenta a contribuição estatisticamente significativa das variáveis independentes (relação a/c, %RBRO e a interação a/c\*%RBRO) sobre a variável absorção de água por imersão. O efeito isolado da variável relação a/c é mostrado pela Figura 7 (a); o melhor desempenho ocorreu nos concretos de relação a/c 0,55, pois absorveu menos água do que os concretos de relação a/c igual a 0,45 e 0,65. A absorção de água é maior nos concretos com maior relação a/c, entretanto, notou-se aumento da absorção nos concretos com relação a/c 0,45. Uma explicação para este fenômeno é a dificuldade de adensamento de concretos de baixa relação a/c quando formulados com incorporação de adições minerais. Devido à adição a consistência da mistura fica menos fluida ocasionando o aumento de poros de ar aprisionado [17]; ainda, como consequência, a



resistência do concreto pode sofrer diminuição [15]. Segundo BACARJI *et al.* [16], quando o RBRO inerte é utilizado como substituto parcial do cimento, pode ocorrer o aumento da quantidade de água absorvida pelos concretos produzidos.



**Figura 7:** Efeito isolado da variável (a) relação a/c e (b) percentual de RBRO (%RBRO) sobre a absorção de água por imersão.



**Figura 8:** Absorção de água por imersão em função da interação entre a relação a/c e %RBRO.

Pela Figura 7 (b) observa-se o efeito isolado da variável percentual de RBRO (%RBRO) sobre a absorção de água por imersão. Os concretos com 5%, 10% e 15% de RBRO absorveram menos água ou quantidade equivalente quando comparados aos concretos de referência. Os resultados corroboram com os encontrados por ALMEIDA *et al.* [18] que utilizaram resíduos de mármore e calcário como substituto parcial do agregado miúdo; os autores atribuíram a menor absorção à redução do volume de poros e à descontinuidade entre os poros na matriz. ELMOATY *et al.* [9] constatou diminuição da porosidade nos concretos com até 10% de adição de resíduo de rocha quando comparados com o concreto de controle, com 0% de resíduo.

A Figura 8, por sua vez, descreve a interação entre as variáveis: relação a/c e %RBRO sobre a variável resposta. Observa-se que nos concretos de relação a/c de 0,45, a absorção é maior à medida que cresce o teor de adição, possivelmente devido ao aumento do ar aprisionado em virtude da dificuldade de adensamento desses concretos, conforme já mencionado. Nos concretos de relação a/c igual a 0,55 e 0,65, houve diminuição da quantidade de água absorvida à medida que o percentual de RBRO aumentou, possivelmente devido à redução do volume de poros e à descontinuidade entre os poros.

### 3.3.3 Absorção capilar

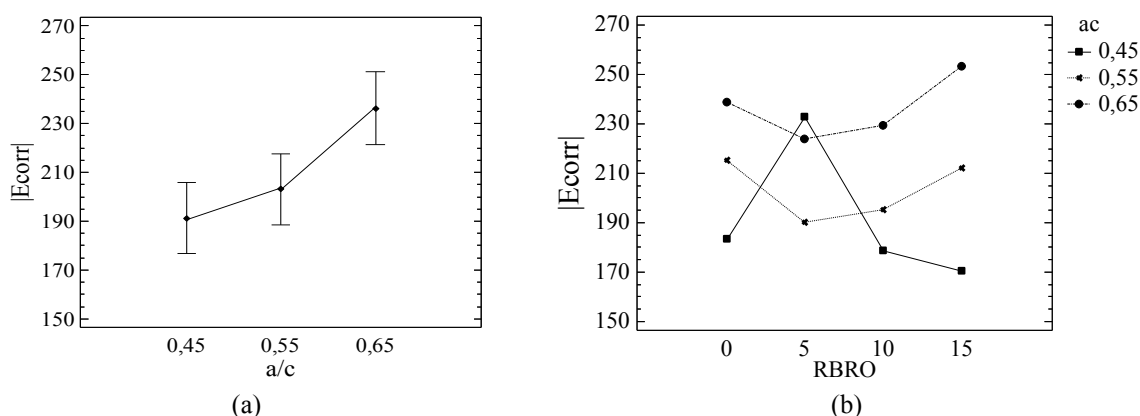
A Tabela 5 apresenta os resultados médios de absorção de água por ascensão capilar após 72 horas. As variáveis relação a/c, percentual de RBRO (%RBRO) e sua interação (a/c\*%RBRO) não foram significativas na ANOVA, conforme Tabela 6. Portanto, não foram necessários os gráficos para maiores discussões. Alguns

trabalhos constataram resultados positivos pela incorporação de resíduos de rochas em concretos; MENADI *et al.* [19] afirmam que a incorporação de finos de rocha calcária não influenciaram negativamente na propriedade de absorção capilar de concretos; GAMEIRO *et al.* [20] demonstram que a sucção capilar após 72 horas pode decrescer devido à utilização de 20% de finos de mármore como substituto parcial de agregado miúdo. Entretanto, ANDRÉ *et al.* [21] alertam que a absorção capilar depende da aderência na zona de transição entre argamassa e agregado graúdo e dos poros existentes nesta região.

### 3.3.4 Potencial de corrosão

Conforme Tabela 6, a variável relação  $a/c$  e a interação ( $a/c*\%RBRO$ ) foram estatisticamente significativas sobre a variável potencial de corrosão ( $E_{cor}$ ), pode-se afirmar que a variável percentual de RBRO ( $\%RBRO$ ) só tem efeito significativo quando associada à relação  $a/c$ .

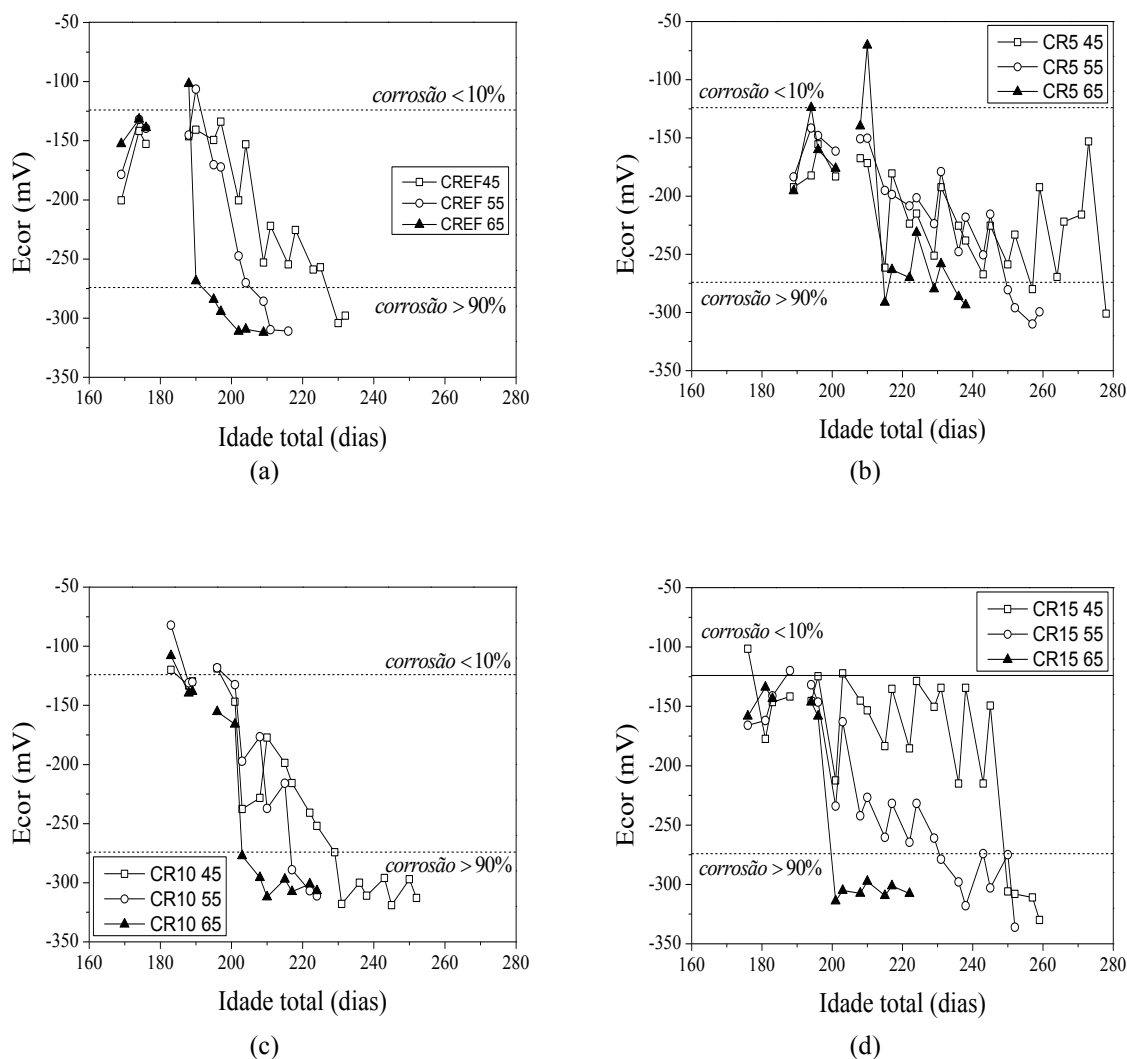
A Figura 9 (a) apresenta a influência da variável relação  $a/c$  sobre o potencial de corrosão. Nota-se que os valores aferidos aumentam, em módulo, à medida que a relação  $a/c$  aumenta. A Figura 9 (b) mostra a interação entre a relação  $a/c$  e  $\%RBRO$  sobre o potencial de corrosão. Os concretos de relação  $a/c$  de 0,65 e 0,55 se comportam de maneira similar, havendo diminuição no módulo do potencial de corrosão nos concretos com adição de 5% e 10% quando comparados com a referência. Para as famílias de relação  $a/c$  0,45 o gráfico apresenta um pico para os concretos CR5 45. É possível que a adição de 5% tenha proporcionado uma matriz mais porosa em virtude do ar aprisionado durante a etapa de adensamento. Todavia, a adição de 10 e 15% de RBRO (CR10 45 e CR15 45) resultou numa diminuição do potencial de corrosão quando comparados com os potenciais registrados nas armaduras dos concretos CREF 45.



**Figura 9:** Efeito isolado da variável independente relação  $a/c$  sobre o potencial de corrosão ( $E_{cor}$ ).

A Figura 10 apresenta as médias dos potenciais de corrosão das armaduras embutidas (eletrodos de trabalho) nas famílias de concreto (a) de referência (CREF 45, CREF 55, CREF 65); (b) com 5% de adição de RBRO (CR5 45, CR5 55, CR5 65); (c) com 10% de adição de RBRO (CR10 45, CR10 55, CR10 65); e (d) com 15% de adição de RBRO (CR15 45, CR15 55, CR15 65), em função do tempo. As linhas horizontais representam limites de baixa probabilidade de corrosão (menor que 10%) e alta probabilidade de corrosão (maior que 90%), conforme Tabela 3. Os potenciais aferidos caem abruptamente sinalizando a quebra da camada passiva da armadura e iniciação da corrosão ativa [22].

É possível observar que a adição de RBRO pode retardar a evolução dos potenciais especialmente para o conteúdo de 5%, conforme Figura 10 (b), e 10%, conforme Figura 10 (d), quando comparados com os concretos de referência, Figura 10 (a). Os resultados corroboram com os encontrados por RIBEIRO *et al.* [3] ao estudarem a lama vermelha como adição em concretos. Os autores afirmam que o processo de despassivação das armaduras foi retardado pela adição do resíduo em consequência da descontinuidade entre os poros da matriz. FAJARDO *et al.* [23] também constataram aumento significativo do tempo de indução da corrosão em concretos contendo pozolana natural, proveniente da rocha andesito, como substituto parcial do cimento; sendo considerada benéfica a incorporação da pozolana.

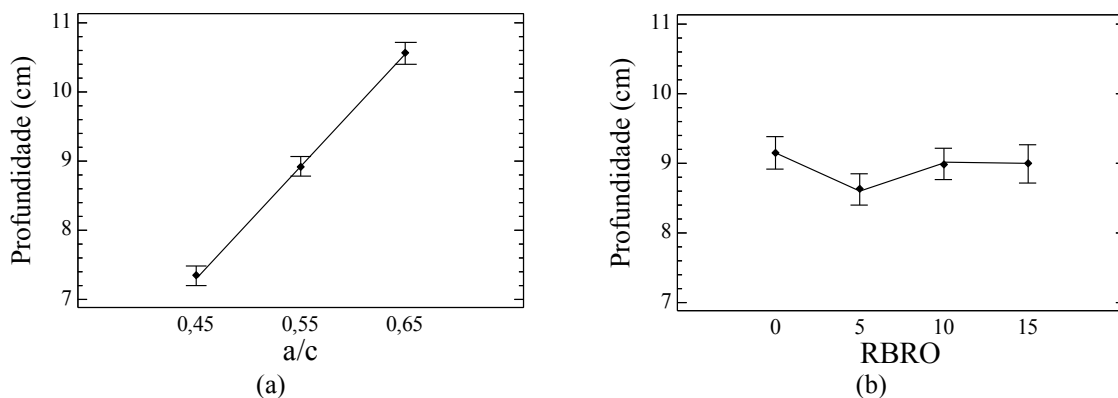


**Figura 10:** Média dos potenciais de corrosão aferidos nas armaduras embutidas nos concretos (a) de referência; (b) 5%; (c) 10% e (d) 15% de RBRO.

### 3.3.5 Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ )

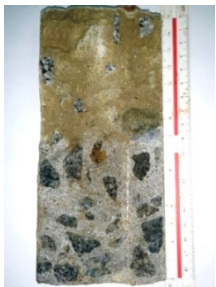







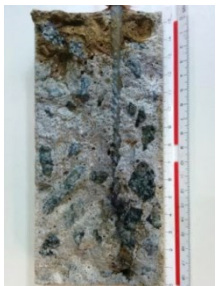



Ambas as variáveis relação a/c e %RBRO mostraram-se estatisticamente significativas na avaliação da propriedade profundidade de penetração de cloretos, conforme Tabela 6. O efeito isolado da variável a/c sobre a altura de penetração de cloretos livres é retratado pela Figura 11 (a). A frente de penetração de cloretos atingiu menor profundidade nos concretos de relação a/c igual a 0,45 quando comparados aos concretos com relação a/c de 0,55 e 0,65. Com relação à adição de RBRO pode-se afirmar que a quantidade de 5% de resíduo obteve melhor comportamento na profundidade da frente de cloretos livres, conforme Figura 11 (b). Este resultado, provavelmente ocorreu por causa do efeito de empacotamento de partículas e descontinuidade entre poros em virtude dos finos de RBRO. Resultados semelhantes foram encontrados por SINGH *et al.* [5] que utilizaram resíduos de granito como substituto parcial de agregado miúdo e atestam que o teor de 25% minimizou a penetração dos íons enquanto os outros teores apresentaram comportamento similar aos de controle; os autores também afirmam que a relação a/c igual a 0,3 apresentou resultados melhores que a relação a/c igual a 0,4.

As superfícies de concreto após aspersão do indicador químico nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) são apresentadas pela Tabela 7. Pode-se visualizar que o aumento da relação a/c acarreta maior avanço da frente de cloretos, esse comportamento está relacionado com a porosidade do concreto, que é proporcional à quantidade de água utilizada na sua formulação [15].



**Figura 11:** Efeito isolado da variável independente (a) relação a/c e; (b) percentual de RBRO (%RBRO) sobre a altura de penetração de cloretos.

**Tabela 7:** Formação de duas áreas de coloração distintas na superfície dos concretos formadas pela aspersão de  $AgNO_3$  nas famílias de concreto produzidas.

RELAÇÃO A/C	0% RBRO	5% RBRO	10%RBRO	15% RBRO
0,45	 CREF 45	 CR5 45	 CR10 45	 CR15 45
0,55	 CREF 55	 CR5 55	 CR10 55	 CR15 55
0,65	 CREF65	 CR5 65	 CR10 65	 CR15 65

As médias das profundidades aferidas podem ser visualizadas na Tabela 8, que apresenta também as idades inicial e final dos corpos-de-prova submetidos aos ciclos de indução da corrosão, o tempo de indução

da corrosão, ou número de ciclos necessários para que as armaduras embutidas (eletrodos de trabalho) apresentem potencial de corrosão (Ecor) menor ou igual a -274 mV e a idade final dos corpos-de-prova.

**Tabela 8:** Idade dos corpos-de-prova, número de ciclos de indução da corrosão, tempo de indução da corrosão e média da profundidade da frente de cloretos.

	CREf 45	CR5 45	CR10 45	CR15 45	CREf 55	CR5 55	CR10 55	CR15 55	CREf 65	CR5 65	CR10 65	CR15 65
Idade inicial dos concretos (dias)	169	189	183	176	169	189	183	176	169	189	183	176
Número de ciclos até despassivação das armaduras	9	10	8	11	6	9	6	9	4	4	4	4
Tempo de indução da corrosão (dias)	63	70	56	77	42	63	42	63	28	28	28	28
Idade final dos concretos (dias)	232	259	239	253	211	252	225	239	197	217	211	204
Média da profundidade da frente de cloretos (cm)	7,51	7,0	7,49	7,36	9,29	8,68	8,96	8,80	10,63	10,26	10,50	70,81

#### 4. CONCLUSÕES

- O uso de RBRO como adição inerte ocasionou perda de abatimento no ensaio de índice de consistência, contudo, as misturas mantiveram aspecto coeso e com trabalhabilidade adequada para a moldagem dos corpos-de-prova.
- A adição de RBRO proporcionou desempenho equivalente ao concreto de referência quanto à propriedade de resistência à compressão axial, apresentando incrementos na resistência nos concretos contendo 5% de RBRO possivelmente devido ao efeito de empacotamento de partículas.
- Os resultados de absorção por imersão indicam que o RBRO como adição pode diminuir a absorção de água dos concretos com relação a/c iguais a 0,55 e 0,65 possivelmente devido à redução do volume de poros e à descontinuidade entre os poros na matriz.
- A variável relação a/c é a maior responsável pela manutenção dos potenciais abaixo do limite de 90% de probabilidade de haver corrosão no eletrodo de trabalho (armadura).
- A adição de RBRO pode retardar a evolução dos potenciais especialmente para o conteúdo de 5% possivelmente devido à descontinuidade dos poros da matriz.
- A avaliação da frente de cloretos, por meio do ensaio colorimétrico, confirmou o benefício trazido pela incorporação de 5% de RBRO nas formulações, sendo esta proporção capaz de diminuir a profundidade de penetração dos íons.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção e a CAPES pela concessão de bolsa ao primeiro autor.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ANDRADE, C., BUJÁK, R. "Effects of some mineral additions to Portland cement reinforced corrosion", *Cement and Concrete Research*, v.53, pp. 59-67, 2013.
- [2] KOU, C.C., POON, C.S., AGRELA, F. "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with addition of different mineral admixtures", *Cement & Concrete Composites*, v.33, n.8, pp.788-795, 2011.

- [3] RIBEIRO, D.V., LABRINCHA, J.A., MORELLI, M.R. “Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete”, *Cement & Concrete Research*, v. 42, pp.124-133, 2012.
- [4] ALMEIDA, N., BRANCO, F., SANTOS, J.R. “Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures”, *Building and Environment*, v.42, pp. 810–819, 2007.
- [5] SINGH, S., NAGAR, R., AGRAWAL, V. “Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions”, *Journal of Cleaner Production*, v.127, pp. 172-182, 2016.
- [6] VIJAYALAKSHMI, M., SEKAR, A.S.S., GANESH PRABHU, G. “Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste”, *Construction and Building Materials*, v.46, pp.1-7, 2013.
- [7] AL-AKHRAS, N.M., ABABNEH, A., ALARAJI, W.A. “Using burnt stone slurry in mortar mixes”, *Construction and Building Materials*, v.24, pp. 2658-2663, 2010.
- [8] ABUKERSH, S. A., FAIRFIELD, C. A. “Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement”, *Construction and Building Materials*, v. 25 , n.10, pp.4088-4094, 2011.
- [9] ELMOATY, A.E.M. “Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust”, *Construction and Building Materials*, v.47, pp. 743-752, 2013.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. 2011. Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens. G1.
- [11] DEBIEB, F., COURARD, L., KENAI, S., *et al.*, “Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates”, *Cement & Concrete Composites*, v.32 , pp.421–426, 2010.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. 2009. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete - C 876
- [13] HE, F., SHI, C., YUAN, Q., *et al.*, “AgNO<sub>3</sub>-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete”, *Construction and Building Materials*, v.26, pp.1-8, 2012.
- [14] RANA, A., KALLA, P., CSETENYI, L. J. “Recycling of dimension limestone industry waste in concrete”, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, pp.1-20, 2016.
- [15] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutural, propriedades e materiais*, 3 ed. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2008.
- [16] BACARJI, E., TOLEDO FILHO, R.D., KOENDERS, E.A.B., *et al.*, “Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers”, *Construction and Building Materials*, v.45, pp. 1-10, 2013.
- [17] RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., *et al.*, *Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise*. 1.ed. Rio de Janeiro, Elsevier, 2014.
- [18] ALMEIDA, N., BRANCO, F., BRITO, J., *et al.*, “High-performance concrete with recycled stone slurry”, *Cement and Concrete Research*, v.37, pp. 210-220, 2007.
- [19] MENADI, B., KENAI, S., KHATIB, J., *et al.*, “Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand”, *Construction and Building Materials*, v.23, pp.625-633, 2009.
- [20] GAMEIRO, F., BRITO, J., SILVA, D.C. “Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry”, *Engineering Structures*, v. 59, pp. 654-662, 2014.
- [21] ANDRÉ, A., BRITO, J., ROSA, A., *et al.*, “Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste”, *Journal of Clean Production*, v.65, pp.389-396, 2014.
- [22] LIU, G., ZHANG, Y., NI, Z., *et al.*, “Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution”, *Construction and Building Materials*, v.115, pp. 1-5, 2016.
- [23] FAJARDO, G., VALDEZ, P., PACHECO, J. “Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides”, *Construction and Building Materials*, v.23, pp.768-774, 2009.