

## **Preparação de materiais cimentícios a partir da mistura de casca de ovo com lodo de anodização de alumínio ou com lodo de vidro ou com resíduo de abrasivo**

### *Preparation of cementitious materials by mixing eggshell with aluminum anodizing sludge or glass sludge or abrasive residue*

**Diego Valdevino Marques, mestrando, Unisul**

marques.dv87@outlook.com

**Cristine De Pretto, graduanda, Unisul**

crisdepretto@yahoo.com.br

**Rachel Faverzani Magnago, professora doutora, Unisul**

rachelfaverzanimagnago@gmail.com

### **Resumo**

O cimento é um dos produtos mais consumidos mundialmente. Porém, seu processo produtivo gera impactos ambientais. Pode-se minimizar esses impactos substituindo-se certas matérias-primas por resíduos de outros processos. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a produção cimentos a partir de resíduos usando três misturas diferentes: casca de ovo com lodo alumínio anodizado, casca de ovo e lodo de vidro e de casca de ovo com abrasivo. As cascas de ovos foram primeiro calcinadas e depois misturadas com cada um dos outros resíduos. As misturas cimentícias obtidas apresentaram a propriedade ligante do cimento, porém com resistências à compressão variando de aproximadamente 60 a 300 vezes inferior à do cimento comercial preparado e testado nas mesmas condições. Tal resultado pode estar relacionado ao fato das misturas obtidas apresentarem quantidades inferiores de alguns componentes importantes na formação da resistência do cimento. Desta forma, pode ser interessante adicionar quantidades suplementares destes componentes.

**Palavras-chave:** Materiais cimentícios; Casca de ovo; Lodo de anodização de alumínio; Lodo de vidro; Abrasivo

### **Abstract**

*Cement is one of the most consumed products in the world. However, its production process generates environmental impacts. These impacts can be minimized by replacing certain raw materials with residues from other processes. Thus, this work aimed to evaluate the production of cementitious materials from residues using three different mixtures: eggshell with aluminum anodizing sludge, eggshell with glass sludge and eggshell with abrasive. The eggshells were, firstly,*

*calcined and, then, mixed with one of the other residues. The cementitious mixtures obtained showed the cement binder property, but with compressive strengths varying approximately 60 to 300 times lower than the commercial cement prepared and tested under the same conditions. This result may be related to the fact that the obtained mixtures present lower amounts of some important components in the cement strength formation. Thus, it may be interesting to add additional quantities of these components.*

**Keywords:** *Cementitious materials; Eggshell; Aluminum anodizing sludge; Glass sludge; Abrasive*

## 1. Introdução

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, ficando atrás apenas da água (GAGG, 2014). O cimento, por sua vez, é um dos ingredientes para a produção do concreto, sendo o agente ligante que une os agregados para formar o concreto (GAGG, 2014). A produção mundial de cimento em 2018 foi estimada em 4,1 bilhões de toneladas métricas (TM), quase que o triplo do que era produzido mundialmente há vinte anos (1,5 bilhões TM). Esse aumento se deve, em grande parte, devido à expansão da produção em países em desenvolvimento, com destaque para a China. O Brasil teve uma produção de cimento estimada em 52 milhões de toneladas métricas no ano de 2018 (SERVIÇO GEOLÓGICO DOS ESTADOS UNIDOS, 2020; WWF, 2008).

O cimento mais utilizado na construção civil é o cimento Portland, que, normalmente, é obtido pela mistura de calcário, argila e outros materiais que contenham óxido de ferro. Esses materiais são queimados a altas temperaturas, dando origem ao clínquer. O clínquer é então moído e a ele, pode-se adicionar gipsita, para retardar o tempo de “pega” (endurecimento do cimento) ou outros agentes de moagem. A mistura é novamente moída, resultando no cimento Portland comercial (NEVILLE; BROOKS, 2012).

A rocha calcária é fonte mais comum de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) usada na produção do cimento, que após sofrer calcinação no forno rotativo, dá origem ao óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), composto presente em maior quantidade no cimento. Enquanto que as argilas são as matérias-primas mais usuais para a obtenção dos aluminossilicatos, por exemplo,  $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$  (CHATTERJEE, 2018; BYE, 2011). Após o aquecimento das matérias-primas, o produto obtido (clínquer) é uma mistura grumosa contendo silício (Si), cálcio (Ca), ferro (Fe) e alumínio (Al), que se encontram distribuídos em quatro compostos estáveis principais: alita ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ), belita ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), aluminato de cálcio ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ) e ferro-aluminatos de cálcio ( $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ ) (GAGG, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2012). A Tabela 1 apresenta a faixa de valores da composição do cimento Portland comum em termos de óxidos.

**Tabela 1: Limites aproximados da composição de óxidos do cimento Portland**

Óxido	Teor (%)
CaO	60-67
SiO <sub>2</sub>	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5-6,0
MgO	0,1-4,0
Álcalis (Na <sub>2</sub> O e K <sub>2</sub> O)	0,2-1,3
SO <sub>3</sub>	1-3

Fonte: NEVILLE; BROOKS, 2012.

A cadeia produtiva de cimento gera emprego e renda, porém também impactos ambientais negativos. Um exemplo é a extração de grandes quantidades de rocha calcária, que pode causar a extinção de espécies nas áreas próximas, destruição de áreas úmidas, poluição do ar por emissão de poeira e partículas poluentes, contaminação de águas superficiais e subterrâneas rasas, além de consumir quantidade significativa de água (WANG et al., 2018).

Uma forma de se minimizar os impactos ambientais pode ser por meio da utilização de resíduos gerados durante a manufatura de um produto como matéria-prima para a produção de um outro (CANBEK; SHAKOURI; ERDOĞAN, 2020; CHANG et al., 2020; GE et al., 2020). Desta forma, pode-se avaliar a substituição das matérias-primas do clínquer por resíduos que possuam uma composição semelhante e verificar se o resultado obtido é satisfatório de forma que a substituição se torne aplicável na prática cotidiana.

Exemplos de resíduos que podem ser candidatos a substituir os insumos para a produção de clínquer do cimento são: a casca do ovo, o lodo da anodização do alumínio, o lodo de vidro e o resíduo de abrasivo.

Ovos de galinhas e outras aves são consumidos diariamente no mundo inteiro. Em 2013, foram consumidos mundialmente 73,8 milhões de toneladas de ovos no mundo, um consumo 152% maior do que há trinta anos, em 1983. O Brasil se encontra entre os dez maiores produtores de ovos do mundo (FAO, 2015). Normalmente, são consumidas a clara e a gema, sendo a casca, juntamente com sua membrana, descartadas. A casca e a membrana representam aproximadamente 11% da massa total do ovo. De forma geral, a casca é composta por 94-97% em massa de carbonato de cálcio, 0,2-1% de fosfato de cálcio, 0,2-1% de carbonato de magnésio, 2-4% de matéria orgânica e 0,1% de outras substâncias. A membrana possui, majoritariamente, matéria orgânica, contendo principalmente proteínas (BALÁŽ, 2018; BINICI et al., 2015; RIVERA et al., 1999). Pode-se perceber que a casca possui como principal componente o carbonato de cálcio, principal componente, também, da rocha calcária.

A anodização do alumínio tem como função proteger o alumínio contra corrosão, reduzir de imperfeições superficiais oriundas de processos anteriores, elevar sua resistência à abrasão e aumentar o seu isolamento elétrico. Para isso, forma-se uma camada externa de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) ao redor do material de alumínio. Durante o processo de anodização, o alumínio é colocado em contato com produtos químicos como soluções de hidróxido de sódio, de ácido sulfúrico, entre outros. Entre cada etapa, o material é lavado com água para não levar impurezas para a etapa seguinte. Assim, durante o processo são gerados efluentes de natureza ácida e básica, de forma concentrada ou diluída. Esses efluentes são tratados para poderem ser descartados, gerando no fim do tratamento um efluente tratado líquido e um sólido (NUERNBERG, 2018; SPRICIGO, 2017; SARTOR, 2006). O efluente sólido é chamado de lodo de alumínio anodizado ou lodo da anodização do alumínio (LAA). Esse resíduo, em massa seca, possui em sua composição, cerca de 58,2% em massa de  $Al_2O_3$ , 3,6% de  $SiO_2$ , 0,3% de  $Fe_2O_3$ , sendo o restante, em sua maioria, outros óxidos (SPRICIGO, 2017).

Os vidros destinados ao uso na indústria civil podem passar pelo processo de acabamento de lapidação e polimento, sendo que água é usada para amenizar o atrito e a temperatura dos rebolos durante o processo. Essa água pode ser tratada e reutilizada no processo. Durante o tratamento são adicionados produtos químicos para a decantação das partículas de vidro desgastado. Depois de prensadas, as partículas de vidro desgastado dão origem ao resíduo sólido denominado lodo de vidro (LV) (ANTÔNIO, 2012). O lodo de vidro apresenta na sua composição, em média, 68% em massa de  $SiO_2$ , 10% de  $CaO$ , 3% de  $Al_2O_3$ , 0,35% de  $Fe_2O_3$ , além de outros compostos (GUIGNONE, 2017).

Na indústria, uma técnica muito usada para o corte de materiais é o corte usando jato de água pressurizada com abrasivo. Essa técnica possibilita desde o corte de materiais delicados, como cerâmicas e vidros, até cortes de materiais mais pesados como aços e outros materiais ferrosos. Um tipo de abrasivo que pode ser utilizado é um pó proveniente de uma

rocha chamada almandina, sendo esse um material inerte. A almandina possui em sua composição, entre outros componentes, cerca de 36% em massa de  $\text{SiO}_2$ , 30% de  $\text{FeO}$ , 20% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 2% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (BERMUDES, 2018). Após o uso da água com abrasivo para o corte do material, o abrasivo pode ser separado da água e reutilizado tanto no mesmo processo por mais alguns ciclos ou em outros processos.

Diante da relevância mundial, do significativo aumento da produção de cimento e da importância de se adotar o uso de resíduos de processos como insumos de outros para diminuir o impacto ambiental, seja do resíduo gerado ou da extração de recursos minerais, este trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de produção de cimento a partir de diferentes resíduos e qual a combinação de resíduos mais adequada, sendo as combinações exploradas: mistura de casca de ovo com lodo de anodização de alumínio, mistura de casca de ovo com lodo de vidro e mistura de casca de ovo com abrasivo.

## **2. Materiais e métodos**

### **2.1. Materiais**

As cascas de ovos foram doadas pela empresa Palmas Hotel & Spa (Governador Celso Ramos-SC). O lodo de alumínio anodizado foi doado pela empresa Hydro (Tubarão-SC). O lodo de vidro foi doado pela empresa Personal Glass (Palhoça-SC) e o abrasivo garnet foi doado pela empresa XEXEUMAR Metalúrgica Náutica (São José-SC).

### **2.2. Métodos**

#### **2.2.1. Preparo dos insumos**

Para o preparo da casca de ovo calcinada, as cascas dos ovos foram, primeiramente, colocadas em uma estufa a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , por 24 horas. Depois, foram trituradas em um moedor de pedras e passadas em uma peneira com granulometria de  $75\text{ }\mu\text{m}$ . Posteriormente, o material foi queimado usando-se um bico de Bunsen e, em seguida, tratado termicamente a  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , por 4 horas, em uma mufla. Após resfriar, uma amostra foi retirada para a realização da caracterização química e o restante armazenado para o uso no preparo dos corpos de prova.

Tanto lodo de alumínio quanto o de vidro, após recebidos, ficaram em estufa, a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , por três horas. Na sequência, foram destorroados com auxílio do moedor de pedras e peneirados usando-se a peneira de  $75\text{ }\mu\text{m}$ . Uma amostra de cada lodo foi separada para a caracterização química e o restante armazenado para ser usado no preparo dos corpos de prova.

O abrasivo garnet foi utilizado como recebido.

### 2.2.2. Caracterização química dos insumos

A amostra de casca de ovo foi enviada para o Laboratório de Química Ambiental e Instrumental (UNIOESTE Marechal Cândido Rondon) para a realização da caracterização por espectrometria de absorção atômica.

As amostras do lodo de alumínio anodizado, do lodo de vidro e do abrasivo foram enviadas para o Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (SENAI de Criciúma), onde foram submetidos a análise química por espectrometria de fluorescência de Raios-X e espectrometria de absorção atômica. Os ensaios foram realizados segundo PR-CR-097, PRCR-098 e PR-CR-103.

### 2.2.3. Preparo dos corpos de prova

A casca de ovo calcinada foi misturada com resíduo (lodo de alumínio ou lodo de vidro ou abrasivo) e, depois, as misturas foram colocadas em cadinhos e levadas à mufla, a 1300 °C, por 2 h. A proporção utilizada de cada insumo está apresentada na Tabela 2. As proporções foram elaboradas de forma que a composição química da mistura ficasse semelhante à do cimento Portland.

**Tabela 2: Composição dos cimentos**

	Massa de casca de ovo calcinada (g)	Massa do outro insumo (g)
Cimento de COC e LAA	26,28	3,72
Cimento de COC e lodo de vidro	25,82	4,18
Cimento de COC e abrasivo	26,20	3,80

Fonte: elaborado pelos autores.

Após retiradas da mufla, à cada mistura foi adicionado 92 g de areia com granulometria de 150 µm. Depois, foram adicionados 40 mL de água e as misturas foram colocadas em moldes com 50 mm de diâmetro. Passadas 24 h, os corpos de prova foram retirados dos moldes e submergidos totalmente em água por 7 dias. Finalmente, os corpos de prova foram retirados da água e encaminhados para o ensaio mecânico de compressão.

### 2.2.4. Ensaio mecânico de compressão

O teste mecânico de compressão foi realizado usando-se uma célula de carga de 5 kN em um equipamento de teste universal (EMIC DL-30000). Os corpos de prova foram submetidos a incrementos de pressão até a deformação plástica, à temperatura ambiente.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Caracterização química dos insumos

As composições em termos de óxidos obtidos para a casca de ovo calcinada, o lodo de alumínio anodizado, o lodo de vidro e o abrasivo garnet são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3: Composição em termos de óxidos para o lodo de alumínio anodizado, lodo de vidro e abrasivo garnet**

Óxido	Casca de ovo calcinada (%)	Lodo de alumínio anodizado (%)	Lodo de vidro (%)	Abrasivo garnet (%)
CaO	70,75	0,29	8,1	1,50
SiO <sub>2</sub>	-	0,48	64,75	35,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	66,16	3,38	21,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,24	0,31	31,00
MgO	0,75	-	3,14	8,00
Na <sub>2</sub> O	-	1,32	12,28	-
K <sub>2</sub> O	-	-	0,07	-
SO <sub>3</sub>	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,24	-	0,05
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	1,00
MnO	-	-	-	0,50
Outras substâncias	29,17	31,27	7,97	1,95
Total percentual	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: elaborado pelos autores.

Na Tabela 3, pode-se observar que a casca de ovo após ter sido calcinada, decompondo o CaCO<sub>3</sub> em CaO e CO<sub>2</sub>, apresentou 70,75% de CaO. Também se nota que os três insumos possuem quantidades muito inferiores de óxido de cálcio quando comparados à esta quantidade na composição do cimento (60-67%), justamente por isso se faz necessária a adição da casca de ovo calcinada à mistura. A quantidade de SiO<sub>2</sub> no cimento varia de 17-25%, desta forma, nota-se o LAA apresentou uma quantidade inferior (0,48%) e o lodo de vidro e de alumínio quantidades superiores, 64,75% e 35,00% respectivamente. Em relação ao Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o LAA e o abrasivo apresentaram quantidades de 66,16% e 21,00% respectivamente, enquanto o lodo de vidro apresentou o valor 3,38%, dentro do intervalo quanto comparado ao teor deste componente no cimento tradicional (3-8%).

Quando comparado aos valores obtidos na literatura, nota-se que o LAA apresentou valor um pouco maior para o óxido de alumínio (58,2% na literatura) e menor valor para o óxido de silício (3,6% na literatura) (SPRICIGO, 2017). Já o lodo de vidro apresentou valor um pouco menor para o SiO<sub>2</sub> (68%), para o CaO (10%) e praticamente igual para o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3%) e para o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,35%) (GUIGNONE, 2017). A composição obtida para o abrasivo valor semelhante para o SiO<sub>2</sub> (36%) e para o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20%), porém valor bem superior para o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2%) (BERMUDES, 2018).

### 3.2. Composição dos cimentos

A Tabela 4 mostra como ficou a composição dos cimentos após a mistura da casca de ovo calcinada com cada um dos outros insumos.

**Tabela 4: Composição em termos de óxidos para os cimentos produzidos a partir de casca de ovo calcinada e lodo de alumínio anodizado ou lodo de vidro ou abrasivo garnet**

Óxido	COC + LAA (%)	COC + lodo de vidro (%)	COC + abrasivo garnet (%)	Cimento (NEVILLE; BROOKS, 2012) (%)
CaO	62,00	62,00	62,00	60-67
SiO <sub>2</sub>	0,06	9,03	4,42	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,21	0,47	2,65	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,04	3,91	0,5-6,0
MgO	0,66	1,08	1,67	0,1-4,0
Outras substâncias	29,05	27,37	25,35	-
Total percentual	100,00	100,00	100,00	-

Fonte: elaborado pelos autores.

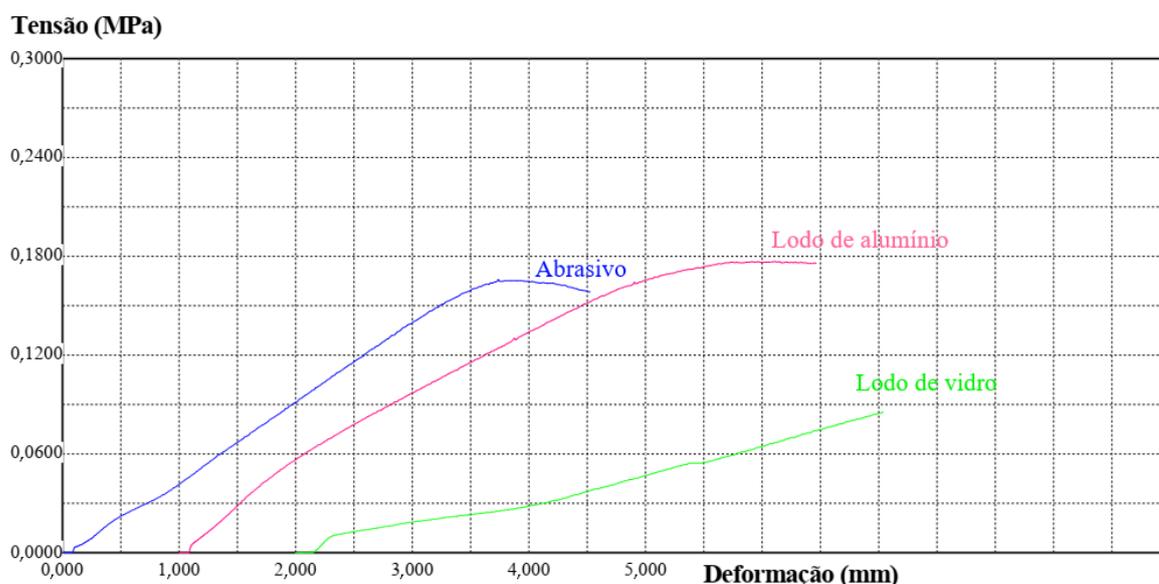
A partir dos valores apresentados na Tabela 4 pode-se observar que todos os cimentos apresentaram valor de CaO dentro dos limites apresentados para o cimento tradicional. Isso aconteceu justamente porque as massas foram dimensionadas para que esse óxido estivesse dentro dos limites do cimento Portland comum e para que os cimentos dos diferentes resíduos tivessem a mesma quantidade desse óxido.

Em relação à sílica (SiO<sub>2</sub>), todos os cimentos tiveram valores abaixo do limite inferior da quantidade presente no cimento tradicional. Para o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o cimento com LAA apresentou valor um pouco superior do limite superior do cimento tradicional enquanto os outros dois cimentos de resíduos apresentaram valores abaixo do limite inferior. Quanto ao Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, apenas o cimento com abrasivo apresentou valor dentro da faixa do cimento tradicional, enquanto os outros dois cimentos de resíduos apresentaram valores inferiores.

Apesar de apresentar quantidades inferiores de alguns componentes quando comparados ao cimento Portland comercial, todas as misturas cimentícias testadas apresentaram a propriedade ligante que um material cimentício deve possuir, mantendo todo o corpo de prova unido.

### 3.3. Ensaio mecânico de compressão

A Figura 1 apresenta o resultado do ensaio de compressão para as três misturas.



**Figura 1: Gráfico do ensaio mecânico de compressão para as três misturas cimentícias produzidas (Fonte: elaborado pelos autores)**

A mistura cimentícia que apresentou maior resistência foi a composta pela casca de ovo calcinada e lodo de anodização de alumínio, chegando praticamente a resistência de 0,18 MPa. Em seguida, a mistura contendo casca de ovo calcinada e abrasivo apresentou resistência de 0,17 MPa. Por último, a mistura de casca de ovo calcinada com lodo de vidro teve resistência de 0,03 MPa.

Também foi realizado um ensaio com um corpo de prova feito com o cimento Portland comercial submetido às mesmas condições de preparo das outras misturas cimentícias, sendo que a resistência máxima obtida para o cimento comercial foi de 10,82 MPa. Comparando-se os valores dos resultados das misturas cimentícias de resíduos com o cimento comercial, nota-se que as resistências a compressão das misturas feitas com resíduos foram muito inferiores ao do preparo com cimento comercial, sendo a do lodo de anodização do alumínio e do abrasivo cerca de 60 vezes menor e a do lodo de vidro mais de 300 vezes menor.

O resultado significativamente inferior à compressão das misturas cimentícias pode ter ocorrido devido ao fato de se ter pouco óxido de silício nos materiais, desta forma, a formação das fases alita ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ), belita ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), responsáveis por dar resistência ao material (NEVILLE; BROOKS, 2012) fica prejudicada. Por outro lado, pode-se observar que a mistura que apresentou a maior resistência, o cimento com LAA, foi o que possui menor quantidade de óxido de silício e o que possui menor resistência foi o que possui a maior quantidade desse óxido. Talvez tal fenômeno possa ser explicado pela maior presença de óxido de alumínio no LAA. Apesar da formação do composto aluminato de cálcio ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ) não influenciar diretamente a resistência do material, ela facilita a combinação do óxido de cálcio com a sílica (NEVILLE; BROOKS, 2012).

#### 4. Conclusão

A produção de cimento a partir de resíduos é interessante do ponto de vista ambiental, pois pode-se minimizar os impactos causados, por exemplo, pela exploração mineral das matérias-primas e utilização de resíduos de outros processos produtivos. As três misturas cimentícias produzidas a partir da casca do ovo calcinada e um dos três seguintes insumos: lodo de alumínio anodizado, lodo de vidro e abrasivo garnet apresentaram a propriedade ligante do cimento, porém com resistências à compressão muito inferiores à do cimento comercial: 0,18 MPa, 0,03 MPa e 0,17 MPa, respectivamente, sendo que o cimento comercial preparado e testado nas mesmas condições apresentou resistência à compressão de 10,82 MPa. Essa disparidade pode estar relacionada ao fato das misturas obtidas apresentarem quantidades inferiores de alguns componentes importantes na formação dos compostos que proporcionam ou auxiliam na formação da resistência do cimento. Desta forma, pode ser interessante adicionar quantidades suplementares desses óxidos, nomeadamente a sílica e o também óxido de alumínio.

#### Agradecimentos

Agradecemos à metalurgia náutica Xexeumar (SC, Brasil) e Hydro (SC, Brasil) pela doação de resíduos de lodo de óxido de alumínio. Este trabalho foi apoiado pela Fundação Amparo para Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina [Nº 06/2017] e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

#### Referências

- ANTÔNIO, A. P. Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.
- BALÁŽ, M. Ball milling of eggshell waste as a green and sustainable approach: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 256, p. 256–275, jun. 2018.
- BERMUDES, M. Identificação e caracterização dos resíduos sólidos e líquidos gerados no corte das placas de UHMWPE utilizadas no processo de fabricação de filtros para o setor canavieiro. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental)—Ribeirão Preto: Universidade de Ribeirão Preto, 2018.
- BINICI, H. et al. Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with cement, sand and egg shells. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 1145–1150, set. 2015.
- BYE, G. C. *Portland cement*. 3. ed ed. London: ICE Publishing, 2011.
- CANBEK, O.; SHAKOURI, S.; ERDOĞAN, S. T. Laboratory production of calcium sulfoaluminate cements with high industrial waste content. *Cement and Concrete Composites*, v. 106, p. 103475, fev. 2020.

CHANG, Z. et al. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 154, p. 104606, mar. 2020.

CHATTERJEE, A. K. *Cement Production Technology: Principles and Practice*. Milton: Chapman and Hall/CRC, 2018.

FAO. Egg facts. Disponível em:

<<http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/284410/>>. Acesso em: 8 jan. 2020.

GAGG, C. R. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, v. 40, p. 114–140, maio 2014.

GE, Z. et al. Use of green calcium sulphoaluminate cement to prepare foamed concrete for road embankment: A feasibility study. *Construction and Building Materials*, v. 237, p. 117791, mar. 2020.

GUIGNONE, G. C. Desempenho de concretos com a utilização de resíduos da lapidação do vidro como substitutos parciais ao cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. 2. ed. Porto Alegre-RS: Bookman, 2012.

NUERNBERG, N. B. DA S. Desenvolvimento e caracterização de geopolímeros a partir da cinza de casca de arroz e do lodo de anodização de alumínio. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)—Criciúma: Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2018.

RIVERA, E. M. et al. Synthesis of hydroxyapatite from eggshells. *Materials Letters*, v. 41, n. 3, p. 128–134, nov. 1999.

SARTOR, M. N. Caracterização do resíduo de anodização do alumínio como matéria-prima para o desenvolvimento de produtos cerâmicos. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

SERVIÇO GEOLÓGICO DOS ESTADOS UNIDOS. Cement statistics and information. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information>>. Acesso em: 7 jan. 2020.

SPRICIGO, L. P. Valorização de resíduos de vidro plano e de anodização de alumínio para síntese de geopolímero. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)—Criciúma: Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2017.

WANG, H. et al. A novel environmental restoration method for an abandoned limestone quarry with a deep open pit and steep palisades: a case study. *Royal Society Open Science*, v. 5, n. 5, p. 180365, maio 2018.

WWF. A blueprint for a climate friendly cement industry. Disponível em:

<[https://wwf.panda.org/wwf\\_news/?151621/A-blueprint-for-a-climate-friendly-cement-industry](https://wwf.panda.org/wwf_news/?151621/A-blueprint-for-a-climate-friendly-cement-industry)>. Acesso em: 7 jan. 2020.