

DESENVOLVIMENTO DE CIMENTOS ÁLCALI ATIVADOS COMPOSTOS COM RESÍDUOS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO ¹

FRASSON, B. J., Universidade Federal de Santa Catarina, email: bjfrasson@gmail.com;

ROCHA, J. C., Universidade Federal de Santa Catarina, email: janaide.rocha@ufsc.br

ABSTRACT

Wastes from coal washing has potential for being use as building materials, from pozzolanic materials to aluminosilicate sources in alkali-activated cements. The aim of this work was to evaluate the use of pre-treated mining residues (RCE and LMDT) in alkali-activated cements by analyzing the performance of different types of alkaline solutions and mechanical behavior of pastes. The results showed that the optimized alkali solutions was the composition of $Na_2SiO_3 + NaOH$ (solid), because wasn't appearance of efflorescence and had tendency to hardening. With that definition was mixed pastes to compressive strength test, the results showed low value for AARCE (1.83 MPa) in 24 hours and increase of strength for AALMDT (13.91 MPa). This research demonstrated the potential of using waste from coal mining, mitigating the environmental impacts.

Keywords: By-products. Coal gangue. Alkali-Activated.

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral é um combustível fóssil bastante utilizado, responsável por cerca de 40% da produção energética, os maiores produtores são China, EUA e Índia (IEA, 2016). Compostos de hidrocarbonetos formados a partir da decomposição de material orgânico, ao longo de milhões de anos, encontram-se intercalados em rochas como, por exemplo, arenitos, folhelhos, siltitos e outros (WCI, 2009).

No ano de 2014 segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015) a produção de carvão Bruto (ROM) foi de quase 14 milhões de toneladas no Brasil. O carvão brasileiro é de baixa qualidade, possui pouca capacidade de recuperação, gerando grande quantidade de resíduo sólido.

Conforme o DNPM (2010) o estado de Santa Catarina foi responsável pela produção de mais de 6.700 milhões de toneladas de ROM no ano de 2010, destes mais de 60% é rejeito sólido. Esses resíduos podem causar impactos ambientais tais como, drenagem ácida (SIMATE, NDLOVU, 2014; KEFENI, MSGATI, MAMBA, 2017) e combustão espontânea dos depósitos (NICHOL, TOVEY, 1998; MISZ-KENNAN, 2010; JELÍNEK et al, 2015).

Os resíduos de mineração são materiais heterogêneos, compostos principalmente de quartzo e caulinita (GONG et al, 2007; CAO et al, 2016; CUTRUNEO, 2016), com composição química predominante de SiO_2 e Al_2O_3 (LI et al, 2006; YAO, SUN, 2012; YAO et al, 2013; DONG et al, 2015; GARCIA et

¹ FRASSON, B. J., ROCHA, J. C. Desenvolvimento de cimentos alcali ativados compostos com resíduos de mineração de carvão. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

al, 2015; CAO et al, 2016; ZHANG et al, 2016; CUTRUNEO et al, 2014).

Na área de construção civil os resíduos de mineração têm sido aproveitados como agregados (DONG et al, 2015), matéria prima para produção de tijolos (ZHOU et al, 2014), materiais pozolânicos (LI et al, 2010; FRIAS et al, 2012; FRIAS et al, 2011; GARCIA et al, 2015; CAO et al, 2016) e, mais recentemente como pós em cimentos álcali ativados (DUAN e WANG, 2008; XU, ZHOU, YANG, 2014; XU, ZHOU, XEN, 2015; GENG et al, 2016; GENG et al, 2017).

Cimentos álcali ativados são cimentos compostos por pós de silicatos (precursores) e soluções alcalinas, os primeiros são geralmente subprodutos industriais ou argilas calcinadas (SHI, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, PALOMO, 2011). As soluções alcalinas são constituídas de reagentes industriais, normalmente hidróxidos e silicatos solúveis (ROVNANÍK, 2010; PELISSER, 2013; AYDIN e BARADAN, 2014; SAMSON, CYR, GAO; 2017).

De maneira geral os cimentos álcali ativados com baixo teor de cálcio apresentam bom desempenho mecânico (ROVNANÍK, 2010; BIGNOZZI et al, 2013; CHENG et al, 2015) e resistência à ataque de sulfatos (BAKHAREV, 2005; SLATY et al, 2015; SAAVEDRA, ÂNGULO, GUTIÉRREZ, 2016; DZUNUZOVIC et al, 2017; ZHANG et al, 2017).

Com base nesse contexto esse trabalho teve como objetivo o estudo preliminar para o desenvolvimento de cimentos álcali-ativado compostos de resíduos da mineração de carvão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

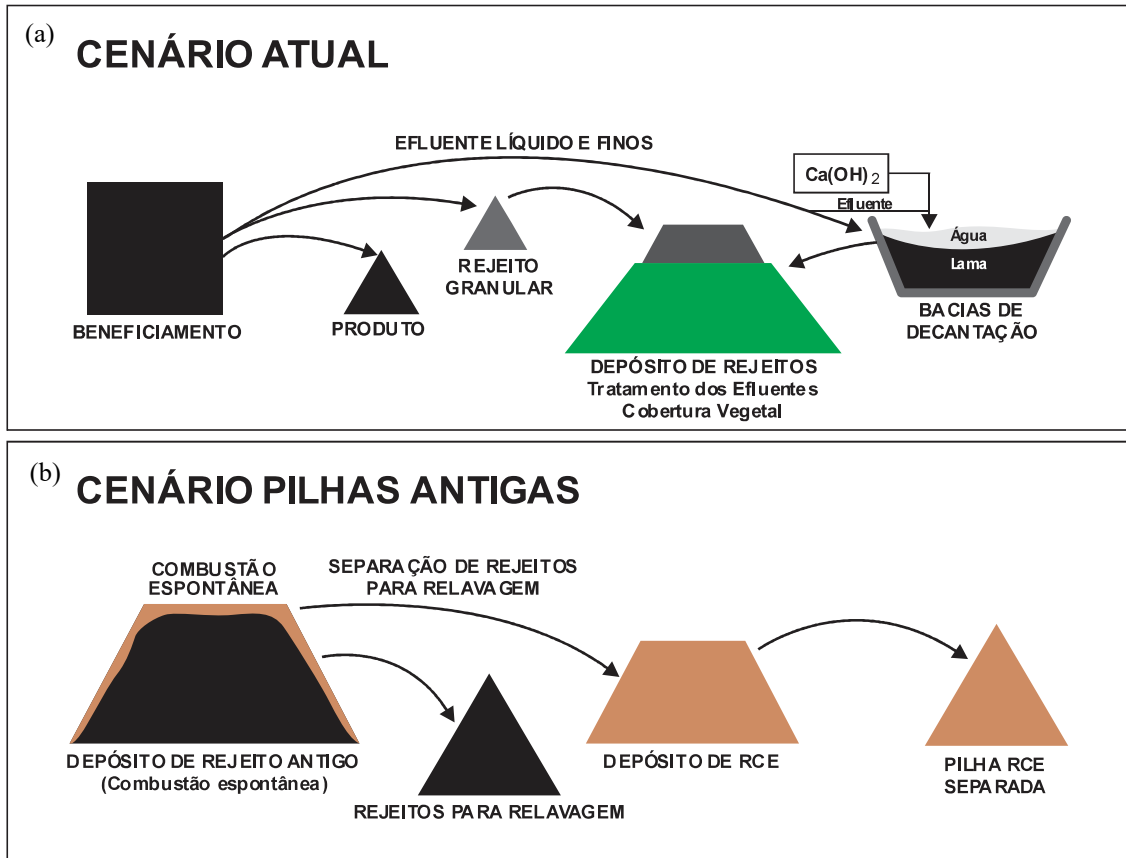
O programa experimental se dividiu em três etapas, (I) coleta, pré-tratamentos e caracterização dos resíduos; (II) otimização da solução ativadora; (III) análise da resistência mecânica das pastas álcali ativadas (AA).

Foram utilizados resíduos provenientes de plantas de beneficiamento de uma mineradora da região carbonífera de Santa Catarina. A Figura 1 apresenta o procedimento de geração e coleta desses materiais. Os resíduos coletados para as análises são os de combustão espontânea (RCE) e as lamas de bacias de decantação (LMD).

2.1 Pré-tratamentos dos resíduos

O pré tratamento consistiu em secagem dos resíduos (105°C por 24 horas, em estufa), moagem (AMEF, modelo AMBI 480 X 400), o LMD foi submetido a um ciclo de 30 minutos e o RCE a quatro ciclos de 90 minutos. Os RCE e LMD foram calcinados na temperatura de 700°C por 1 hora numa taxa de aquecimento de 10°C/minuto em um forno mufla (modelo Ceramic Furnaces KK 170 SO 1059), após a calcinação os resíduos foram denominados RCET e LMDT.

Figura 1 – Obtenção dos rejeitos de mineração (a) LMD; (b) RCE.



Fonte: Adaptado de Frasson (2018)

2.2 Materiais

Os resíduos pré-tratados obtiveram composição química de Si+Al de 74%, 69% e 90% para respectivamente RCE, RCET e LMDT, obtida por meio da análise de espectrometria dispersiva de Raio-X (EDX-7000, Shimadzu). Foi adotado o Cimento CP V-ARI na pasta referência. As soluções alcalinas (SA) foram preparadas adotando-se as composições fornecidas pelos fabricantes: silicato de sódio (DAV®: solução, Na₂O: 12,69%, SiO₂: 30,36% e H₂O: 56,95%), NaOH (VETEC®: sólido - 97%) e NaOH (Dinâmica®: solução - 18 N).

2.3 Métodos

Após a coleta dos resíduos brutos, foram realizados ensaios de determinação da umidade (ABNT NBR 16508: 2016), composição granulométrica (ABNT NBR 7211: 2009) e massa específica, pelo método do picnômetro.

Na segunda etapa do trabalho foram adotados diferentes tipos de soluções alcalinas, com o objetivo de observar o endurecimento e aparecimento de eflorescências, (i) Na₂SiO₃; (ii) Na₂SiO₃ + NaOH (sólido); (iii) Na₂SiO₃ + NaOH (18N); (iv) NaOH (18 N). Nas soluções compostas, a mistura consistiu em dissolver o NaOH diretamente no Na₂SiO₃ com auxílio de um agitador magnético.

Na obtenção das pastas a SA foi adicionada ao pó, e homogeneizados por 5 minutos, manualmente. Foram moldados corpos de prova de 2 x 2 cm (diâmetro x altura), sendo acondicionados hermeticamente fechados, curados em temperatura ambiente ou à 50°C, por 24 horas.

Na terceira etapa do procedimento experimental, foi utilizada a SA otimizada ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ com concentração de 10,3 N), na mistura com os pós RCE, RCET e LMDT. A dosagem das pastas dessa etapa foi de 1:1 (pó : solução ativadora).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma prensa Instron com célula de carga de 50 kN, na velocidade de 3.000 N/min. O software utilizado na prensa forneceu os dados brutos da deformação (mm/mm) durante a aplicação de carga (kN), que auxiliou na obtenção das curvas de tensão x deformação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resíduo LMD apresentou maior umidade e P.F. do que o RCE, devido ao processo de beneficiamento do ROM e aos pontos de coleta dos materiais. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para todas as amostras. Os subprodutos, partículas granulares apresentam D50 de aproximadamente 0,300 mm e 4,00 mm para respectivamente LMD e RCE. A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica das amostras. Essas características justificam os procedimentos de pré-tratamento, para que os resíduos possam ser utilizados na produção de cimentos álcali ativados.

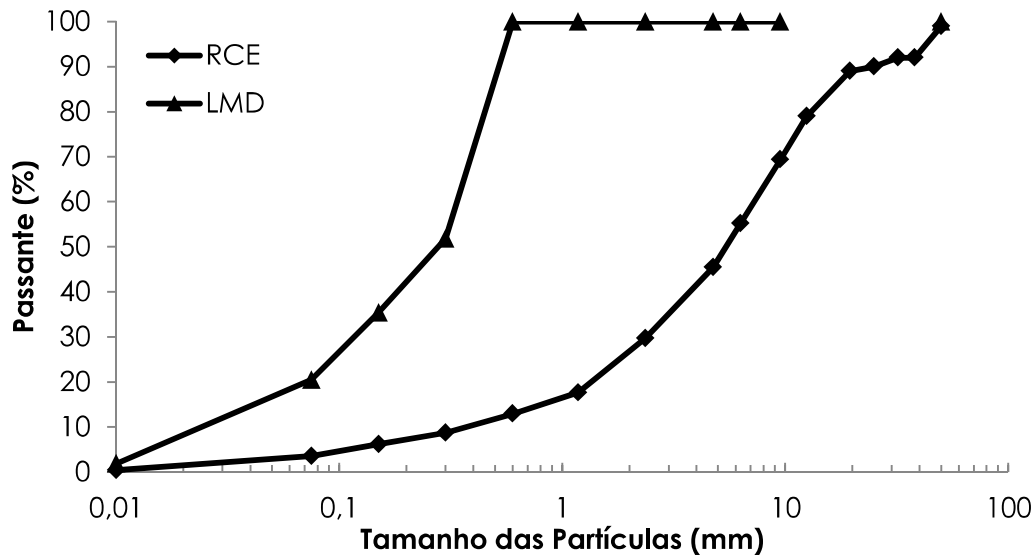
A Tabela 2 apresenta a síntese dos resultados da segunda etapa. As pastas apenas com NaOH (em solução) resultaram no aparecimento de eflorescências, diferente daquelas com silicatos solúveis e NaOH (sólido), conforme mostra a Figura 3. Não houve endurecimento em temperatura ambiente em qualquer caso. Diante desses resultados, foi definida a dosagem M9, e cura térmica para o prosseguimento da etapa três.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de caracterização dos resíduos brutos

Ensaio	RCE	LMD
(%) Umidade Total	18,59	92,14
(%) Umidade Ambiente	4,71	2,01
(%) Umidade Estufa	14,55	91,98
Massa Específica (g/cm ³)	2,03	2,001
(%) Perda ao Fogo (P.F.)	12,56	24,85
pH (método das fitas) (H ₂ O/Sólido~35)	5	6

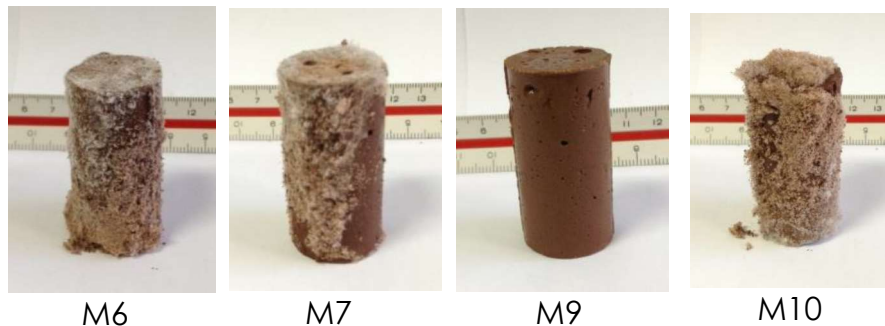
Fonte: Dos Autores (2018)

Figura 2 – Distribuição granulométrica dos resíduos brutos secos



Fonte: Dos Autores (2018)

Figura 3 – Análise visual do aparecimento de eflorescências



Fonte: Dos Autores (2018)

A Figura 4 apresenta os resultados de resistência à compressão, as pastas AARCE e AARCET apresentaram resistência considerada baixa após 24 horas (1,83 MPa e 2,20 MPa, respectivamente), bem como pouco ganho de resistência ao longo do tempo (2,57 MPa e 3,27 MPa respectivamente). De qualquer forma, cabe salientar que na amostra AARCET há um ganho de rigidez maior que a AARCE, conforme mostra a Figura 5.

A pasta AALMDT apresenta resistência alta e rigidez elevada se comparada com as pastas produzidas com os demais resíduos, com 13,91 MPa em 24 horas. O comportamento mecânico pode estar relacionado com a reatividade dos resíduos utilizados, ou seja, a presença de maiores teores de Si e Al em fases amorfas, implicando no desenvolvimento da microestrutura e ganho de resistência dos sistemas AA (LI, SUN, LI, 2010; ALONSO, PALOMO, 2001; GRANIZO, PALOMO, FERNANDEZ-JIMENEZ, 2014).

As composições avaliadas foram identificadas no diagrama ternário (Figura 6). Verifica-se uma região onde as pastas com teores de sódio acima de 20%, tiveram elevado aparecimento de eflorescências, decorrentes do preparo da SA com NaOH em solução. Já as pastas que se encontram na zona superior do diagrama, não apresentaram eflorescências, pois foram

compostas com Na_2SiO_3 solúvel e NaOH (sólido) nessas pastas houve endurecimento e ganho de resistência. Segundo Skvara et al (2008), as ligações entre os íons de sódio e os aluminossilicatos são fracas, podendo ser quebradas, explicando o aparecimento desse fenômeno.

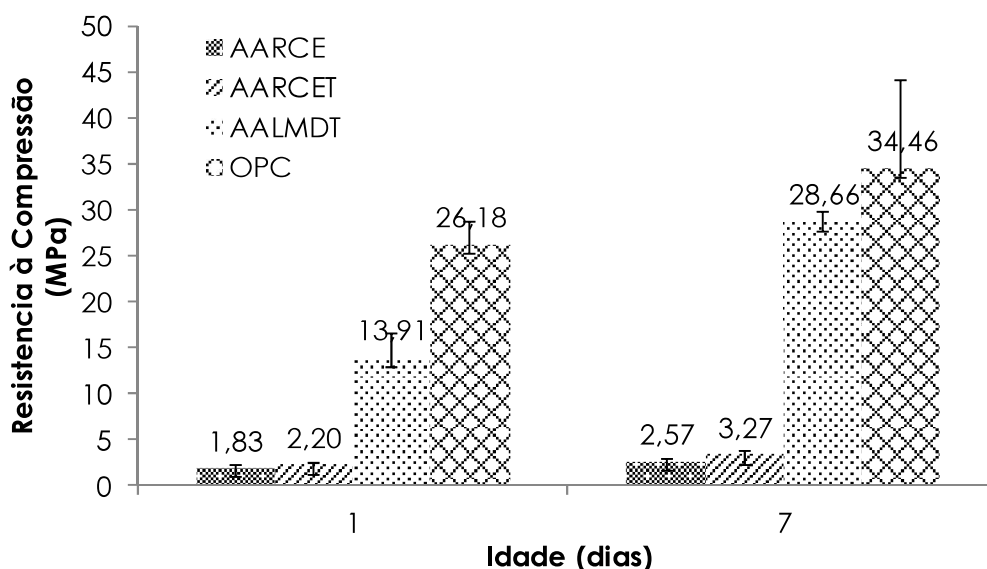
Tabela 2 – Análise das misturas da etapa dois do experimento

Dosagem	SA/P	Consistência	Endurecimento	Eflorescência – 24h
M1 - SN	1,0	Baixa	-	-
M2 – NaOH^2 (18M)	1,4	Alta	Sim	Alto
M3 - SN+ NaOH^1 (24M)	1,0	Alta	Não	Alto
M4 - SN+ NaOH^1 (15M)	0,7	Alta	Não	Baixo
M5 - SN+ NaOH^2 (18M)	0,7	Alta	Não	Baixo
M6 – NaOH^2 (18M)	0,6	Boa	Parcial	Alto
M7 – NaOH^2 (18M)	1,0	Boa	Parcial	Alto
M8 - SN+ NaOH^1 (10M)	0,7	Boa	Sim	Não
M9 - SN+ NaOH^1 (10M)	1,0	Boa	Parcial	Não
M10 - SN+ NaOH^2 (18M)	1,0	Alta	Sim	Alto

SN: silicato de sódio; SA: solução ativadora; P: pó; ¹ NaOH sólido; ² NaOH solução.

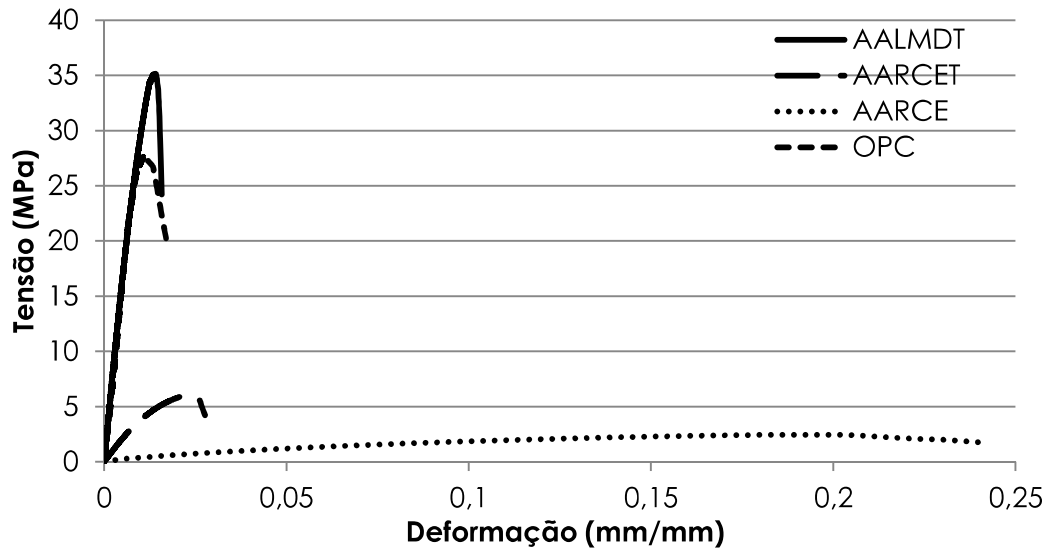
Fonte: Dos Autores (2018)

Figura 4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão



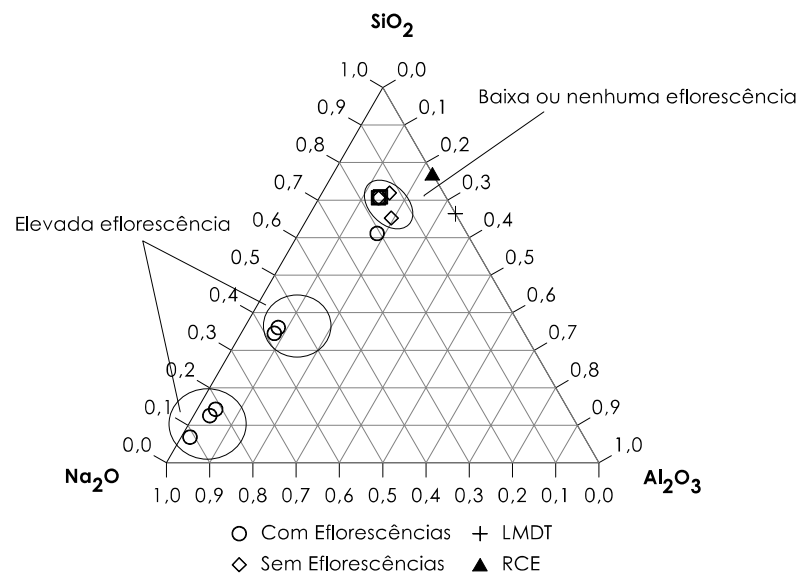
Fonte: Dos Autores (2018)

Figura 5 – Curvas tensão x deformação das pastas analisadas na idade de 24 horas



Fonte: Dos Autores (2017)

Figura 6 – Diagrama ternário síntese do estudo preliminar das pastas



Fonte: Adaptado de Frasson (2018)

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitem concluir que para produção de misturas álcali ativadas a partir de resíduos de carvão mineral:

- a solução ativadora ideal é aquela em que o NaOH é dissolvido no silicato de sódio (na concentração de 10 M), devido ao não aparecimento de eflorescências;
- há necessidade de realizar a cura térmica (em 50°C por 24 horas);
- o desempenho do resíduo LMDT é superior, com resistência à compressão alta nas primeiras idades e ganho ao longo do tempo.

Esse trabalho demonstrou o potencial de desenvolvimento de cimentos álcali ativado, compostos por resíduos de mineração de carvão, principalmente o LMDT, identificando os aspectos que limitam o desenvolvimento de SA nas aplicações com tais resíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

ALONSO, S.; PALOMO, A. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio.

Materials Letters, Madrid, n. 47, p.56-62, jan. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16508**: Carvão mineral - Teor de umidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

AYDIN, S.; BARADAN, B. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 57, p.166-172, fev. 2014.

BAKHAREV, T.. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 35, n. 6, p.1233-1246, jun. 2005.

CAO, Z.; CAO, Y.; DONG, H.; ZHANG, J.; SUN, C. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue. **International Journal of Mineral Processing**, [s.l.], v. 146, p.23-28, jan. 2016.

CHENG, H.; LIN, KL.; CUI, R.; HWANG, CL.; CHENG, TW.; CHANG, YM.. Effect of solid-to-liquid ratios on the properties of waste catalyst–metakaolin based geopolymers. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 88, p.74-83, jul. 2015.

CUTRUNEO, C. M. N. L.; OLIVEIRA, M. L. S.; WARD, C. R.; HOWER, J. C.; DE BRUM, I. A.S.; SAMPAIO, C. H.; KAUTZMANN, R. M.; TAFFAREL, S. R.; Teixeira, Elba C.; SILVA, L. F.O.. A mineralogical and geochemical study of three Brazilian coal cleaning rejects: Demonstration of electron beam applications. **International Journal of Coal Geology**, [s.l.], v. 130, p.33-52, ago. 2014.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro**. 2010.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. 2015.

DONG, Z.; XIA, J.; FAN, C.; CAO, J. Activity of calcined coal gangue fine aggregate and its effect on the mechanical behavior of cement mortar. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 100, p.63-69, dez. 2015.

DUAN, YF.; WANG, PM. Early Hydration of the Material of Alkali-Activated Coal Gangue. **Journal of Materials Science & Engineering**, Shanghai, v. 4, n. 26, p.511-515, ago. 2008.

DŽUNUZOVIĆ, N. et al. External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnace slag composite. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 157, p.737-747, dez. 2017.

FRASSON, B. J. **Aproveitamento de Subprodutos da Mineração de Carvão para Produção de Cimentos Álcali Ativados**. 2017. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

FRÍAS, M. ; LA VILLA, R. V.; ROJAS, M. S.; MEDINA, C.; JUAN VALDÉS, A. Scientific Aspects of Kaolinite Based Coal Mining Wastes in Pozzolan/Ca(OH)₂ System. **Journal of the American Ceramic Society**, [s.l.], v. 95, n. 1, p.386-391, 1 dez. 2011. Wiley-Blackwell.

FRÍAS, M. ; SANCHEZ DE ROJAS, M.I. ; GARCÍA, R. ; JUAN VALDÉS, A.; MEDINA, C.. Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 34, n. 5, p.678-683, maio 2012.

GARCÍA, R.; VIGIL DE LA VILLA, R.; FRÍAS, M.; RODRIGUEZ, O.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L.; DE SOTO, I. S.; VILLAR-COCIÑA, E. Mineralogical study of calcined coal waste in a pozzolan/Ca(OH)₂ system. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 108, p.45-54, maio 2015.

GARCÍA, R.; VIGIL DE LA VILLA, R.; FRÍAS, M.; RODRIGUEZ, O.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L.; DE SOTO, I. S.; VILLAR-COCIÑA, E.. Mineralogical study of calcined coal waste in a pozzolan/Ca(OH)₂ system. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 108, p.45-54, maio 2015.

GENG, J. ; ZHOU, M.; LI, Y.; CHEN, Y.; HAN, Y.; WAN, S.; ZHOU, X.; HOU, H. Comparison of red mud and coal gangue blended geopolymers synthesized through thermal activation and mechanical grinding preactivation. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 153, p.185-192, out. 2017.

GENG, J.; ZHOU, M.; ZHANG, T.; WANG, W.; WANG, T.; ZHOU, X.; WANG, X.; HOU, H. Preparation of blended geopolymer from red mud and coal gangue with mechanical co-grinding preactivation. **Materials and Structures**, [s.l.], v. 50, n. 2, p.1-11, 12 dez. 2016.

GONG, C.; LI, D.; WANG, X.; LI, Z. Activity and structure of calcined coal gangue. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, [s.l.], v. 22, n. 4, p.749-753, dez. 2007. Springer Nature.

GRANIZO, N.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMÉNEZ, A.. Effect of temperature and alkaline concentration on metakaolin leaching kinetics. **Ceramics International**, [s.l.], v. 40, n. 7, p.8975-8985, ago. 2014.

IEA – Internacional Energy Agency. **Key Coal Trends**. 2016.

JELÍNEK, P.; MARSCHALCO, M.; LAMICH, D.; YILMAZ, I.; ZASTĚROVÁ, P.; BEDNÁRIK, M.; HEVIÁNKOVÁ, S.; KYNCL, M.; DRUSA, M. ; RŮČKOVÁ, H. Monitoring and analysis of burning in coal tailing dumps: a case study from the Czech Republic. **Environmental Earth Sciences**, [s.l.], v. 73, n. 10, p.6601-6612, 22 nov. 2014.

KEFENI, K. K.; MSAGATI, T. A. M.; MAMBA, B. B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 151, p.475-493, maio 2017.

LI, C.; WAN, J.; SUN, H.; LI, L. Investigation on the activation of coal gangue by a new compound method. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 179, n. 1-3, p.515-520, jul. 2010.

LI, D.; SONG, X.; GONG, C.; PAN, Z. Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanic cement with coal gangue. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 36, n. 9, p.1752-1759, set. 2006.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 40, n. 9, p.1341-1349, set. 2010.

MISZ-KENNAN, M., 2010. Thermal alterations of organic matter in coal waste from Upper Silesia, Poland. **Mineralogia**, 41, 105–236.

NICHOL, D.; TOVEY, N.p.. Remediation and monitoring of a burning coal refuse bank affecting the Southsea Looproad at Brymbo, North Wales. **Engineering Geology, Wrexham**, v. 1, n. 50, p.309-318, maio 1998.

PELISSER, F. ; GUERRINO, E.L. ; MENGER, M. ; MICHEL, M.D. ; LABRINCHA, J.A.. Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 49, p.547-553, dez. 2013.

ROVNANÍK, P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 7, p.1176-1183, jul. 2010.

SAAVEDRA, W. G. V.; ANGULO, D. E.; GUTIÉRREZ, R. M. de. Fly Ash Slag Geopolymer Concrete: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack. **Journal of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 28, n. 12, p.04016148-04016157, dez. 2016. **American Society of Civil Engineers (ASCE)**.

SAMSON, G.; CYR, M.; GAO, X. Formulation and characterization of blended alkali-activated materials based on flash-calcined metakaolin, fly ash and GGBS. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 144, p.50-64, jul. 2017.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, Angel. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 7, p.750-763, jul. 2011.

SIMATE, G. S.; NDLOVU, S. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 2, n. 3, p.1785-1803, set. 2014.

SKVÁRA, F.; KOPECKÝ, L.; SMILAUER, V.; BITNAR, Z. Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 168, n. 2-3, p.711-720, set. 2009.

WCI – World Coal Institute. **The Coal Resource: a comprehensive overview of coal**. 2009

XU, Z.F.; ZOU, X.T.; CHEN, J. Preparation of thermal activation sludge and coal gangue polymer. **Intergr Ferro-electr**, v.160, n.1, p.1-9.

XU, Z.F.; ZOU, X.T.; YANG, Z. Preparation and properties of sludge and coal gangue composite geopolymer. **Asian J Chem**, [N.], v.26, n.6, p.327-345.

YAO, Y ; LI, Y ; LIU, XM ; JIANG, SS ; FENG, C ; RAFANAN, E. Characterization on a cementitious material composed of red mud and coal industry byproducts. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 47, p.496-501, out. 2013.

YAO, Y.; SUN, H.. A novel silica alumina-based backfill material composed of coal refuse and fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 213-214, p.71-82, abr. 2012.

ZHANG, Jian et al. Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 152, p.598-613, out. 2017.

ZHANG, N.; LI, H.; LIU, X.. Hydration mechanism and leaching behavior of bauxite-calcination-method red mud-coal gangue based cementitious materials. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 314, p.172-180, ago. 2016.

ZHOU, C., LIU, G., WU, S., LAM, P.K.S. The environmental characteristics of usage of coal gangue in bricking-making: a case study at Huainan, China, 2014, **Chemosphere**, 95, 274-280.