

COMPORTAMENTO DE CONCRETOS PLÁSTICOS FORMULADOS COM CIMENTO À BASE DE ESCÓRIA: UMA COMPARAÇÃO ENTRE ÁLCALI ATIVADOS E SUPERSULFATADOS

(Behavior of plastic concretes formulated with slag cement: a comparison between activated alkali and supersulfated)

K. Stedile¹; P. O. Trentin¹; C. Angulski da Luz¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Pato Branco, Brasil 1

kstedile@alunos.utfpr.edu.br

Resumo

O processo produtivo do cimento Portland é responsável pela liberação de 5% das emissões de CO₂ no mundo todo. Tendo em vista, aumentar a disponibilidade de matéria-prima, reduzir as emissões de CO₂ e o consumo de energia. O cimento supersulfatado (CSS) é composto por uma fonte de sulfato de cálcio, escória de alto-forno e uma pequena quantidade de ativador alcalino, por não haver presença de clínquer é considerado um cimento de baixo impacto ambiental. O cimento álcali ativado (CAT) é composto por materiais ricos em aluminatos, encontrados principalmente em subprodutos industriais, e uma fonte de ativador alcalino. O presente estudo avaliou a resistência mecânica do concreto plástico, à base de CSS, comparando seu desempenho ao do concreto plástico, à base de CAT. O concreto à base de CAT apresentou uma maior resistência mecânica mas também mostrou uma maior liberação de calor de hidratação.

Palavras chave: Concreto plástico, Cimento supersulfatado, Cimento álcali ativado.

Abstract

The Portland cement production process is responsible for the release of 5% of CO₂ emissions worldwide. With a view to increasing the availability of raw materials, reducing CO₂ emissions and energy consumption. The supersulfated cement (SSC) consists of a source of calcium sulfate, blast furnace slag and a small amount of alkaline activator, as no clinker is present as a low environmental impact cement. Alkali activated cement (AAC) is composed of materials rich in aluminates, mainly industrial by-products, and an alkaline activator source. The present study investigated the compressive strength of plastic concrete, based on CSS, comparing its performance to that of plastic concrete, based on AAC. AAC-based concrete presented higher compressive strength but also showed a greater heat release from hydration.

Keywords: Plastic concrete, Supersulfated cement, Alkali activated cement.

INTRODUÇÃO

O cimento Portland (CP) foi desenvolvido pelo construtor inglês Joseph Aspdin em 1824 [1]. Por suas características de resistência, durabilidade e fácil trabalhabilidade, o CP é um dos materiais mais utilizados na construção civil.

O cimento Portland é composto de clínquer e de diferentes adições que variam de um cimento para outro [2]. O clínquer é um produto do calcário e da argila, que são retirados de jazidas próximas das fábricas de cimento.

No processo de fabricação do cimento Portland há grande emissão de CO₂, originado principalmente da descarbonatação do carbonato de cálcio e da queima de combustíveis fósseis durante o aquecimento dos fornos [3]. Aproximadamente 90% das emissões de CO₂ ocorrem durante a produção do clínquer, sendo 50% emitido pela calcinação/descarbonatação da matéria-prima e 40% pela combustão no forno, os 10% restante resultam do transporte de matéria-prima e das emissões indiretas pelo consumo de energia elétrica [4].

A escória de alto-forno (EAF) é um resíduo da fabricação de ferro-gusa, e seu uso na produção do cimento proporciona uma diminuição do consumo de energia [5]. A EAF é vítrea e formada quando rapidamente esfriada por um processo chamado granulação [6]. Apesar das EAF's apresentarem propriedades hidráulicas latentes, suas reações de hidratação são lentas, ou seja, necessitam de ativadores químicos ou físicos para acelerar o processo de hidratação.

Os cimentos álcali-ativados (CAT) começaram a ser estudados a partir de 1940. A partir dessa época, grandes avanços foram alcançados, principalmente devido à ausência do clínquer, mas a adoção comercial deste cimento tem sido muito limitada. Apenas nos últimos 15-20 anos tornou-se difundido dentro da indústria de cimento e concreto [7].

Os CAT's são obtidos pela mistura de aluminossilicato como cinza volantes, escória de alto-forno, ou metacaulim com uma solução de ativador alcalino, como hidróxidos e silicatos [8]. Esses aglomerantes se apresentam como uma boa alternativa ao CP, visto que apresentam uma resistência à compressão, dureza e estabilidade compráveis [9]. Os CAT's podem ser gerados a partir do reuso de subprodutos da indústria, sendo que muitos desses não possuem destinação correta ou valorizada. Dessa forma pode-se considerar os CAT's como produtos de baixo impacto ambiental e com propriedades mecânica relevante para à engenharia civil [3].

A facilidade de ativação e hidratação das escórias depende principalmente da sua composição química, finura e do tipo do ativador alcalino utilizado [10]. Para obter resultados consideráveis, o tipo de ativador deve ser estudado em função da matéria-prima principal, pois a composição química e a granulometria condicionam a reação de ativação [11]. Matérias-primas ricas em cálcio produzem compostos hidratados como o silicato de cálcio hidratado, já matérias-primas

ricas em óxidos (SiO_2 e Al_2O_3) sem a presença de cálcio, formam um material aluminossilicato amorfo [7].

O cimento supersulfatado (CSS) surgiu em 1908 pela combinação de dois componentes: uma fonte de sulfato de cálcio e a escória de alto-forno [12]. O CSS, atualmente, é constituído basicamente de escória de alto-forno, de uma fonte de sulfato de cálcio e uma pequena quantidade de ativador alcalino, e por não haver a presença de clínquer também pode considerado um “cimento verde”, de baixo impacto ambiental.

Os CSS são compostos basicamente de 70 a 90% de escória de alto-forno, de 10 a 20% de sulfato de cálcio, e até 5% de um ativador alcalino. Geralmente os ativadores alcalinos mais utilizados são o cimento Portland, hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e carbonato de sódio (Na_2CO_3) [8]. As fontes de sulfato de cálcio utilizadas podem ser na forma de gipsita natural desidratado, anidrita ou ainda podem ser fontes sintéticas como o fosfogesso, dessulfogesso e fluorogesso.

De acordo com Gruskovnjak et al.[13] o CSS mostra uma resistência maior ao ataque de sulfatos e um menor calor de hidratação quando comparado ao CP comum. Revelou-se também, aumento da resistência ao ataque de ácidos, baixa permeabilidade, excelente retenção de umidade, baixa penetração de cloretos, alta resistência à reação álcali-agregado e redução dos impactos ambientais [12]. O CSS mostrou-se útil em aplicações que solicitem resistência à água do mar.

Ao adicionar o ativador alcalino, inicia-se o processo de hidratação do CSS, com a dissolução da escória formando a etringita e o C-S-H, sendo que quanto maior a formação de etringita maior será a resistência à compressão nas primeiras idades do cimento [8].

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento dos cimentos de baixo impacto ambiental, CAT e CSS, em concretos plásticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram usadas duas escórias. Ambas foram adquiridas na forma granulada e foram trituradas em moinho de bolas de porcelana. A escória destinada ao concreto à base de CAT, denominada A, foi triturada até obter superfície específica igual a $5112\text{cm}^2/\text{g}$. Sua massa específica é de $2,87\text{g}/\text{cm}^3$ e relação CaO/SiO_2 igual a 0,97, desta forma considerada como ácida. A escória destinada ao concreto à base de CSS, denominada B, foi submetida à moagem por 3 horas, até atingir superfície igual a $5087\text{cm}^2/\text{g}$. Sua massa específica é de $2,92\text{g}/\text{cm}^3$ e com relação CaO/SiO_2 igual a 1,34, desta forma é considerada como básica.

Os ativadores alcalinos utilizados foram hidróxidos de sódio em micropérolas da marca Isofar e cimento CP V ARI, cimento Portland de alta resistência inicial da marca Itambé, para o concreto à base de CAT e CSS respectivamente.

A fonte de sulfato de cálcio utilizada foi o fosfogesso, passado na peneira de 0,150mm e calcinado em mufla, a temperatura de 650°C, durante 1 hora, a uma taxa de aquecimento de 50°C/mim-1[14].

A composição química das matérias primas envolvidas na formulação dos cimentos (CAT e CSS) estão exibidas na Tabela I. Para fins de caracterização das escórias foi realizada a difração de raios-X (DRX), a qual apresentou caráter amorfo como mostra a Figura 1.

Para a composição do concreto foi utilizado areia natural e brita de origem basáltica normalizada pela NBR 7211.

Tabela I – Composição química da escória básica, escória ácida, fosfogesso e CPV-ARI (%)

Óxidos	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃
Escória A	38,1	37,0	13,9	6,2	1,3	1,1	0,9	0,8	0,2	0,1
Escória B	34,7	47,5	8,9	4,3	0,6	0,9	0,4	0,5	0,1	1,6
Fosfogesso	1,0	38,5	0,3	0,2	0,2	<0,1	0,1	-	-	46,8
CP-V-ARI	18,91	60,59	4,35	4,74	2,69	-	-	-	-	2,86

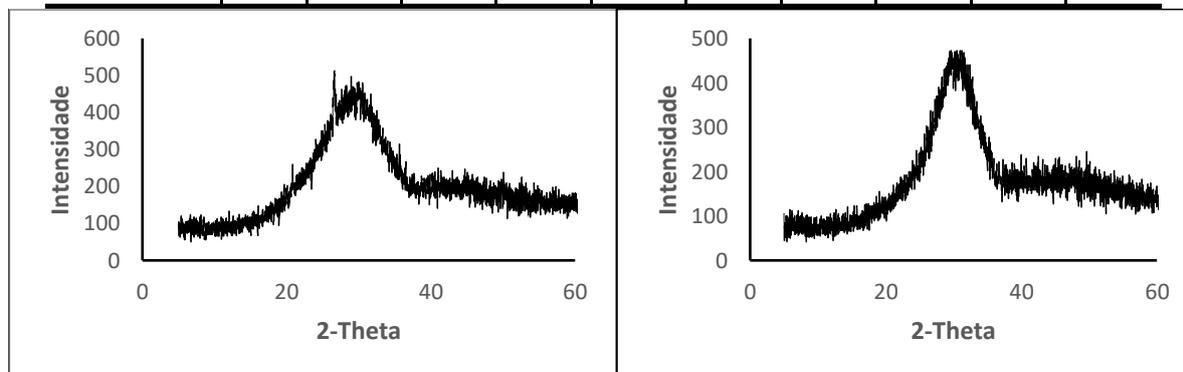


Figura 1 – DRX escória A (à esquerda) e B (à direita).

Inicialmente, definiu-se o teor dos componentes do cimento supersulfatado (escória de alto-forno, fonte de sulfato de cálcio e ativador alcalino), que foi 85:15:5% [15]. Para o cimento álcali ativado foi definido o teor de ativador alcalino de 5% da massa de escória por apresentar bons resultados em estudos anteriores [3]. A composição de cada cimento está exibida na Tabela II. A proporção de materiais utilizados para o concreto foi de 1:2:1:0.4 por apresentar melhores resultados em testes preliminares.

Tabela II – Composição dos cimentos à base de CSS e CAT.

Percentual (%)					
Cimento	Escória básica	Escória ácida	Sulfato de cálcio	Ativador alcalino	Ativador alcalino(% da massa de escória)
CSS	80	-	15	5	-

CAT	-	100	-	-	5
-----	---	-----	---	---	---

O método adotado para o preparo dos concretos, avaliação da resistência mecânica e determinação do índice de consistência normal seguiu a normativa NBR 7215 [16], apenas com uma pequena alteração no preparo do concreto à base de CAT, onde o ativador foi diluído na água antes do procedimento de mistura. As amostras foram acondicionadas em moldes prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm), adensados em três camadas de 15 golpes cada, e mantidas em câmara úmida, sob temperatura controlada de 23°C, e desmoldadas após 48 horas. O concreto à base de CSS foi submetido a cura imersa em água com cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) na solução de 3g/l. O concreto à base de CAT foi armazenado em ambiente de $\text{RH} > 95\%$ e temperatura de $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$ até, 7 e 28 dias para os testes de resistência à compressão. A Figura 2 mostra o espalhamento dos concretos à base de CAT e CSS.

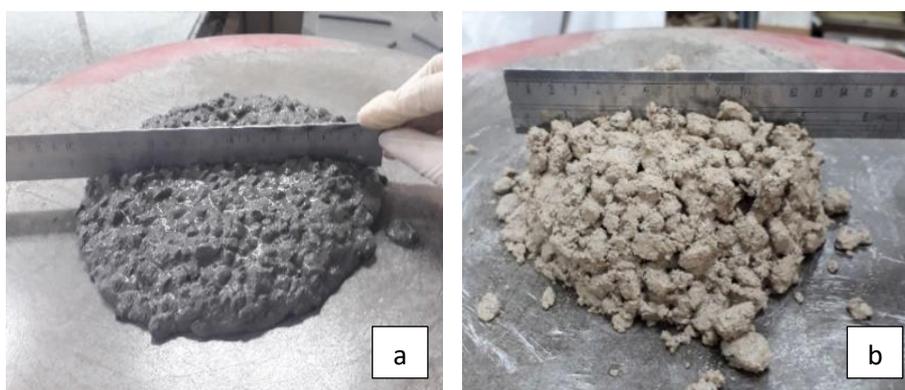


Figura 2 – Espalhamento do concreto à base de a) CAT b) CSS

Foram realizadas análises da calorimetria em concretos de CAT e CSS os quais foram monitorados por 7 dias em ambiente de 23°C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos à base de CAT e CSS. Observa-se que as amostras apresentaram uma evolução semelhante no ganho da resistência, entretanto, o concreto à base de CAT apresentou resistência mais elevada nas duas idades, aproximadamente 40% em 7 dias e mais de 100% em 28 dias comparado ao concreto à base de CSS. O desempenho do CAT resulta em um ganho de resistência de 28 MPa entre 7 e 28 dias, esses resultados se assemelham a outras pesquisas, Cadore (2018) [9] verificou ganho de resistência em concreto à base de CAT entre 7 e 28 dias de aproximadamente de 26 MPa.

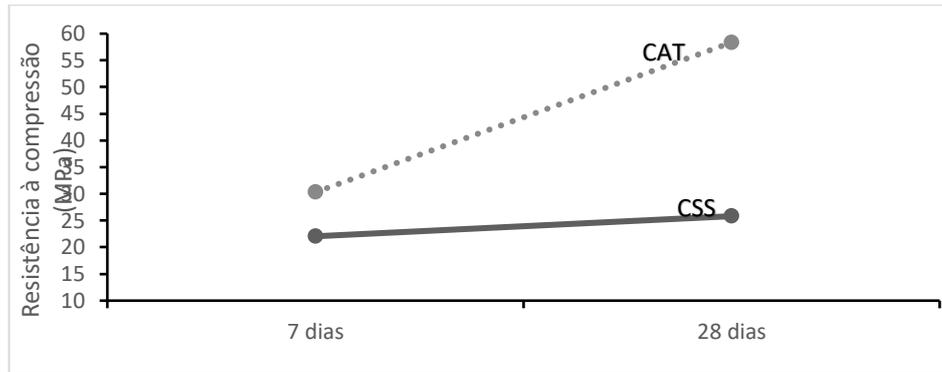


Figura 3 – Resistência mecânica dos concretos à base de CSS e CAT

Em relação às análises de calorimetria, percebe-se que o concreto à base de CSS apresentou uma menor taxa de calor comparado ao concreto à base de CAT, como pode-se observar na Figura 4.

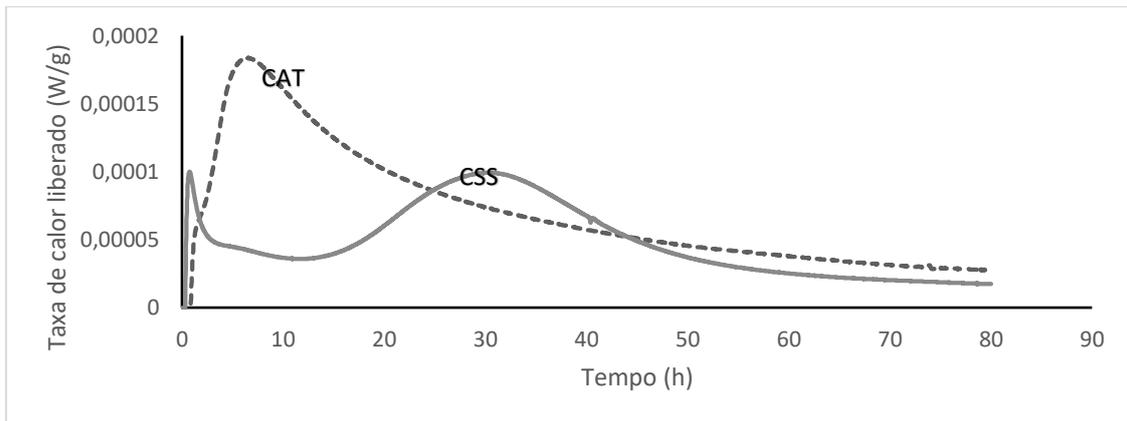


Figura 4 – Curvas de calorimetria de condução dos concretos à base de CSS e CAT

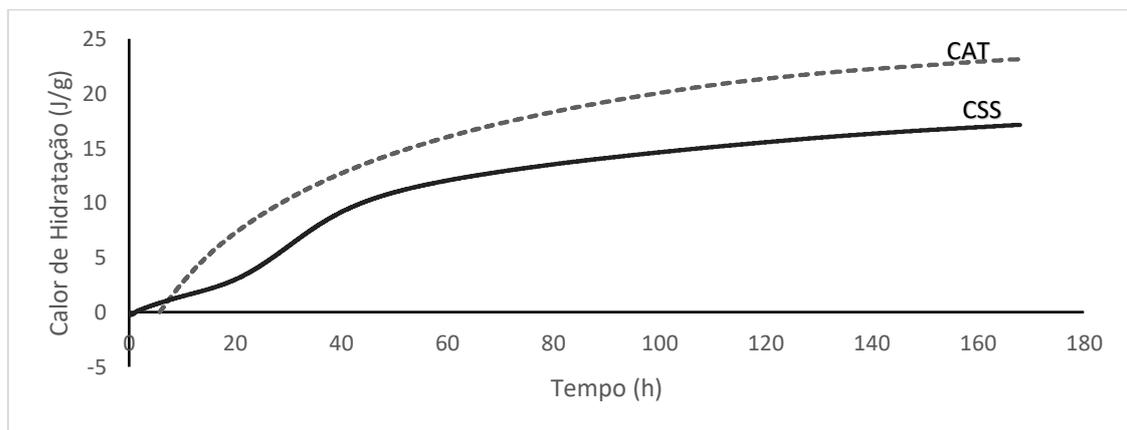


Figura 5 – Calor de hidratação liberado até os 7 dias de hidratação dos concretos à base de CSS e CAT
O primeiro pico de hidratação de ambos ocorre em tempos semelhantes, porém com intensidades diferentes.

O desempenho na taxa de calor liberado apresentado pelo concreto à base de CSS é equivalente ao encontrado por Homrich (2018) [15], e em estudos nas pastas por Gruskovnjak et al. (2008) [13], Matshei et al. (2005) [16], que mostra uma liberação de calor imediatamente após a

mistura com água, posteriormente um período de indução, consequência da formação de etringite na superfície dos grãos de escória. Logo após, ocorre um aumento na taxa de liberação de calor correspondente à formação de C-S-H.

Pode-se observar na Figura 5 o calor total liberado dos concretos, onde é possível verificar que o concreto produzido à base de CSS apresentou valores menores comparado ao produzido com CAT. Além de que o concreto dosado com CAT teve metade do seu calor liberado entre o intervalo de 20 a 40 horas já o concreto dosado com CSS obteve o mesmo índice após horas de hidratação.

CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi comparar a resistência mecânica e o calor de hidratação de concretos produzidos com cimentos supersulfataado (CSS) e cimento álcali ativado (CAT), os quais são considerados aglomerantes de baixo impacto ambiental. A partir dos resultados, pode se concluir que:

- Em relação à resistência mecânica, o concreto à base de CAT apresentou valores de resistências próximos a 60 MPa aos 28 dias, o que possibilita sua utilização em diversos fins na engenharia civil, tendo em vista que se enquadra na classe de resistência C60. Resultados semelhantes para o CAT foram encontrados por Cadore (2018) [9] e Puertas et al. (2007) [17]. O concreto à base de CSS apresentou valores inferior, porém satisfatórios, próximos a 25 MPa em 28 dias, o que o inclui na classe C25, podendo ser aplicado em diversos cenários da engenharia.

- Em relação ao calor de hidratação, os resultados obtidos pelo concreto à base de CSS corroboram com os estudos elaborados por Gruskovnjak et al.(2008) [13] ou seja, o concreto produzido com CSS apresentou uma menor taxa de calor de hidratação e menor calor liberado. O concreto à base de CAT apresentou valores superiores aos resultados do concreto à base de CSS, esse resultado deve-se a um maior período de indução tornando a hidratação mais lenta no concreto à base de CSS. Ambos apresentaram valores em inferiores aos apresentados pelo cimento Portland, o que favorece a aplicação em obras de grande volume.

- Ambos os cimentos, CAT e CSS, podem ter suas propriedades melhoradas a partir do tipo de matéria prima e da proporção/otimização das mesmas e mostram uma nova perspectiva do uso cimentos na produção de concretos na busca de aglomerantes de baixo impacto ambiental bem como do melhoramento de propriedades e durabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] UNITED STATES PATENTE OFFICE (United States). Hans Kühl. Slag Cement and Process of Making the same. EUA nº 381,980, 03 jul. 1907, 13 out. 1908.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. BT-106: Guia Básico de utilização do Cimento Portland. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002. 26 p.
- [3] LANGARO, E. Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal. 2016. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- [4] MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (MDIC). Nota Técnica Plano Indústria Subsetor Cimento. Disponível em :<http://www.comexresponde.comexbrasil.gov.br/portalmDIC/arquivos/dwnl_1352304842.pdf> Acesso em: ago. de 2018.
- [5] NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do Concreto. 2 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013. 472 p.
- [6] NETO, A. Estudo de retração em Argamassa com cimento de escória ativada. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [7] THOMAS, R.J et al. Micromechanical properties of alkali-activated slag: cement binders. Elsevier: Cement and Concrete Composites. [s.i], p. 241-256. abr. 2018.
- [8] JUENGER M.C.G.; WINNEFELD, F.; ROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. Advances in Alternative Cementitious Binders. V. 41, p. 1232-1243. dec. 2011.
- [9] CADORE, D. Durabilidade de concretos à base de cimento álcali ativado: aspectos relacionados à carbonatação. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.
- [10] BEN HAHA, M.; LOTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag— part I: effect of MgO, Cement and Concrete Research, v. 41, ed. 9, 955–963 p., 2011a.
- [11] PINTO, T. A. Introdução ao Estudo dos Geopolímeros. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2006. Disponível em: <<http://www.geopol.com.br/default.asp?area=01>>. Acesso em: julho de 2015.
- [12] WOLTRON, G. The utilisation of GGBFS for advanced supersulfated cements. World Cement, 2009.

- [13] GRUSKOVNJAK, A. et al. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 7, p. 983–992, 2008.
- [14] GRACIOLI, B.; VARELA, M. V. F.; ANGULSKI DA LUZ, C. Utilização de fosfogesso em matrizes de cimentos supersulfatados: um subproduto da indústria de fertilizantes. III Congresso de Ciência e Tecnologia da UTFPR - DV. Anais...2015.
- [15] HOMRICH, J. Avaliação do comportamento do cimento supersulfatado em concreto autoadensável. 2018. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7215: Cimento Portland Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- [17] PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; GUTIÉRREZ, R. Morteros de Escoria Activada Alcalinamente. Propiedades y Durabilidad. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, 2007.