

Modelagem de propriedades de argamassas contendo geopolímero em substituição parcial ao cimento Portland

(Modeling of mortar properties containing geopolymer as a partial replacement of Portland cement)

M. B. Kretzer¹, C. Effting¹, S. Schwaab², S.L. Correia²,

¹PPGEC – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas (UDESC/CCT)

²PPGCEM – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas (UDESC/CCT)
Rua Paulo Malschitzki, 200, Zona Industrial Norte, Joinville, SC
manuelakretzer@hotmail.com

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados do estudo do uso de cimento de geopolímero (CG) em substituição parcial ao cimento Portland (CP), em argamassas de revestimento para construção. O CG foi obtido a partir de misturas de rejeitos industriais e metacaulim. Para o planejamento experimental e a análise dos resultados foi utilizado um projeto fatorial 3². Os fatores empregados foram o teor de CG substituído (10, 30 e 50 %) e a relação agregado-cimento, A/C (6,11, 6,90 e 7,69). A trabalhabilidade foi avaliada pelo índice de consistência, e a resistência à compressão após 28 dias de cura. Os resultados mostraram que a técnica de planejamento experimental foi muito eficiente na obtenção de argamassas. Para um nível de A/C, o teor de 50% de CG produziu argamassas com 4,9 MPa e consistência de 26,7cm, indicando a viabilidade do geopolímero como um material sustentável para construção civil.

Palavras chave: Argamassa de revestimento, Cimento de Geopolímero, Trabalhabilidade, Resistência à compressão.

Abstract

This work presents the results of the study of the use of geopolymer cement (GC) as a partial replacement of Portland cement (PC), in coating mortars for construction. GC was obtained from mixtures of industrial waste and metakaolin. A factorial design 3² was used for the experimental planning and analysis of the results. The factors employed were the content of GC replacement (10, 30 and 50%) and the aggregate-cement ratio, A/C (6.11, 6.90 and 7.69). The workability was evaluated by the consistency index, and the compressive strength after 28 days of cure. The results showed that the experimental planning was very efficient in obtaining mortars. For an A/C level, the 50% GC content produced mortars with 4.9 MPa and a consistency of 26.7 cm, indicating the viability of the geopolymer as a sustainable material for civil construction.

Keywords: Coating Mortar, Geopolymer cement, Workability, Compressive strength.

INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, tornou-se essencial adotar práticas sustentáveis na indústria da construção devido ao rápido crescimento urbano. O cimento Portland (CP), principal ligante utilizado em concretos e argamassas, é obtido de um processo com um elevado consumo energético e altamente poluente [1]. Desta forma, o desenvolvimento de ligantes alternativos, que utilizem de resíduos industriais, têm atraído considerável atenção nos últimos anos por reduzir o impacto ambiental e apresentar propriedades e características que o tornam uma alternativa para o CP [2].

O cimento de geopolímero (CG), considerado como um cimento de terceira geração, é produzido pela reação química entre um precursor (formado por silício e alumínio) e um ativador (solução alcalina). Entretanto, no que diz respeito à indústria da construção, ainda é necessário comprovar sua rentabilidade e adequação [3]. Estudos prévios têm reportado que os geopolímeros possuem alta resistência inicial, baixa retração, resistência ao congelamento e descongelamento, aos sulfatos, à corrosão, a ácidos e ao fogo [4].

Argamassas geopoliméricas (AG), produzidas com cimento geopolimérico, possuem características distintas das argamassas tradicionais devido as particularidades dos materiais que compõem o CG. Existem inúmeros materiais que podem ser usados como base para a produção de geopolímeros, entre os principais estão: cinzas volantes, escórias e metacaulim [5].

No estado fresco, a trabalhabilidade de AG é afetada pela adição de CG dependendo do tipo de ativador alcalino. Existe uma tendência de diminuição da fluidez com o aumento da concentração de geopolímeros. Além disso, a fluidez e a consistência são influenciadas pela granulometria do agregado miúdo [5].

No estado endurecido, a resistência à compressão é o primeiro parâmetro a ser considerado em misturas de argamassas geopoliméricas [5]. Independentemente do tipo de ativador, em geral, a resistência à compressão cresce com o aumento da concentração [6]. A ligação entre o CG e os agregados, devido à natureza dos geopolímeros, determina a resistência à compressão das argamassas [7].

Dessa maneira, por meio de planejamento de experimentos, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito do teor de CG em substituição parcial ao CP, ao mesmo tempo variando a relação agregado/cimento (A/C), nas propriedades de argamassas para a construção civil (trabalhabilidade e resistência à compressão). Finalmente, por meio da metodologia de superfícies de resposta, procura-se estimar os níveis dos fatores estudados com melhores propriedades visando aplicação como material de construção.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Os materiais utilizados na preparação das argamassas foram:

a) Cimento Portland (CP), tipo CP II – F32, fabricado por Supremo Secil cimentos, com massa específica de 3,03g/cm³. Este cimento contém alto teor de clínquer (75% a 89%) e adição de fíler calcário (11% a 25%). Nesta pesquisa foi necessário utilizar um cimento sem adição de pozolana, afim de não influenciar nos resultados.

b) Cal hidratada, tipo CH-III, constituída basicamente por hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂], hidróxido de magnésio [Mg(OH)₂] e óxido de magnésio (MgO), com teor de gás carbônico ≤ 13% e óxido totais ≥ 88%.

c) Agregado miúdo, com massa específica de 2,58g/cm³, módulo de finura de 1,31 e diâmetro máximo de 0,6mm. Areia proveniente de cava e formada por 99% sílica.

d) Cimento geopolimérico (CG), formado por mistura, em massa, de 30% de cinza volante (massa específica de 2,19g/cm³), 34% de escória granulada de alto forno (massa específica de 2,97 g/cm³), e 36% de metacaulim (massa específica de 2,70g/cm³), ativado por solução composta de 60% de silicato de sódio alcalino e 40% de hidróxido de potássio 5mol/L. As amostras obtinham partícula inferior à 44µm.

e) Água fornecida pela concessionária local.

Procedimento experimental

A argamassa de referência foi produzida na proporção de 1; 1,5; 5,5 (em volume), comumente utilizado na construção civil, e fator água-cimento (W/C) de 1,87, em massa. Com base na massa específica e unitária, a proporção foi transformada para massa (1; 1,042; 7,69).

Para o planejamento experimental, foi definido um projeto fatorial 3² completo, sem réplicas, variando o fator agregado-cimento, A/C (massa), e o teor de substituição (TS) do cimento Portland pelo cimento geopolimérico, em porcentagem de massa, conforme Tabela I. Com auxílio do *software* Statistica 13.0 [8] foi realizado o delineamento das misturas.

Para a identificação das argamassas, foram utilizadas as seguintes nomenclaturas: R611, R690 e R769, para indicar, respectivamente, a relação A/C de 6,11, 6,90 e 7,69, em massa. Assim como, P10, P30, e P50, para indicar o TS, em massa, de 10%, 30% e 50%, respectivamente.

Tabela I – Limites dos fatores adotados das argamassas

Nível	Fator	
	A/C	TS
Menor	6,11	10 %
Médio	6,90	30 %
Maior	7,69	50 %

A preparação das misturas das argamassas foi realizada por um misturador mecânico, de acordo com o estabelecido pela norma NBR 16541 [9]. Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados moldes prismáticos de 4 x 4 x 16 cm. Estes permaneceram nos moldes durante 48 ± 24 horas até serem desmoldados. A cura foi realizada em temperatura ambiente, $23 \pm 2^\circ\text{C}$, pelo tempo de 28 dias para a realização do ensaio.

A determinação da trabalhabilidade foi avaliada pelo índice de consistência (IC), conforme a NBR 13276 [10], com auxílio da mesa de consistência (*Flow table*), para medir o espalhamento. A NBR 16541[9] recomenda adotar o índice de consistência da argamassa de 260 ± 5 mm. A resistência à compressão aos 28 dias (RC28) foi realizada segundo a norma NBR 13279 [11], por meio de uma prensa hidráulica, modelo PC 220 I, marca Emic. A preparação e os ensaios das argamassas foram realizados no laboratório de Materiais de Construção Civil, do Departamento de Engenharia Civil da UDESC/CCT – Joinville.

Métodos de análise da variância (ANOVA) e superfície de resposta foram aplicados, e posteriormente, determinados modelos de regressão em função dos fatores A/C e TS para a trabalhabilidade e a resistência à compressão após 28 dias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados para o índice de consistência (IC)

A Tabela II apresenta as misturas das argamassas e os resultados obtidos para o IC. Verifica-se que a consistência diminui conforme o fator A/C aumenta. O TS não apresentou influência no IC, pois o fator W/C manteve-se constante em todas as misturas.

A Tabela III exhibe o resultado da análise de variância (ANOVA) do índice de consistência das argamassas com os fatores estatisticamente significantes e insignificantes. De acordo com a tabela IV, observa-se que apenas o fator A/C (L) apresenta relevância mais significativa para o modelo.

Dessa forma, admitindo-se um nível de significância (α) de 0,19 para o modelo final, ignora-se o A/C (Q), o TS (L) e a interação A/C (L) x TS (L). Na Tabela IV, o A/C (L) ($p =$

$0,0015 \leq \alpha$) e o fator TS (Q) ($p = 0,1877 \leq \alpha$) são estatisticamente significantes conforme nível de significância estabelecido.

Tabela II - Índice de consistência (cm) das argamassas

Argamassa	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)
R611P10	33,60	$\pm 0,53$
R611P30	32,50	$\pm 0,50$
R611P50	33,50	$\pm 1,00$
R690P10	27,33	$\pm 1,89$
R690P30	32,33	$\pm 1,04$
R690P50	28,67	$\pm 1,53$
R769P10	26,50	$\pm 0,50$
R769P30	27,67	$\pm 0,76$
R769P50	26,67	$\pm 0,76$
Referência	26,67	$\pm 1,15$

Tabela III - ANOVA do IC com efeitos estatisticamente significantes e insignificantes

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F ₀	p
A/C (L)	58,66	1	58,66	16,99	0,0259
A/C (Q)	0,79	1	0,79	0,23	0,6643
TS (L)	0,33	1	0,33	0,09	0,7769
TS (Q)	4,23	1	4,23	1,23	0,3488
A/C (L) x TS (L)	0,02	1	0,02	0,01	0,9466
Erro	10,37	3	3,45		
Total	74,39	8			

(L) temo linear, (Q) termo quadrático

Tabela IV - ANOVA do IC com efeitos estatisticamente significantes

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F ₀	p
A/C (L)	58,66	1	58,66	30,61	0,0015
TS (Q)	4,23	1	4,23	2,21	0,1877
Erro	11,49	6	1,92		
Total	74,39	8			

(L) temo linear, (Q) termo quadrático

A proporção da variabilidade (R^2) foi de 0,8455, ou seja, indica que os fatores e seus efeitos representam 84,55% variabilidade das medidas. A partir dos resultados, a equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela equação (A), onde x_1 é o fator A/C e x_2 é o fator TS.

$$IC = 57,10344 - 3,95781x_1 + 0,00006x_2^2 \quad (A)$$

Para constatar a adequação do modelo, foram avaliados os resíduos quanto à normalidade e a aleatoriedade (resíduos estão normalmente distribuídos e sem tendência de afunilamento) [12]. Conclui-se que o modelo descrito conforme a equação (A) é adequado para descrever o comportamento do índice de consistência como uma função A/C e TS.

O efeito dos fatores A/C e TS no IC estão dispostos na forma de gráfico de contorno, Figura 1. De acordo com o gráfico da superfície de resposta, O IC diminui conforme a relação A/C aumenta. A norma NBR 16541 [9] indica o valor de $26 \pm 0,5$ cm como adequado para uma argamassa ser considerada trabalhável. O gráfico indica que argamassas com quaisquer que sejam as quantidades de CG (entre 10 e 50%) na mistura, com a relação A/C superior a 7,6, apresentarão resultados conforme especificado da norma citada.

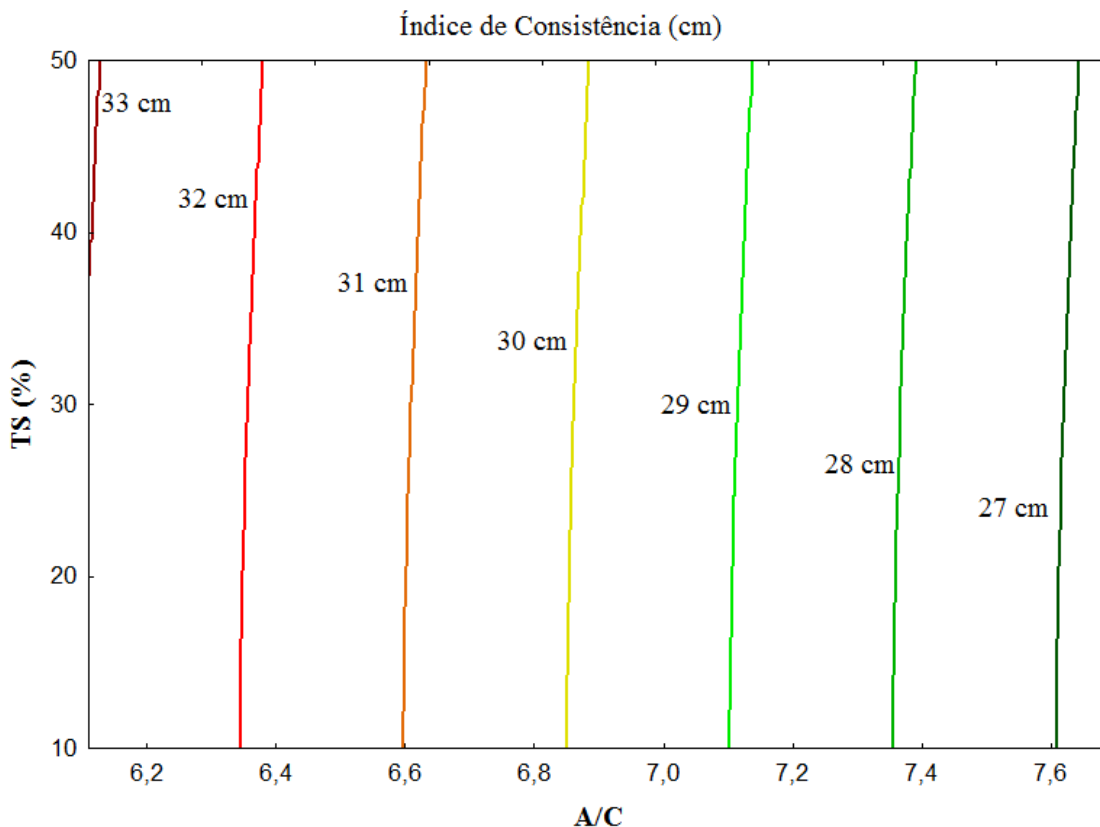


Figura 1 - Gráfico de contorno da superfície de resposta do IC

Resultados para a resistência à compressão após 28 dias de cura.

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias (RC28) estão apresentados na Tabela V. As argamassas geopoliméricas contendo teor de substituição de 50% apresentaram, de modo geral, os maiores valores de resistência à compressão. Conforme pesquisas, os geopolímeros possuem maior resistência à compressão quando comparadas ao cimento Portland [13].

Tabela V – Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias das argamassas

Argamassa	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
R611P10	3,23	± 0,17
R611P30	3,13	± 0,32
R611P50	3,80	± 0,08
R690P10	2,68	± 0,29
R690P30	3,48	± 0,17
R690P50	4,60	± 0,40
R769P10	4,00	± 0,20
R769P30	3,58	± 0,17
R769P50	4,93	± 0,17
Referência	3,38	± 0,22

Na Tabela VI estão os resultados da análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão aos 28 dias com os fatores estatisticamente significantes e insignificantes. Observa-se, que o fator TS (L) é o fator com maior relevância para o modelo.

Admitindo-se um nível de significância (α) de 0,15 para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula), na Tabela VII, ignora-se os fatores A/C (Q) e a interação A/C (L) x TS (L) para o modelo final. O A/C (L) ($p = 0,0556 \leq \alpha$), o fator TS (L) ($p = 0,0153 \leq \alpha$) e o fator TS (Q) ($p = 0,1413 \leq \alpha$) são estatisticamente significantes.

Tabela VI - ANOVA da RC28 com efeitos estatisticamente significantes e insignificantes

Fator	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média dos Quadrados	F ₀	p
A/C (L)	0,92	1	0,92	4,32	0,1293
A/C (Q)	0,07	1	0,07	0,34	0,5985
TS (L)	1,95	1	1,95	9,14	0,0566
TS (Q)	0,45	1	0,45	2,13	0,2405
A/C (L) x TS (Q)	0,03	1	0,03	0,15	0,7227
Erro	0,64	3	0,21		
Total	4,07	8			

(L) termo linear, (Q) termo quadrático

Tabela VII - ANOVA da RC28 das argamassas com efeitos estatisticamente significantes

Fator	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média dos Quadrados	F ₀	p
A/C (L)	0,92	1	0,92	6,17	0,0556
TS (L)	1,95	1	1,95	13,07	0,0153
TS (Q)	0,45	1	0,45	3,05	0,1413
Erro	0,74	5	0,15		
Total	4,07	8			

(L) termo linear, (Q) termo quadrático

A proporção da variabilidade (R^2) foi de 0,8168, ou seja, indica que os fatores e seus efeitos representam 81,68% da variabilidade das medidas. A partir dos resultados, a equação final ajustada para o modelo pode ser determinada pela equação (B), onde x_1 é o fator A/C e x_2 é o fator TS.

$$RC28 = 0,193281 + 0,495781x_1 - 0,04300x_2 + 0,001192x_2^2 \quad (B)$$

Os resíduos foram avaliados referentes à normalidade (seguindo a reta da normal) e a aleatoriedade (sem tendência de afunilamento) para analisar a adequação do modelo [12]. Pode-se concluir que o modelo é adequado para retratar o comportamento da resistência à compressão aos 28 dias, como uma função entre o A/C e TS.

Através do gráfico de contorno da superfície de resposta, Figura 2, pode-se observar melhor o efeito dos fatores A/C e TS na RC28. Conforme a figura 2, para obter argamassas com resistência a compressão acima de 4,0 MPa (respeitando a trabalhabilidade, A/C acima de 7,6), de acordo com a figura, a quantidade de CG em substituição deve ser acima de 40% (limitado à 50%).

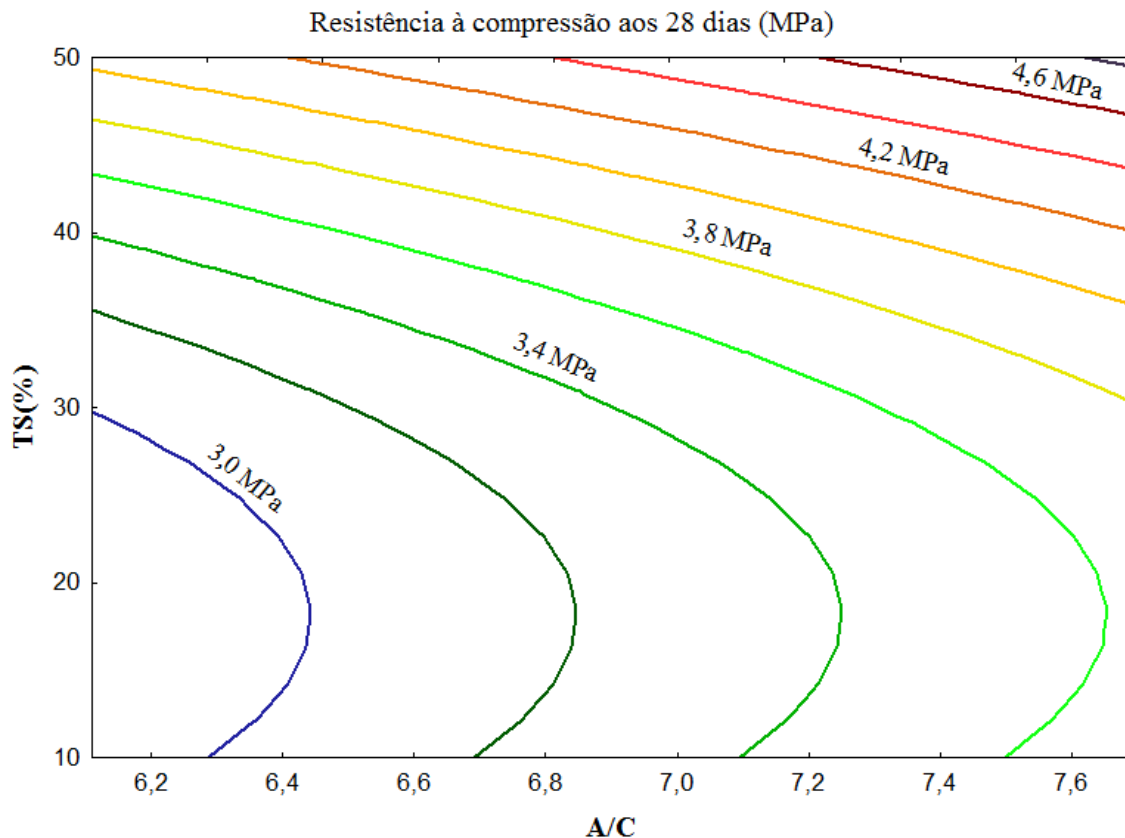


Figura 2 - Gráfico de contorno da superfície de resposta do RC28

CONCLUSÕES

A utilização de cimento geopolimérico em substituição parcial ao cimento Portland apresentou resultados satisfatórios em relação as propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

Através do projeto fatorial e da análise estatística, foi possível determinar que a relação agregado/cimento é o fator mais relevante no índice de consistência. Enquanto que, o teor de substituição (%) é o fator mais influente na resistência à compressão das argamassas analisadas.

A análise estatística possibilitou o cálculo de modelos de regressão que descrevem, tanto para o índice de consistência quanto para a resistência à compressão aos 28 dias, a função entre os fatores agregado/cimento e teor de substituição do cimento Portland pelo cimento geopolimérico.

Por meio do gráfico de contorno de superfície de resposta, para as argamassas com relação agregado/cimento igual a 7,69, e inclusão do cimento geopolimérico em qualquer um dos níveis (entre 10 e 50%), foi possível obter valores de índice de consistência conforme exigido em norma para as argamassas geopoliméricas.

Ainda, por meio do gráfico de contorno, a resistência a compressão, após 28 dias, obtidas a partir de trabalhabilidade adequada, atingiu valores superiores à 4,0 MPa em composições com teor de geopolímero entre 40 e 50%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro à esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1]. HUYNH, T.P.; VO, D.H.; HWANG, C.L. Engineering and durability properties of eco-friendly mortar using cement-free SRF binder. *Construction and Building Materials*, v. 160, p. 145-155, 2018,
- [2]. SINGH, B; ISHWARYA, G; GUPTA, M; BHATTACHARYYA, S.K. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, v. 85, p. 78-90, 2015.
- [3]. KWASNY, J.; SOUTSOS, M. N.; MCINTOSH, J. A.; CLELAND, D.J. Comparison of the effect of mix proportion parameters on behaviour of geopolymer and Portland cement mortars. *Construction and Building Materials*, v. 187, p. 635-651, 2018.

- [4] WALLAH, S.E.; RANGAN, B.V. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties. Research Report GC2. Faculty of Engineering. Curtin University of Technology. Perth, Australia. 107p. 2006.
- [5].ZHANG, P.; ZHENG, Y.; WANG, K.; ZHANG, J. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. Composites Part B: Engineering, v. 152, p. 79-95, 2018.
- [6] KEN, P.W.; RAMLI, M.; BAN, C.C. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. Construction and Building Materials, v. 77, p. 370-395, 2015.
- [7] TEMUJIN, J.; RIESSEN, A.V.; MACKENZIE, K.J.D. Preparation and characterization of fly ash based geopolymer mortars. Construction and Building Materials, v. 24, p. 1906-1910, 2010.
- [8] STATSOFT Inc. STATISTICA Ultimate Academic, v. 13.0; License Number 135-726-299. Disponível em: <http://www.statsoft.com.br>.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.
- [10]_____. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- [11]_____. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- [12] MYERS, R. M., MONTGOMERY, D. C. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. New York: John Wiley and Sons, 2002.
- [13]HARDJITO, D.; RANGAN, B.V. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC 1. Faculty of Engineering. Curtin University of Technology. 2005. 103 páginas.