2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

ESTUDO PRELIMINAR DO USO DOS FINOS DO RESÍDUO DA AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS

COMPARSI, Taís Damian (1); LERMEN, Richard Thomas (2); SILVA, Rodrigo de Almeida (3); FARIAS, Sílvio Marques (4); BONSEMBIANTE, Francieli Tiecher (5); DALLAGO, Rogério Marcos (6)

(1) IMED, taiscomparsi@hotmail.com
(2) IMED, richard.lermen@imed.edu.br
(3) IMED, rodrigo.silva@imed.edu.br
(4) IMED, silviomfarias@gmail.com
(5) IMED, francieli.bonsembiante@imed.edu.br
(6) URI ERECHIM, dallago@uricer.edu.br

RESUMO

No processo de fundição de peças metálicas, os moldes são produzidos com uma mistura de areia natural e bentonita, entretanto, após o aquecimento, a bentonita ativada perde suas propriedades aglomerantes, fazendo com que parte da areia de fundição tenha que ser descartada do processo. Visando então a reutilização do resíduo de areia verde de fundição (RAVF) que é descartada no processo de fundição de metais, o presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a possibilidade de substituir o metacaulim pelos finos do RAVF no desenvolvimento de um material geopolimérico. Cinco níveis de substituição foram estudados (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Os geopolímeros foram sintetizados utilizando a porcentagem de álcalis de 20%, módulo de sílica de 0,5 e a relação água/sólido de 0,45. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão para três diferentes tempos de cura (7,14 e 28 dias). Os resultados mostraram que ao substituir o metacaulim por RAVF a resistência à compressão diminuiu significativamente, porém ajustes no processo de cura e nas composições dos ativadores podem melhorar os resultados possibilitando o uso do RAVF no desenvolvimento de geopolímeros.

Palavras-chave: *Resíduo de Areia verde de fundição. Geopolímeros. Resistência à compressão.*

ABSTRACT

In the process of casting metal parts, the molds are produced with a mixture of natural sand and bentonite, however, after heating, the activated bentonite loses its binding properties, causing part of the foundry sand to be discarded from the process. Aiming then to reuse the green foundry sand waste (GFSW) that is discarded in the metal smelting process, the present work had as main aim to evaluate the possibility of replacing the metakaolin with the GFSW fines in the development of a geopolymeric material. Five levels of substitution were studied (0%, 25%, 50%, 75% and 100%). The geopolymers were synthesized using an alkali percentage of 20%, a silica module of 0.5 and a water/solid ratio of 0.45. The specimens were submitted to the compressive strength test for three different cure times (7, 14 and 28 days). The results showed that when replacing the metakaolin by GFSW, the compressive strength decreased

significantly, but adjustments in the curing process and in the compositions of the activators can improve the results allowing the use of GFSW in the development of geopolymers.

Keywords: Green *Foundry Sand Waste. Geopolymers. Compressive strenght.*

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de fundição de peças metálicas, a areia utilizada para moldagem das peças é reciclada e reutilizada várias vezes durante o processo de fundição. Quando existe a deficiência de suas características físico-químicas, não é possível mais reutilizá-la no processo de moldagem, então a areia é retirada do sistema e passa a ser considerada um resíduo, conhecido como areia descartada de fundição (ADF) (ANDRADE et al., 2018).

Para a realização do seu processo, as fundições utilizam toneladas de areia por ano, calcula-se que para cada tonelada de metal fundido obtenha-se por volta de uma tonelada de areia descartada (KLINSKY, 2008). No cenário mundial, o Brasil é o 10º produtor de fundidos (base 2017), produzindo cerca de 2,3 milhões de toneladas (ABIFA, 2019), ou seja, 2,3 milhões de toneladas de areia de fundição são descartadas.

Uma possibilidade de aplicação dos resíduos da areia de fundição é a fabricação de materiais geopoliméricos. Esses resíduos quando utilizados como matéria prima podem ser a solução para o reaproveitamento e o desenvolvimento de novos materiais, auxiliando na redução da demanda dos recursos naturais (HU et al., 2020 e DAVIDOVITS, 2017). Geopolímeros são agentes ligantes produzidos a partir de um aluminossilicato, que endurecem à temperatura ambiente, em um período curto de tempo (2 à 48 horas) (DAVIDOVITS, 1991). Os geopolímeros são, normalmente, produzidos pela combinação de um material precursor como o metacaulim e com um ativador, que deve ser um reagente químico altamente alcalino (BELL et al., 2009).

Com o objetivo de avaliar o reaproveitamento da areia descartada no processo de fundição (ADF), o estudo propõe analisar o comportamento de pastas geopoliméricas produzidas com o uso de Metacaulim do Brasil, adicionando percentuais dos resíduos finos da areia verde de fundição como material precursor.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Metacaulim

Como precursor foi utilizado o metacaulim comercial HP Ultra – MB, o qual possui a composição químicas apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Fluorescência de raio-X para o metacaulim MB (Metacaulim do Brasil indústria e comércio LTDA)

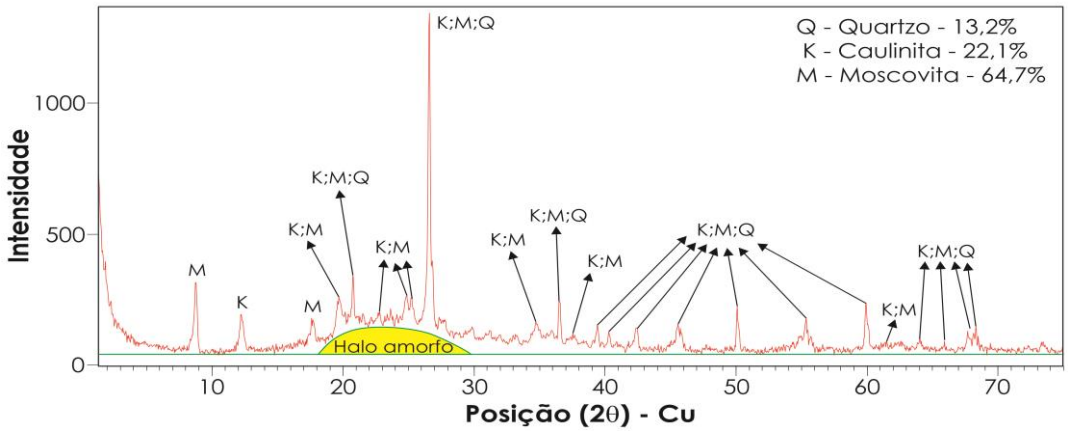
Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites(NBR 15.894)
SiO_2	57%	44% a 65%
Al_2O_3	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO_3	< 0,1%	< 1%

Na_2O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na_2O	< 1,5%	< 1,5%
Fe_2O_3	2%	-
TiO_2	1,50%	-
Umidade	0,50%	< 2%
Perda ao Fogo	3%	< 4%
Resíduo #325	6%	< 10%
Atividade Pozolânica Chapelle	880 mg Ca(OH)2/g	> 750 mg Ca(OH)2/g
Área Específica BET	230.000 cm²/g	150.000 cm²/g
Massa Específica	2560 kg/m³	

Fonte: Autores (2020)

Na Figura 1 pode ser observado o difratograma do Metacaulim HP Ultra. Os principais minerais identificados foram quartzo (SiO_2), Moscovita [$KAl_2O_{10}(OH, F)_2$] e caulinita [$Al_2Si_2O_5(OH)_4$]. Os picos característicos de quartzo e caulinita indicam a presença de impurezas e calcinação incompleta. As quantidades das fases mineralógicas foram determinadas pelo método de Rietveld.

Figura 1: Difração de raio-X para o metacaulim HP Ultra

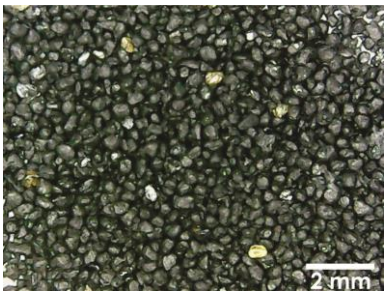


Fonte: Autores (2020)

2.1.2 Resíduo de Areia Verde de Fundição - RAVF

Afim de substituir o precursor comercial por um resíduo, os finos do resíduo da areia verde de fundição foram empregados. Para a realização da pesquisa, foi utilizado o material passante na peneira de número 70 e de abertura 0,212 mm. Na Figura 2 pode ser observado uma imagem dos finos do RAVF.

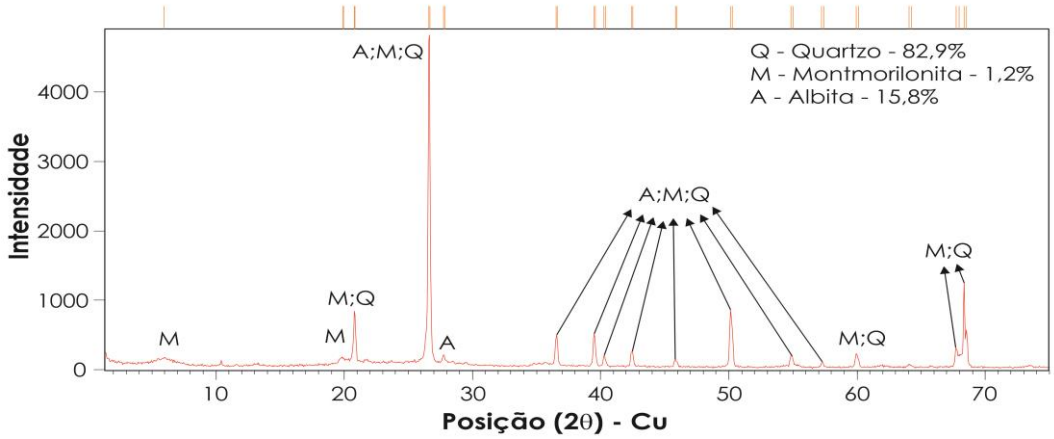
Figura 2: Finos de RAVF



Fonte: Autores (2020)

Na Figura 13 pode ser observado o difratograma do resíduo de areia verde de fundição. Os principais minerais identificados foram quartzo, Montmorilonita e albita, sendo as duas últimas fases característica da bentonita adicionada a mistura de areia. As quantidades das fases mineralógicas foram determinadas pelo método de Rietveld.

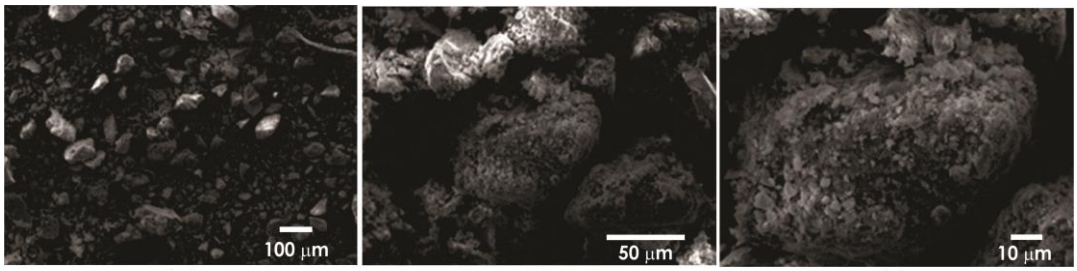
Figura 3: Difração de raio-X para o resíduo fino da areia verde de fundição



Fonte: Autores (2020)

Na Figura 4 pode ser observado a microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma amostra dos finos do RAVF. É possível observar que o resíduo possui dimensão variável, formato dos grãos angular e possui estrutura aglomerada. Também é possível observar o recobrimento dos grãos de areia por bentonita.

Figura 4: MEV do resíduo fino da areia verde de fundição com diferentes aproximações



(a) (b) (c)

Fonte: Autores (2020)

2.1.3 Ativadores

Como ativadores alcalinos, foram utilizados o silicato de sódio (Na_2SiO_3) e o Hidróxido de Sódio (NaOH) em escamas com 98% de pureza. Foi utilizado 0,5 de módulo de sílica e 20% de álcalis, os mesmos foram mantidos constantes em todas as misturas.

2.2 Sintetização dos geopolímeros

A solução de hidróxido de sódio ficou em repouso por um período de 30 minutos após a mistura, para a redução da temperatura aumentada pela reação exotérmica. Em seguida foi adicionado o silicato de sódio à solução. A mistura foi agitada por 5 minutos com um misturador orbital com velocidade média de 150 RPM (rotações por

minuto), e sequencialmente, foram adicionados os precursores: metacaulim e os finos do resíduo da areia verde de fundição em diferentes proporções (percentual de substituição (0%- referência, 25%, 50%, 75% e 100%). Após essa adição procedeu-se nova agitação com velocidade média de 150 RPM por um período de 5 minutos para a completa homogeneização.

Após a confecção das pastas, foram moldados os corpos de prova cilíndricos com dimensão de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O adensamento dos corpos de prova foi feito em mesa vibratória, para a retirada do ar incorporado nas amostras, durante 1 minuto. Os corpos de prova foram desmoldados, após 24 horas e foram mantidos em temperatura ambiente sem envelopamento (não foram isolados com papel filme), até as idades de ruptura.

2.3 Caracterização dos Geopolímeros

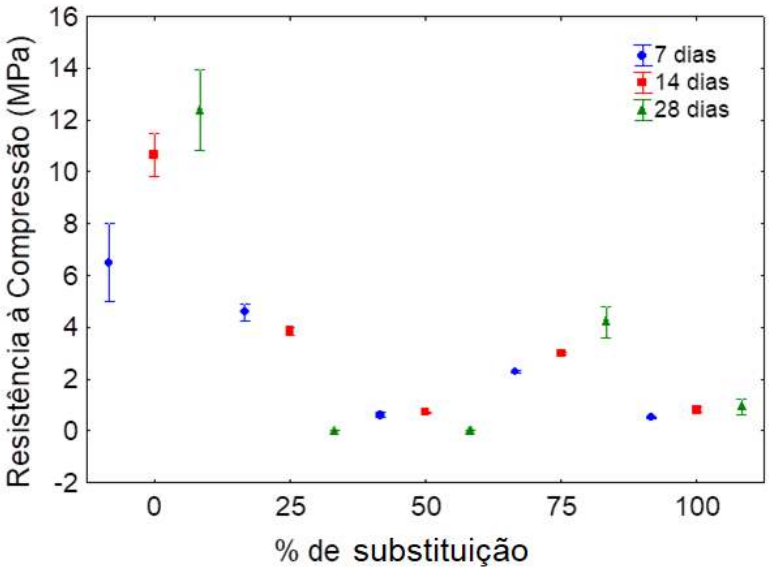
As misturas geopoliméricas foram avaliadas através da sua resistência à compressão axial, seguindo os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 1996), nas idades de 7, 14 e 28 dias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resistência à compressão

Na Figura 5 pode ser visualizado o gráfico da resistência à compressão em relação aos percentuais de substituição e respectivo tempo de cura.

Figura 5: Resistência à compressão em função do percentual de substituição de metacaulim pelos finos do resíduo da areia verde de fundição.



Fonte: Autores (2020)

Doğan-sağlamtimur (2018) estudou a reutilização da areia de fundição em geopolímero. O valor mínimo da resistência à compressão para materiais de revestimento de paredes foi aceito como 2,5 MPa pelos padrões nacionais. Neste estudo, o valor máximo da resistência à compressão foi de 12,3 MPa. Concluiu-se então que é adequado para uso como revestimento de parede. Entretanto, no nosso estudo, o traço utilizando 75% de substituição obtive valores mais elevados que 2,5

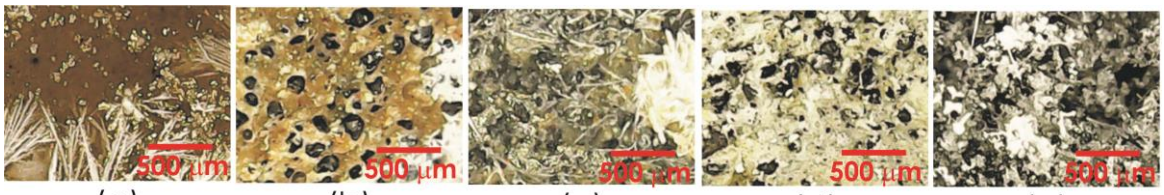
MPa, mas ainda é necessário mais análise spara entender por que obteve-se esse resultado apenas para essa porcentagem e chegar a melhores conclusões sobre esse resíduo quando utilizado em geopolímeros.

Em alguns casos, pode-se ocorrer, em geopolímeros com elevadas concentrações de silicatos solúveis, uma redução na resistência mecânica com o avanço da idade, isso ocorre devido à pouca cristalinidade do gel formado durante as reações e ao início da cristalização do zeólito, como consequência de uma certa instabilidade termodinâmica dos produtos da reação amorfa (LONGHI *et al*., 2016). Com isso, é possível entender os resultados encontrados nesse estudo, pois em algumas misturas existe uma diminuição da resistência à compressão com o passar dos dias. Os corpos de prova (CPs) com 25% de substituição mostraram um resultado razoavelmente bom com 7 dias, com 14 dias diminuiu e com 28 dias as amostras desfizeram-se, sendo descartadas. Os CPs com 50% de substituição obtiveram um pequeno acréscimo da resistência aos 14 dias, entretanto aos 28 dias as amostras também fissuraram, precisando ser descartadas.

Acredita-se que o modo de cura utilizado na pesquisa influenciou negativamente na resistência à compressão, pois foi feita a cura com temperatura ambiente e sem cobrir ou envelopar os CPs. Conforme os estudos realizados por Elakyah *et al*. (2019) o modo de cura influência na resistência à compressão, em sua pesquisa estudou-se amostras de geopolímeros sob cura ambiente, os CPs foram cobertos com folha de polietileno por 48 horas para evitar o calor em condições de cura ambiente, e também existiram CPs curados em forno. Constatou-se que quando curados em forno a resistência é maior, entretanto, a diferença de resistência entre os tipos de cura não é significativa.

A resistência à compressão também foi afetada pelo fenômeno de eflorescência, pelas porosidades e pela fissuração observada nos corpos de prova. A Figura 6 mostra as macrografias das pastas poliméricas desenvolvidas, nas quais podem ser observados o fenômeno de eflorescência.

Figura 6: Macrografia das pastas geopoliméricas para os diferentes percentuais de substituição: (a) 0%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 75% e (e) 100%.



Fonte: Autores (2020)

Eflorescência é uma manifestação patológica que pode prejudicar a integridade estrutural do material. A sua cristalização é o resultado da lixiviação de álcalis livres presentes na estrutura dos poros dos geopolímeros quando em contato com a água. Esses álcalis lixiviados reagem com o ácido carbônico, formando sais alcalinos que cristalizam na superfície do geopolímero (LONGHI *et al.*, 2019). Os sistemas geopoliméricos que utilizam hidróxido de sódio como ativador tem mais chance em possuir eflorescências. A temperatura e umidade relativa do ar influenciam na quantidade de água que entra e sai, causando também a cristalização de sais (AIN *et al.*, 2016).

Conforme Zanghi *et al*. (2014) a porosidade afeta significativamente na formação de eflorescências, pois quanto menos permeável, menor é a lixiviação de álcalis e carbonatação interna.

Através dos estudos realizados por Longhi *et al.* (2020) e Cassel (2020) foi possível observar que o quanto maior a quantidade de silicato de sódio no ativador, mais densa e menos permeável será a matriz, o que dificulta a extração de álcalis livres para a superfície, e reduz a formação de eflorescência.

Uma análise de variância (ANOVA), que pode ser observada na Tabela 2, foi usada para determinar a influência dos fatores na resistência à compressão axial. Os fatores foram considerados significativos para p-valores iguais ou inferiores a 0,05 (valor crítico adotado), o que indica um nível de confiança igual ou superior a 95% em relação ao que está sendo declarado.

Tabela 2: ANOVA para a resistência à compressão

Fator	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
% de substituição (S)	510,1962	4	127,5491	99,9926	0,000000	Sim
Tempo de cura (TC)	11,6512	2	5,8256	4,5670	0,018557	Sim
S*TC	55,3761	8	6,9220	5,4265	0,000285	Sim
Erro	38,2675	30	1,2756			

* interação entre os fatores

Fonte: Autores (2020)

Através da Tabela 3 observa-se que tanto o teor de substituição de metacaulim por finos do resíduo de areia verde de fundição, quanto o tempo de cura, bem como a interação entre ambos influenciam significativamente na resistência à compressão. Sendo assim, é possível afirmar que o emprego do resíduo de areia verde de fundição em substituição ao metacaulim é ruim.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa teve como objetivo analisar a resistência à compressão de um material geopolimérico que teve como precursor o Metacaulim do Brasil, e existindo uma substituição com diferentes percentuais do resíduo fino da areia verde de fundição.

A formação de eflorescência, a porosidade e a fissuração encontradas nos corpos de provas influenciaram negativamente na resistência à compressão. O modo da cura dos corpos de prova pode ter influenciado na formação das eflorescências.

Espera-se que em pesquisas futuras o material desenvolvido atinja a resistência à compressão ao menos próxima da encontrada com o material precursor base que é o Metacaulim. Além disso, espera-se encontrar qual a melhor proporção dos materiais buscando melhoramento das propriedades física e mecânicas dos geopolímeros desenvolvidos. Apartir desse estudo preliminar podemos contribuir com estudos futuros, pois conclui-se que ajustes nos processos de cura e proporções dos ativadores devem ser realizados, buscando atingir maiores resistências à compressão.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo desejam agradecer o apoio da CAPES e Fundação Meridional – IMED, pelo apoio financeiro e pelos laboratórios usados para realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

ABIFA, anuário 2019. 18 p. Disponível em: <http://www.abifa.org.br/revista20/#p=1>. Acesso em 11 maio 2020.

AIN, N.; SANI, M.; MAN, Z.; SHAMSUDDIN, R.M.; AZIZLI, K.A.; SHAARIA, K.Z.K. **Determination of Excess Sodium Hydroxide in Geopolymer by Volumetric Analysis.** Procedia Engineering, ScienceDirect, Perak, v. 148, p. 298–301, 2016.

ANDRADE, L. B.; CARNIN, R. L. P.; PINTO, R. C. A. **Areia descartada de fundição para uso em concreto de cimento Portland: análise do agregado**. Revista Matéria. Scielo, Florianópolis, v.23, n.03, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:1996** – Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

BELL, Jonathan L.; DRIEMEYER, Patrick E.; KRIVEN, Waltraud M.. Formation of Ceramics from Metakaolin-Based Geopolymers. Part II: k-based geopolymer. **Journal Of The American Ceramic Society**, [s.l.], v. 92, n. 3, p. 607-615, mar. 2009. Wiley. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02922.x>.

CASSEL, L. D. **Manifestação patológica em sistemas geopoliméricos produzidos com metacaulim: avaliação da susceptibilidade no desenvolvimento de eflorescências**. Porto Alegre, 2018, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2018.

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and calorimetry**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers.** Journal of Ceramic Science and Technology. Google Acadêmico, Saint-Quentin, v.8, n.3, Ago. 2017.

DOğAN-SAğLAMTIMUR, Neslihan. Waste Foundry Sand Usage for Building Material Production: a first geopolymer record in material reuse. **Advances In Civil Engineering**, [s.l.], v. 2018, p. 1-10, 2018. http://dx.doi.org/10.1155/2018/1927135.

ELAKYAH, D.; KALAIVANI, M.; EASWARAN, P. **Effect of curing and molarity on Geopolymer concrete with foundry sand**. International Journal of Scientific Research and Review, v. 7, n. 3, 2019.

HU, Z.; WYRZYKOMSKI, M.; LURA, P. **Estimation of reaction kinetics of geopolymers at early ages.** Cement and Concrete Research, ScienceDirect, Zurich, v. 129, Jan. 2020.

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez**. Proposta de Reaproveitamento de Areia Fundição em Sub-bases e Bases de Pavimentos Flexíveis Através da sua Incorporação a Solos Argilosos**. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

LONGHI, M.A.; RODRÍGUES, E.D.; WALKLEY, B.; ZHANG, Z.; KIRCHHEIM, A.P. **Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation**. Composites Part B: Engineering, Porto Alegre, v. 182, 2020.

LONGHI, M.A.; RODRÍGUEZ, E. D.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; KIRCHHEIM, A. P. **Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers**. Journal of Cleaner Production, Porto Alegre, v. 115, p. 265-272, 2016.

LONGHI, M.A.; ZHANG, Z.; RODRÍGUES, E.D.; KIRCHHEIM, A.P.; WANG, H. **Efflorescence of alkali-activated cements (geopolymers) and the impacts on material structures: A critical analysis.** Frontiers in Materials, Porto Alegre, v. 6, p. 89, 30 Abr. 2019.

STURM, P.; GLUTH, G. J. G.; BROUWERS, H. J. H,; KÜHNE, H. C. **Synthesizing one-part geopolymers from rice husk ash.** Construction and Building Materials, ScienceDirect, Berlin, v.124, P. 961-966, Ago. 2016.

WAN, Q.; ZHANG, Y.; ZHANG, R. **Using mechanical activation of quartz to enhance the compressive strength of metakaolin based geopolymers.** Cement and Concrete Composites. ScienceDirect, Wuhan, V.111, Abr. 2020.

ZHANG, Z.; PROVIS, J.L.; REID, A.; WANG, H. **Fly ash-based geopolymers: the relationship between composition, pore structure and efflorescence.** Cement and concrete research, ScienceDirect, Toowoomba, v. 64, p. 30-41, 30 Jan. 2014.