



**DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS COM A INCORPORAÇÃO DO LODO DE
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Matheus Rossetto⁽¹⁾

Engenheiro de Infraestrutura na Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

Luciano Senff⁽²⁾

Professor da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

Simone Malutta⁽³⁾

Professora da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

Rubia Lana Britenbach Meert⁽⁴⁾

Graduanda de Engenharia de Infraestrutura na Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

Bruno Borges Gentil⁽⁵⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental – Gerente da Água da Companhia Águas de Joinville

Endereço⁽²⁾: Rua Dona Francisca, 8300 - Campus da UFSC – Parque Perini – Joinville – Santa Catarina
CEP: 89.219-600 - Brasil - Tel: +55 (47) 3204-7305 - e-mail: l.senff@ufsc.br

RESUMO

Essa pesquisa se concentrou em analisar as características físicas, químicas e mecânicas de argamassas com a presença de lodo de estações de tratamento de água, como fonte de aluminossilicatos em substituição parcial do metacaulim, como também, utilizando o lodo como forma de adição. As formulações tiveram relação sólido/líquido de 1,5 e relação silicato/solução de 50%/50%. Foram testadas amostras com substituição do metacaulim por lodo com 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% e com adição de 0%, 10%, 15% e 20%. Concluiu-se que, no estado fresco, a incorporação do lodo reduz significativamente a trabalhabilidade da argamassa geopolimérica. No estado endurecido, após os 28 dias de cura, quando o lodo é adicionado em forma de substituição existe uma redução da resistência à compressão em relação a formulação de referência, sendo que a formulação com maior resistência à compressão foi com 25% de substituição, atingindo 33,25 MPa, redução de 25,39%. No caso de adição, todas as amostras apresentaram um aumento da resistência à compressão, sendo que a formulação com 15% de adição de lodo obteve 52,46 MPa de resistência à compressão, acréscimo de 17,73%.

PALAVRAS-CHAVE: Geopolímero, Lodo de ETA

Introdução

O concreto é amplamente utilizado em todas as obras da construção civil e tem evoluído para atender as necessidades com maior qualidade, durabilidade e menor custo (HAGEMANN, 2011). Em razão do volume consumido, atualmente a quantidade de matérias-primas provenientes de recursos naturais é muito significativa, e a energia utilizada para sua fabricação gera grande emissão de gases de efeito estufa, assim como poluição por poeira (ZHANG, 2014).

O concreto mais elementar é formado basicamente por aglomerante + agregado graúdo + agregado miúdo + água. O principal aglomerante é o cimento Portland. Deste modo, a comunidade científica tem procurado desenvolver ligantes alternativos capazes de apresentarem melhor desempenho, durabilidade e que sejam mais sustentáveis (HAGEMANN, 2011; WINCRET DESIGNER CONCRETE PRODUCTS LTDA, 2016).

Nesse contexto, surge o concreto de geopolímero, que consiste em uma pasta com ativação alcalina de aluminossilicatos e agregados com características similares aos materiais à base de cimento, porém, com o diferencial de apresentar menor impacto ambiental (DAVIDOVITS, 2002). São formados basicamente por uma fonte de aluminossilicato, geralmente o metacaulim, devido principalmente à sua elevada taxa de dissolução em meio alcalino e à facilidade de controle da relação Si:Al; e um ativador alcalino, responsável pela dissolução dos aluminossilicatos em um meio aquoso e em condições altamente alcalinas, usualmente sendo utilizado o hidróxido de sódio ou potássio (CESARI, 2015).



Os geopolímeros são membros da família de polímeros inorgânicos e podem ser fabricados com qualquer material ou resíduo que apresente uma quantidade considerável de silício (Si) e alumínio (Al) na forma amorfa à sem-cristalina (BHARATH, 2018). Assim, é possível utilizar, para a sua confecção, materiais que são rejeitos industriais e não tem um descarte adequado na natureza (BOCA SANTA, 2012).

Neste cenário, o processo de tratamento de água no Brasil gera grande volume de lodo que necessita ser descartado, usualmente tendo sido lançado nos recursos hídricos próximos ou transportado a aterros sanitários de lixo urbano. Os resíduos, quando lançados nos cursos de água, sem o tratamento adequado, colaboram para aumentar a concentração de metais tóxicos, além de diminuir significativamente a luminosidade do meio. Consequentemente, o tratamento e descarte é uma atividade complexa com custos operacionais elevados. (BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011; RODRIGUES; HOLANDA, 2013). O lodo das estações de tratamento de água (ETA) é um material de resíduo rico em minerais de silicatos e matéria orgânica (RODRIGUES; HOLANDA, 2013). Desta forma, se torna um material muito atrativo para a produção de geopolímeros.

Diante disso, este artigo se concentra em analisar propriedades físicas e mecânicas de argamassas geopoliméricas fabricadas com a utilização em diferentes quantidades do lodo de estações de tratamento de água em substituição parcial do metacaulim e como adição em uma matriz preestabelecida. O lodo utilizado, foi cedido pela Companhia Águas de Joinville e é proveniente da Estação de Tratamento de Lodo (ETL) da ETA Cubatão.

Materiais e metodologia experimental

Para a produção das argamassas geopoliméricas os seguintes materiais foram utilizados:

- Metacaulim (MK) como fonte de aluminossilicato: disponibilizado pela empresa Metacaulim Brasil e segue as especificações da norma NBR15894/10. Ele é composto basicamente por Al_2O_3 (32,6%) e SiO_2 (57,12%) e tem o tamanho médio das partículas é de 21 μm e $D50 = 6,5 \mu m$;
- (Solução de $H_2O + NaOH$) (9 molar) + Silicato de sódio como agente ativador alcalino: o NaOH é fabricado pela empresa Buschle & Lepper S/A e possui 98% de pureza e o silicato de sódio neutro Q-112 é fabricado pela mesma empresa;
- Areia média como agregado miúdo: de origem silícea, com massa unitária igual a 1,59 g/cm^3 .

O lodo é um resíduo gerado principalmente pela descarga de decantadores e pela lavagem dos filtros da ETA. O lodo misturado ao efluente é encaminhado para a ETL para o tratamento. Depois do efluente tratado a água clarificada é destinada ao rio Cubatão e o lodo adensado é encaminhado para um tanque de lodo, que serve como armazenamento. Este lodo é então direcionado aos equipamentos de desague que consistem em prensas parafusos. O teor de sólidos obtido no processo de desague gira em torno de 22 a 25%. Ainda na ETA é utilizado um polímero aniônico de alto peso molecular e baixa densidade de carga.

A determinação da composição do lodo da ETA foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios-X e espectrometria de absorção atômica e os resultados estão apresentados na Tabela 1. Foi possível perceber o material tem uma quantidade considerável de Al_2O_3 (25,50%) e SiO_2 (28,40%), tornando-o interessante para ser utilizado como fonte de sílica e alumina na matriz geopolimérica.

O lodo fornecido pela Companhia Águas de Joinville contém uma grande quantidade de água (aproximadamente 80%), porém a concentração elevada de água não é desejada pela diminuição da cinética de geopolimerização. Toda fase líquida na composição do geopolímero provém da solução de hidróxido de sódio e do silicato de sódio. Visto isso, o lodo precisou de um processamento para ser utilizado.

Primeiramente o material foi seco em estufa a 100 °C durante 24 horas. Após a secagem, foi levado ao moinho Servitech CT-12242, utilizando um jarro com uma capa de alumínio de 300 ml. Foram usadas 39 bolas de 14 mm e 17 bolas de 20 mm. A definição da quantidade de bolas empregada foi feita de forma experimental em função da granulometria desejada. O material permaneceu no moinho durante 7 minutos com uma rotação de 380 rpm. Após o processo, tornou-se pó (figura 1b).



Para a caracterização do lodo em pó foi realizada sua granulometria. Neste procedimento, foram utilizadas as peneiras de 125,106,74,63,45 e 25 μm . A curva granulométrica é apresentada na Figura 1.

O material com granulometria superior a 125 μm não foi utilizado para a confecção dos corpos de prova. O erro da curva granulométrica apresentada é 2,42%. A densidade do material em forma de pó também foi calculada e está na ordem de 0,513 g/cm^3 .

A metodologia experimental está esquematizada na Figura 2 abaixo e foi definida seguindo os critérios abaixo relacionados:

- Ausência visual de eflorescência nos corpos de prova;
- Incorporação máxima possível do resíduo (limitada pela trabalhabilidade);
- Manutenção constante da relação sólido/líquido, silicato e solução;

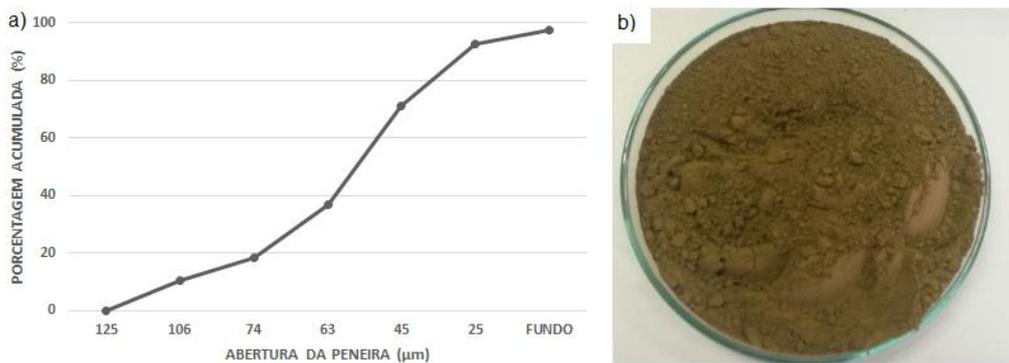


Elementos Teor (%)

Al ₂ O ₃	25,50
CaO	0,65
Fe ₂ O ₃	8,85
K ₂ O	0,95
MgO	0,69
MnO	0,12
Na ₂ O	0,22
P ₂ O ₅	0,59
SiO ₂	28,40
TiO ₂	0,65

Tabela 1 – Composição química do lodo. Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDMC), 2017.

Figura 1 – a) Curva granulométrica do lodo após a moagem b) Lodo em forma de pó



Atendendo aos critérios já citados, foram definidas duas possibilidades de formulações (tabela 2). A primeira, utilizando o lodo como substituição parcial do metacaulim, sendo trocado em massa pelo lodo em pó. Nesta condição, foi adicionado lodo nas seguintes porcentagens: 10%, 15%, 20%, 25% e 30% (F1 até F5). A segunda possibilidade, empregando o lodo na forma de uma adição. Neste cenário, a quantidade de metacaulim é mantida constante e o lodo é adicionado e aproveitado como agregado miúdo, alterando assim a traço da composição. Nesta possibilidade, o lodo foi adicionado nas porcentagens de 10%, 15% e 20% (F6 a F8).

Primeiramente o silicato de sódio e o hidróxido de sódio foram colocados no agitador mecânico e misturados a 100 rpm por 5 minutos. Em seguida, adicionou-se o metacaulim e o lodo em pó. Estes, foram misturados a 100 rpm por 5 minutos e posteriormente, sendo feita uma pausa de 1 minuto para a mistura manual com uma espátula do material retido na lateral da cuba. Após este procedimento, o misturador foi ligado novamente a 100 rpm por mais 5 minutos. Por fim, foi adicionada a areia e misturada por 2 minutos. Para produção dos corpos de prova, seguiu-se a NBR 13279/15. Posteriormente, os corpos de prova foram levados a estufa durante 24 horas à temperatura de 40° C e depois retirados, desenformados e colocados em uma sala a temperatura ambiente.



Tabela 2 – Formulações realizadas

	Formulação	S/L	Traço	Lodo (%)	MK (%)	NaOH (%) M	Na ₂ SiO ₃ (%)	Areia (%)
Substituição	REF	1,5	1:2	0	100	50	50	200
	F1	1,5	1:2	10	90	50	50	200
	F2	1,5	1:2	15	85	50	50	200
	F3	1,5	1:2	20	80	50	50	200
	F4	1,5	1:2	25	75	50	50	200
	F5	1,5	1:2	30	70	50	50	200
Adição	F6	1,5	1:2,10	10	100	50	50	200
	F7	1,5	1:2,15	15	100	50	50	200
	F8	1,5	1:2,20	20	100	50	50	200

No estado fresco foi realizado o ensaio de *flow table test*, que é especificado pelas normas NBR7215 e NBR13276 e tem por finalidade avaliar as argamassas quanto a sua plasticidade e consistência logo após sua confecção. Neste artigo, este ensaio foi utilizado para limitar a quantidade de lodo inserido na matriz, uma vez que se adicionou até se obter quantidades aceitáveis de trabalhabilidade. Além disso, através do ensaio, pode-se relacionar a quantidade de lodo incorporado com as propriedades do estado fresco.

Para analisar as propriedades no estado endurecido foram produzidos três corpos de prova, com dimensões 4x4x16 cm, para cada formulação analisada. Condicionou-se estes na estufa a 40°C nas primeiras 24 horas. Após este período, foram retirados da estufa, desmoldados e deixados a temperatura ambiente até completarem 28 dias de cura. Ao término deste período foram submetidos aos ensaios de compressão e flexão.

No estado endurecido, além do ensaio de compressão e flexão, foram obtidas as propriedades físicas (absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta) utilizando corpos de prova com 28 dias de cura. O método segue o princípio de Arquimedes e consiste em: a) condicionar o corpo de prova em estufa a aproximadamente (103±1) durante 24 horas e realizar sua pesagem (*ms*); b) imergir os corpos de prova em água durante 72 horas para que todos os poros sejam preenchidos e fazer a pesagem imersa (*mi*); c) pesagem da amostra com sua superfície seca (*mss*).

Com base nas medições realizadas é possível obter as propriedades físicas com as seguintes equações:

$$\text{Absorção de água} = \frac{mss - ms}{ms} \cdot 100 \quad \text{Equação (1)}$$

$$\text{Densidade aparente} = \frac{ms}{mss - mi} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\text{Porosidade aberta} = \frac{mss - ms}{mss - mi} \cdot 100 \quad \text{Equação (3)}$$

ms é massa seca, *mi* é a massa imersa e *mss* é a massa de superfície seca.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ensaio no estado fresco

Para a caracterização das amostras no estado fresco foi utilizado o *flow table test*. Este, realizado para todas as amostras a fim de avaliar a influência no lodo nas diferentes porcentagens estudadas. A Figura 2 mostra os resultados obtidos e as diferenças de trabalhabilidade para as amostras com maiores porcentagens de lodo.

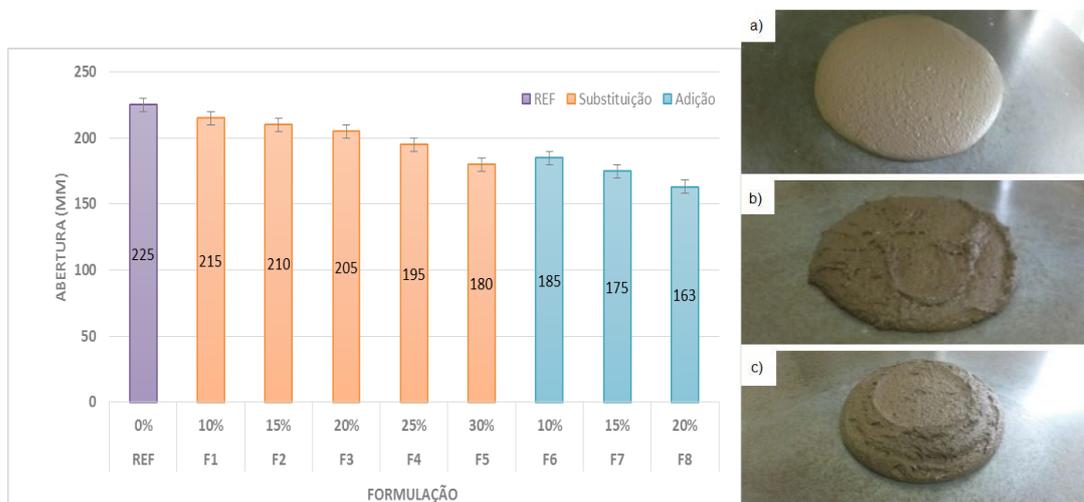


Figura 2 – Valores de espalhamento das formulações realizadas e abertura na mesa de consistência a) Formulação de referência b) 30% de substituição c) 20% de adição (F8)

Pode-se observar na Figura 2, que a presença do lodo causou uma redução significativa da trabalhabilidade, variando a abertura na mesa, no caso da substituição de 215 mm (F1) até 180 mm (F5) e de 185 mm (F6) a 163 mm (F8) para adição. Outro fato relevante, é que com as mesmas porcentagens de lodo adicionado mas com métodos diferentes (adição e substituição) a trabalhabilidade apresenta grande alteração. Os valores de abertura para adição são menores, pois para estas formulações, a quantidade de metacaulim e areia foram mantidas constantes, assim existe maior quantidade de sólidos para a mesma quantidade de líquido, o que resulta na aproximação entre os sólidos e maior atrito superficial.

É importante ressaltar que não foi possível manter a trabalhabilidade constante nas formulações. Nos geopolímeros, todo o líquido provém da solução (hidróxido de sódio) e do silicato de sódio, assim para manter a abertura na mesa constante a relação sólido/líquido deveria ser alterada. Foram realizadas amostras com relações s/l diferentes, porém para estas foi observado o aparecimento de eflorescência. A eflorescência aparece quando há hidróxido de sódio remanescente da reação com Si e Al. Assim, ocorre a formação de depósitos de sais por um processo chamado de lixiviação.

Referente a propriedades no estado fresco, a técnica que obteve os melhores resultados foi substituição, na qual os valores de abertura de mesa foram maiores. Contudo, vale ressaltar que a trabalhabilidade depende muito da aplicação desejada. Desta forma, as várias aberturas obtidas das formulações podem se apresentar adequadas para diferentes situações.



ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão após 28 dias de cura são mostrados na Figura 3. Estes, são a média dos três corpos de prova produzidos para cada formulação estudada. A formulação de referência atingiu resistência à compressão de 44,56 MPa.

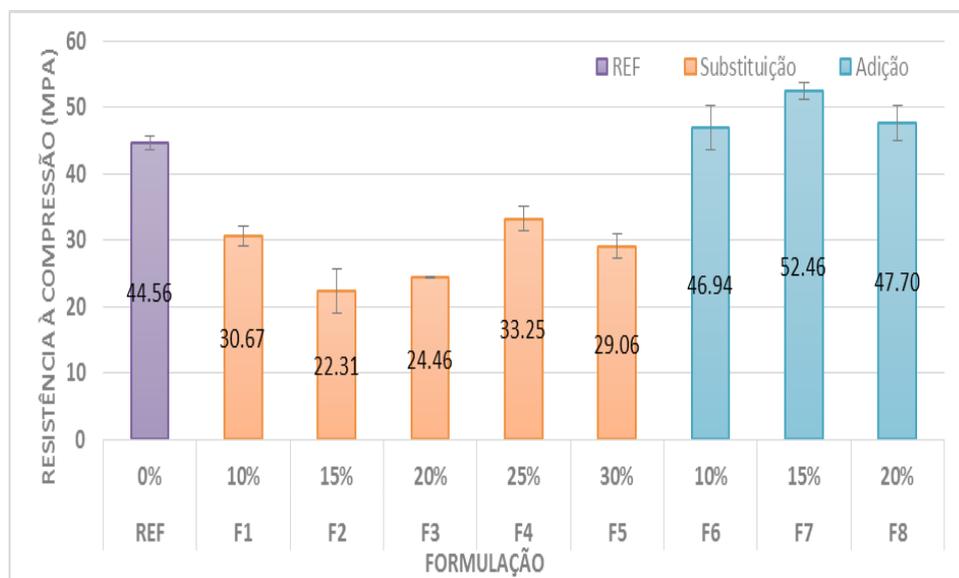


Figura 3 – Resistência à compressão após 28 dias

Verifica-se na Figura 6 que, para formulações com o lodo como substituição, o valor de resistência à compressão reduziu significativamente em relação a REF. Outro dado importante, é que existe um aumento da resistência nas formulações com 25% e 30%. Isto pode ser explicado, pela diferença já apresentada das propriedades físicas, na qual sempre F4 e F5 mostravam uma diferença significativa em relação as anteriores (F1, F2, F3). Para adição, a resistência à compressão da REF foi sempre superada. Consta-se também que a formulação de substituição que obteve o melhor resultado foi F4, com uma redução da resistência, em relação a REF, de 25,39%, atingindo assim 33,25 MPa. A menor resistência, foi vista em F2 com 22,31 MPa, redução de 49,39% em comparação a REF. Para adição, F7 obteve a maior resistência, com 52,46 MPa, aumento de 17,73%.

Os valores obtidos podem ser relacionados com as propriedades físicas. A Figura 4 relaciona resistência à compressão com porosidade aberta, as quais apresentam uma relação inversamente proporcional e que pode ser aproximada pela equação exponencial $y = 1164,7e^{-0,154x}$ com R^2 de 0,92. Essa relação é importante para se estimar os valores de resistência à compressão com dados de porosidade.

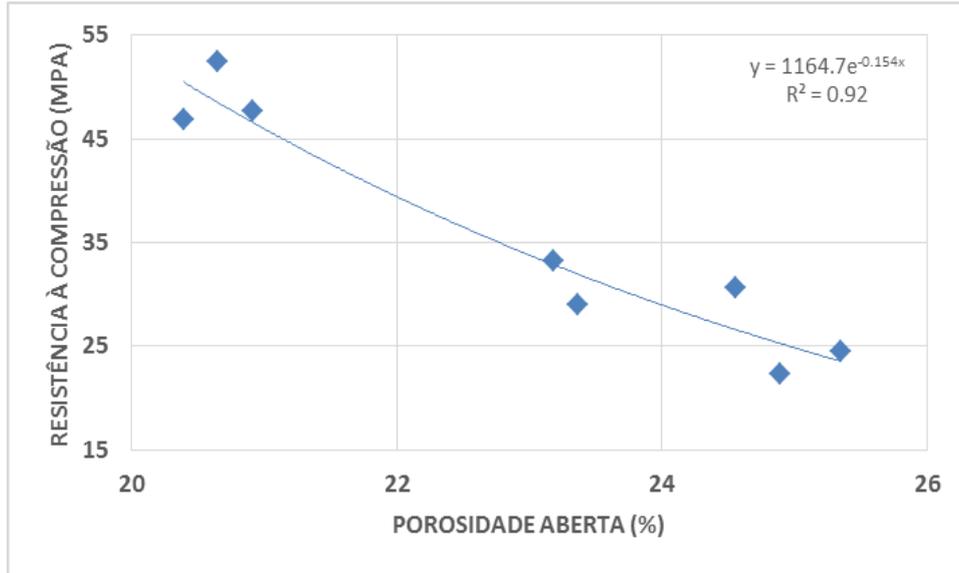


Figura 4 – Resistência à compressão X porosidade aberta

Observa-se na Figura 4, que para se obter uma argamassa geopolimérica com maior resistência à compressão é preciso ter uma menor porosidade possível, a qual tem uma variação que não é constante e depende diretamente da quantidade de lodo adicionado.

Neste sentido, identifica-se também na Figura 4 o motivo de as amostras de adição apresentarem os maiores valores de resistência à compressão, pois estas, obtiveram os menores valores de porosidade aberta. Neste ponto de vista, as formulações de substituição, F4 e F5 contiveram menores valores de porosidade que F1, F2 e F3, assim pode ser explicado o aumento de resistência à compressão observado anteriormente.

Em resumo, a técnica que apresenta os melhores resultados de resistência à compressão é a adição, na qual o valor de REF sempre foi superado. Vale ressaltar, que os valores de resistência para substituição também são muito significativos, pois todos se apresentam acima dos 20 MPa que é a valor mínimo aceitável para aplicações em obras da construção civil.

A Figura 5 mostra a comparação com outros estudos já realizados nesta área (Figura 5).

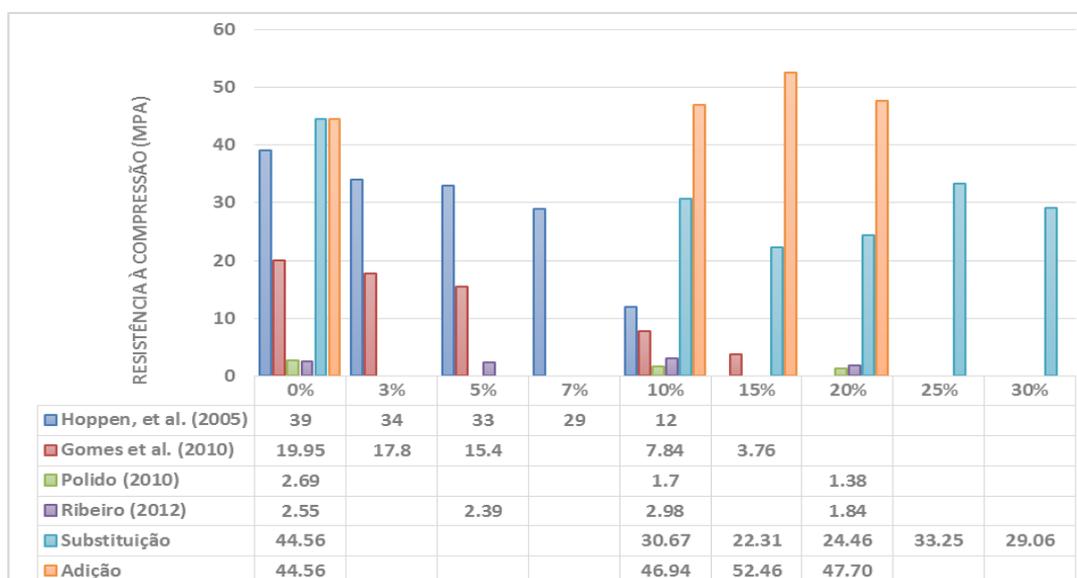


Figura 5 – Comparação com estudos já realizados



Percebe-se na Figura 5, que Hoppen, *et al.* (2005), com incorporação do lodo em concreto, atingiram resistência à compressão aos 28 dias, de 39 MPa, 34 MPa, 33 MPa, 29 MPa e 12 MPa para 0%, 3%, 5%, 7% e 10% de incorporação, respectivamente. Chama atenção a formulação com 10%, que nas argamassas geopoliméricas atingiu 33,67 MPa para substituição e 46,94 MPa para adição. Gomes *et al.* (2010), também em concreto, atingiu 19,95 MPa, 17,80 MPa, 15,40 MPa, 7,84 MPa e 3,76 MPa para 0%, 3%, 5%, 10% e 15% de adição de lodo. Polido (2010) e Ribeiro (2012) atingiram valores inferiores a 3 MPa em argamassas convencionais.

RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os valores de resistência à flexão foram obtidos com corpos de prova com 28 dias de cura e são mostrados na Figura 6. Estes, são a média dos três corpos de prova produzidos para cada formulação. A formulação de referência atingiu resistência à flexão de 9,43 MPa.

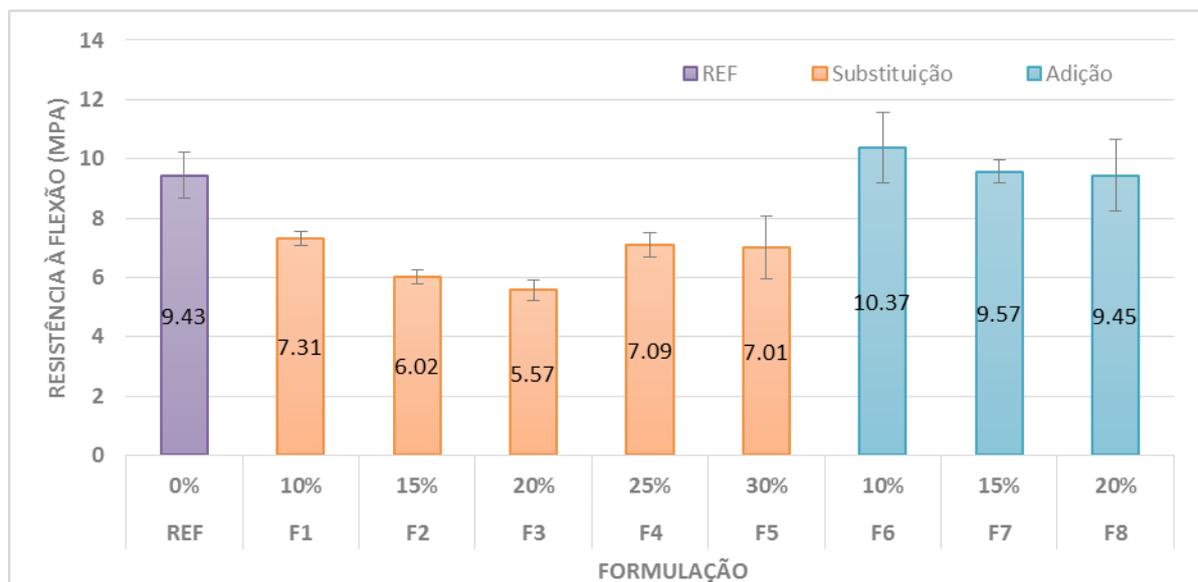


Figura 6 – Resistência à flexão após 28 dias de cura

Percebe-se que similarmente na resistência à compressão as formulações de substituição apresentaram uma redução da resistência à flexão se comparada a amostra de referência. Novamente, F4 e F5 tiveram um acréscimo da resistência, se comparadas com a tendência das formulações anteriores (F1, F2 e F3). Para as amostras de adição, o valor de resistência à flexão foi sempre maior que REF.

Observando a Figura 6, constata-se que a amostra de substituição que alcançou o maior valor de resistência à flexão foi F1 com 7,31 MPa, redução de 22,47% em relação a REF. Nas amostras de adição, F6 atingiu 10,37 MPa, aumento de 9,93% se comparado com REF.

Nota-se que a resistência à flexão é bem inferior do que a resistência à compressão. Esse comportamento também é observado nas argamassas a base de cimento Portland, na qual a resistência à tração é da ordem de $0,3\sqrt{f_{ck}}$, ou seja, para uma argamassa com resistência à compressão de 45 MPa tem-se, aproximadamente, uma resistência à flexão de 2,01 MPa. Assim, as amostras apresentam um valor de resistência à flexão muito superior se comparado com argamassas convencionais. Em média, as formulações estudadas alcançaram 22,4% da resistência à compressão como resistência à flexão.

Os dados de resistência à flexão podem ser relacionados com as propriedades físicas já estudadas. A Figura 7 relaciona resistência à flexão e porosidade aberta. Estas, tem uma relação inversamente proporcional que pode ser estimado pela equação exponencial com R^2 de 0,9274.

A Figura 7 mostra que para se obter argamassas geopoliméricas com maior resistência à flexão é necessário reduzir a porosidade, relacionada diretamente com a quantidade de lodo adicionada.



Para flexão, a técnica que apresenta os valores mais significativos de resistência é a adição, porém vale destacar que tanto nas formulações com adição, quanto nas com substituição, o valor de resistência à flexão foi muito superior ao valor de 2 MPa, que uma argamassa convencional a base de cimento apresentaria

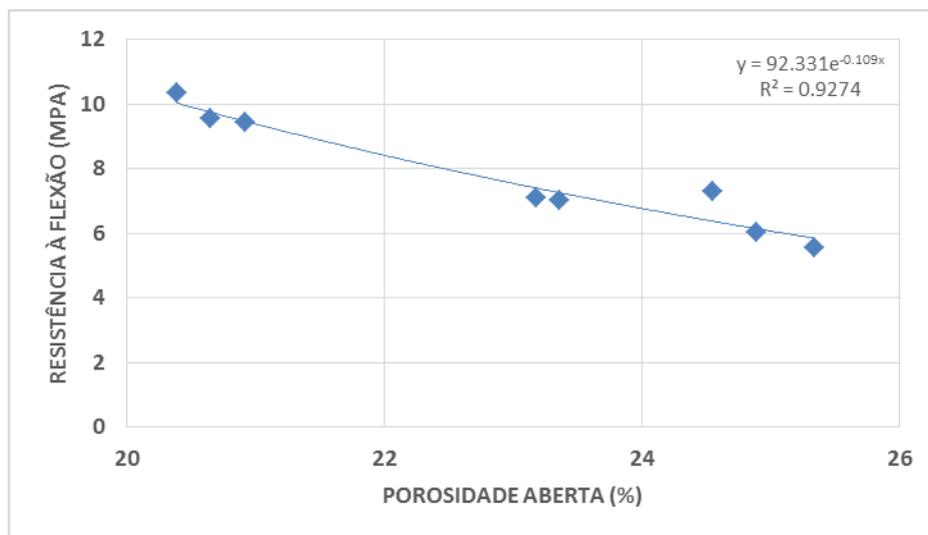


Figura 7 – Resistência à flexão X porosidade aberta

CONCLUSÃO

Por meio do ensaio de consistência (*flow table test*) foi possível perceber que a presença do lodo reduziu a trabalhabilidade significativamente nas duas situações estudadas. A técnica de substituição, apresentou valores de abertura maior se comparada ao caso de adição. Isso pode ser explicado pelo aumento do traço das amostras de adição, na qual existiam mais partículas sólidas para a mesma quantidade de líquido, fazendo com que estas ficassem mais próximas elevando o atrito superficial.

Quanto as propriedades físicas, comparadas a REF, para substituição, a absorção cresceu até F3 (20%) e reduziu para F4 (25%) e F5 (30%). A densidade aparente e a porosidade aberta sempre diminuíram. No caso de adição, a absorção, densidade aparente e porosidade aberta decresceram em todas as formulações. De maneira geral, a incorporação do lodo gerou queda nos índices de propriedades físicas.

Os parâmetros de resistência à compressão tiveram comportamentos semelhantes nas duas possibilidades estudadas. O caso de adição obteve os melhores resultados nas duas situações. Os dados mais significativos se mostraram na formulação F7 (15%), que exibiu um acréscimo de resistência de 17,73%, atingindo 52,46 MPa de resistência à compressão e F6 (10%). Na situação de substituição, os valores mais expressivos são de F4 (25%) com um decréscimo de 25,39%, tendo 33,25 MPa de resistência à compressão.

A redução dos parâmetros de resistência pode ser explicada pela função que o lodo tem em cada técnica. Para substituição, o lodo se apresenta como fonte de aluminossilicato, sendo assim, existe a necessidade da Si e Al reagirem com o ativador. Assim, conclui-se que a Si e Al presente no lodo não são totalmente reativas ou apresentam uma reatividade inferior ao metacaulim, sendo assim, foi observada a variação de resistência para substituição. No modo de adição, o lodo tem a função de um agregado miúdo, desta forma, ele não precisa reagir e é incorporado para o aumento da resistência mecânica.

Além da função do lodo, a porosidade aberta influenciou na resistência mecânica. Esta, apresentou uma variação que não é constante e depende diretamente da quantidade de lodo adicionado. Percebeu-se que, para se obter argamassas geopoliméricas mais resistentes, é necessário diminuir a porosidade. Tendo isso em vista, pode ser explicado o valor de resistência à compressão e flexão elevado das formulações de adição, que apresentaram os menores valores de porosidade aberta.



Com base no dados obtidos, é correto afirmar que o lodo de ETA pode ser utilizado em argamassas geopoliméricas, tanto na forma de substituição parcial do metacaulim, como adição com função de um agregado miúdo. O método de substituição é mais indicado para aplicações que necessitam de argamassas fluídas e com maior trabalhabilidade. A técnica de adição seria apropriada para situações que necessitam valores elevados de resistência, como em estruturas, nas quais a trabalhabilidade não é muito relevante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BERNARDO, Luiz di; DANTAS, Angela di Bernardo; VOLTAN, Paulo Eduardo Nogueira. **Trabalhabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Ldibe Editora, 2011. 453 p.
2. BHARATH, R. **Rheology of geopolymer concrete**. Disponível em: <http://www.kscst.iisc.ernet.in/spp/37_series/spp37s/synopsis_seminar/025_37S1026.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2018.
3. BOCA SANTA, R. A. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. 34 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2012
4. CESARI, Vanessa Fernandes. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015. 128 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
5. DAVIDOVITS, J. **30 Years of successes and failures in geopolymer applications. market trends and potential breakthroughs**. Geopolymer institute. Geopolymer. Melbourne, Australia: Conference, oct. 28-29 2002.
6. GOMES, Igor Alan Soares et al. **Adição de lodo de estação de tratamento de água em argamassa**. 2010. 11ª Semana de Iniciação Científica e 2ª Semana de Extensão. Disponível em: <<https://www.unilestemg.br/pic/sic-11/resumos/pesquisa-engenharia-tecnologia/adicao-de-lodo-de-estacao-de-tratamento-de-agua-em-argamassa.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2018.
7. HAGEMANN, S. E. **Materiais de construção básicos**. Rio Grande do Sul: Instituto Federal Sul-Rio-Grandense; Universidade Aberta do Brasil, 2011. Disponível em: <http://tics.ifsul.edu.br/matriz/conteudo/disciplinas/_pdf/apostila_mcb.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2018.
8. HOPPEN, Cinthya.; PORTELLA, Kleber F.; ANDREOLI, Cleverson V.; SALES, Almir.; JOUKOSKY, Alex. Estudo de Dosagem para Incorporação de Lodo de ETA em Matriz de Concreto, Como Forma de Disposição Final. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005. Campo Grande. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <[http://www.sanepar.com.br/sanepar/CalandraKBX/filesmng.nsf/C22AAD74368E2D9B832570B500646487/\\$File/I-106.pdf?OpenElement](http://www.sanepar.com.br/sanepar/CalandraKBX/filesmng.nsf/C22AAD74368E2D9B832570B500646487/$File/I-106.pdf?OpenElement)>. Acesso em: 6 fev. 2018.
9. POLIDO, Marcele Aparecida. **Estudo de argamassa com adição do lodo de ETA**. 2010. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Tecnologia em Materiais de Construção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2010.
10. RIBEIRO, Rodolfo Faquini. **Estudo de dosagem de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em argamassa**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.
11. RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento**. 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v59n352/10.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2018.
12. WINCRET DESIGNER CONCRETE PRODUCTS LTDA. **Cimento Portland versus Ligantes Geopoliméricos Considerações econômicas sobre as implicações do mercado de carbono no custo dos concretos**. Disponível em <<http://www.geopolymer.com.br/PDF/cpxgp.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2018.
13. ZHANG, Zuhua et al. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. **Construction & Building Materials**. v.56, p.114, jan. 2014.