Universidade Federal de Uberlândia
Campus Santa Mônica

Faculdade de Engenharia Civil

Ana Laura Berger de Oliveira

ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS POR RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU, POLIESTIRENO EXPANDIDO E CASCA DE SOJA EM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA À BASE DE METACAULIM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora:
Profa. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta

UBERLÂNDIA
2020

ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS POR RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU, POLIESTIRENO EXPANDIDO E CASCA DE SOJA EM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA À BASE DE METACAULIM

Ana Laura Berger de Oliveira[1]

Leila Aparecida de Castro Motta[2]

RESUMO

O desenvolvimento de novos processos construtivos incita pesquisadores e empresas a investir em novos materiais de engenharia que satisfaçam as necessidades do setor, que contribua na busca por alternativas sustentáveis, com custo compatível aos dos materiais convencionalmente utilizados. Deste modo, o geopolímero é estudado como uma alternativa ecologicamente viável de substituição da matriz cimentícia, uma vez que o impacto ambiental da produção do cimento Portland é muito alto. Ademais, o aproveitamento de resíduos de produção vegetal ou materiais recicláveis como substituição de agregados naturais concebe uma ação relevante sob o ponto de vista da sustentabilidade. O presente trabalho estuda o comportamento de um novo material, com o metacaulim utilizado como fonte de aluminossilicato em uma matriz geopolimérica, associado a uma solução ativadora composta pela combinação de silicato de sódio e hidróxido de sódio. Cascas de soja, borracha de pneu de recauchutagem, poliestireno expandido (EPS) reciclado e triturado foram incorporados como substituição de agregados miúdos em diferentes porcentagens, sendo analisada a alteração da resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica seca das amostras. Os resultados da substituição parcial do agregado por borracha foram os que mais se aproximaram do traço de referência. Os teores de substituição por EPS e casca de soja apresentaram uma queda acentuada da resistência à compressão, porém a baixa massa específica torna estes materiais interessantes, pois podem ser utilizados como materiais leves, sem demanda de resistência e que não agregam carga à estrutura.

Palavras-chave: Argamassa geopolimérica. Metacaulim. Borracha de recauchutagem. EPS. Casca de soja

ABSTRACT

The development of new construction processes encourages researchers and companies to invest in new engineering materials that satisfy the sector, which contributes to the search for sustainable alternatives, at a cost compatible with those conventionally used materials. Thus, the geopolymer is studied as an ecologically viable alternative to replace the cement matrix, since the environmental impact of Portland cement production is very high. In addition, the use of plant production waste or recyclable materials as a substitute for natural aggregates conceives a relevant action from the point of view of sustainability. The present work studies the behavior of a new material, with the metacaolin used as a source of aluminosilicate in a geopolymeric matrix, associated with an activating solution composed by the combination of sodium silicate and sodium hydroxide. Soy husks, tire rubber from retreading process, recycled and crushed

[1] Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: analauraberger11@gmail.com

[2] Professora da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: lacastro@ufu.br

expanded polystyrene (EPS) were incorporated as a substitute for fine aggregates in different percentages, being analyzed the change in compressive strength, water absorption, voids ratio and dry specific mass samples. The results of the partial replacement of the aggregate by rubber were the ones that came closest to the reference trait. The contents of substitution by EPS and soy husks showed a sharp drop in compressive strength, however the low specific mass makes these materials interesting, as they can be used as light materials, without resistance demand and that do not add load to the structure.

Keywords: Geopolymeric mortar. Metacaolin. Retreading rubber. EPS. Soy husks.

1 Introdução

1.1 Justificativa

O interesse em alternativas sustentáveis fomenta o estudo para a substituição de matérias primas e métodos de produções poluidores. A indústria cimenteira é responsável por cerca de 7% de todo o gás carbônico (CO_2) emitido no planeta (ABCP, 2019), assim como o gasto energético de sua produção também é muito grande, o que incita pesquisas para a substituição deste material tão presente no âmbito da construção civil. Neste sentido, o geopolímero se apresenta como material de grande potencial sob o ponto de vista da sustentabilidade com bom desempenho.

Ademais, os materiais orgânicos e reciclados na engenharia civil podem ser utilizados de diversas maneiras sob o viés da sustentabilidade. Os resíduos da produção de soja e arroz, por exemplo, podem ser utilizados como substituição da areia, agregado miúdo natural comumente utilizado. Apesar da borracha de pneu de recauchutagem e o poliestireno expandido (EPS) reciclado e triturado não serem materiais naturais, estes também são potenciais substituintes do agregado miúdo. O uso desses materiais reciclados pode gerar diversos benefícios, tanto ao meio ambiente quanto ao viés financeiro, ao se reutilizar o que não seria aproveitado e/ou incorretamente descartado, incorporando estes materiais que são abundantes e baratos no Brasil (SOUZA, 2017).

Há poucos estudos sobre a adição destes três materiais em compósitos geopoliméricos, sendo este trabalho promissor para os avanços em novos materiais de engenharia civil.

1.2 Objetivo

Os objetivos principais deste Trabalho de Conclusão de Curso são: analisar o comportamento dos compósitos produzidos com matriz geopolimérica com substituição parcial dos agregados miúdos por resíduos de produção vegetal (cascas de soja) e materiais recicláveis (borracha de pneu e EPS) e compará-los à uma matriz de referência e à compósitos semelhantes

da literatura quanto à resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica seca.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Geopolímero à base de metacaulim

De acordo com Vassalo (2013), os primeiros geopolímeros foram estudados nas décadas de 50 e 60 pelo ucraniano Glukhovsky (1989) que os nomeou de cimento de solo por utilizar na sua produção materiais naturais (aluminosilicatos minerais moídos, misturados com resíduos industriais ricos em álcalis) que apresentaram capacidade ligante, como o cimento Portland.

Outro importante nome no estudo dos geopolímeros é Davidovits, que depois de uma série de incêndios catastróficos na França envolvendo plásticos orgânicos entre os anos de 1970 e 1973, se dedicou na pesquisa de novos materiais mais resistentes ao calor (ALVES, 2018).

Os geopolímeros são materiais ativados alcalinamente, tal que esta ativação se dá pela reação de hidratação de alumino-silicatos com substâncias alcalinas ou alcalinoterrosas. De maneira simplificada, são ligantes que se endurecem por meio da ativação de um sólido em meio alcalino, cujo ganho de resistência é resultado das redes tridimensionais de aluminossilicatos inorgânicos (SEVERO *et al.*, 2013; SCHNEIDER *et al.* 2011).

Estes podem apresentar diversas propriedades e características, dependendo dos materiais envolvidos na reação, tais como elevada resistência à compressão, baixa retração, resistência a ácidos, resistência ao fogo e afins. Vale ressaltar que a produção de geopolímeros não exige calcinação à alta temperatura, o que gera menor impacto ambiental. Sendo assim, tais características tornam os geopolímeros potenciais alternativas sustentáveis ao cimento Portland (LI, C.; SUN, H.; LI, L, 2010; DAVIDOVITS, 2002).

Por sua vez, o metacaulim, material aluminossilicato escolhido para ser base do geopolímero estudado, é termicamente ativado, gerado pela calcinação de argilas cauliníticas em temperaturas entre 650°C a 800°C e possui alta atividade pozolânica (LI, C.; SUN, H.; LI, L, 2010). É um material comumente utilizado como adição mineral na indústria cimentícia, porém também é utilizado na indústria siderúrgica, química e outras (METACAULIM DO BRASIL, 2003).

2.2 Materiais reciclados como substituição parcial do agregado miúdo

É evidente a atual importância da construção civil no âmbito da sustentabilidade, sendo o ramo que apresenta os melhores resultados com a incorporação de materiais reciclados e

reaproveitados, como subprodutos e rejeitos industriais ou naturais (ALVES, 2020). Nesse sentido, a utilização de agregados leves reciclados na construção civil é uma grande oportunidade de se estudar materiais inovadores e seus comportamentos sob o viés da sustentabilidade, com o objetivo de descobrir bons materiais alternativos, que possam evitar o descarte e acúmulo de diversos rejeitos na natureza, além de minimizar a extração de recursos naturais.

Sendo assim, no presente trabalho serão estudados geopolímeros a base de metaculim, com substituição parcial da areia, agregado miúdo natural comumente utilizado, por cascas de soja, borracha de pneu de recauchutagem, poliestireno expandido (EPS) reciclado e triturado.

2.2.1 Borracha de pneu de recauchutagem

O pneu é um item essencial para o funcionamento dos veículos automotores e, portanto, para a indústria automobilística e o sistema rodoviário brasileiro. De acordo com Bravo (2014), no ano de 2013, as dez principais empresas brasileiras produziram 68,8 milhões de unidades, número preocupante devido ao seu caráter inservível após sua curta vida útil, gerando um descarte elevado deste material.

O processo de recauchutagem prolonga a vida útil de um pneu, aproveitando sua estrutura e incorporando uma nova camada de borracha externa. Durante o processo, por meio da raspagem das bandas de rodagem, originam-se resíduos de borracha de pneus que podem ser reaproveitados, constituídos de pequenas partículas de granulometria variável (FIORITTI, 2002).

De acordo com Azmi *et al.* (2016) e Bravo (2014), o uso da borracha de pneu na construção civil em matrizes geopoliméricas é majoritariamente recomendado para a confecção de concretos leves e para aplicações não estruturais. Estes autores justificam a viabilidade deste material, apesar da redução da resistência mecânica à compressão e flexão, devido aos benefícios encontrados. Dentre os benefícios mencionados citam-se: baixa densidade do material, que gera menores cargas em uma edificação; melhor isolamento térmico, comparado a blocos semelhantes feitos com cimento Portland e areia convencional; e resultados favoráveis quanto à absorção de água, somados ao benefício de ser um material ecológico.

2.2.2 Poliestireno expandido (EPS)

EPS é a sigla internacional do Poliestireno Expandido, material descoberto na Alemanha em 1949, resultado da polimerização do estireno em água, cujo volume pode alcançar até 98% de ar depois do processo de transformação em vapor. É um material inerte e pode ser

reaproveitado e reciclado infinitas vezes, pois não perde suas propriedades mecânicas. De acordo com a Comissão Setorial do EPS no Brasil, o CAN (Consumo Aparente Nacional = produção + importação - exportação) cresceu em 4,0% de 1999 a 2017, alcançando o valor de 91,74 mil toneladas no ano de 2017 (EPS BRASIL, 2020).

O EPS pode ser reciclado de diversas maneiras e destinado a diversos fins. No âmbito da construção civil, pode ser utilizado como agregado leve na busca por materiais com menor densidade e menor condutividade térmica, como apontam a maioria dos estudos nessa área (BOGDANOV *et al*., 2012; DUAN *et al.*, 2017; KAKALI *et al.*, 2018; POSI *et al*., 2015; SINGH *et al*., 2013).

DUAN *et al.* (2017) estudaram um novo compósito de isolamento térmico, com partículas de poliestireno (EPS) com 2,5 mm de diâmetro, à uma base de metacaulim, tal que a razão em massa de partículas de EPS para metacaulim foi variada de 0,25 a 1,00. Os resultados adquiridos pelos autores mostraram que houve uma queda de resistência à compressão e flexão à medida que o teor de partículas de EPS aumentava, em comparação ao geopolímero de referência sem EPS. Em contrapartida, os resultados mostraram significativa queda nos valores de densidade seca e condutividade térmica avaliados. Tais valores estão ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1: Composição de material lignocelulósico

	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Densidade seca (kg/m³)	Condutividade térmica (W/mK)
Geopolímero de referência (sem EPS)	6,5	1,4	835	0,15
EPS / metacaulim = 0,25 em massa	4	1,1	380	0,08
EPS / metacaulim = 1,00 em massa	3	0,6	100	0,035

Fonte: adaptado de DUAN *et al.* (2017).

Demais autores que estudaram o uso do EPS como agregado leve, como Bogdanov *et al.* (2012), também obtiveram resultados similares e indicam a aplicação de materiais geopoliméricos leves sintetizados na construção civil como, por exemplo, na construção de paredes internas.

2.2.3 Casca de soja

A casca de soja é um subproduto do cultivo da soja em que, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no início de 2020, sua produção pode ultrapassar a casa das 123,3 milhões de toneladas neste mesmo ano (CANAL RURAL, 2020). De acordo com Mulrhead (1993), obtêm-se 8 kg de casca de soja a cada 100 kg de soja processada. Desse modo, pode-se também concluir que há este subproduto em abundância no Brasil, o que colabora com o viés sustentável deste trabalho.

A casca de soja é um material orgânico lignocelulósico, composto por celulose, heimicelulose e lignina, responsáveis respectivamente pela estabilidade e resistência, pela rigidez e pela ligação entre as fibras. Na Tabela 2, analisa-se a composição resíduo, juntamente com a casca de arroz.

Tabela 2: Composição de material lignocelulósico

Material lignocelulósico	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Casca de soja	38	10	3
Casca de arroz	35	12	15

Fonte: adaptado de Hickert (2014).

Há poucos estudos sobre a utilização da casca de soja no âmbito da construção civil. Entretanto, a literatura aponta viabilidade no uso de casca de arroz para substituição parcial de agregado miúdo e segundo a Tabela 2, a composição é muito similar. Souza (2008) comprovou a viabilidade da substituição de parte do agregado miúdo (areia) por casca de arroz em argamassas de matriz cimentícia, sob ponto de vista físico e mecânico do produto final. Em outra perspectiva, Martinez *et. al* (2005) concluiu que é viável o uso de casca de arroz para painéis de vedação, em taxas menores do que 20%, como alternativa de substituição aos convencionais tijolos cerâmicos, pois possuem o mesmo desempenho.

3 Metodologia

A obtenção de argamassas geopoliméricas com a substituição parcial de agregado miúdo tem como objetivo verificar as propriedades físicas dos compostos por meio do ensaio de compressão, da determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica seca.

A produção do geopolímero foi realizada com metacaulim como material base, ativado pela solução alcalina resultante da combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio e água, em proporções previamente determinadas pelo estudo de Alves (2018). Para estudar a substituição parcial dos agregados, variaram-se os teores de resíduos, de acordo com a revisão bibliográfica deste trabalho, como retrata a Tabela 3.

Tabela 3: Teores de substituição em volume do agregado

	Borracha	EPS	Casca de soja
% de substituição em volume	5, 10 e 15	50, 75 e 100	10, 20 e 30

Fonte: A autora.

Após a desforma os corpos de prova foram envolvidos em filme plástico e curados em temperatura ambiente (25 ± 5° C). Os ensaios de compressão e absorção foram realizados com a idade de 7 dias de acordo com as normas ABNT NBR 13279 (2005) e ABNT NBR 9778 (2005), respectivamente.

3.1 Preparo e caracterização dos materiais

3.1.1 Metacaulim

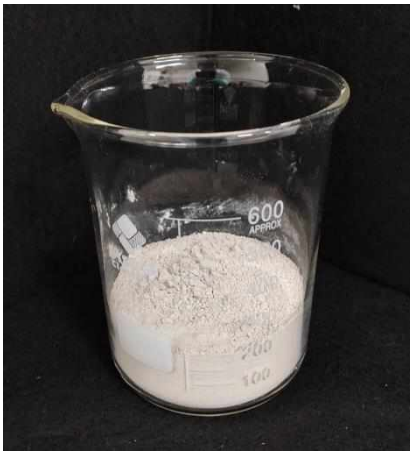
O metacaulim utilizado, denominado *MetacaulimHP* e ilustrado na Figura 1, foi doado pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda, de Jundiaí – SP. O material foi caracterizado por Alves (2018) e é composto basicamente de sílica e alumina, pois a soma desses óxidos proporciona uma porcentagem maior que 90% da sua composição total. Outras características do metacaulim estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Tamanho da partícula, massa específica e índice pozolânico do metacaulim

Diâmetro médio (μm)	12,4
Massa específica (kg/m3)	2650
Área de superfície específica (m²/kg)	32700
Atividade pozolânica a 90 ± 5 °C (mg CaO/g amostra)	771,2

Fonte: Metacaulim do Brasil (2003).

Figura 1: Metacaulim



Fonte: A autora.

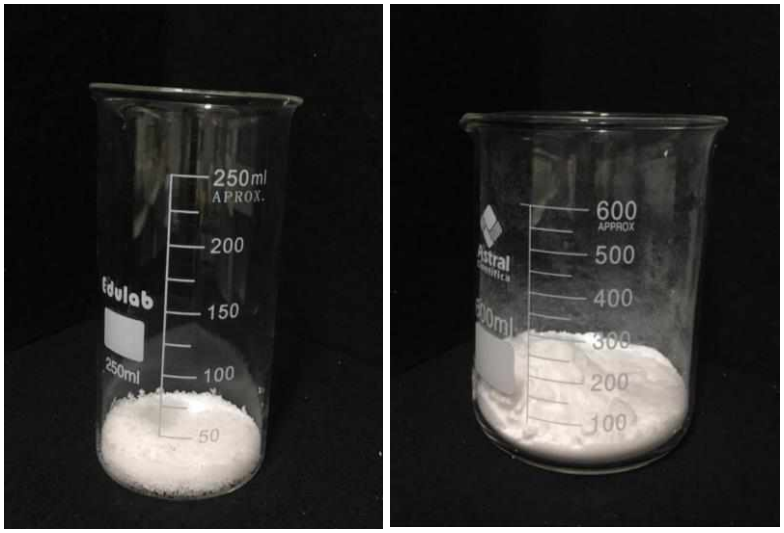
3.1.2 Hidróxido de sódio e Silicato de sódio

O hidróxido de sódio utilizado neste trabalho foi adquirido da empresa Vetec Química Fina Ltda e contém 99% de NaOH.

O silicato de sódio foi adquirido da empresa UNAPROSIL - Usina Nova América, tal que o produto se chama “Silicato de sódio alcalino em pó 2.00”, uma vez que este produto possui a relação entre os óxidos de silício e sódio (SiO_2/Na_2O) de 1,98.

Ambos os materiais estão ilustrados na Figura 2.

Figura 2: Hidróxido de sódio e Silicato de sódio, respectivamente



Fonte: A autora.

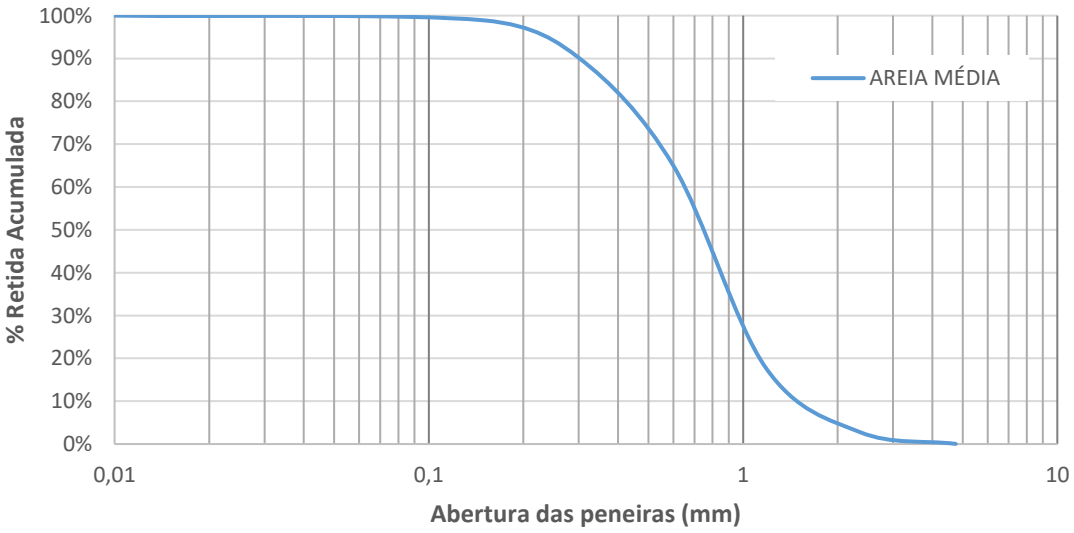
3.1.3 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo natural utilizado foi areia média de rio, provenientes da região do Triângulo Mineiro em Minas Gerais, como mostra a Figura 3. O material foi caracterizado obtendo massa específica igual a 2,66 g/cm³, sua dimensão máxima característica 2,36 mm, módulo de finura 2,75 e sua curva granulométrica está ilustrada na Figura 4.

Figura 3: Areia média de rio

Fonte: A autora.

Figura 4: Curva granulométrica da areia



Fonte: A autora.

3.1.4 Borracha de pneu de recauchutagem

A borracha de pneu utilizada neste trabalho é proveniente da etapa de raspagem de pneus, que faz parte do processo de recauchutagem (Figura 5). O rejeito da borracha é classificado como resíduo classe II – B (ABNT NBR 10004:2004), pois não contém metais pesados, não sofre lixiviação e não é solúvel em água.

Figura 5: Borracha proveniente da raspagem de pneus

Fonte: Alves (2020); A autora.

A borracha foi previamente caracterizada por Alves (2020), tal que o material apresenta massa específica de 1,05 g/cm³, dimensão máxima característica de 6,3 mm e absorção de 0,1%, determinados respectivamente segundo adaptações à ABNT NBR NM52:2009, ABNT NBR NM 248:2003 e Bouchonneau *et al.* (2010).

3.1.5 Poliestireno Expandido (EPS) reciclado

O Poliestireno Expandido (EPS) utilizado neste trabalho foi do tipo reciclado, recebido triturado e previamente caracterizado por Alves (2020), obtendo-se massa específica igual a 0,0135 g/cm³ e a absorção igual a 300%, determinados respectivamente segundo adaptações à ABNT NBR NM52:2009 e Bouchonneau *et al.* (2010)

Os resíduos de plásticos polimerizados – Código de Identificação A007 são classificados como não perigosos (ABNT NBR 10004:2004), desde que não contaminados por produtos considerados perigosos. Desse modo, o EPS é enquadrado como resíduo classe II B –

não perigosos e inertes, pois em presença de água destilada à temperatura ambiente o resíduo mantém sua integridade e não solubiliza seus constituintes.

A Figura 6 A ilustra as partículas de diversos tamanhos do EPS recebido, resultado da trituração mecânica, parte do processo de reciclagem das peças de EPS. Para este trabalho, o EPS foi peneirado com peneira #4,8 mm, como mostra a Figura 6 B.

Figura 6: EPS reciclado triturado (A) e peneirado (B)

(A) (B)

Fonte: Alves (2020); A autora.

3.1.6 Casca de soja

A casca de soja utilizada neste trabalho, representada na Figura 7, é proveniente de rejeitos do beneficiamento da soja e foi cedida pela empresa Algar Agro AS, localizada em Uberlândia.

O rejeito foi previamente caracterizado pelo Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e tem em sua composição química 48,2% de celulose, 24,0% de hemicelulose, 5,78% de lignina e 3,94% de cinzas (NETO, 2012.).

Para a determinação da massa específica da casca de soja, adaptou-se o ensaio de determinação da massa específica de agregados miúdos (ABNT NBR NM52:2009), tal que o resultado obtido foi 0,80 g/cm³.

Figura 7: Casca de soja in natura

Fonte: A autora.

3.2 Dosagem, preparo e moldagem dos corpos de prova

Neste trabalho, utilizou-se a matriz geopolimérica a base de metacaulim previamente estudada por Alves (2018) e adaptada para argamassa com um pré-estudo da relação metacaulim e areia, como mostram as Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Traço referência

Metacaulim : Areia	Água/Metacaulim	NaOH : Na_2SiO_3
1 : 2	0,60	1 : 2,5

Fonte: A autora.

Tabela 6: Proporção de materiais em gramas para moldar 6 corpos de prova de 4x4x4 cm da argamassa de referência

Metacaulim	Areia	NaOH	H_2O para NaOH	Na_2SiO_3	H_2O para Na_2SiO_3	H_2O excedente
266,66	533,34	45,42	75,68	113,54	77,52	6,8

Fonte: A autora.

Primeiramente, misturou-se a solução de NaOH durante 1 minuto e a solução de Na_2SiO_3 em seguida, como mostra as Figuras 8 A e B, respectivamente. Foi necessário fazer essas misturas em resfriamento controlado (banho em água resfriada) devido ao calor gerado neste processo, que acelera a geopolimerização e dificultaria a moldagem dos corpos de prova. Então,

as soluções foram misturadas promovendo a homogeneização e resfriamento à temperatura ambiente novamente (Figura 8 C). A tal mistura foi então acrescentada ao metacaulim e homogeneizados por 5 min.

Figura 8: Solução de NaOH (A), solução de Na_2SiO_3 (B) e mistura das duas soluções (C)

(A) (B) (C)

Fonte: A autora.

Posteriormente, acrescentaram-se a areia, os resíduos, de acordo com a porcentagem de cada substituição, e a chamada água excedente para conferir trabalhabilidade à argamassa. A Figura 9 A mostra a argamassa sem substituição (referência), a Figura 9 B mostra o traço com 100% de substituição por EPS (EPS100) e a Figura 9 C mostra o traço com 30% de substituição por casca de soja (CS30).

Figura 9: Argamassas de referência (A), EPS100 (B) e CS30 (C)

(A) (B) (C)

Fonte: A autora.

No caso da casca de soja, o resíduo foi saturado com água por 15 min, para que o material não absorvesse parte da água da mistura calculada para o traço. Depois o excesso de água do resíduo foi retirado, com o uso de peneiras finas e das mãos para fazer uma leve pressão. A Figura 10 mostra a casca de soja saturada antes de ser acrescentada à argamassa. Mesmo com a saturação, a substituição com casca de soja prejudicou a trabalhabilidade da argamassa, porém ainda foi possível moldá-la.

Figura 10: Casca de soja saturada

Fonte: A autora.

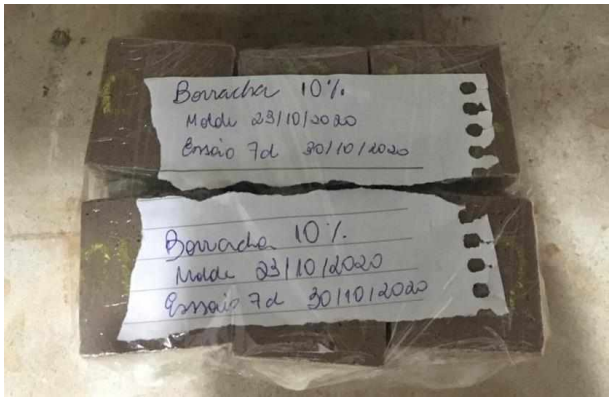
Após a mistura, o material foi moldado em formas metálicas com capacidade para três corpos de prova com dimensões 4 x 4 x 4 cm, de acordo com adaptações sugeridas por CAPRARO *et al*. (2019) à ABNT NBR 13279 (2005). Foram moldados, para cada teor estudado, seis corpos de prova, sendo quatro para o ensaio de compressão e dois para o ensaio de absorção.

Cada molde foi adensado com trinta golpes na mesa de adensamento e selados com filme plástico (Figura 11), para evitar perda de umidade para o ambiente (REED; LOKUGE e KARUNASENA, 2014; KHAN *et al.*, 2016; REVATHI; JEYALAKSHMI e RAJAMANE, 2018), a reação com o CO_2 do ambiente e a formação de carbonato de sódio como consequência (ALZEER; MACKENZIE, 2013; BOUGUERMOUH *et al*., 2017). Por fim, os corpos de prova foram curados a temperatura ambiente de 25 ± 5° C, desmoldados em 24h e embalados novamente com o filme plástico, como mostra a Figura 12, para posteriores ensaios na idade fixada em 7 dias. A idade de 7 dias foi definida para viabilizar a realização do TCC e também porque a resistência não aumenta significativamente após os sete dias de idade (ALVES, 2018).

Figura 11: Moldagem dos corpos de prova

Fonte: A autora.

Figura 12: Exemplo de corpos de prova embalados para cura



Fonte: A autora.

3.3 Ensaios

3.3.1 Compressão

O ensaio foi realizado em conformidade com a ABNT NBR 13279 (2005), em condições ambientes do laboratório (temperatura: 25 ± 5 °C; umidade: 55 ± 10%) utilizando uma Máquina Universal de Ensaios da marca Instron, modelo 5982 e célula de carga de 100 kN, como mostra a Figura 13. Os corpos de prova foram ensaiados envoltos ao plástico filme apenas para evitar sujar a máquina.

Figura 13: Ensaio de compressão

Fonte: A autora.

3.3.2 Absorção

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica seca foram realizados de acordo com a NBR 9778 (2005), seguindo as etapas de secagem da amostra na estufa, saturação da amostra por imersão em água, fervura das amostras, com determinação da massa em cada condição, e por fim, determinação da massa imersa em água, com ilustrado nas Figuras 14 A, B, C e D, respectivamente.

Figura 14: Secagem (A), saturação (B), fervura (C) e determinação da massa em imersão (D)

(A)

(B)

(C)

(D)

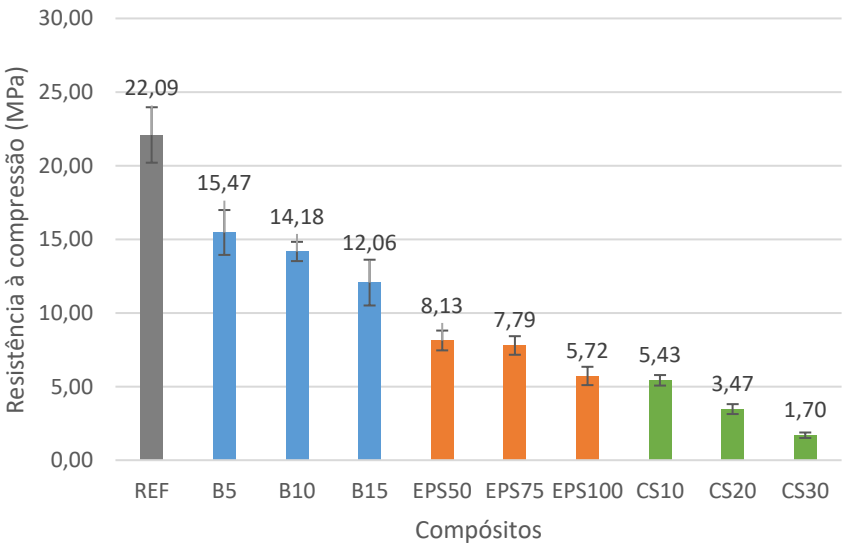
Fonte: A autora.

4 Resultados e análises

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão e absorção estão representados em gráficos nas Figuras 15, 16, 17 e 18. Para a legenda, considera-se: “REF” a argamassa de referência, “B5, B10, B15” são respectivamente as argamassas com 5%, 10% e 15% de substituição da areia por resíduo de borracha, em volume, e de forma similar seguem os teores “EPS50, EPS75, EPS100” para substituição por EPS e “CS10, CS20, CSS30” para substituição por casca de soja.

Estão destacados nos gráficos os valores médios obtidos para cada teor estudado e o erro foi definido como o desvio padrão obtido para cada propriedade e amostra.

Figura 15: Resistência à compressão



Fonte: A autora.

Para os resultados de compressão, conclui-se que quanto maior o teor de substituição, menor a resistência à compressão, o que já era esperado. O material que apresentou menor queda na resistência foi a borracha, possivelmente por ter sido estudada em teores menores de substituição e por ter boa interação com a matriz.

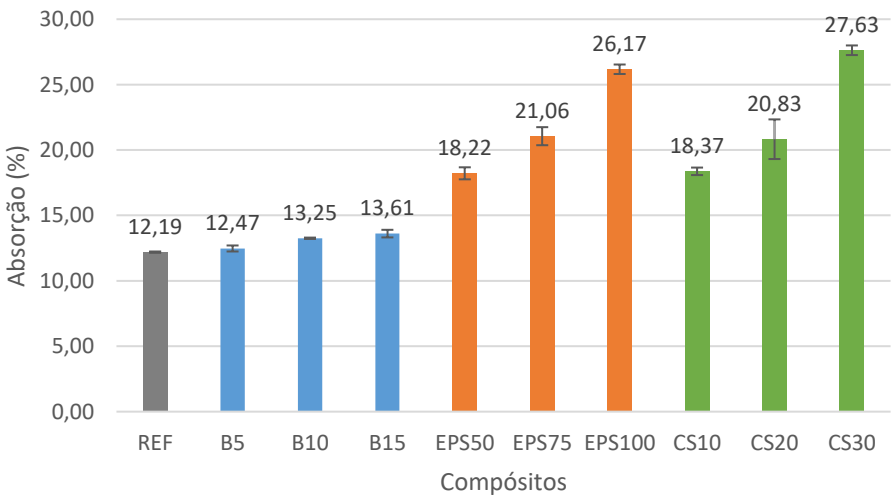
Analisando os maiores teores de substituição de cada resíduo, tem-se uma queda máxima de 92,30% para substituição de 30% do agregado por casca de soja, 74,11% para a substituição de 100% do agregado por EPS e 45,41% para a substituição de 15% do agregado por borracha.

Ressalta-se, portanto, que mesmo com a redução da resistência à compressão, os valores ainda são altos ou condizentes a valores de ensaios a 7 dias de geopolímeros na literatura. Para geopolímeros à base de cinzas volantes com areia de fundição, de Vargas *et al.* (2015) obtiveram valores médios de resistência à compressão de 4 a 1 MPa. Para geopolímeros à base de cinza pesada mediante otimização de cura térmica, Alves *et al.* (2016) obtiveram valores médios para a resistência à compressão dos traços de argamassa em 7 dias de cura de 5 MPa.

Para efeito comparativo ao cimento Portland, faz-se uma retomada à literatura. Nos estudos de Rodrigues e Beraldo (2010), o valor obtido para a resistência à compressão para a argamassa referência (sem substituição do cimento Portland por cinzas de casca de arroz) foi de 29,60 MPa. Neste estudo, o traço adotado foi 1:3:0,5 (cimento : areia: água, em massa) e o ensaio foi realizado com 28 dias de cura.

Os valores obtidos neste estudo, apesar de baixos, permitem a utilização destas argamassas para diversas aplicações e fabricação de componentes para a construção, utilizando os resíduos e poupando o agregado natural.

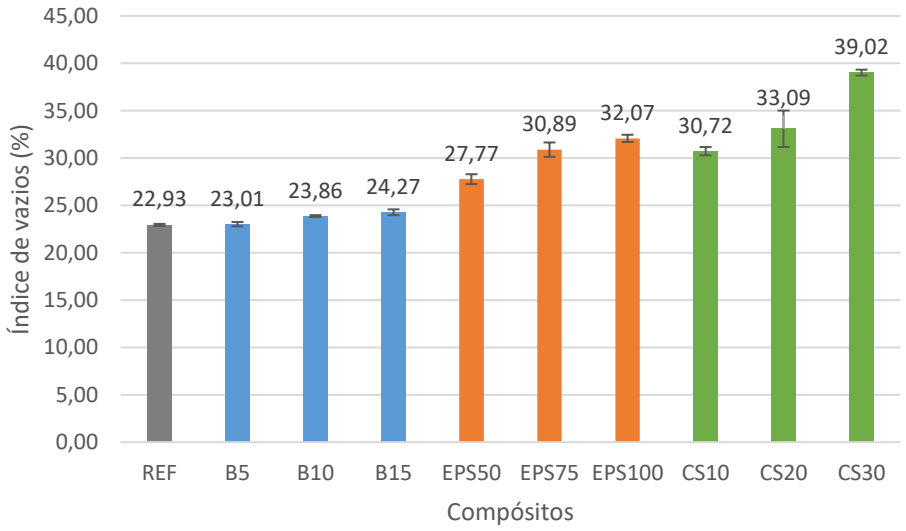
Figura 16: Absorção dos compósitos estudados



Fonte: A autora.

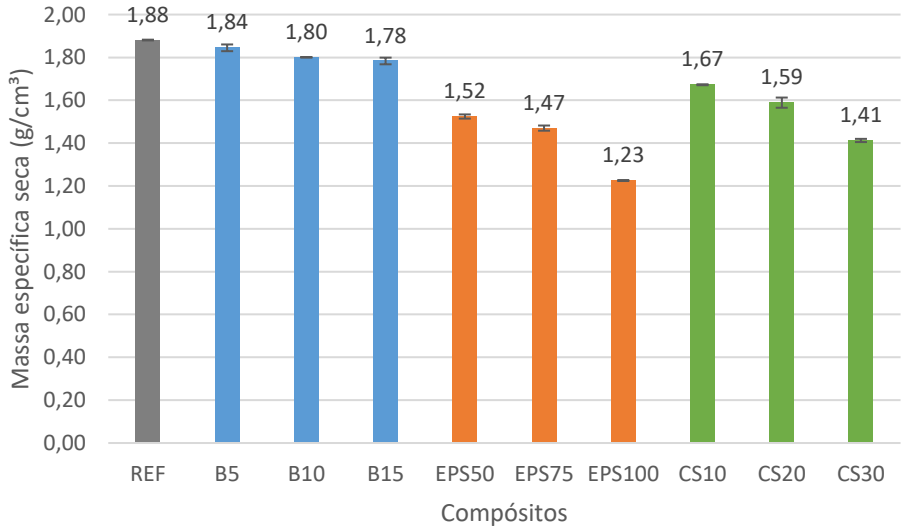
Os resultados de absorção mostram que as misturas com os resíduos EPS e casca de soja foram os que apresentaram maior aumento em relação à referência. Isso se explica pelo fato de que no EPS reciclado e triturado, de acordo com Alves (2020), ocorre o fenômeno de conectividade dos poros, visto que o próprio resíduo apresentou elevada absorção. A casca de soja, por sua vez, por ser um material vegetal, possui a característica intrínseca de alta absorção de água.

Figura 17: Índice de vazios dos compósitos estudados



Fonte: A autora.

Figura 18: Massa específica seca dos compósitos estudados



Fonte: A autora.

Os resultados de índice de vazios apresentam elevação com o aumento do teor de substituição parcial do agregado, comparados ao traço referência. O contrário ocorre com os resultados de massa específica, tal que a substituição do agregado gera menor massa específica seca em relação à referência, o que é explicado pelo fato de os resíduos terem menores massas específicas comparadas a massa específica da areia de rio utilizada, e ainda porque houve incremento do índice de vazios nos compósitos com a substituição por resíduo.

Uma outra observação a ser feita é quanto à quantidade de água nas misturas com o resíduo de casca de soja. Acredita-se que o processo de retirada do excesso de água da casca não tenha sido eficiente, o que pode ter acarretado no aumento da quantidade de água livre nas misturas (aumento da relação água/metacaulim) e possivelmente a incorporação de ar durante a mistura, causando aumento do índice de vazios e absorção, além da redução acentuada na resistência à compressão. Um novo processo de umidificação da casca antes da sua aplicação na mistura está sendo testado, de forma a garantir a umidificação apenas das paredes lignocelulósicas, sem água livre, que possa prejudicar as propriedades das misturas após endurecidas.

Por fim, a significância dos dados apresentados foi analisada pelo cálculo da variância, utilizando a ferramenta "Anova: fator único" do *software* Microsoft Excel. As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam as comparações dos resultados obtidos para cada teor estudado nos ensaios realizados. Assim, é possível afirmar, para cada comparação, se os resultados obtidos são estatisticamente equivalentes (equiv.) ou não (não equiv.), com um nível de significância de 95%.

A análise dos teores de substituição parcial do agregado por borracha, na Tabela 7, mostra que a maioria dos resultados são equivalentes. B5 e B10 são equivalentes em todos as propriedades analisadas, assim como B10 e B15. Mostra também que B5 não é equivalente a B15 e ao traço referência apenas para compressão.

A partir desta análise pode-se dizer que para ter variação da absorção, índice de vazios e massa específica em relação à referência é necessário no mínimo 10% de borracha. Nota-se também que B5 e B10 são equivalentes em relação à resistência à compressão, o que significa que não há diferença entre adicionar 5% ou 10% do material.

Por fim, não houve variação significativa dos valores de absorção com o aumento da incorporação de borracha. O mesmo ocorre com a massa específica e o índice de vazios, tal que a equivalência destes resultados significa que o maior teor substituição impacta tanto quanto o menor teor, sendo assim teoricamente é seguro escolher o maior teor levando em conta apenas estas características para ter um material mais leve.

Tabela 7: análise da variância para substituição por borracha

	COMPRESSÃO			ABSORÇÃO		
	B5	**B10**	**B15**	**B5**	**B10**	**B15**
REF	não equiv.	não equiv.	não equiv.	equiv.	não equiv.	não equiv.
B5		equiv.	não equiv.		equiv.	equiv.
B10	equiv.		equiv.	equiv.		equiv.
	ÍNDICE DE VAZIOS			**MASSA ESPECÍFICA SECA**		
	B5	**B10**	**B15**	**B5**	**B10**	**B15**
REF	equiv.	não equiv.	não equiv.	equiv.	não equiv.	não equiv.
B5		equiv.	equiv.		equiv.	equiv.
B10	equiv.		equiv.	equiv.		equiv.

Fonte: A autora.

Já a análise dos teores de substituição parcial do agregado por EPS, na Tabela 8, mostra que apenas os teores EPS50 e EPS75 são equivalentes para absorção, índice de vazios e massa específica, tal que qualquer teor de substituição altera significativamente a resistência à compressão.

Similar à análise para absorção, índice de vazios e massa específica para a substituição com borracha, temos que não há diferenças para essas características entre 50% ou 75% para substituição por EPS. Teoricamente então seria melhor colocar 75% para obter-se um material mais leve.

Tabela 8: análise da variância para substituição por EPS

	COMPRESSÃO			ABSORÇÃO		
	EPS50	**EPS75**	**EPS100**	**EPS50**	**EPS75**	**EPS100**
REF	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.
EPS50		não equiv.	não equiv.		equiv.	não equiv.
EPS75	não equiv.		não equiv.	equiv.		não equiv.
	ÍNDICE DE VAZIOS			**MASSA ESPECÍFICA SECA**		
	EPS50	**EPS75**	**EPS100**	**EPS50**	**EPS75**	**EPS100**
REF	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.
EPS50		equiv.	não equiv.		equiv.	não equiv.
EPS75	equiv.		equiv.	equiv.		não equiv.

Fonte: A autora.

Como observação sobre estas substituições, vale ressaltar que era possível notar que as misturas com EPS sofriam segregação durante a moldagem, como mostra a Figura 19, em que é possível identificar a base do cubo com menor teor do agregado leve.

Figura 19: Segregação nos corpos com EPS

Fonte: A autora.

Por fim, a análise dos teores de substituição parcial do agregado por casca de soja, na Tabela 9, mostra que apenas os teores CS10 e CS20 são equivalentes para absorção, índice de vazios e massa específica. A análise é igual à análise para a substituição por EPS.

Tabela 9: análise da variância para substituição por casca de soja

	COMPRESSÃO			ABSORÇÃO		
	CS10	CS20	CS30	CS10	CS20	CS30
REF	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.
CS10		não equiv.	não equiv.		equiv.	não equiv.
CS20	não equiv.		não equiv.	equiv.		não equiv.
	ÍNDICE DE VAZIOS			MASSA ESPECÍFICA SECA		
	CS10	CS20	CS30	CS10	CS20	CS30
REF	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.	não equiv.
CS10		equiv.	não equiv.		equiv.	não equiv.
CS20	equiv.		equiv.	equiv.		não equiv.

Fonte: A autora.

5 Considerações finais

Os resultados da substituição parcial por borracha foram os que mais se aproximaram do traço de referência. Seria interessante estudar a influência dessa substituição também para a resistência à tração, uma vez que a borracha de pneu de recauchutagem apresenta aspecto de fibra, por ser longa e fina.

Apesar da queda da resistência para os teores de substituição por EPS e casca de soja, a baixa massa específica torna os materiais estudados interessantes, pois podem ser utilizados na

fabricação de unidades de alvenaria sem demanda de elevada resistência à compressão, com o objetivo de ser leve e não agregar carga à estrutura.

Há a possibilidade desses materiais terem boas propriedade termoacústicas, principalmente o EPS que já foi mais estudado no âmbito da engenharia civil, sendo assim, recomenda-se o futuro estudo dessas propriedades para esses materiais.

Ressalta-se a necessidade de em próximos estudos atentarem-se quanto a dosagem e viscosidade para a substituição parcial ou integral do agregado por EPS para evitar a segregação.

Referências bibliográficas

ABCP: **Redução na emissão de co2 é sinônimo de competitividade na indústria global do cimento** [2019]. Disponível em <https://abcp.org.br/imprensa/reducao-na-emissao-de-co2-e-sinonimo-de-competitividade-na-industria-global-do-cimento/>. Acesso em 20 ago. 2020.

ALVES, C. dos R. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU E POLIESTIRENO EXPANDIDO PARA APLICAÇÃO EM PAREDES DE CONCRETO**. 2020. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.358>. Acesso em 01 set. 2020.

ALVES, C. V.; FROENER, M. S.; LONGHI, M.; RODRÍGUEZ, E. D.; KIRCHHEIM, A. P. Avaliação da resistência mecânica em geopolímeros a base de cinza pesada mediante otimização de cura térmica. In: **SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS, 5.** Anais... Passo Fundo: 2016.

ALVES, L. C. da S. **GEOPOLÍMERO À BASE DE METACAULIM COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE SISAL.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ALZEER, M.; MACKENZIE, K. Synthesis and mechanical properties of novel composite of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (*phormium tenax*). **Applied Clay Science**. v. 75-76, p. 148-152, May 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 9778:** Argamassas e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AZMI, A. A.; ABDULLAH, M. M. A. B.; GHAZALI, C. M. R.; SANDU, A. V.; HUSSIN, K. Effect Of Crumb Rubber On Compressive Strength Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, p. 01063, 2016.

BOGDANOV, B. I.; HRISTOV, Y.; GEORGIEV, D. P.; MARKOVSKA, I. Synthesis and Properties of Lightweight Geopolymer using Ash from Thermal Power Plants. In: **Advanced Materials Research.** Trans Tech Publications, p. 580-585, 2012.

BOUCHONNEAU, N. et al. Análise da absorção de água em dois polímeros expandidos: desenvolvimento do módulo de flutuabilidade de um mini-robô submarino. **Polímeros**, v. 20, n. 3, p. 181-187, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000032>. Acesso em 08 dez. 2020.

BOUGUERMOUH, K.; BOUZIDI, N.; MAHTOUT, L.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; MARTÍNEZ-CARTAS, M.L. Effect of acid attack on microstructure and composition of metakaolin-based geopolymers: The role of alkaline activator. **Journal of Non-Crystalline Solids**. v. 463, p. 128-137, May 2017.

BRAVO, R. S. **ANÁLISE DE BLOCOS DE CONCRETO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU E METACAULIM.** 2014. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2014.

CANAL RURAL: **Confira como está a colheita da soja em cada estado do país.** Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/sites-e-especiais/projeto-soja-brasil/confira-como-esta-a-colheita-da-soja-em-cada-estado-do-pais/#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20soja%20em,dos%20Estados%20Unidos%20(USDA)>. Acesso em 22 jun. 2020.

CAPRARO, D. F. A. *et al* . Avaliação experimental e numérica da influência da forma e dimensão de corpos de prova de argamassa em ensaios de compressão. **Rev. IBRACON Estrut. Mater**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 429-444, 2019.

DAVIDOVITS,J. **30 Years of Sucesses and Failures in Geopolymers Aplications. Market Trends and Potential Breakthroughs.** Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália, 2002.

DE VARGAS, A. S.; SCHNEIDER, E. L.; SCHMITZ, G.; DE AQUIM, P. M. Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição. In: **CERÂMICA VOL.61 NO.359.** São Paulo: jul./set. 2015.

DUAN, P.; SONG, L.; YAN, C.; REN, D.; LI, Z. Novel thermal insulating and lightweight composites from metakaolin geopolymer and polystyrene particles. In: **Ceramics International**, v. 43, n. 6, p. 5115-5120, 2017.

EPS BRASIL: **O que é EPS?** Disponível em: http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html. Acesso em 14 set. 2020.

FIORITI, C. F. **AVALIAÇÃO DE COMPÓSITOS DE CONCRETO COM RESÍDUOS DE BORRACHA NA PRODUÇÃO DE BLOCOS PARA ALVENARIA.** 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

GLUKHOVSKY, V. D. **Durability of Concrete. Aspect of admixtures and industrial products.** Swedish Council for Building Research, Gothengurg, Sweden, p. 53-62, 1989.

HICKERT, L. R. **BIOCONVERSÃO DE HIDROLISADOS DE CASCA DE ARROZ E SOJA EM ETANOL E XILITOL POR LEVEDURAS**. 2014. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

KAKALI, G.; KIOUPIS, D.; SKAROPOULOU, A.; TSIVILIS, S. Lightweight geopolymer composites as structural elements with improved insulation capacity. In: **MATEC Web of Conferences.** EDP Sciences, 2018. p. 01042.

KHAN, M.Z.N.; SHAIKH, F.U.A.; HAO, Y.; HAO, H. Synthesis of high strength ambient cured geopolymer composite by using low calcium flu ash. **Construction and Building Materials.** v. 125, p. 809-820, Oct. 2016.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. **A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements,** Cem. Conc. Res., vol. 40, p.1341–1349, 2010.

MARTINEZ, R. G. *et al.* Placa de argamassa composta com casca de arroz para painéis de fechamento vertical em habitações populares. In: **I SEMINÁRIO MATOGROSSENSE DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL**. Anais... Cuiabá – MT, p. 509-524, 2005.

METACAULIM DO BRASIL**: Estudo da influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland** [2003]. Disponível em: <http://www.metacaulim.com.br/pdf/metacaulim-hp-usp.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2020.

MULRHEAD, S. Soyhulls are acceptable alternative to forage fiber in dairy cows diets. **Feedstuffs,** v. 655, n. 46, p.12, 1993.

NETO, Wilson Pires Flauzino. **Extração e caracterização de nanocristais de celulose a partir de casca de soja, e sua aplicação como agente de reforço em nanocompósitos poliméricos utilizando carboximetilcelulose como matriz**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Química, Uberlândia, 2012.

POSI, P.; RIDTIRUD, C.; EKVONG, C.; CHAMMANEE, D.; JANTHOWONG, K.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. In: **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 408-413, 2015.

REED, M.; LOKUGE, W.; KARUNASENA, W. Fibre-reinforced geopolymer concrete with ambient curing for in situ applications. **Journal of Materials Science**. v. 49, n. 12, p. 4297-4304, Jun. 2014.

REVATHI, T.; JEYALAKSHMI, R.; RAJAMANE, N.P. Study on the role of n-SiO2 incorporation in thermo-mechanical and microstructural properties of ambient cured FAGGBS geopolymer matrix. **Applied Surface Science**. v. 449, p. 322-331, Aug. 2018.

RODRIGUES, Michelle S.; BERALDO, Antônio L. Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.2, p.193-204, 2010.

SCHNEIDER, M; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H.Sustainable cement production - present and future. **Cement and Concrete Research.** v. 41, n. 7, p. 642-650, 2011.

SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. In: **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.8.2, p. 55-67, 2013.

SINGH, B.; GUPTA, M.; CHAUHAN, M.; BHATTACHARYYA, S. K. Lightweight Geopolymer Concrete with EPS Beads. In: **Proceedings of International council for Research and Innovation in Building and Construction–CIB World Building Congress**. 2013.

SOUZA, J. **ESTUDO DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS UTILIZANDO CINZAS E CASCA DE ARROZ.** 2008. 161 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

SOUZA, J. Materiais sustentáveis na construção civil: menos impacto e mais economia. **Sienge**, 2017. Disponível em: <https://www.sienge.com.br/blog/materiais-sustentaveis-na-construcao-civil/#:~:text=Os%20containers%20t%C3%AAm%20ganhado%20cada,30%25%20na%20constru%C3%A7%C3%A3o%20de%20edif%C3%ADcios>. Acesso em 20 ago. 2020.

VASSALO, É. A. de S. **OBTENÇÃO DE GEOPOLÍMERO A PARTIR DE METACAULIM ATIVADO.** 2013. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.