

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

JENNIFER LOURENÇO SILVA

**USO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA
PRODUÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS: PROPRIEDADES
POZOLÂNICAS E MECÂNICAS**

SÃO PAULO
2021

JENNIFER LOURENÇO SILVA

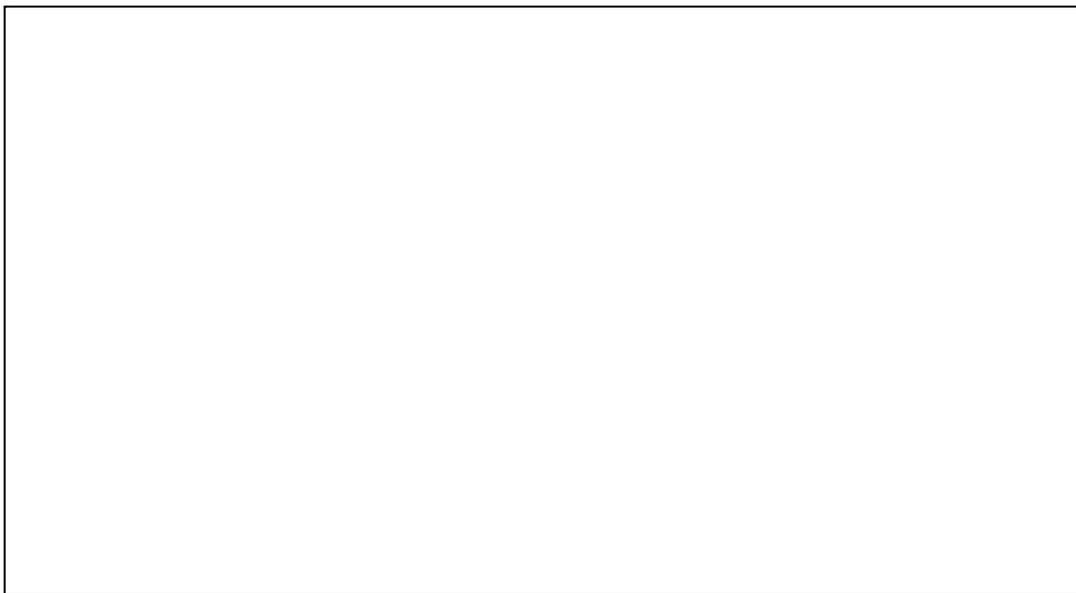
**USO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA
CONSTRUÇÃO DE TIJOLOS: PROPRIEDADES POZOLÂNICAS E
MECÂNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Tecnologia dos Materiais.

Orientadora: Professora Doutora Fernanda Alves Cangerana Pereira.

SÃO PAULO
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.



Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

JENNIFER LOURENÇO SILVA

**USO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA
CONSTRUÇÃO DE TIJOLOS: PROPRIEDADES POZOLÂNICAS E
MECÂNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de Tecnologia de
São Paulo, como requisito parcial para
obtenção do título de Tecnólogo em
Tecnologia dos Materiais.

Aprovação em: ____/____/____

Prof.
Faculdade de Tecnologia de São Paulo
Orientador(a)

Prof.
Faculdade de Tecnologia de São Paulo
Avaliador(a)

Prof.
Faculdade de Tecnologia de São Paulo
Avaliador(a)

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Lilian Lourenço Silva e Wellington
Silva*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela minha vida e por ter me ajudado a enfrentar os obstáculos ao longo do curso e da minha vida.

A minha família, amigos e colegas de trabalho e a Companhia Metropolitana de São Paulo, que me incentivaram e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava ao curso e realização desse trabalho.

E aos professores pelos ensinamentos e paciência ao longo do curso.

“Entrega o teu caminho ao Senhor, confia Nele e o mais
Elefará.” Salmos 37:5

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de açúcar e etanol pela cana-de-açúcar e um importante fornecedor deste produto para grande parte do mundo. Na última safra, cerca de 9.953,2 mil hectares foram destinados ao cultivo de cana no país, sendo a região Centro-Sul responsável por mais de 90% da produção. No contexto da produção de resíduos, a indústria sucroalcooleira produz grandes quantidades de bagaço, resíduo fibroso obtido após a moagem e extração do caldo, que é utilizada pelas usinas para a geração de calor. No entanto, desse processo de queima resultam grandes quantidades de cinzas (SCBA), que são resíduos sólidos não biodegradável. Neste sentido, este estudo teve como objetivo analisar o desempenho de tijolos ecológicos que utilizaram da SCBA como compósito para a sua fabricação. Trata-se de um estudo de revisão bibliográfica com buscas nas principais plataformas de divulgação científica. Como resultados, o estudo destacou que a SCBA apresentou características físicas, químicas e mecânicas que viabilizam o seu uso como material pozolânico. Sendo assim, concluiu-se que a SCBA é considerada uma excelente adição pozolânica na produção de tijolos ecológicos e que esta destinação pode ser uma excelente alternativa em termos de proteção ambiental, práticas de gerenciamento de resíduos e economia de matéria-prima.

Palavras-chave: Atividade pozolânica. Reciclagem. Tijolo solo-cimento.

ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of sugar and ethanol from sugarcane and an important supplier of sugarcane products to much of the world. In the last harvest, sugarcane cultivation in the country required around 9,953.2 thousand hectares, where the Center-South region was responsible for more than 90% of production. In the context of waste production, the sugar and alcohol industry produce large quantities of bagasse, a fibrous residue obtained after grinding and extracting the juice, which is used to generate heat in industries. However, large amounts of sugarcane bagasse ash are generated in these processes, considered non-biodegradable solid waste. In this sense, this study aimed to analyze the performance of ecological bricks that used SCBA as a composite for their manufacture. This study is a bibliographic review of the main articles published in the main scientific dissemination platforms. The results of the study showed that SCBA had physical, chemical and mechanical characteristics that enable its use as a pozzolanic material. Therefore, the study concludes that sugarcane bagasse ash is considered an excellent pozzolanic addition in the production of ecological bricks. The use is considered an excellent alternative in terms of environmental protection, waste management practices and raw material savings.

Keywords: Pozzolanic activity. Recycling. Soil-cement brick.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cana-de-açúcar (<i>S. officinarum</i>)	17
Figura 2 - Processo produtivo de indústrias sucroalcooleiras.	18
Figura 3 - Bagaço da cana-de-açúcar.	20
Figura 4 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA).	21
Figura 5 – Modelo de tijolo solo-cimento.	24
Figura 6 - Tipos de adições nos cimentos Portland.	26
Figura 7 – Sistema de assentamento de tijolos solo-cimento.	28
Figura 8 - Correlação entre o tempo de moagem, tamanho médio de partícula, finura de Blaine, atividade pozolânica e capacidade de consumo de Ca^{2+} da SCBA.	31
Figura 9 – Valores de resistência à compressão do tijolo solo-cimento com substituições de SCBA.....	35
Figura 10 – Valores de resistência à tração dos tijolos com determinado conteúdo de SCBA	36
Figura 11 – Valores de resistência à compressão (a) e à tração por compressão diamétrica (b).....	36
Figura 12 – Valores de resistência à compressão com 28 dias de cura dos tijolos solo-cimento.	38
Figura 13 - Fratura do corpo de prova após ensaio de compressão solo-cimento (80/20) (a) e Fratura do corpo de prova após ensaio de compressão solo-cimento (100/0) (b).	38
Figura 14 – Valores de absorção de água dos tijolos de argila versus teor de resíduos.	39
Figura 15 – Valores de densidade aparente dos tijolos de argila versus teor de resíduos	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas de SCBA e Cimento Portland Pozolânico (OPC)	30
Tabela 2 - Propriedades químicas do SCBA.....	31
Tabela 3 - Características químicas representativas de pozolanas convencionais...	32
Tabela 4 - Índice de Atividade Pozolana (IAP) de acordo com as substituições do SCBA	33
Tabela 5 – Índice de atividade pozolânica (IAP) conforme temperaturas de queima da SCBA	34
Tabela 6 - Resistência à compressão média dos corpos de prova.....	37
Tabela 7 - Média das porcentagens de absorção de água.....	39

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
BIOA	Cinzas de biomassa
CEPED	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
GEE	Gases de efeito estufa
IAP	Índices de atividade pozolânica
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LOI	Conteúdo de Perda por Ignição
Proálcool	Programa Nacional do Álcool
SCB	Bagaço da cana-de-açúcar
SCBA	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
SCC	Solo-cimento compactado
SCP	Solo-cimento plástico
SCSA	Cinza da palha da cana-de-açúcar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. GERAL	16
2.2. ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1. Indústria da cana-de-açúcar.....	17
3.2. Bagaço da cana-de-açúcar (SCB)	19
3.3. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (SCBA).....	21
3.4. Atividade Pozolânica.....	22
3.5. Tijolo solo-cimento	24
4. METODOLOGIA.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1. Propriedades físicas e químicas da SCBA e atividades pozolânicas	30
5.2. Características mecânicas dos tijolos com uso da SCBA.....	34
6. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é o maior produtor global de cana-de-açúcar, com grande destaque para a produção de etanol que ganhou maior impulso no cenário nacional após a crise do petróleo na década de 1970 (BENETTI, 2009). Na indústria sucroalcooleira, são gerados diversos resíduos dos processos de beneficiamento da cana-de-açúcar, como as águas de lavagem, bagaços, vinhaça, torta de filtros e leveduras (GIORDANO, 2016).

O bagaço da cana-de-açúcar (SCB) é um resíduo fibroso originado do processo de moagem da cana-de-açúcar para a extração do caldo e é, atualmente, um dos resíduos mais gerados no mundo (RAMBABU; GUPTA; RAMARAO, 2016). Comumente, este subproduto é utilizado pelas usinas para a cogeração de energia propiciando a sustentabilidade energética. No entanto, deste processo são originados outros resíduos, as cinzas.

As cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA) são consideradas um resíduo sólido não biodegradável, sua reciclagem tem sido, cada vez mais, incentivada, principalmente nos países em desenvolvimento, pois até o momento a maior parte das SCBA tem sido descartada em aterros ou utilizada como fertilizante do solo (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007).

As SCBA são originadas do calcário do bagaço, apresentam grandes teores de sílica e alumina que, em condições adequadas, reagem com o hidróxido de cálcio produzindo atividade pozolânica (GILIO; CASTRO, 2016). De acordo com Gibbons (2003), um material pozolano é um material silicioso ou silicioso e aluminoso que não apresenta valor cimentante por si só, mas na presença da umidade reage quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos detentores de propriedades cimentantes.

Tendo em vista os potenciais impactos ambientais da destinação final das cinzas, muitos estudos têm utilizado a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material suplementar cimentício visando uma possível alternativa de destinação final para o resíduo (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2008; 2009; CHUSILP et al., 2009). Desta forma, considerando a importância do reaproveitamento e disposição ambientalmente correta da SCBA, o presente trabalho tem como objetivo discutir o uso potencial da cinza da SCBA na fabricação de tijolos ecológicos e quais

são as suas influências nas características de resistência e absorção de água dos tijolos.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Discutir o uso potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA) como compósito na fabricação de tijolos ecológicos.

2.2. ESPECÍFICOS

- I. Altercar as principais propriedades físicas e químicas da SCBA;
- II. Argumentar a respeito das atividades pozolânicas da SCBA;
- III. Contender as características mecânicas dos tijolos produzidos com a SCBA.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Indústria da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é a principal matéria-prima das indústrias sucroalcooleiras, sendo cultivada em cerca de 121 países com produção mundial superior a um bilhão e quinhentos milhões de toneladas por ano (MODANI; VYAWAHARE, 2013; RAMESH; GOUTHAM; KISHOR, 2017). No Brasil, o cultivo da cana-de-açúcar (Figura 1) iniciou-se no século XVI durante o período de colonização. Atualmente, o país é o maior produtor mundial de açúcar e etanol pela cana-de-açúcar e um importante abastecedor de produtos de cana-de-açúcar para grande parte do mundo (ARAÚJO; SANTOS, 2012).

Figura 1 - Cana-de-açúcar (*S. officinarum*)



Fonte: Khalil, Aslam e Ahmad (2021).

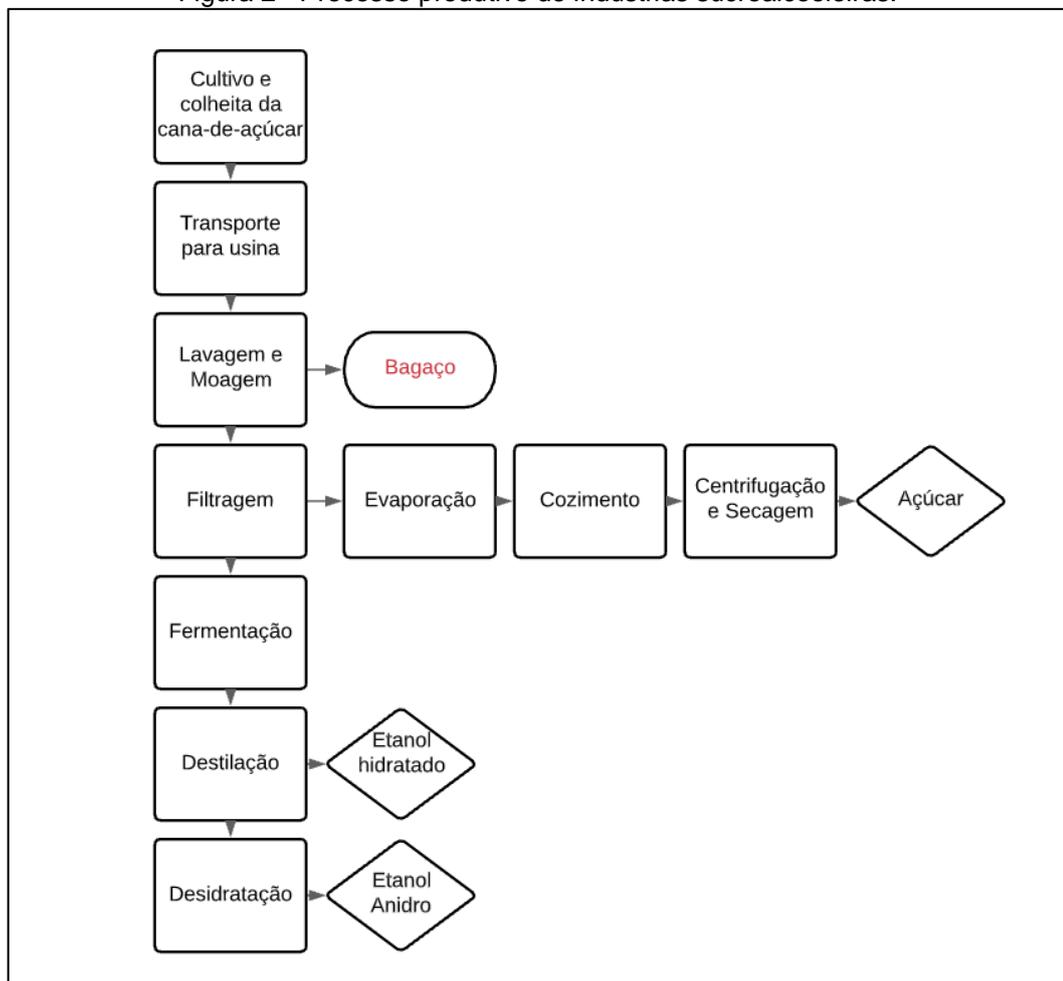
O etanol ganhou destaque no cenário nacional após a crise do petróleo na década de 1970. Na ocasião, a inflação resultou em incentivos para obter energia de fontes alternativas. Neste período, surgiu o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) que tinha como objetivo substituir os combustíveis derivados do petróleo por outros combustíveis de origem sustentável impulsionando o cultivo de cana-de-açúcar para produzir álcool que aumentou a produção em larga escala apenas na década de 1990 e com maior intensidade após o ano 2000 (BENETTI, 2009; ARAÚJO; SANTOS, 2012).

De acordo com o terceiro levantamento de acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), com relação à safra 2020/2021, o Brasil possuía uma área total de 9.953,2 mil hectares destinada ao cultivo de cana-de-açúcar, com produtividade média estimada em 77,29 toneladas por hectare plantado (CONAB, 2020).

A região Centro-Sul é responsável por aproximadamente 92% da produção de cana-de-açúcar do país, (cerca de 610 milhões e 655 mil toneladas de cana-de-açúcar na última safra) com destaques para o estado de São Paulo, principal estado produtor, seguido dos estados de Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (CONAB, 2020). Segundo Flausinio (2015), a produção da cana-de-açúcar no Brasil é de grande importância para a geração de capital com a geração de renda e fonte de energia, que conseqüentemente diversifica a matriz energética e promove o ganho ambiental com a redução de emissões de compostos responsáveis pelo efeito estufa.

A cadeia produtiva do etanol e açúcar nas indústrias sucroalcooleiras é composta pelas etapas agrícola e industrial, modelo de produção que diferencia o Brasil dos demais concorrentes por possuir processo integrado na produção de açúcar e etanol. Na Figura 2, é apresentado o fluxograma do processo produtivo do açúcar e álcool nas indústrias sucroalcooleiras.

Figura 2 - Processo produtivo de indústrias sucroalcooleiras.



Fonte: Pereira et al. 2019

Na etapa agrícola, o cultivo da cana-de-açúcar dura em média seis anos, com cortes programados para o 12º mês, 18º mês e posteriormente a cada um ano. As próximas etapas são a colheita, que ocorre em períodos de estiagem para favorecer a maturação, e o transporte para as usinas. Na etapa industrial, a cana-de-açúcar é lavada, picada e moída para a extração do caldo (FLAUSINIO, 2015).

Segundo Fonseca (2016), na etapa de moagem da cana-de-açúcar para a retirada do caldo, a cana passa por rolos de compressão ou por diversas etapas de lavagens com água quente para a extração do açúcar e em seguida é submetida a um rolo de secagem (FLAUSINIO, 2015). Para a produção do açúcar, o caldo passa por diversos tipos de tratamento químico e altas temperaturas para a obtenção do melaço, que possui altas quantidades de glicose e sacarose, que posteriormente é transformado em açúcar cristalizado.

Na produção do etanol, o processo consiste na fermentação alcoólica do melaço, que segundo Rodrigues (2017) é adicionado em dornas junto com leveduras originando o vinho, que após a destilação pode chegar a cerca de 96% de álcool. No entanto, considerando o contexto da produção de resíduos nas etapas de produção de açúcar e álcool nas indústrias sucroalcooleiras, vale ressaltar que após a moagem e extração do caldo da cana-de-açúcar grande quantidade de resíduos fibrosos, conhecidos como bagaço, são gerados (FLAUSINIO, 2015; INBASEKAR; HARIPRASATH; SENTHILKUMAR, 2016; PEREIRA et al., 2019).

3.2. Bagaço da cana-de-açúcar (SCB)

O bagaço da cana-de-açúcar (SCB- *sugarcane bagasse*) (Figura 3) é um dos resíduos mais gerados nas indústrias agrícolas do mundo (PANDEY et al., 2000; TREJO-HERNADEZ et al., 2007). É estimado que para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida cerca de 26% se tornem resíduos fibrosos, ou seja, para cada tonelada de cana-de-açúcar serão geradas até 290 kg de bagaço fibroso (CONAB, 2011; RAMBABU; GUPTA; RAMARAO, 2016).

O SCB contém celulose, lignina e hemicelulose – responsáveis pelo conteúdo energético do material – além de cinzas, cera e cerca de 50% de umidade – devido a inserção de água na etapa de moagem (REDDY; VARDHAN; REDDY, 2016). Segundo Santos et al. (2011), além da umidade, o SCB ainda apresenta em sua composição cerca de 45% de fibras lignocelulósicas e até 3% de sólidos solúveis e

insolúveis. Desta forma, o SCB apresenta grande versatilidade de usos, pois sua fibra o torna um excelente material compósito para a criação de novos materiais com propriedades físicas e químicas distintas (MULINARI et al., 2009; HERNÁNDEZ-SALAS et al., 2009).

Figura 3 - Bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: Loh et al. (2013)

Nas décadas anteriores, era comum a utilização do SCB para geração de calor no lugar da lenha, o que causava diversos problemas como sujeira, demanda de grandes espaços para armazenamento e sistema de logística (LINHARE; ARAÚJO; SILVA, 2018). Desta forma, as usinas começaram a utilizar o SCB nos sistemas de cogeração de energia, submetendo o SCB à queima – realizada a céu aberto, em laboratórios em formato experimental ou em incineradores – para recuperação energética como combustível na cogeração produzindo vapor ou gerando eletricidade (FIESP, 2001).

Segundo Santos et al. (2011), a biomassa do SCB tem enorme representatividade na matriz energética brasileira, pois supre a demanda de energia elétrica, térmica e mecânica das indústrias sucroalcooleiras do país por meio deste sistema de cogeração. O uso do SCB para cogeração de energia apresenta vantagens como a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE); maior estabilidade em relação às perdas no sistema de transmissão; possibilidade de escoar a energia gerada para a rede de distribuição e uso de insumos de origem nacional e eficiente (OLIVEIRA; NEVES; WAITMAN, 2017).

No entanto, a utilização do SCB para cogeração de energia tem como resultado a produção de grandes quantidades de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA – *sugarcane bagasse ash*) (KHALIL; ASLAM; AHMAD, 2021).

3.3. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (SCBA)

A indústria sucroalcooleira no Brasil cresce anualmente, de modo que os níveis de SCBA devem aumentar exponencialmente. De todo bagaço incinerado apenas 0,62% se torna cinza residual (Figura 4) (MAHMUD et al., 2018), sendo estes considerados resíduos sólidos não biodegradável, permanecendo como resíduo final da cadeia produtiva do açúcar (FARIA; GURGEL; HOLANDA, 2012).

Figura 4 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA).



Fonte: Khalil, Aslam e Ahmad (2021).

No entanto, a SCBA tem sido comumente utilizada no Brasil como fertilizante para o solo, o que tem gerado diversos questionamentos com relação aos potenciais impactos dessa prática ainda pouco estudada. Desta forma, o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem economicamente e ambientalmente viável para os resíduos da SCBA tem ganhado crescente relevância (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007).

A SCBA é caracterizada como um resíduo sólido que possui grande quantidade de sílica – normalmente em quantidades acima de 60% em massa – que pode variar de acordo com o processo de incineração, temperatura da queima, tipos de solo de cultivo e outras propriedades da cana-de-açúcar (KUMARI; KUMAR, 2015). Segundo Barboza Filho e Prabhu (2002), o silício absorvido pela cana-de-açúcar em formato de ácido monossilícico (H_4SiO_4) é proveniente do solo e fica retido na epiderme da cana como sílica gel após a evapotranspiração.

De acordo com Faria, Gurgel e Holanda (2010), a sílica cristalina pode ser utilizada como matéria prima cerâmica e aditivo em misturas de cimento, concreto e argamassas (PAYÁ et al., 2002; FRIAS; VILLAR-COCCINA, 2007; GANESAN et al., 2007), enquanto a sílica amorfa é um elemento vital para a reação pozolânica com

hidróxido de cálcio (VENKATESH et al., 2018), podendo agregar valor econômico e proporcionar vantagens técnicas e ambientais com a substituição parcial de cimento Portland.

Desta forma, a SCBA têm sido considerada um excelente substituto do cimento concreto (DE-SOARES et al., 2016; INBASEKAR; HARIPRASATH. SENTHILKUMAR, 2016) e para a obtenção de cerâmicas (BORLINI et al., 2005; VIEIRA et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2008) apresentando grande potencial para destinação final de cerca de 2,5 milhões de toneladas de SCBA produzidas pela indústria sucroalcooleira no Brasil anualmente, visto que a reciclagem de resíduos industriais do setor agrícola é cada vez mais incentivada, principalmente os subprodutos ricos em lignocelulose, incluindo a palha e o bagaço da cana-de-açúcar.

3.4. Atividade Pozolânica

As pozolanas são materiais inorgânicos, silicosos ou alumino-silicosos, que não possuem valor cimentício, porém podem apresentar propriedades aglomerantes quando moídos ou na presença de umidade e hidróxido de cálcio (CH) (LEITE et al., 2004). As pozolanas são classificadas como naturais, artificiais ou ainda como subprodutos industriais. De acordo com Coutinho (1997), as pozolanas naturais são constituídas de rochas vulcânicas submetidas à meteorização; as artificiais são quaisquer tipos de argilas submetidas a altas temperaturas e os subprodutos industriais se constituem de cinzas volantes, cinzas de arroz, cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, sílica ativa, entre outros.

Na fase de hidratação do cimento, quando a pozolana é adicionada, a mesma é atacada por hidróxido de oxigênio dissolvido (OH) que forma uma película final ao redor da partícula de pozolana. Geralmente essas reações ocorrem após o início da hidratação do cimento e a reação pozolânica transforma o CH em outros compostos que contribuem para a resistência do concreto (FRAAY; BIJEN; HAAN, 1989).

Segundo Marsh e Day (1988), após a cura do cimento, a adição de pozolanas atribue menor permeabilidade e estrutura mais densa da mistura, aumentando a durabilidade do concreto proporcionando maior resistência ao ataque de sulfato, eflorescência, encolhimento, craqueamento térmico, corrosão de cloro e expansão da reação de sílica alcalina, quando comparadas com a mistura de cimento-água.

As pozolanas apresentam excelentes resultados na produção de argamassas e concretos devido à sua capacidade de reagir com o CH produzido durante a hidratação do cimento Portland, melhorando as propriedades do concreto e o desempenho de novos cimentos com relação à sua durabilidade (FRIAS; SANCHEZ-ROJAS; URIA, 2002; FRIAS; SANCHEZ-ROJAS, 2004). As adições de pozolanas naturais influenciam sobre a cinética de hidratação do cimento Portland formando produtos hidratados secundários que, conseqüentemente, alteram a microestrutura da matriz hidratada aumentando a durabilidade de construções civis (LOTTHENBACK; SCRIVENER; HOOTON, 2011; HOPPE FILHO et al., 2017).

Atualmente, diversos materiais pozolânicos, como as cinzas, são utilizados em substituição parcial ao cimento Portland, porém é requerido um padrão de qualidade e propriedades físico-químicas compatíveis com ingredientes e composição do cimento para favorecer a reação pozolânica (CEN, 2000). No entanto, a mistura cimento-pozolana-água é um sistema com processos físico-químicos complexos que são influenciados por fatores como a temperatura, proporção de mistura, reatividade da pozolana, tamanho de partícula de pozolana e outros (WANG et al., 2016).

A este respeito, as SCBA, classificadas como cinzas de biomassa (BIOA - *biomass ash*) contém a sílica contida no bagaço em estado amorfo possibilitando o emprego desse resíduo como pozolana (ADESANYA; RAHEEM, 2010). Desta forma, cimentos econômicos podem ser feitos com BIOA substituindo até 20% do peso de cimentos Portland. No entanto, é sabido que as SCBA com altas propriedades pozolânicas requerem queima sob condições controladas, pois os procedimentos de calcinação definem a qualidade do SCBA por meio da interação entre as fases ativas amorfas ou parcialmente cristalinas (sílica e alumina) e o teor de carbono (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009).

As combinações adequadas de tempo, taxa de aquecimento e temperatura de queima do bagaço podem produzir SCBA com alto teor de sílica amorfa e baixa perda por ignição (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009; SOUZA et al., 2014; RAHMAT et al., 2016). Além das combinações citadas, a trituração também é um fator condicionante da SCBA para teor de sílica amorfa, dada sua capacidade de homogeneizar e controlar a distribuição granulométrica (CORDEIRO; ANDREÃO; TAVARES, 2019).

O emprego de pozolanas possibilita a redução de problemas ambientais relacionados ao uso de cimento Portland em concreto, como grande quantidade requerida de matéria-prima natural e emissão de gases de efeito estufa, sobretudo dióxido de carbono, emitidos para a atmosfera durante sua produção. A queima do bagaço produz substancial liberação de CO², no entanto, o balanço nas emissões de CO² é praticamente nulo, visto que por meio da fotossíntese, a biomassa queimada é reposta no ciclo seguinte da cultura da cana-de-açúcar (ALDAHDOOH; BUNNORI; JOHARI, 2013).

As adições à composição do cimento Portland apresentam ainda vantagens como a redução do consumo de clínquer e a destinação ambientalmente adequada para os resíduos industriais, promovendo a mitigação de passivos ambientais (ANTONI et al., 2012). Esta estratégia recicla eficazmente estes recursos e reduz a quantidade de cimento Portland necessário para fazer concreto forte e durável (HEEDE et al., 2012; HUNTZINGER; EATMON, 2009).

3.5. Tijolo solo-cimento

O tijolo solo-cimento, ou tijolo ecológico, é definido como um bloco de solo comprimido, obtido pela mistura de solo, cimento e água (Figura 5), que segundo Figuerola (2004) e Pisani (2005) são empregados em estradas, jardins, canteiros, construções de residências e edificações, onde podem ser utilizados sem chapisco, emboço e reboco, necessitando somente de impermeabilização.

Figura 5–Modelo de tijolo solo-cimento.



Fonte: Cunha (2012).

Na fabricação do tijolo solo-cimento não existe a queima, basicamente, o tijolo é obtido pela mistura de solo, cimento Portland e água, evitando desmatamentos,

poluição do ar e geração de resíduos. A proporção de solo usado na produção do tijolo é maior do que a de cimento e água, que normalmente apresentam grande uniformidade, ao contrário do solo (MACÊDO, 2004).

O solo é composto por partículas sólidas, líquidas e gasosas originados pela desagregação de rochas que são agregados de minerais ligados por forças coesivas e permanentes (AZAMBUJA, 1979 apud GRANDE, 2003). Sua geração se dá por meio de agentes naturais (intemperismo) e antrópicos (acelerados), tem como característica a solubilidade em água e apresenta comportamento mecânico de acordo com sua granulometria. Sua compactação ocorre quando suas partículas se agrupam de forma mecânica por meio da redução de vazios de ar (BLUCHER, 1951 apud GRANDE, 2003).

Já o cimento pode ser definido como um aglomerante hidráulico originado da queima e moagem de misturas de calcário, argila e minério de ferro clínquerizado em menor proporção. Posteriormente, recebe adição de gesso para controlar a pega e endurecimento e outras substâncias como escória de alto forno, cinzas volantes e sílicas ativas, de acordo com cada tipo de cimento (NEVILLE, 1997; GRANDE, 2003). Segundo Baghchesaraei e Baghchesaraei (2012), o cimento Portland é o tipo mais comum de cimento devido ao seu uso em concretos, argamassa e a maioria dos rejuntas não especializados e seu nome é originário de um tipo de pedra extraída da Ilha de Portland em Dorset, na Inglaterra no início do século XIX.

No Brasil, oito tipos de cimentos são produzidos, sendo eles: o cimento Portland comum (CP I e CP I-S), cimento Portland composto (CP II-E; CP II-Z e CP II-F); cimento Portland de alto-forno (CP III); cimento Portland pozolânico (CP IV); cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI); cimento Portland resistente a sulfatos (RS); cimento Portland de baixo calor de hidratação (BC) e cimento Portland branco (CPB)(ABCP, 2021).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2021), o CP I é referênciados demais tipos básicos de cimento Portland e se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio e de adições de escórias, pozolanas e material carbonático (fíler calcário) no processo de moagem. O material carbonático é conhecido no jargão da indústria como fíler calcário.

O CP I pode conter de 1% a 5% de material pozolânico, escória ou carbonato de cálcio e o restante de clínquer, enquanto CPI-S pode conter de 6% a 10% de material carbonático. Os cimentos Portland compostos tem adições de escória,

pozolana e fíler em proporções maiores que no CP I e CP I-S. O CP III e oCP IV contam com proporções maiores de escória e pozolana, de 15% a 50% (CP IV). Desta forma, as adições no cimento (Figura 6) apresentam melhoras nas características do concreto além de preservar o ambiente aproveitando resíduos e diminuindo as emissões de gases e a extração de matéria-prima (ABCP, 2021).

Figura 6 - Tipos de adições nos cimentos Portland.



Fonte: ABCP (2021).

Desde 2018, todos os tipos de cimento foram reunidos em uma única norma de especificação, a NBR 16697, que especifica os requisitos para o recebimento dos cimentos Portland no país (ABNT, 2018). A NBR referida unifica oito normas de especificação de cimentos Portland em um único documento, no entanto, neste estudo será dada maior atenção ao cimento Portland pozolânico.

O cimento Portland pozolânico é bastante recomendável na concretagem sob temperaturas elevadas, pois proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, como os sulfatos. É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento, nosso objeto de estudo (CIMENTO.ORG, 2016).

No caso do solo-cimento, a natureza do cimento é de suma importância para o desenvolvimento de pesquisas de melhoramento do material, visto que diferentes composições de cimento apresentam comportamentos distintos de mistura solo-cimento no que se refere à fissuração por retração (GRANDE, 2003). Segundo Segantini (2000), o solo-cimento pode ser classificado em solo-cimento compactado (SCC) e solo-cimento plástico (SCP). O primeiro necessita de água em quantidade suficiente para que possibilite a máxima compactação e a ocorrência das reações de hidratação do cimento, enquanto a segunda necessita de água até que se obtenha um produto de consistência plástica, de aspecto similar ao de uma argamassa de emboço.

O uso do solo-cimento em construções no Brasil já acontecia desde 1953, como na construção de um hospital em Manaus – AM, porém, as primeiras pesquisas no país foram feitas pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia (CEPED) no início da década de 1970 (MERCADO, 1990; GRANDE, 2003).

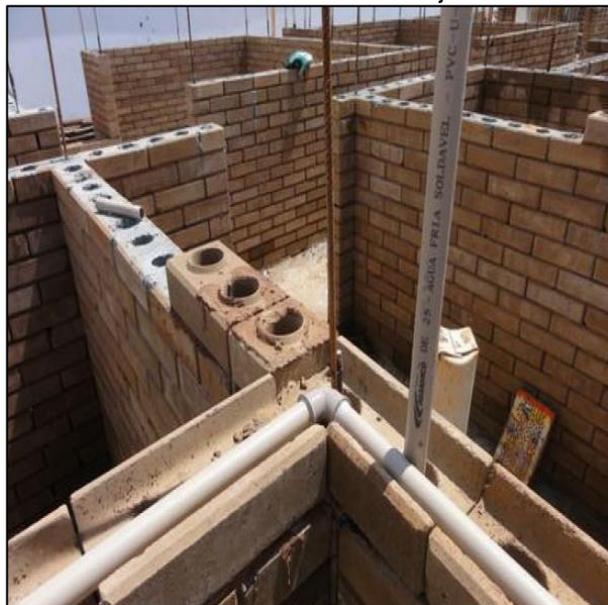
A primeira etapa da produção é a seleção do traço (dosagem de cada componente da mistura), a qual segundo Lima (2010) deve ser realizada com cautela com base nas propriedades necessárias para cada tipo de aplicação. Normalmente, o traço do tijolo apresenta a menor aplicação de cimento, atendendo aos critérios específicos da NBR 8491 (ABNT, 2012) que determina valores relacionados a resistência à compressão, tração e absorção de água.

Posteriormente, o solo escolhido passa pelas etapas de gradeamento e peneiramento, com peneiras de 4,8mm, para descarte da granulometria retida. Junto ao solo, é adicionado o cimento e água até que se alcance a umidade ideal. Logo após, a mistura é encaminhada ao processo de prensagem que dão formato aos tijolos que levam até sete dias para a cura (ABCP, 2021). O processo de produção também pode ser realizado de forma automatizada, com produção de cerca de 3000 unidades de tijolos por dia (CORDEIRO; MACHADO, 2017).

Segundo Motta et al. (2014), o tijolo solo-cimento gera menores quantidades de resíduos e pode ainda ser usado na fabricação de outros tijolos. Tecnicamente, os tijolos podem ser montados por encaixefacilitando o assentamento, o tempo de execução, favorecendo a redução de gastos com argamassas, dimensionamento das fundações e outras estruturas. Segundo o mesmo autor, o modelo mais comum de fabricação do tijolo solo-cimento possui dois furos, corroborando para o

isolamento térmico e acústico por conta das câmaras de ar no âmago das alvenarias. Além disso, ainda formam dutos que permitem passagem de fios e tubulações (Figura 7).

Figura 7–Sistema de assentamento de tijolos solo-cimento.



Fonte: Cunha (2012).

Comparado a alvenaria convencional, o uso de tijolo solo-cimento proporciona uma redução de 30% no tempo da construção, redução do uso de madeiras para modular pilares e vigas, economia de ferragens e concreto, menos geração de entulhos e tem fácil acabamento, sendo necessário apenas a aplicação de impermeabilizantes (LIMA, 2016).

Desta forma, o tijolo ecológico pode ser considerando uma excelente opção de escolha devido a abundância de sua matéria-prima e devido ao seu processo de fabricação não necessitar de queima, podendo ser fabricado no próprio canteiro de obras e com o solo da região. Desta forma, sua produção corrobora com economias na obra, com a redução de gastos com transporte, matéria-prima, maior economia de energia com pouco gasto energético, além de garantir conforto térmico e acústico devido às suas características isolantes (FIQUEROLA, 2004).

4. METODOLOGIA

Para a execução da pesquisa, optou-se pela realização de revisão bibliográfica com abordagem qualitativa, de natureza aplicada e caráter exploratório. Este tipo de pesquisa tem como objetivo a descrição de características de determinadas populações ou fenômenos, ainda, o estabelecimento de relações entre variáveis (GIL, 2010). A pesquisa bibliográfica permite obter uma visão mais geral de uma determinada modalidade de pesquisa indireta (MARCONI; LAKATOS, 2009) e apresenta como principal vantagem a possibilidade de o investigador obter uma gama de fenômenos, por vezes mais ampla do que aquela que se poderia pesquisar diretamente (GIL, 2011).

Para isso, utilizou-se como base de dados diversos livros, monografias, dissertações, teses e demais artigos e materiais bibliográficos de caráter científico, disponíveis em plataformas de divulgação científica como *Google Scholar*, repositórios de Universidades, *Scopus* e *Web of Science*. Optou-se por trabalhar com publicações dos últimos vinte anos, sendo estes escritos em português ou inglês. Para as buscas, utilizaram-se termos livres e combinados como estratégia de pesquisa, em português e inglês, como: “cinza do bagaço da cana-de-açúcar”, “*sugarcane bagasse ash*”, “SCBA”, “tijolo solo-cimento”, “tijolo ecológico”, “atividade pozolânica” e “*pozzolanic activity*”.

Como critério de inclusão e exclusão, foram analisados inicialmente títulos e resumos para exclusão dos artigos que não correspondiam com o objetivo proposto por este estudo. Para os artigos e materiais selecionados definiu-se desfechos para análises como: “propriedades química, física e pozolânica da SCBA” e “propriedades mecânicas de tijolos ecológicos fabricados com a SCBA”. Desta forma, buscou-se promover um diálogo entre as fontes utilizadas a partir de um ponto de vista crítico, comparando ideias e buscando responder os objetivos apresentados neste trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Propriedades físicas e químicas da SCBA e atividades pozolânicas

As propriedades físicas da SCBA são importantes de serem estudadas pois influenciam nas propriedades de endurecimento do concreto. Na Tabela 1 são apresentadas as principais propriedades físicas da SCBA e comparadas com as propriedades do cimento Portland pozolânico (OPC), conforme valores apresentados na literatura (RAMBABU; GUPTA; RAMARAO, 2016; TEJA; PURNACHANDRA; MEENA, 2017; MAMATA; NARAYANA; KUMAR, 2017).

Tabela 1 - Propriedades físicas de SCBA e Cimento Portland Pozolânico (OPC)

Propriedades físicas	OPC	SCBA
Cor	Cinza	Preto, cinza avermelhado, branco
Tamanho da partícula (μm)	22,5 a 28	0,1 a 105
Gravidade específica	2,9 a 3,15	1,36 a 2,88
Finura (passando na peneira de 45 μm)	93%	95 a 97%
Densidade aparente frouxa (Kg/m^3)	1160	575 a 578
Densidade aparente compactada (Kg/m^3)	1560	1200 a 1560,8
A área de superfície específica Blaine (m^2/kg)	309 a 373	514 a 1250
Solidez (mm)	1 a 9	1,21

Fonte: Khalil, Aslam, Ahmad (2021) adaptado.

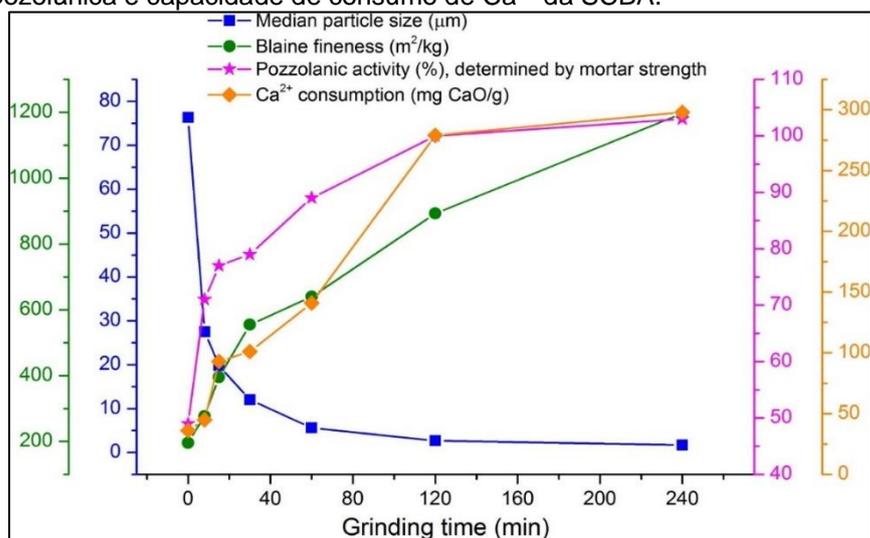
A cor da SCBA pode variar entre preto, cinza avermelhado e branco de acordo com o processo de combustão, onde a cor preta significa um maior teor de carbono devido à incineração incompleta, as SCBA cinza avermelhado são as que passaram por processos de combustão acima de 800°C e as brancas acima de 900°C (KATARE; MANDURWAR, 2015; BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2017). Dentre 95 a 97% do material analisado (SCBA) apresentam finura que passam na peneira de 45 μm . Segundo Hosseini e Whalen (2011), as partículas devem ser finas o suficiente para garantir a área de superfície reativa suficientemente grande para a reação pozolânica.

Com relação ao tamanho da partícula, os valores da SCBA variam entre 0,1 a 105 μm . Segundo Cordeiro et al. (2009), quanto menor o tamanho de partícula melhor a atividade pozolânica que conseqüentemente melhora a resistência das argamassas ao promover o consumo de CH na reação pozolânica, conforme

exemplo apresentado na Figura 8, onde as menores partículas (1,7 µm) apresentaram melhor atividade pozolânica (103%).

A gravidade específica do SCBA ficou abaixo de 2,9 – mínima do OPC – o que significa um maior volume de SCBA para substituição do cimento. Da mesma forma, as densidades aparentes (frouxa ou compactada) são menores que do OPC, sendo assim, o volume de SCBA para uma suposta massa será maior e, conseqüentemente, tornarão o concreto menos permeável (KRISHNA; SANDEEP; MINI, 2016). Com relação a área de superfície específica de Blaine, a SCBA apresentou valores 514 e 1250m²/kg. Segundo Cordeiro et al. (2009) quanto maior área de superfície específica o uso da SCBA maior será a quantidade de aditivos superplastificantes e incorporadores de ar para obter maior trabalhabilidade.

Figura 8 - Correlação entre o tempo de moagem, tamanho médio de partícula, finura de Blaine, atividade pozolânica e capacidade de consumo de Ca²⁺ da SCBA.



Fonte: Cordeiro et al. (2009) *apud* Wang et al. (2016).

Segundo Khalil, Aslam e Ahmad (2021), conhecer as propriedades químicas do SCBA é essencial para garantir o bom funcionamento deste como compósito na substituição do cimento, visto que as propriedades de endurecimento do concreto dependem de diferentes fatores, entre eles a composição química do material de ligação. As composições químicas da SCBA apresentadas na literatura científica são listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades químicas do SCBA.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
68,42	5,812	0,218	2,56	0,572	4,33	-	-	15,9
72,853	1,077	6,961	9,968	6,419	-	6,768	1.968	4,233
65	3,95	9,17	12,6	0,6	0,1	-	-	9,02
76,67	2,13	3,78	5,59	0,92	-	8,29	0,12	2 a 5

62,1	5,54	5,42	1	1,12	-	2,22	0,81	-
62,43	4,28	6,98	11,8	2,51	1,48	3,53	-	4,73
65	4,8	0,9	3,9	-	0,9	2	-	10,5
64,59	4,38	6,98	11,8	2,51	1,48	3,53	-	4,73
57,63	1,33	1,5	6,14	1,56	3,52	7,33	0,22	21
62,43	4,38	6,98	11,8	2,51	1,48	3,53	-	4,73
66,89	29,18	-	1,92	0,83	0,56	-	-	0,72
58,62	14,95	12,25	1,92	2.090	2.070	-	-	1,08
77,25	6,37	4,21	4,05	2,61	0,11	2,34	1,38	-
78,34	8,55	3,61	2,15	0,83	0,56	3,46	0,12	0,42
55,05*	3,87*	0,42*	5,09*	4,82*	-	4*	0,94*	-
66,5**	4,82**	4,67**	3,83**	2,87**	-	4,07**	0,59**	-
77,25	6,37	4,21	4,05	2,61	0,11	2,34	1,38	-
65	3,95	9,17	12,6	0,6	0,1	-	-	9

Fonte: Khalil, Aslam, Ahmad (2021) adaptado. *Recolhido no moinho (300–600 ° C); **Moido por 45 min. e depois queimado a 400°C por 4 horas.

Segundo Wang et al (2016), qualquer material residual candidato à pozolana deve ter alta quantidade de SiO₂ (Dióxido de silício) amorfo + Al₂O₃ (Óxido de alumínio) + Fe₂O₃ (Óxido de ferro) em um teor adequado para garantir sua reatividade química.

Conforme apresentado na Tabela 2, a proporção de SiO₂ apresentada na literatura está na faixa de 55,05% a 78,34% em peso, o que significa dizer que a SCBA compreende um alto teor de óxidos que são importantes e adequados para um material pozolânico (CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009) *apud* KHALIL; ASLAM; AHMAD, 2021). Segundo Khalil, Aslam, Ahmad (2021), a reatividade da SCBA é avaliada pela presença do teor de SiO₂.

Com relação ao Al₂O₃ e Fe₂O₃, estes chegaram a apresentar 29,18% e 12,25% em peso, conforme estudos de Kawade et al. (2013) e Patel et al. (2018) *apud* KHALIL; ASLAM; AHMAD, 2021), respectivamente. Na Tabela 3, apresenta-se as características químicas representativas de pozolanas convencionais, sílica ativa e metacaulium (NEHDI; DUQUETTE; DAMATTY, 2003; PAYÁ et al., 2013; SATA; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2007).

Tabela 3 -Características químicas representativas de pozolanas convencionais.

Classe	Material Pozolânico	Composição química (% em peso)		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Convencional	Sílica ativa	94,00	0,10	0,10
Convencional	Metacaulium	52,10	41,00	4,32

Fonte: Nehdi, Duquette e Damatty (2003); Payá et al. (2013); Sata, Jaturapitakkul e Kiattikomol (2007) adaptados.

De acordo com NBR 12653, o ideal é que a soma de SiO₂, Al₂O₃eFe₂O₃ esteja acima de 70% da massa total (ABNT, 2015). Porém, além dos

principais componentes (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), a SCBA também apresenta carbono orgânico não queimado, carbonato e água que é apresentado na Tabela 2 como LOI (Conteúdo de Perda por Ignição) que variaram na faixa de 0,42 a 21%. Segundo Siddique (2012), quanto maior o conteúdo de LOI presente na SCBA significa que o carbono não queimou totalmente e, conseqüentemente, isto diminui a atividade pozolânica da SCBA. Neste caso, o tempo de queima e a temperatura são fatores condicionantes na variação no valor do LOI.

De acordo com Wang et al. (2016), por conta da variabilidade na composição química que ocorre em matérias orgânicas biológicas de plantas ou materiais lignocelulósicos e por serem cultivados em muitos ambientes diferentes, as cinzas da combustão de biomassas podem apresentar atividades pozolânicas variáveis. De acordo com estudo realizado por Paula et al. (2008), assumindo quatro tipos de misturas de SCBA com cimento, os resultados dos índices de atividade pozolânica (IAP) comprovaram a reatividade da SCBA em todas as combinações (10%, 20% e 30% de substituição por SCBA) com valores superiores a 75%, conforme exigido pelas normas técnicas (Tabela 4).

Tabela 4 - Índice de Atividade Pozolana (IAP) de acordo com as substituições do SCBA

Mistura	IAP (%)
C1 (100/0)	100
C2 (90/10)	100
C3 (80/20)	99
C4 (70/30)	86

Fonte: Paula et al. (2008) adaptado.

Diversos métodos de avaliação das atividades pozolânicas do SCBA são citados na literatura, dentre eles o teste de índice de atividade de força, teste de reatividade de cal, teste Frattini, método de condutividade elétrica e método de saturação de limão (BAHURUDEEN et al., 2016). Da mesma forma, diversos métodos apresentados na literatura visam melhorar a atividade pozolânica de resíduos sólidos, como a SCBA, e possibilitam aumentar o conteúdo de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e a proporção de cristais amorfs de pozolana. Dentre estes, Wang et al. (2016) cita a otimização da combustão, a adição de produtos químicos durante a hidratação do cimento, elevação da temperatura de cura e pré-tratamento de pozolanas com maior tempo de moagem.

A otimização da combustão é responsável pela alteração das propriedades físico-químicas das cinzas, pois fatores como temperatura de combustão, tempo de

retenção e método de resfriamento determinam o grau de remoção de carbono durante a combustão que, conseqüentemente, alteram o potencial pozolânico das cinzas pois afetam diretamente a pureza de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ e influenciam a transformação amorfa-cristalina termossensível.

Em estudo realizado por Cordeiro et al. (2009), foi possível observar que existe variação da atividade pozolânica em relação as temperaturas de queima, no entanto, os dois parâmetros não apresentam tendência definida (Tabela 5). Todas as temperaturas de queima, com exceção de 600°C, não atingiram o valor mínimo de IAP estipulado pela norma técnica de 75%. Desta forma, a temperatura de 600°C foi a mais apropriada para a produção de SCBA pozolânica.

Tabela 5 – Índice de atividade pozolânica (IAP) conforme temperaturas de queima da SCBA

Temperatura de queima (°C)	IAP (%)
400	28
500	73
600	77
700	63
800	69
900	73

Fonte: Cordeiro et al. (2009).

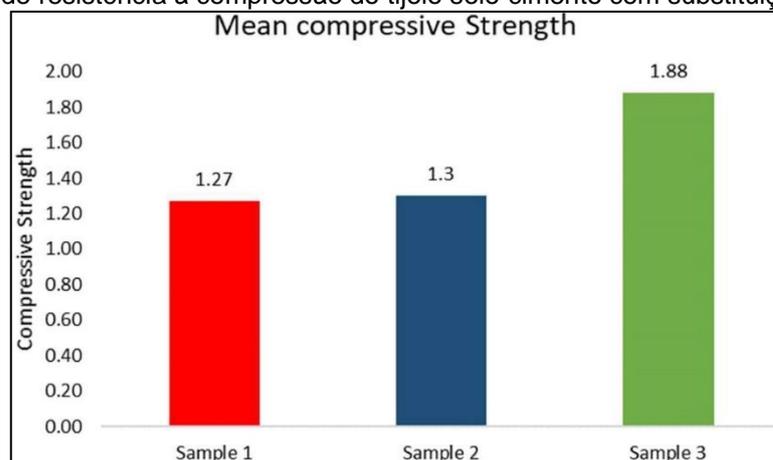
No entanto, com relação a questão da otimização, ainda não há consenso sobre os parâmetros de combustão recomendados para maximizar a atividade pozolânica da SCBA devido ao fato de que os pesquisadores não seguem um protocolo experimental padrão em testes de combustão de biomassa, portanto, o tipo de forno, forma de ignição, ventilação de fluxo de ar e outros fatores não controlados podem influenciar a atividade pozolânica das SCBA.

5.2. Características mecânicas dos tijolos com uso da SCBA

Com relação a resistência à compressão de tijolos solo-cimento, em estudo realizado por Giordano (2016), o uso de SCBA para produção dos tijolos não alcançaram a resistência mínima de 2 MPa, de acordo com a NBR 10834. Da mesma forma, em um estudo realizado por Jordan et al. (2019) analisou-se a resistência média à compressão de tijolos solo-cimento fabricados com 10%, 30% e 40% de substituição por SCBA. Segundo os autores, os experimentos também não apresentaram resistência >2,0 Mpa, chegando a um valor absoluto de ≥1,7 MPa

para as amostras testada, mas o resultado foi considerado insatisfatório, conforme Figura 09.

Figura 9–Valores de resistência à compressão do tijolo solo-cimento com substituições de SCBA



Fonte: Jordan et al. (2019)

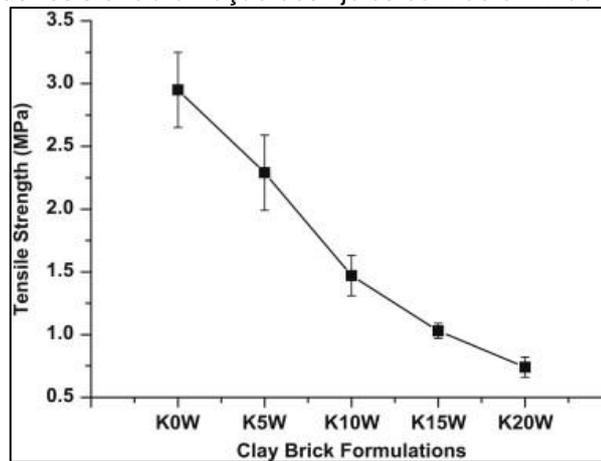
Em experimentos realizados por Kazmi et al. (2016), a resistência à compressão dos tijolos de argila também diminuiu com a inserção de SCBA de 8,38 MPa para 5,10 Mpa, mantendo-se, no entanto, acima do valor mínimo estipulado pelas normas. Já em estudo de Ferrari et al. (2014), a resistência mínima recomendada pela norma também não foi atendida, onde a resistência à compressão de tijolos de solo-cimento foi reduzida em 50% com a substituição de 20% do cimento por SCBA em comparação com misturas que não continham SCBA.

Possivelmente, segundo os autores, os resultados insatisfatórios de resistência à compressão têm relação com a granulometria das cinzas utilizadas e falta de tratamento, produzindo um material com vazios e granulometria variável, comprometendo a qualidade da mistura e levando a valores inferiores aos estabelecidos pela norma (GIORDANO, 2016; JORDAN et al., 2019). Segundo Almeida et al. (2015), quando devidamente tratadas as SCBA apresentam efeito filler preenchendo os microporos da mistura e, conseqüentemente, reduzindo o número de vazios, contribuindo para a resistência à compressão.

Em estudo realizado por Faria, Gurgel e Holanda (2012), a qualidade dos tijolos produzidos com até 20% em peso de resíduo de SCBA após queima a 1000°C foi analisada com base na resistência à tração, nas propriedades de absorção de água e densidade aparente, onde as peças sem resíduo de SCBA foram consideradas peças de referência. A resistência à tração diminuiu conforme

houve aumento do resíduo da SCBA (Figura 10), sendo sugerido pelos autores que a adição de SCBA acima de 10% em peso deve ser evitada, pois prejudica a resistência mecânica das peças.

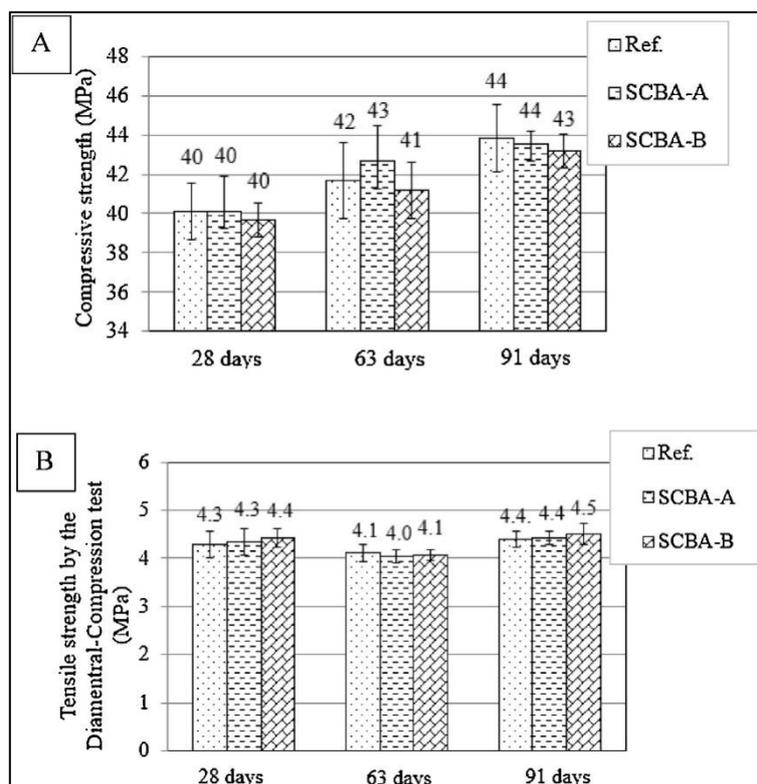
Figura 10–Valores de resistência à tração dos tijolos com determinado conteúdo de SCBA



Fonte: Faria, Gurgel e Holanda (2012).

Em trabalho realizado por Berenger et al. (2020) a resistência à compressão e tração de peças utilizando a quantidade parcial de substituição de 15% do cimento Portland pelo bagaço da cinza da cana-de-açúcar, independentemente da origem, resultou em materiais com equivalência estatística, tanto para o caso de resistência à compressão quanto para resistência à tração Figuras 11a e 11b.

Figura 11–Valores de resistência à compressão (a) e à tração por compressão diamétrica (b).



Fonte: Berenger et al. (2020)

No entanto, em pesquisa realizada por Moretti, Nunes e Sales (2018), a substituição de 30% do cimento por SCBA foi responsável por uma diminuição na resistência à compressão aos 28 dias. Isso significa que o teor de substituição de 15% é ideal para não haver prejuízo para as propriedades.

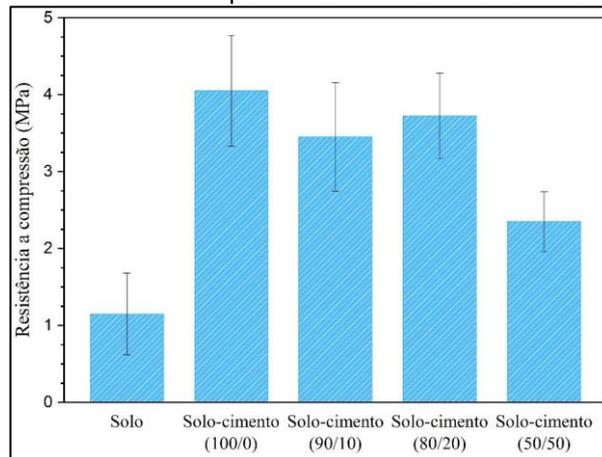
No estudo realizado por Moura et al. (2021), os resultados dos ensaios de resistência à compressão foram obtidos através dos rompimentos dos corpos de prova (CP) aos 28 dias, onde todos os traços apresentaram resistência acima de 2,0 Mpa, de acordo com os dados listados na Tabela 6. Na Figura 12, apresenta-se a comparação entre os tijolos de acordo com a composição de cada traço, onde é possível constatar que, com exceção do tijolo de solo puro, todos os demais com SCBA na composição apresentaram valores da resistência de acordo com as recomendações da NBR 8492 para tijolo maciço de solo-cimento (ABNT, 2012).

Tabela 6 - Resistência à compressão média dos corpos de prova

Mistura	Cimento (%)	SCBA (%)	Limite de resistência (MPa)
Solo	0	0	1,15 ± 0,53
Solo-cimento (100/0)	100	0	4,05 ± 0,72
Solo-cimento (90/10)	90	10	3,45 ± 0,70
Solo-cimento (80/20)	80	20	3,73 ± 0,56
Solo-cimento (50/50)	50	50	2,35 ± 0,39

Fonte: Moura et al. (2021).

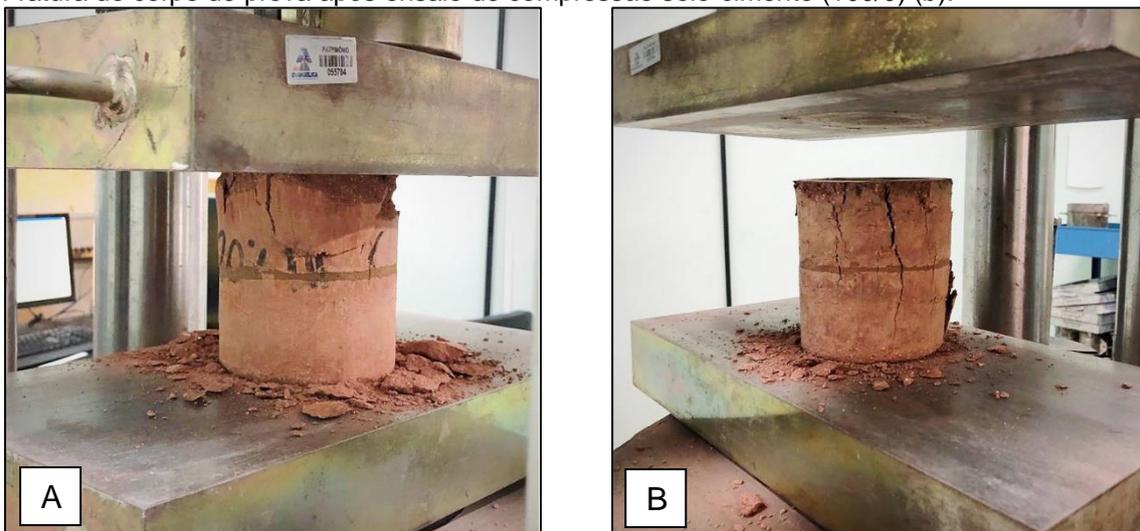
Figura 12–Valores de resistência à compressão com 28 dias de cura dos tijolos solo-cimento.



Fonte: Moura et al. (2021).

Nas Figuras 13a e 13b apresenta-se a resistência mecânica do tijolo com adição de 20% de SCBA (80/20) e sem adição de SCBA (100/0), respectivamente. Dentre os corpos de prova testados com SCBA, o 80/20 apresentou a maior resistência mecânica assim como em estudo desenvolvido por Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) e Jamsawang et al. (2017), onde a substituição parcial do cimento por 20% de SCBA também apresentou os melhores resultados de resistência mecânica em materiais cimentícios, com redução da resistência na adição gradativa da SCBA.

Figura 13 - Fratura do corpo de prova após ensaio de compressão solo-cimento (80/20) (a) e Fratura do corpo de prova após ensaio de compressão solo-cimento (100/0) (b).



Fonte: Moura et al. (2021).

Com relação a absorção de água, que está relacionada à microestrutura da matriz cerâmica queimada e determina a fração de volume dos poros abertos, observou-se que a absorção de água variou entre 22,88% e 25,66% (Figura 14a),

com tendência de aumentar conforme a adição de resíduos de SCBA. Segundo Faria, Gurgel e Holanda (2012), os resultados foram condizentes com os valores da densidade aparente (Figura 14b).

Figura 14– Valores de absorção de água dos tijolos de argila versus teor de resíduos.

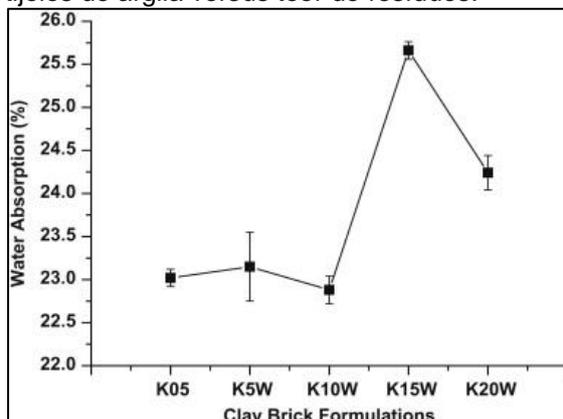
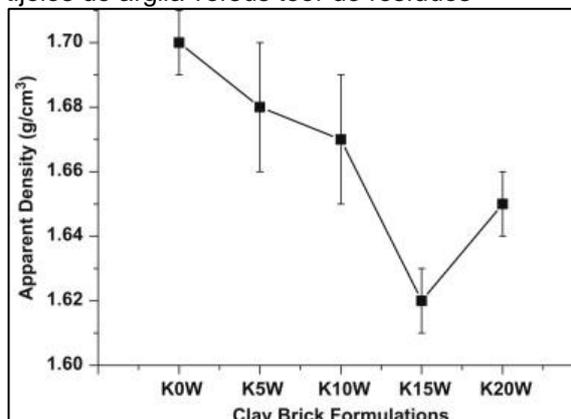


Figura 15–Valores de densidade aparente dos tijolos de argila versus teor de resíduos



Fonte: Faria, Gurgel e Holanda (2012).

Como já citado por Almeida et al. (2015), as partículas finas da SCBA preenchem os microporos do solo propiciando o aumento da relação água-cimento. Este fato pode ser percebido nos resultados do estudo de Moura et al. (2021), onde é possível observar uma diminuição da capacidade de absorção de água conforme o aumento de SCBA no traço (Tabela 7).

Tabela 7 - Média das porcentagens de absorção de água

Mistura	Cimento (%)	SCBA (%)	Absorção de água (%)
Solo-cimento (100/0)	100	0	9,65 ± 1,35
Solo-cimento (90/10)	90	10	9,44 ± 1,96
Solo-cimento (80/20)	80	20	7,46 ± 0,32
Solo-cimento (50/50)	50	50	3,61 ± 0,92

Fonte: Moura et al. (2021).

Com o aumento da adição de SCBA nos corpos de prova a porosidade interna dos tijolos reduziu e, conseqüentemente, houve uma menor absorção de água. Desta forma, todos os traços utilizados para produção do tijolo solo-cimento foram satisfatórios com relação a absorção de água com valores inferiores ao valor médio de 20% estabelecido pela NBR 8492 (ABNT, 2012).

CONCLUSÃO

Com base no exposto, pode ser verificado que a SCBA apresenta características físicas e químicas que propiciam a melhora da resistência ao promover o consumo de CH na reação pozolânica, mesmo com sua gravidade específica exigindo um maior volume quando comparado ao cimento, e apresentam SiO_2 amorfo, Al_2O_3 e Fe_2O_3 em um teor adequado para garantir sua reatividade química, o que geralmente garante a reatividade da SCBA apresentando valores de índices de atividades pozolânicas superiores a 75%, atendendo as normas técnicas regulatórias.

Algumas das principais limitações da incorporação da SCBA em tijolos ecológicos se referem ao aumento da absorção de água e também da diminuição da resistência mecânica. Com relação a estas características, diversos estudos apresentaram valores de resistência à compressão e tração com equivalência estatística aos produzidos sem adição da SCBA, com valores superiores a 2,0 MPA.

Da mesma forma, nos testes de absorção de água os resultados apresentaram valores satisfatórios inferiores ao valor médio de 20%, atendendo aos critérios estabelecidos pelas normas.

Desta forma, conclui-se que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar processada pode ser usada como excelente compósito de adição pozolânica na produção de tijolos ecológicos ao invés de ser descartada como resíduo, sendo uma alternativa que apresenta resultados altamente positivos em termos de proteção ambiental, práticas de gerenciamento de resíduos e economia de matéria-prima.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A versatilidade do cimento brasileiro**. 2021. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento/tipos/>> Acesso em: 13 jul. 2021.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio.4p. 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozzolânicos – Requisitos. 6p. 2015.

ADESANYA, D.; RAHEEM, A. **A study of the permeability and acid attack of corn cob ash blended cements** Constr. Build. Mater., 24 (3) (2010), pp. 403-409

ALDAHDOOH, M.; MUHAMAD, B. N.; JOHARI, M.M. Development of green ultra-high performance fiber reinforced concrete containing ultrafine palm oil fuel ash. **Constr. Buildings Materials**, 48, p. 379-389. 2013.

ALMEIDA, F. C. R. *et al.* Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31-38, 2015.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTINERA, F.; SCRIVENER, K. Replacement of cement with a combination of metakaolin and limestone. **Cem. Concret Resources**, 42, p. 1579 – 1589. 2012.

ARAÚJO, E. S.; SANTOS, J. A. P. **O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no brasil e sua relevância na economia nacional**. Facider, Colíder, v. 4, n. 34342, p.1-16, 2012

ARSHEE, K.; SAXENA, A.K. Um estudo experimental de substituição parcial de cimento por SBCA para concreto M-25 **Int. J. Innovat. Res. Sci. Technol.** , 3 (07), pp. 119 – 121. 2016.

AZAMBUJA, M.A. **Geologia aplicada a solo-cimento**. Publicações ABCP, São Paulo. 1979.

BAGHCHESARAEI, A., BAGHCHESARAEI, O.R. Portland Cement, **International Conference on Transport, Civil, Architecture and Environment engineering (ICTCAEE'2012)**, Dubai. 2012.

BAHURUDEEN, A.; MARCKSON, A.V.; KISHORE, A.; SANTHANAM, M. Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers, **Constr. Build. Mater.** 68, pp. 465–475. 2014.

BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash, **Cem. Concr. Compos.** 56, pp. 32–45. 2015.

BAHURUDEEN, A. *et al.* Assesment of Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**.Volume 28, ed. 2. 2016.

BENETTI, M. D. A internacionalização recente da indústria de etanol brasileira. **Revistas Eletrônicas FEE**, Porto Alegre, v. 36, n.04, 2009.

BERENQUER, R.; LIMA, N.; VALD´ES, C.; MEDEIROS, M. H. F.; LIMA, N. B. D.; DELGADO, J. M. P. Q.; SILVA, F. A. N.; AZEVEDO, A. C.; GUIMARÃES, A. S.; RANGEL, B. Durability of Concrete Structures with Sugar Cane Bagasse Ash. **Advances in Materials Science and Engineering**. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6907834>

BARBOZA FILHO, M. P.; PRABHU, A. S. **Aplicação de Silicato de Cálcio na Cultura de Arroz**, Embrapa: Santo Antônio de Goiás, 2002

BLUCHER, E. **Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários** – volume I. São Paulo. 1951.

BORLINI, M.C.; LOPES, C.R.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. Influência da cinza do bagaço de cana na substituição dos fluxos de uma telha cerâmica vitrificada, **49º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, São Paulo, Brasil. 2005.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Constr. Build. Mater.**, 23, pp. 3352-3358. 2009.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars, **Constr. Build. Mater.** 23, pp. 3523–3531. 2009.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. V. 7, safra 2019/2020, n. 3 – Terceiro levantamento, Brasília. 62 p. 2020.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Use of ultra-fine sugar cane bagasse ash as mineral admixture for concrete, **ACI Mater. J.** 105 (5), pp. 487–493. 2008.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; TAVARES, L.M. Fairbairn, Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete, **Cem. Concr. Res.** 39 (2), pp. 110–115. 2009.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Effect of calcinations temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash, **Constr. Build. Mater.** 23, p. 3301–3303. 2019.

CORDEIRO, G.C.; ANDREÃO, P.V.; TAVARES, L.M. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. **Helyon**. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02566>

CORDEIRO, C. R.; MACHADO, V. C. **Sustentabilidade na fabricação do tijolo solo-cimento: estudo comparativo com blocos convencionais**. 2017. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Aparecida de Goiânia, 2017.

COUTINHO, A.S. **Fabrico e propriedades do betão**. 3. Ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, v. 1., 400 p. 1997.

- CUNHA, K. **Tijolo Solo-Cimento**, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.karlacunha.com.br/tijolo-solo-cimento/>. Acesso em: 19 de jul. 2021.
- DE-SOARES, M.; GARCIA, D.C.S.; FIGUEIREDO, R.B.; AGUILAR, M.T.P.; CETLIN, P.R. Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂. **Cem. Concr. Compos.**, 71, pp. 20-25. 2016.
- FARIA, K.C.P.; GURGEL, R.F.; HOLANDA, J.N.F. Characterization of sugarcane bagasse ash for use in ceramic bodies. **Mater. Sci. Forum**, pp. 1049-1052, 2010.
- FARIA, K.C.P.; GURGEL, R.F.; HOLANDA, J.N.F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks, **Journal of Environmental Management**, Volume 101, pp. 7-12, ISSN 0301-4797, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.032>.
- FERRARI, V.J.; SOUZA, A.H.C.; BALTAZAR, H.P.; DOTTO, W.; NETO, J.G.V. Tijolos vazados de solo-cimento produzidos com soloda Região do Arenito Caiuá do Paraná. **Ambiente Construído**14(3):131-148. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000300011>
- FLAUSINIO, B. F. P. G. **Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais**. 2015. Tese (Doutorado de Engenharia Nuclear e da Energia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- FONSECA, T. T. A. **Avaliação das influências climáticas na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar**. 2016. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- FRAAY, A.; BIJEN, J.; HAAN, T. The reaction of fly ash in concrete a critical examination. **Cem. Concret Resources**, 19, p. 235-246. 1989.
- FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I.; URÍA, A. **Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry**. *Material Construction*, 52 (267) (2002), pp. 79-83
- FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I. **Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: expansive compounds**. *Cement Concrete Research*, 34 (2004), pp. 1881-1888
- FRIAS, M.; VILLAR-COCINA, E. Influência da temperatura de calcinação na ativação do bagaço de cana-de-açúcar: parâmetros cinéticos. **Adv. Cement Resources.**, 19, p. 109-115. 2007.
- GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 515-524, 2007.
- GIBBONS, P. **Pozolanas para argamassa de cal**. 2003.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. ed. São Paulo: **Atlas**, 2010.
- GIL, A. C. Metodologia do ensino superior. 4. ed. São Paulo: **Atlas**, 2011
- GILIO L.; CASTRO, N.R. Avaliação de aspectos limitantes ao crescimento do etanol e o setor sucroenergético no Brasil. **Revista Eletrônica de Energia** 6(1):57-74. 2016.

GIORDANO, E. B. **Fabricação de tijolos solo-cimento com adição de cinza de bagaço de cana**. TCC (Graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, 2016.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

HEEDE, P.V.D.; MAES, M.; GRUYAERT, E.; BELIE, N.D. Full probabilistic service life prediction and life cycle assessment of concrete with fly ash and blast-furnace slag in a submerged marine environment: a parameter study. **Int. J. Environ. Sustain. Dev.**, 11, p. 32-49. 2012.

HERNÁNDEZ-SALAS, J.M.; VILLA-RAMÍREZ, M.S.; VELOZ-RENDÓ, N.J.S.; RIVERA-HERNÁNDEZ, K.N.; GONZÁLEZ-CÉSAR, R.A.; PLASCENCIA-ESPINOSA, M.A. Comparative hydrolysis and fermentation of sugarcane and agave bagasse. **Bio resource Technology**, 100, p. 1238-1245. 2009.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, G.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V.A.; MEDEIROS, M.H.F. Portland cement pozzolanic activity (Part I): pozzolanic activity index (Iap) with lime, X-ray diffraction (Xrd), thermogravimetry (Tga) and modified hood. **Matér. Journal**, 22, p. 1 – 18. 2017.

HUNTZINGER, D.N.; EATMON, T.D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative Technologies. **Journal Cleaner Production**. 17, p. 668-675. 2009.

INBASEKAR, M.; HARIPRASATH, P.; SENTHILKUMAR, D. Study on potential utilization of sugarcane bagasse ash in steel fiber reinforced concrete. **International Journal of Enginner Science Res. Technoloy**. 2016.

JAMSAWANG, P. *et al.* Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste. **Construction and Building Materials**, v. 154, n. 12, p. 61-71, 2017.

JORDAN, R.A.; COSTA, M.V.; MARTINS, E.A.S.; ROSA, M.A., PETRAUSKI, A. Manufacture of soil-cement bricks with the addition of sugarcane bagasse ash. **Revista Engenharia Agrícola**. ISSN: 1809-4430 (on-line). 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n1p26-31/2019>

KATARE, V.D.; MADURWAR, M.V. Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review, **Constr. Build. Mater**. 152, pp. 1–15. 2017.

KAZMI, S.M.S.; ABBAS, S.; MUNIR, M.J.; KHITAB, A. Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks. **Journal of Building Engineering** 7:372-378. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.08.001>

KAWADE, M.U.R.; RATHI, M.V.R.; GIRGE, M.V.D. Effect of use of bagasse ash on strength of concrete, **Int. J. Innovat. Res. Sci. Eng. Technol**. PP. 2997–3000. 2013.

KHALIL, M.J.; ASLAM, M.; AHMAD, S. Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete – A review. **Construction and Building Materials**. V. 270. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121371>

KRISHNA, N.K.; SANDEEP, S.; MINI, K.M. Study on concrete with partial replacement of cement by rice husk ash, **Mater. Sci. Eng.** 149 pp. 1–12. 2016.

KUMARI, A., KUMAR, P. S. Experimental Study on Partial Replacement of Cement by Sugaracne Bagasse Ash. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, 4(7), 2347-6710. 2015. doi:DOI:10.15680/IJRSET.2015.0407017

LEITE, J.L.; PIRES, A.T.N.; SOUZA, S.M.A.G.U.D.; SOUZA, A.A.U.D. Characterisation of a phenolic resin and sugar cane pulp composite. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 21, p. 253-260. 2004.

LIMA, F. L. S. **Como Montar uma Fábrica de Tijolos Ecológicos. Ideias de Negócios**, SEBRAE, p. 1-2, 2016.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 107 f. Monografia (Pós-Graduação) – Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

LINHARE, G. N. S.; ARAÚJO, V. O.; SILVA, D. J. A. Análise financeira da utilização do bagaço da cana-de-açúcar para cogeração de energia pela Raízen. **Revista de Trabalhos Acadêmicos Lusófona**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p.42-55, 2018.

LOH, Y.R.; SUJAN, D.; RAHMAN, M.E.; DAS, C.A. Sugarcane bagasse—The future composite material: A literature review, **Resources, Conservation and Recycling**, V. 75, pp. 14-22, 2013. ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.002>.

LOTENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R.D. Supplementary cementitious materials. **Cement Concr. Resources**, 41, p. 1244 – 1256. 2011.

MACÊDO, M. M. **Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. 2004. 289 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

MADANI HOSSEINI, M.; SHAO, Y.; WHALEN, J.K. Biocement production from silicon-rich plant residues: perspectives and future potential in Canada. **Biosyst. Eng.**, 110, pp. 351-362. 2011.

MAHMUD, S.; ISLAM, M.I.; RUBIEYAT, B.A.; ISLAM, M.M.; HASAN, M.M. Investigation on the workability and compressive strength of concrete by using bagasse ash from sugar mil. **World Scientific News**, 96, pp. 191-201. 2018.

MAMATHA, P.; NARAYANA, D.S.M.V.; KUMAR, T.N. To evaluate the mechanical & durability properties of nano sugarcane bagasse ash in cement concrete, **Int. J. Sci. Res. Sci. Technol.** 3 (8), pp. 425–430. 2017.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos da metodologia científica. 6. ed. São Paulo: **Atlas**, 2009.

MARSH, B.K.; DAY, R.L. Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes. **Cem. Concret Resources**, 18, p. 301-310. 1988.

MERCADO, M.C. **Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

MODANI, P.O.; VYAWAHARE, M.R. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete. **Procedia Eng.**, 51, pp. 25-29. 2013.

MORETTI, J.P.; NUNES, S.; SALES, S. Concreto autoadensável incorporando cinza de bagaço de cana-de-açúcar. **Constr. Construir. Mater.**, 172, pp. 635 – 649. 2018.

MOTTA, J.C.S.S.; MORAIS, P.W.P.; ROCHA, G.N.; TAVARES, J.C.; GONÇALVES, G.C.; CHAGAS, M.C.; MAGESTE, J.L.; LUCAS, T.P.B. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **E-xacta**, v. 7, n. 1., p. 13-26. Belo Horizonte. 2014.

MOURA, E. M.; SALES, J. N. B.; NASCIMENTO, N. C.; SOUSA, V. M. Z.; COSTA E SILVA, D. D.; LIBERA JUNIOR, V. D. Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 69-80. 2021. ISSN 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>

MULINARI, D.R.; VOORWALD, H.J.C.; CIOFFI, M.O.H.; SILVA, M.L.C.P.D.; CRUZ, T.G.D.; SARON, C. Sugarcane bagasse cellulose/HDPE composites obtained by extrusion **Composites Science and Technology**, 69, p. 214-219. 2009.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; EL DAMATTY, A. Desempenho da cinza da casca de arroz produzida utilizando uma nova tecnologia como aditivo mineral no concreto. **Cem. Concr. Res.**, 33, pp. 1203 – 1210. 2003.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Pini, São Paulo. 1997.

OLIVEIRA, L.L.; NEVES, G. G.; WAITMAN, P. L. Estudo sobre cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. **REGRAD**, Marília, v. 10, n. 1, p 354 - 365, 2017.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C.S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C.F.; Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.13, n.3, p.353–357, 2009.

PATEL, D.B.; LAD, H.; PRIYANK, S.; GARASIA, B. Experiment study on strength characteristics of concrete using bagasse ash, **Int. Res. J. Eng. Technol.** (IRJET), pp. 3699–3703. 2018.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.; VELÁZQUEZ, S. Avaliações de fator de equivalência de cimento para resíduo de catalisador de craqueamento catalítico fluido **Cem. Concr. Compos.**, pp. 12-17. 2013.

PEREIRA, I.Z.; SANTOS, I.F.S.; CASTRO E SILVA, H.L.; BARROS, R.M. Uma breve revisão sobre a indústria sucroalcooleira no Brasil com enfoque no potencial de geração de energia. **Revista Brasileira de Energia**. 25, p. 111-130. 2019. DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i2.477>

RAHMAT, N.; SABALI, M.A.; SANDU, A.V.; SAHIRON, N.; SANDU, I.G. Study of calcination temperature and concentration of NaOH effect on crystallinity of silica from sugarcane bagasse ash (SCBA), **Rev. Chim.** 67, p. 1872–1875. 2016.

RAMBABU, P.V.; GUPTA, K.D.; RAMARAO, G.V. Effect of sulphates (Na₂So₄) On concrete with sugarcane bagasse ash as a pozzolana **Int. J. Eng. Appl. Sci. (IJEAS)**, pp. 21-25. 2016.

RAMBABU, P.V.; GUPTA, K.D.; RAMARAO, G.V. Effect of sulphates (Na₂So₄) On concrete with sugarcane bagasse ash as a pozzolana, **Int. J. Eng. Appl. Sci. (IJEAS)** 3 (1), pp. 21–25. 2016.

RAMESH, K.V.; GOUTHAM, R.; KISHOR, S. An experimental study on partial replacement of bagasse ash in basalt concrete mix. **Int. J. Civil Eng. Technol.**, pp. 335-341. 2017.

REDDY, G.N.K.; VARDHAN, G.H.; REDDY, S.V.B. **Partial replacement of cement in concrete with sugarcane bagasse ash and its behaviour in aggressive environments.** IOSR J. Mech. Civil Eng., IOSR-JMCE, pp. 29-35. 2016.

RODRIGUES, R. G. **Diversidade microbiana cultivável em processo industrial de produção de etanol.** 2017. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologias Química e Biológica - Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2017.

SANTOS, M. L.; LIMA, O. J.; NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J.; CALEFI, P. S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, Franca, v. 34, n. 3, p.507-501, 2011.<https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000300024>

SATA, V.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Influência da pozolana de vários materiais subprodutos nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. **Constr. Construir. Mater.**, 21, pp. 1589–1598. 2007.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira - SP.** 2000. 206 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Construções Rurais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

SIDDIQUE, R. Utilization of wood ash in concrete, **Resour. Conserv. Recycl.** 67, pp. 27–33. 2012.

SMAHMUD, ISLAM, M.I., RUBIEYAT, B.A.; ISLAM, M.M.; HASAN, M.M. Investigação sobre a trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto usando cinza de bagaço de usina de açúcar **Notícias. World Scientific** , 96, pp. 191 – 201. 2018.

SOUZA, L.M.S.; FAIRBAIRN, E.M.R.; TOLEDO FILHO, R.D.; CORDEIRO, G.C. Influence of initial CaO/SiO₂ ratio on the hydration of rice husk ash-Ca(OH)₂ and sugar cane bagasse ash-Ca(OH)₂ pastes, **Química Nova** 37 (10) (2014) 1600–1605.

TEIXEIRA, R.; SOUZA, A.E.; SANTOS, G.T.A.; PENA, A.F.V. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar como potencial substituto do quartzo em cerâmica vermelha. **Ceramic Society**, 91, p. 1883 – 1887. 2008.

TEJA, K.V.; PURNACHANDRA, P.S.; MEENA, T. Investigation on the behaviour of ternary blended concrete with scba and sf, **Mater. Sci. Eng.** 263. 2007.

VENKATESH, KR, R. RANI, R., THAMILSELVI, M., & RAJAHARIHARASUDHAN, R. Estudo Experimental de Substituição Parcial de Cimento por Cinza Sugaecana de

Bagaço de Concreto. **International Journal of Advance Engineering and Research Development**, 05 (04), pp. 778-785. 2018.

VIEIRA, C.M.F.; BORLINI, M.C.; MONTEIRO, S.N. Incorporação de cinzas de bagaço de cana em tijolos de argila. **Ind. Ceramic** 26, p. 107-113, 2006.

VOTORANTIM. **Norma comentada**: ABNT 16697 – cimento Portland – Requisitos. 2021. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/nbr-16697/>> Acesso em: 21 jul. 2021

WANG, Y.; SHAO, Y.; MIODRAG, D.M.; WHALEN, J.K. Recycling combustion ash for sustainable cement production: A critical review with data-mining and time-series predictive models, **Construction and Building Materials**, 123, p. 673-689, 2016. ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.031>