

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS APUCARANA**

JÚLIA HELENA CARDAMONE LOMBARDI

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR
CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**APUCARANA
2019**

JÚLIA HELENA CARDAMONE LOMBARDI

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR
CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Monografia apresentada como parte dos requisitos necessários para aprovação no componente curricular Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador(a): Prof^(a). Ms. Sarah Honorato Lopes da Silva

Coorientador(a): Prof^(a). Dra. Silvia Paula Sossai Altoé

APUCARANA
2019



Ministério da Educação
**Universidade Tecnológica Federal do
Paraná**
Câmpus Apucarana
COECI – Coordenação do Curso Superior de
Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por cinza do bagaço da cana-de-açúcar

por

Júlia Helena Cardamone Lombardi

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado aos 25 dias do mês de Novembro do ano de 2019, às 15 horas e 30 minutos, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Curso Superior em Engenharia Civil da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A candidata foi arguida pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho aprovado.

Sarah Honorato Lopes da Silva – ORIENTADORA

Mariana Alher Fernandes – EXAMINADORA

Adriana Macedo Patriota Faganello – EXAMINADORA

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

À minha família pelo constante apoio e incentivo
ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora, Prof. Sarah Honorato Lopes da Silva e a minha coorientadora Prof. Silvia Paula Sossai Altoé pelo aprendizado, dedicação e paciência, e também a Prof. Silvia por ter me apresentado a cinza.

A todos os professores da graduação que não mediram esforços para nos ensinar.

Aos meus pais, Maria Helena e Júlio, à minha madrasta Luciane, ao meu padrasto Neto, e aos meus irmãos Guilherme, Eduarda e Isadora que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

A minha avó Lia e a minha avó Auzenir que partiu no meio desta caminhada, mas que com certeza estaria orgulhosa.

Ao meu namorado Rubens pelo companheirismo e incentivo.

Aos meus amigos de turma pelas alegrias e tristezas que passamos juntos.

As minhas parceiras de pesquisa Beatriz e Brenda pelo apoio e companheirismo nos laboratórios e dúvidas frequentes.

A todos que de alguma forma acreditaram e torceram por mim.

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.

Marthin Luther King

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a substituição parcial do agregado miúdo por cinza do bagaço da cana-de-açúcar em argamassas, dando uma destinação viável ao resíduo e reduzindo o consumo de recursos naturais. A pesquisa foi realizada substituindo agregado miúdo por cinza do bagaço da cana-de-açúcar em proporções de 0%, 15%, 20%, 25% e 30% analisando resistência à compressão, absorção de água por imersão e módulo de elasticidade. Os resultados obtidos de resistência à compressão, absorção de água e módulo de elasticidade apontam que nenhum traço ultrapassou a argamassa referência, entretanto obtiveram valores próximos, na qual o traço T15 (15%) alcançou uma resistência de 13,47 MPa e o traço T30 (30%) um módulo de elasticidade de 18,16 MPa. O mesmo ocorreu para a absorção de água por imersão, na qual os valores de absorção das argamassas com cinza do bagaço da cana-de-açúcar estiveram próximos da argamassa referência.

Palavras-chave: Argamassa. Substituição do agregado miúdo. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

ABSTRACT

This work has as objective evaluate the partial replacement of the fine aggregate for sugarcane bagasse ash in mortars, which gives a viable destination for wastes and reducing the consumption of natural resources. The research was realized replacing the fine aggregate for sugarcane bagasse ash on proportions of 0%, 15%, 20%, 25% and 30% evaluating mechanical resistance, water absorption and module of elasticity. The results of mechanical resistance, water absorption and module of elasticity show that no trace exceeded the mortar reference, however they obtained closer values, which trace T15 (15%) reach a resistance of 13,47 MPa and the trace T30 (30%) a module of elasticity of 18,16 MPa. The same happen for the water absorption, which values of absorption in the mortars with sugarcane bagasse ash have been more closer to reference.

Keywords: Mortar. Fine aggregate replacement. Sugarcane bagasse ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Áreas de plantações e usinas de açúcar e álcool	18
Figura 2.2	Esquema do processo de produção de açúcar e álcool	19
Figura 2.3	Bagaço da cana-de-açúcar e diferentes cinzas	20
Figura 3.1	Agregado miúdo	27
Figura 3.2	Curva granulométrica da areia	27
Figura 3.3	Usina Usaçúcar	28
Figura 3.4	Curva granulométrica da cinza	29
Figura 3.5	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	32
Figura 3.6	Ensaio de mini espalhamento	33
Figura 3.7	Corpo de prova	34
Figura 3.8	Materiais para mistura	35
Figura 3.9	Corpo de prova de argamassa	36
Figura 3.10	Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão	37
Figura 3.11	Ensaio de absorção	38
Figura 3.12	Instrumento ultrassônico utilizado no ensaio de módulo de elasticidade	39
Figura 3.13	Ensaio de módulo de elasticidade	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Produção de cana-de-açúcar safra 2019/2010	17
Tabela 3.1	Características do cimento CP II F	25
Tabela 3.2	Análise química do cimento CP II F	26
Tabela 3.3	Massa unitária e específica da areia	28
Tabela 3.4	Coeficiente de uniformidade e curvatura da cinza	30
Tabela 3.5	Massa específica e teor de umidade da cinza	30
Tabela 3.6	Concentração de ânions no extrato lixiviado	31
Tabela 3.7	Concentração de ânions no extrato solubilizado	31
Tabela 3.8	Teor de substituição e dosagem	34
Tabela 4.1	Resultados do ensaio de mini espalhamento	40
Tabela 4.2	Resistência à compressão	40
Tabela 4.3	Água/Massa seca	41
Tabela 4.4	Absorção por imersão	42
Tabela 4.5	Módulo de elasticidade	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1	Correlação Resistência à compressão x Água/massa seca	41
Gráfico 4.2	Correlação Absorção de água x Água/massa seca	42

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
$Ca(OH_2)$	Hidróxido de cálcio
CBC	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
CC	Coefficiente de Curvatura
cm ²	Centímetros quadrado
cm ³	Centímetros cúbicos
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CO ₂	Gás Carbônico
CP	Cimento Portland
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
g	Gramas
ha	Hectare
kg	Quilograma
l	Litros
mg	Miligramas
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Nd	Não determinado
NM	Normalização Nacional
ton	Tonelada
U	Coefficiente de Uniformidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVAS	14
1.1.1	Tecnológicas	14
1.1.2	Econômica e Ambiental	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	CANA DE AÇÚCAR	16
2.2.1	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	17
2.2	APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	20
2.3.1	Uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na construção civil	21
2.3	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	23
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	25
3.1	MATERIAIS	25
3.1.1	Aglomerante	25
3.1.2	Agregado miúdo	26
3.1.3	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	28
3.1.4	Água	32
3.2	MÉTODOS	32
3.2.1	Ajuste da pasta	32
3.2.2	Dosagem e moldagem dos corpos de prova	33
3.2.3	Resistência à compressão	36
3.3.4	Absorção de água por imersão	37
3.3.5	Módulo de elasticidade	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5	CONCLUSÃO	44
6	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico e populacional impulsiona cada vez mais o desenvolvimento de tecnologias para atender o mercado com alto poder de consumo. Para atender esse consumo é necessária mais matéria prima, levando em consideração que todo processo produtivo gera resíduos, conseqüentemente, a produção deste aumenta.

Uma solução para minimizar os danos causados ao meio ambiente e garantir a continuidade da produção seria a utilização de materiais alternativos e a substituição dos recursos naturais. A construção civil é um dos setores mais promissores para a utilização destes resíduos como fonte de matéria prima para a produção de argamassas, concretos, entre outros (ALTOÉ, 2017).

Segundo o professor Vahan Agopyan da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (AUN, 2012), a construção civil é uma das maiores economias que impactam o meio ambiente e uma das principais geradoras de resíduos. Este setor consome entre 40% e 75% dos recursos naturais além de utilizar energia em todas as fases da construção e contribuir para a poluição ambiental.

Vários estudos mostram que a utilização de resíduos na construção civil é viável sendo que um dos resíduos mais promissores é a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Na produção de açúcar e álcool é gerado o bagaço da cana-de-açúcar que, a partir da sua queima, a indústria produz energia e gera um resíduo, denominado como cinza do bagaço da cana-de-açúcar (BERENGUER et al. 2017).

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar pode ser utilizada como adição mineral, porém, é extremamente necessário realizar um estudo sobre sua composição para que sua aplicação seja realizada de acordo com sua composição química e mineralógica (ALTOÉ, 2017). Segundo Bahurudeen et al. (2015), as cinzas predominantemente amorfas apresentam maior reatividade. Já para Sales e Lima (2010), as cinzas predominantemente cristalinas apresentam maior eficiência quando aplicadas como material inerte.

Segundo Pita (2009), o descarte indiscriminado da cinza do bagaço da cana-de-açúcar pode afetar negativamente os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos. Além disso, o descarte dos resíduos potencialmente recicláveis em aterros sanitários também diminui a capacidade destes a longo prazo (BESSA, 2011).

A substituição de agregado miúdo por cinza do bagaço da cana-de-açúcar possui grande relevância no que se refere a redução na destinação inadequada de resíduos, poluição

ambiental, utilização de recursos naturais e da paisagem, flora e fauna. Muitas pesquisas apresentam a viabilidade dessa substituição tanto em concretos, quanto em argamassas, sem sofrer significativas alterações em suas propriedades sendo que muitas vezes apresentam resultados melhores que os exemplares de referência.

Nesse contexto, o trabalho apresenta os métodos e resultados atingidos a partir de argamassas confeccionadas com a substituição parcial do agregado miúdo por cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

1.1 JUSTIFICATIVAS

1.1.1 Tecnológicas

Segundo CONAB (2019), a produção de cana-de-açúcar estimada para a safra 2019/2020 é de 615,98 milhões de toneladas, ocupando uma área de colheita estimada em 8,38 milhões de hectares. Levando em consideração que todo o bagaço seria utilizado como fonte de energia, segundo FIESP/CIESP (2001), para cada tonelada de cana-de-açúcar, são produzidos 260 kg de bagaço; e para cada tonelada de bagaço são gerados 23,8 kg de cinza, produzindo assim, um total de aproximadamente 3,87 milhões de toneladas de cinza.

Com a aplicação desse resíduo de origem agroindustrial na produção de argamassas, por exemplo, foi possível a investigação de novas soluções tecnológicas em relação ao seu uso como substituto do agregado miúdo. Para isso, é imprescindível a produção de conhecimento científico para o uso de novos materiais na construção civil (BESSA, 2011).

1.1.2 Econômica e Ambiental

Segundo Cordeiro (2006), aditivos minerais podem proporcionar um desempenho tecnológico diferenciado a produtos cimentícios. Em alguns casos, a utilização de aditivos minerais pode acarretar na redução dos custos de produção em função da substituição de uma parcela de clínquer, no caso de aglomerante, por materiais energeticamente menos nobres como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

De acordo com Altoé (2012), a cinza do bagaço da cana-de-açúcar possui decomposição lenta e ocupa grandes volumes em aterros, ou ainda é lançada inadequadamente no ambiente. A disposição inadequada da cinza pode contaminar o solo, o ar, a água e trazer sérios riscos à saúde da população.

O setor da construção civil demanda muita quantidade de recursos naturais não renováveis que, junto com a grande produção de cimento Portland incidem alto teor de gases do efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global. O uso de aditivos minerais pode reduzir impactos ambientais, como a menor emissão de gás carbônico e gases intensificadores do efeito estufa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como substituição parcial do agregado miúdo para formulação de argamassas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar a influência da substituição parcial do agregado miúdo na resistência à compressão das argamassas, na absorção de água por imersão das argamassas e no módulo de elasticidade das argamassas;
- Determinar os melhores teores de substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O presente capítulo aborda dados contidos na literatura sobre a produção da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, o aproveitamento deste resíduo na construção civil e as principais propriedades das argamassas.

2.1 CANA DE AÇÚCAR

Criado em 14 de novembro de 1975, o Programa Nacional do Álcool ou Proálcool teve como objetivo estimular a produção de álcool, visando atender as necessidades do mercado interno e externo. De acordo com o programa, a produção do álcool oriundo da cana-de-açúcar ou qualquer outro insumo deveria ser incentivada com a oferta de matérias-primas, ou seja, aumento da produção agrícola (BIODIESEL, 2012).

A cana-de-açúcar tem o maior retorno em relação a outras culturas para os agricultores por hectare plantado. O custo de produção do açúcar é inferior a US\$ 200/tonelada, o que pode colocar o país no mercado internacional. Caso a produção do açúcar se torne menos atrativa devido ao preço internacional torna-se vantajoso a mudança para a produção de álcool (BIODIESEL, 2012).

Com esse incentivo, o Brasil passou a ser o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo com uma produção estimada para a safra 2019/2020 de 615,98 milhões de toneladas, ocupando uma área de colheita estimada em 8,38 milhões de hectares, sendo 35,33 milhões de hectares localizados na região sul, conforme mostra os dados da Tabela 2.1. A produção de etanol deverá atingir 30,3 bilhões de litros para o ano de 2019 (CONAB, 2019).

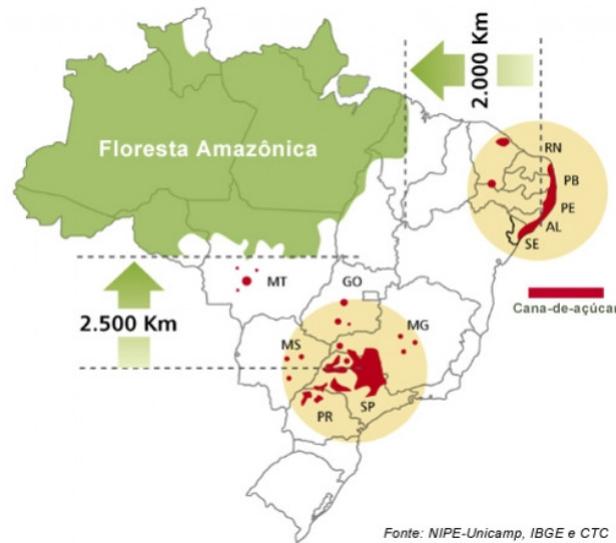
Tabela 2.1 – Produção de cana-de-açúcar safra 2019/2020

Região	Área (mil ha)	Produção (mil ton)
Norte	47,0	3.481,07
Nordeste	797,3	45.765,5
Centro-oeste	1.835,2	139.014,1
Sudeste	5.163,4	392.384,9
Sul	539,3	35.333,3
Brasil	8.382,2	615.978,9

Fonte: Conab (2019)

A produção de cana-de-açúcar concentra-se nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil, sendo a região Sudeste a maior produtora de cana-de-açúcar do país e o estado de São Paulo, seu maior produtor. A Figura 2.1 mostra em vermelho as áreas onde se concentram as plantações e usinas produtoras de açúcar e álcool (ÚNICA, 2019).

Figura 2.1 – Áreas de plantações e usinas de açúcar e álcool



Fonte: Única (2019)

A cana-de-açúcar é de origem da ilha de Nova Guiné no Oceano Pacífico e foi trazida ao Brasil por volta do século VI pelo colonizador português Martin Afonso de Souza. Em 1532 o cultivo de cana-de-açúcar foi introduzido ao Brasil. Na cidade de São Vicente, localizada no estado de São Paulo, foi construído o primeiro engenho de cana-de-açúcar e originada a primeira atividade econômica organizada no país (ÚNICA, 2012).

A cana-de-açúcar é uma cultura típica de climas tropicais e subtropicais e se adapta a diferentes tipos de solo, além de possuir uma grande eficiência no processo de fotossíntese, por utilizar entre 2% e 3% da radiação solar em biomassa (LORA et al., 2001 *apud* CORDEIRO, 2006, p. 39).

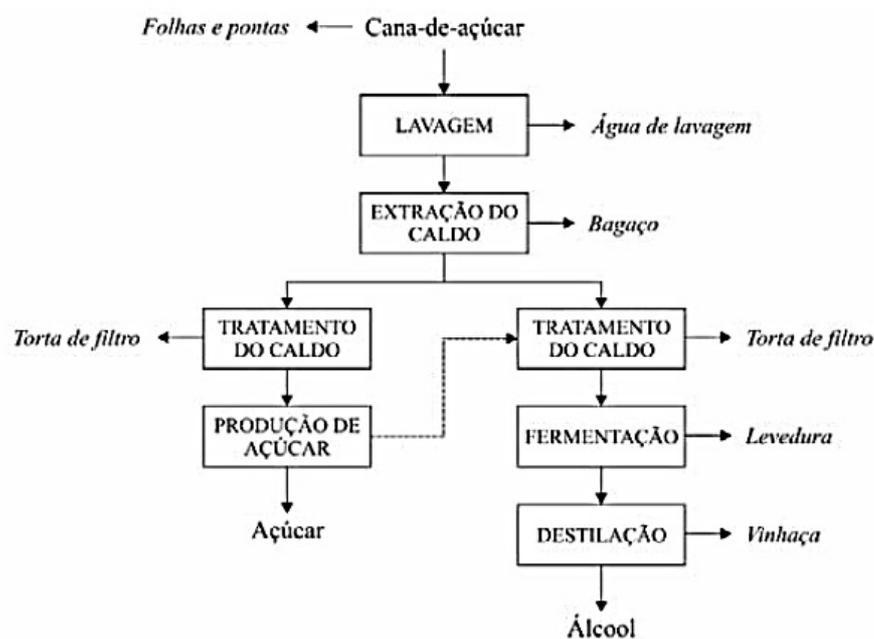
2.2.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A produção de açúcar e álcool através da cana-de-açúcar segue algumas etapas como colheita, carregamento, transporte, pesagem, valorização da cana pela qualidade, descarregamento e lavagem. A colheita da cana-de-açúcar pode ser manual, na qual há

queima da cana para aumentar a eficiência do processo ou mecanizada, sem queima prévia (SILVA E SILVA, 2012).

Segundo Cordeiro (2006), a fabricação do álcool e do açúcar diferem-se a partir da extração do caldo da cana. O caldo é obtido a partir da moagem, podendo ser tratado para produzir açúcar ou ser fermentado para a produção de álcool. As etapas da produção de açúcar e álcool podem ser observadas na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Esquema do processo de produção de açúcar e álcool



Fonte: Cordeiro (2006)

Dos principais subprodutos gerados, como folhas e pontas, água de lavagem, bagaço, torta de filtro, levedura e vinhaça, o mais atrativo é o bagaço, principalmente devido aos grandes montantes de cana-de-açúcar processados. Além disso, um destaque desse resíduo é a geração de energia elétrica através da queima do bagaço, na qual o vapor produzido nas caldeiras aciona turbinas que transformam energia mecânica em energia elétrica, ou seja, co-geração (CORDEIRO, 2006).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2005), a produção de uma tonelada de cana-de-açúcar processada requer em média 12kWh de energia elétrica, podendo esta ser gerada pela queima do bagaço. A co-geração possibilita a auto-suficiência do setor em termos de energia elétrica.

A co-geração com bagaço de cana-de-açúcar libera gás carbônico, porém, o balanço nas emissões desse gás é praticamente nulo, pois, através da fotossíntese, a biomassa queimada é reposta no ciclo seguinte das culturas da cana-de-açúcar. Ao se considerar o ciclo de vida da biomassa e a queima do etanol, verifica-se a emissão de gás carbônico, entretanto este valor é significativamente menor que outras fontes de combustíveis fósseis (CORDEIRO, 2006).

Segundo Cordeiro (2006), a constituição química do bagaço depende do tipo de cana-de-açúcar cultivada, tipos de fertilizantes e herbicidas, além de fatores naturais como o clima, o solo e a água. Geralmente observa-se carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e cinza.

Estas características são influenciadas pelas condições de queima do bagaço além da geração de cinzas de diferentes colorações (CORDEIRO, 2006). A cor indica o grau de calcinação, que conseqüentemente indica seu teor de carbono. A Figura 2.3 apresenta cinzas de diferentes colorações. A cinza preta é proveniente de combustão incompleta e os tons de vermelho a branco foram queimados com maior temperatura.

Figura 2.3 – Bagaço da cana-de-açúcar e diferentes cinzas



Fonte: Cordeiro (2006)

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar ainda apresenta grande quantidade de dióxido de silício, normalmente 60% em massa. O silício é absorvido do solo pelas raízes na forma de ácido monossílico e com a saída de água das plantas, deposita-se na parede externa das células como sílica gel (BARBOZA FILHO E PRABHU, 2002 *apud* CORDEIRO, 2006, p. 49).

De acordo com Akasaki et al. (2010), a composição química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresenta dióxido de silício em diferentes concentrações. Porém, as diferenças mais relevantes na cinza são em relação à forma como a sílica pode ser encontrada, na forma cristalina ou amorfa.

Segundo Altoé (2017), as características mineralógicas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar dependem da temperatura de queima do bagaço, já que este fator determina o surgimento de fases amorfas ou cristalina da sílica. Quanto maior a temperatura de queima, maior será a cristalização da sílica, e para temperaturas mais amenas encontram-se fases mais amorfas (CORDEIRO, 2006).

Segundo Campos (2014), o descarte imediato da cinza do bagaço da cana-de-açúcar nas lavouras é vantajoso pois dispensa a necessidade de custos com armazenamento, já que o descarte dos resíduos potencialmente recicláveis em aterros sanitários diminui a capacidade destes em longo prazo (BESSA, 2011).

Porém, a disposição indiscriminada da cinza do bagaço da cana-de-açúcar pode afetar negativamente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, assim como pode provocar lixiviação, ou até mesmo a contaminação dos cursos d'água (PITA, 2009).

Segundo FIESP/CIESP (2001), para cada tonelada de cana-de-açúcar, são produzidos 260 kg de bagaço; e para cada tonelada de bagaço são gerados 23,8 kg de cinza. Considerando que todo o bagaço seria utilizado como fonte de energia e a produção de cana-de-açúcar segundo CONAB (2019), estimada para a safra 2019/2020 de 615,98 milhões de toneladas, aproximadamente 3,87 milhões de toneladas de cinza seriam produzidos.

De acordo com a ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos/2004, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar é classificada como um resíduo Classe II A, resíduos não perigosos e não inertes, podendo ser utilizado em matrizes cimentícias.

2.2 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A fim de minimizar os danos causados ao meio ambiente e garantir a continuidade da produção, a utilização de materiais alternativos e a substituição dos recursos naturais é uma opção para a reciclagem de resíduos. A construção civil é um dos setores mais promissores para a utilização destes resíduos como fonte de matéria prima (ALTOÉ, 2017).

De acordo com John (2000), a cadeia produtiva da construção civil apresenta muitas vantagens que a habilitam a ser uma grande recicladora. Além de que reduzir o significativo impacto ambiental através da reciclagem é interessante, porque o setor é um dos principais geradores de resíduos.

Segundo Bessa (2011), além da geração de resíduos, os processos de produção de materiais utilizados na construção civil, consomem grandes quantidades de energia e são responsáveis pela geração de grandes quantidades de CO_2 e partículas de poeira.

A construção civil é, por sua própria natureza, o segmento que apresenta maior capacidade de absorver novas tecnologias (JOHN, 2000), pois pode absorver vários tipos de resíduos, como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, a cinza da casca do arroz, resíduos de construção civil, entre outros.

Um dos maiores setores consumidores de materiais silicosos é o setor da construção civil, sendo que a sílica é a espécie atômica mais comum do planeta (JOHN, 2000). Desta maneira, muitos resíduos de processos térmicos, metalúrgicos e de tratamento ambiental possuem sílica.

A indústria da construção civil utiliza como um dos principais componentes os agregados. Estes, na maioria das vezes são granulados, sendo possível produzir diferentes materiais granulares com técnicas simples como a pelotização ou mesmo trituração (JOHN, 2000).

Mesmo com todas estas vantagens, há muitos empecilhos no aproveitamento de resíduos na construção civil. Segundo John (2000), é necessário a superação dos limitadores legais, regulamentares e de educação, porém dependem da existência de políticas de longo prazo. Outra limitação é a dificuldade de introdução de novas tecnologias no setor da construção civil. A causa econômica também pode ser um problema, pois há competição frente aos produtos tradicionais.

O setor industrial desenvolveu a simbiose industrial, na qual uma indústria utiliza o resíduo da outra como matéria prima. Mesmo o setor da construção civil ser a maior recicladora da economia, ainda possui enorme potencial (JOHN, 2000).

2.3.1 Uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na construção civil

Pesquisas realizadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar demonstraram que a substituição destas em argamassas e concretos pode trazer vantagens como a redução de resíduos destinados inadequadamente no meio ambiente e a preservação dos recursos naturais não renováveis. Segundo Bessa (2011), a cinza do bagaço da cana-de-açúcar descartada em locais inapropriados causa sérios problemas ligados a saúde pública e ao meio ambiente. Além de que o descarte dos resíduos potencialmente recicláveis em aterros sanitários diminui a capacidade destes em longo prazo.

Cordeiro (2006) investigou a viabilidade de utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto utilizando teores de substituição de cimento Portland por 10%, 15%, 20% e 40%. A cinza ultrafina promoveu

benefícios reológicos ao concreto, redução de absorção capilar de água e penetração iônica até um teor de 20% de substituição de cimento.

Macedo (2009) estudou a viabilidade da utilização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar como adição mineral em argamassas com a substituição de agregado miúdo em 3%, 5%, 8% e 10%. Analisou as propriedades mecânicas através da resistência a compressão e à tração, compressão diametral e módulo de elasticidade e outras propriedades como a durabilidade, retração por secagem, absorção por capilaridade e reatividade acelerada. Recomendou o teor de substituição de até 5%, pois o decréscimo do módulo de elasticidade em relação ao traço referência corresponde a 10%.

Nunes (2009) estudou a substituição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar por cimento em concretos nos teores de 3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20%. Analisou-se o teor de umidade, matéria orgânica, e carbono orgânico, composição granulométrica, massa específica, superfície específica, difração de raios-x e atividade pozolânica. Os resultados mostraram que a substituição de até 13% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar teve um considerável ganho de resistência.

Bessa (2011) analisou a possibilidade da utilização de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em concretos e argamassas substituindo agregado miúdo nos teores de 10%, 20%, 30%, 50% e 100% em argamassas. Após as análises mecânicas, escolheu-se os teores de 30% e 50% para a substituição de CBC em concretos, avaliando a dosagem, ensaios mecânicos e durabilidade, além de estudos econômicos e ambientais. Os resultados apresentaram que os concretos produzidos com CBC obtiveram melhores resultados mecânicos. Os resultados de durabilidade não afetaram a vida útil dos artefatos de concreto e o valor final do m³ não diminuiu significativamente.

Altoé (2012) estudou a potencialidade da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e dos resíduos de pneus inservíveis em substituição parcial de agregado miúdo em pavers. Avaliou a resistência à compressão, absorção de água, resistência à abrasão e micrografia eletrônica de varredura. Os resultados apresentaram uma melhora nas características analisadas com o resíduo CBC, já os resíduos de pneu não apresentaram resultados que justifiquem sua substituição, porém somado a CBC, os pavers obtiveram resultados satisfatórios.

Martins Filho (2015) investigou a potencialidade de utilização de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do agregado miúdo e do aglomerante em pavers. Analisou a resistência à compressão, abrasão, absorção de água e micrografia eletrônica de

varredura. Os resultados apresentaram a potencialidade da utilização da CBC como substituto tanto da areia natural quanto do cimento Portland.

Castro e Martins (2016) analisaram o efeito da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em argamassas mistas substituindo agregado miúdo nos teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Selecionou-se um traço a fim de substituir 7,5% de cimento por cinza leve do bagaço da cana-de-açúcar. Foram realizados ensaios de resistência a tração na flexão e compressão axial, módulo de elasticidade longitudinal e flexional. A análise dos resultados mostrou que as cinzas podem ser adicionadas às argamassas sem que haja significativas alterações em suas propriedades.

2.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

Argamassas são materiais de construção civil com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água podendo conter aditivos e adições minerais. Sua finalidade é regular a superfície, proteger a edificação contra intemperismo, servir como isolamento térmico e acústico, ser estanque a água e resistir ao desgaste superficial (CARASEK, 2010).

Atualmente o aglomerante utilizado nas argamassas é o cimento, um aglomerante hidráulico, assim chamado por possuir propriedades aglomerantes desenvolvidas pela reação de seus componentes com a água. Este material é utilizado devido a sua contribuição nas propriedades da argamassa, principalmente na resistência mecânica, retenção de água e plasticidade (SILVA et al., 2016).

As argamassas devem apresentar capacidade de absorver pequenas deformações, se deformar sem ruptura ou por microfissuras sem que comprometa sua aderência, estanqueidade e durabilidade (CARASEK, 2010).

Para que as argamassas possam cumprir suas funções, elas precisam atender um conjunto de propriedades relativas as argamassas nos estados fresco e endurecido. As principais propriedades do estado fresco resultam nas propriedades do estado endurecido. As propriedades do estado fresco são: massa específica e teor de ar, trabalhabilidade, retenção de água, aderência inicial e retração na secagem. Já as propriedades do estado endurecido são: aderência, capacidade de absorver deformações, resistência mecânica, resistência ao desgaste e durabilidade (SABBATINE, 1998).

Uma importante propriedade na aplicação da argamassa é a trabalhabilidade, que corresponde a facilidade com que as argamassas são misturadas, transportadas e aplicadas, na

qual a plasticidade e a consistência podem ser consideradas uma das principais propriedades capazes de expressar essa trabalhabilidade (SILVA et al., 2016).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

Para a produção das argamassas foram utilizados cimento, agregado miúdo, cinza do bagaço da cana-de-açúcar e água.

3.1.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado na pesquisa é o Cimento Portland CP II-F 32. Contém alto teor de Clínquer altamente reativo, grau de finura adequado e é indicado para argamassas de revestimento.

As características e análise química obtidas do fabricante estão apresentadas respectivamente na Tabela 3.1 e 3.2, assim como a comparação da norma NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos /2018.

Tabela 3.1 – Características do Cimento CP II F

Item de controle	Unidade	Dados do fabricante	NBR 16697/2018
Resistência 1 dia	MPa	15	-
Resistência 3 dias	MPa	26	≥10
Resistência 7 dias	MPa	30	≥20
Resistência 28 dias	MPa	37	≥32
Blaine	cm ² /g	3671	≥2600
Início de pega	Min	265	≥60
Fim de pega	Min	324	≤600

Fonte: Supremo (2019)

Tabela 3.2 – Análise Química do Cimento CP II F

Item de controle	Unidade	Dados do fabricante	NBR 16697/2018
Perda ao fogo	%	10,7	≤12,5
Resíduo Insolúvel	%	3,6	≤7,5
Óxido de Silício	%	16,1	-
Óxido de Alumínio	%	3,9	-
Óxido de Ferro	%	2,6	-
Óxido de Cálcio	%	58,4	-
Óxido de Magnésio	%	5,8	-
Sulfatos	%	2,8	≤4,5
Óxido de Potássio	%	0,95	-
Óxido de Sódio	%	0,22	-
Cloretos	%	0,0	-
Anidrido Carbônico	%	9,3	≤11,5
Cal Livre	%	0,6	-

Fonte: Supremo (2019)

3.1.2 Agregado miúdo

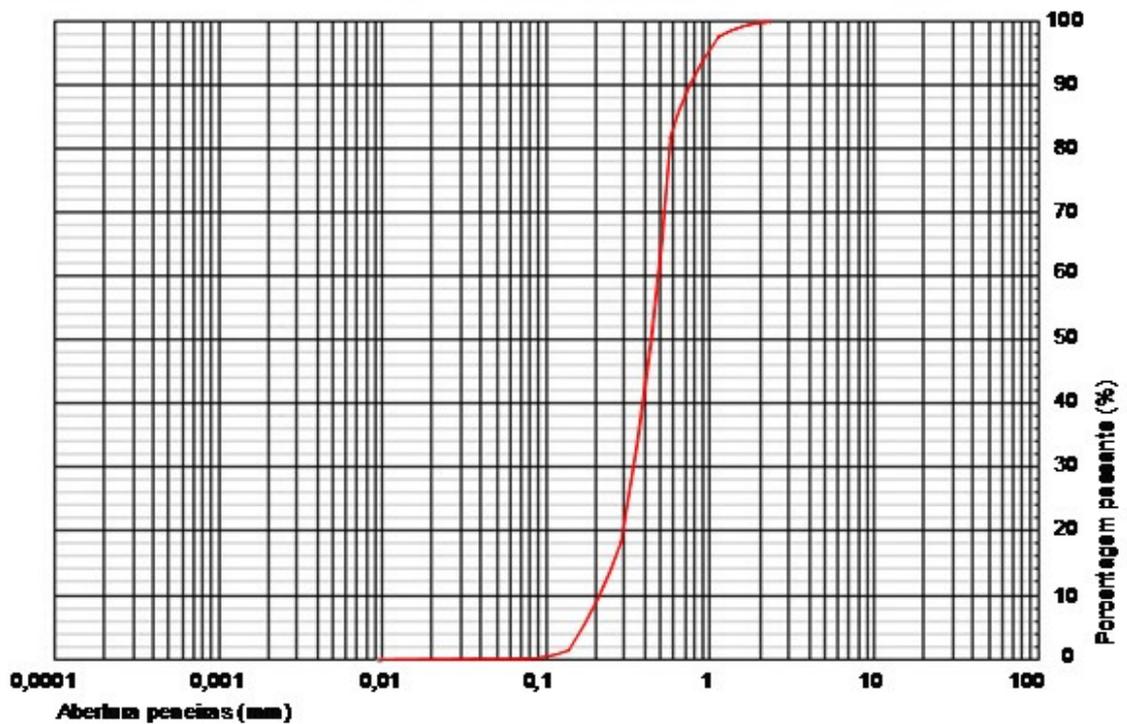
O agregado miúdo utilizado na pesquisa é a areia média, adquirida na cidade de Apucarana. Para uma caracterização inicial, o material é originário do quartzo. Foram realizados ensaios de granulometria, massa unitária e massa específica conforme ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica/2003, ABNT NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios/2006 e ABNT NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica aparente, da massa específica aparente e da absorção de água/2017, respectivamente. Na Figura 3.1 pode-se observar seu aspecto, enquanto que na Figura 3.2 está representada sua curva granulométrica.

Figura 3.1 – Agregado miúdo



Fonte: Autora (2019)

Figura 3.2 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Autora (2019)

Os resultados de caracterização do agregado miúdo: determinação de massa unitária e massa específica dos sólidos estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Massa unitária e específica da areia

Item	Valor
Massa unitária (g/cm ³)	1,39
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,64

Fonte: Autora (2019)

3.1.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar utilizada na pesquisa foi coletada na Usina Santa Terezinha (Usaçúcar), no distrito de Iguatemi, próximo a Maringá, que pode ser observada na Figura 3.3. A Usina produz diariamente, aproximadamente, 1.000 toneladas de açúcar e 180.000 litros de álcool, chegando a moer por dia 9.000 toneladas de cana-de-açúcar (ALTOÉ, 2017).

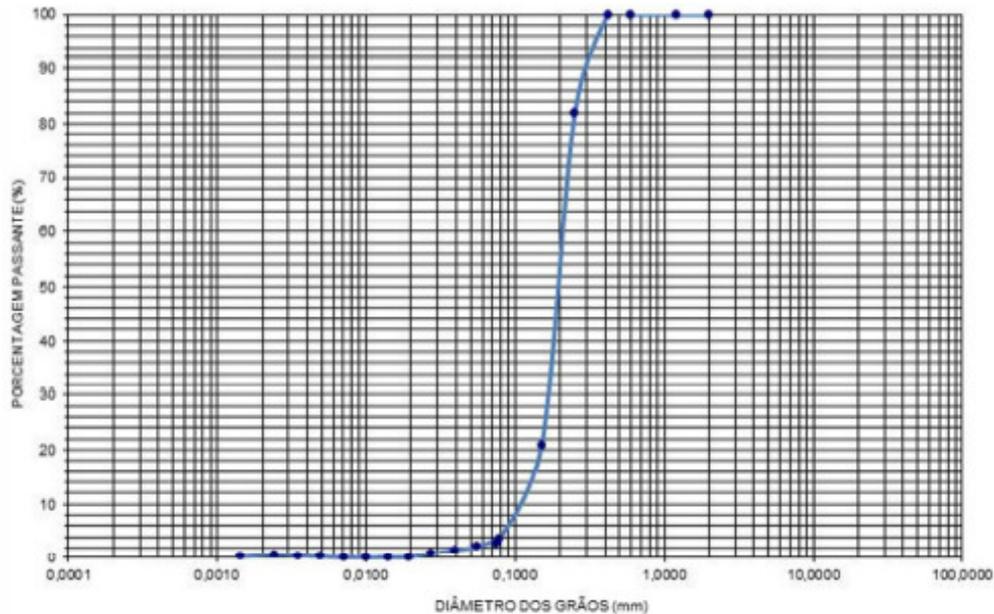
Figura 3.3 – Usina Usaçúcar

Fonte: Usaçúcar (2019)

Os resultados dos ensaios de caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar utilizada no trabalho foram retirados da pesquisa realizada por Altoé (2017) por se tratar da mesma amostra analisada.

A determinação da granulometria da cinza foi realizada por meio de peneiramento e sedimentação, conforme ABNT NBR 7181: Solo - Análise granulométrica/1984, ensaio realizado antes da atualização da norma, cuja curva granulométrica está representada na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Curva granulométrica da cinza



Fonte: Altoé (2017)

Com os resultados do ensaio, é possível determinar o grau de uniformidade conforme NBR 6502: Rochas e Solo/1995 e o coeficiente de uniformidade dado pela Equação 3.1.

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1)$$

em que:

D60 = diâmetro de partículas correspondente aos 60% mais finos da curva granulométrica;

D10 = diâmetro de partículas correspondentes aos 10% mais finos da curva granulométrica.

Já o coeficiente de curvatura é dado pela Equação 3.2 a seguir:

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} * D_{60})} \quad (3.2)$$

em que:

D30 = diâmetro de partículas correspondente aos 30% mais finos da curva granulométrica.

Os valores do coeficiente de uniformidade e curvatura da cinza do bagaço da cana-de-açúcar estão apresentados na Tabela 3.4 a seguir.

Tabela 3.4 – Diâmetros e Coeficientes da cinza

Item	Valor
D60 (mm)	0,20
D30 (mm)	0,13
D10 (mm)	0,09
U (-)	2,22
CC (-)	0,94

Fonte: Altoé (2017)

A massa específica dos sólidos foi determinada pela NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica/1984, na qual a densidade real dos grãos é definida pela equação 3.3 a seguir:

$$Y_s = \frac{\left(\frac{P_1}{1+w}\right)}{\left(\frac{P_1}{1+w}\right) + P_2 + P_3} \quad (3.3)$$

em que:

- Y_s = massa específica dos sólidos;
- P₁ = massa da amostra úmida;
- w = umidade da amostra;
- P₂ = massa do picnômetro + amostra + água;
- P₃ = massa do picnômetro + água.

Os resultados de massa específica e teor de umidade estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Massa específica e teor de umidade da cinza

Item	Valor
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,70
Teor de umidade (%)	0,13

Fonte: Altoé (2017)

O ensaio de atividade pozolânica seguiu o Método de Chapelle Modificado conforme NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado/2010. A amostra analisada apresentou um índice de atividade pozolânica de 137 mg de Ca(OH₂)/g de amostra, que segundo a norma NBR 15895/2010 não é indicativo de material pozolânico, já que para ser considerado material pozolânico este índice deveria ser maior ou igual a 750 mg de Ca(OH₂)/g (ALTOÉ, 2017).

Os ensaios de lixiviação e solubilização cujo objetivo é separar certas substâncias contidas nos materiais por meio de lavagem ou percolação com solventes, determinando a estabilidade química dos resíduos foram realizados de acordo com as NBR 10005:

Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos/2004 e NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos/2004 respectivamente (ALTOÉ, 2017). Os teores de íons determinados nos extratos lixiviado e solubilizado estão apresentados nas Tabelas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.6 – Concentração de ânions no extrato lixiviado

Parâmetros	Limite máximo ABNT NBR 10004/2004 (mg/l)	Concentração (mg/l)
Arsênio	1,00	0,00000
Bário	70,00	0,00000
Cádmio	0,50	0,00405
Chumbo	1,00	0,09840
Cromo	5,00	0,13980
Mercúrio	0,10	0,00060
Fluoreto	150,00	Nd
Prata	5,00	0,00900
Selênio	1,00	0,00000

Fonte: Altoé (2017)

Tabela 3.7 – Concentração de ânions no extrato solubilizado

Parâmetros	Limite máximo ABNT NBR 10004/2004 (mg/l)	Concentração (mg/l)
Alumínio	0,20	2,00500
Arsênio	0,01	0,00000
Bário	0,70	0,00000
Cádmio	0,006	0,00750
Chumbo	0,01	0,14590
Cloreto	250,00	Nd
Cobre	2,00	0,05000
Cromo	0,05	Nd
Ferro	0,30	0,04899
Fluoreto	1,50	Nd
Manganês	0,10	0,0250
Mercúrio	0,001	Nd
Nitrato	10,00	Nd
Prata	0,05	0,0087
Selênio	0,01	Nd
Sódio	200,00	33,33000
Sulfato	250,00	Nd
Zinco	5,00	Nd

Fonte: Altoé (2017)

Os resultados do ensaio do extrato lixiviado mantiveram-se dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR 10004/2004, o que pode classificar a cinza como um resíduo não perigoso. Já os resultados dos metais alumínio, cádmio e chumbo do ensaio do extrato solubilizado, mantiveram-se acima dos parâmetros estabelecidos pela NBR 10004/2004, incluindo a cinza na classe dos não inertes. Assim, conforme NBR 10004/2004 a cinza do bagaço de cana-de-açúcar analisada pode ser classificada como Resíduo Não Perigoso – Classe II A – Não Inerte (ALTOÉ, 2017).

O aspecto da cinza pode ser observado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Autora (2019)

3.1.4 Água

A água utilizada na pesquisa foi proveniente da rede de abastecimento da cidade de Apucarana, operado pela Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR.

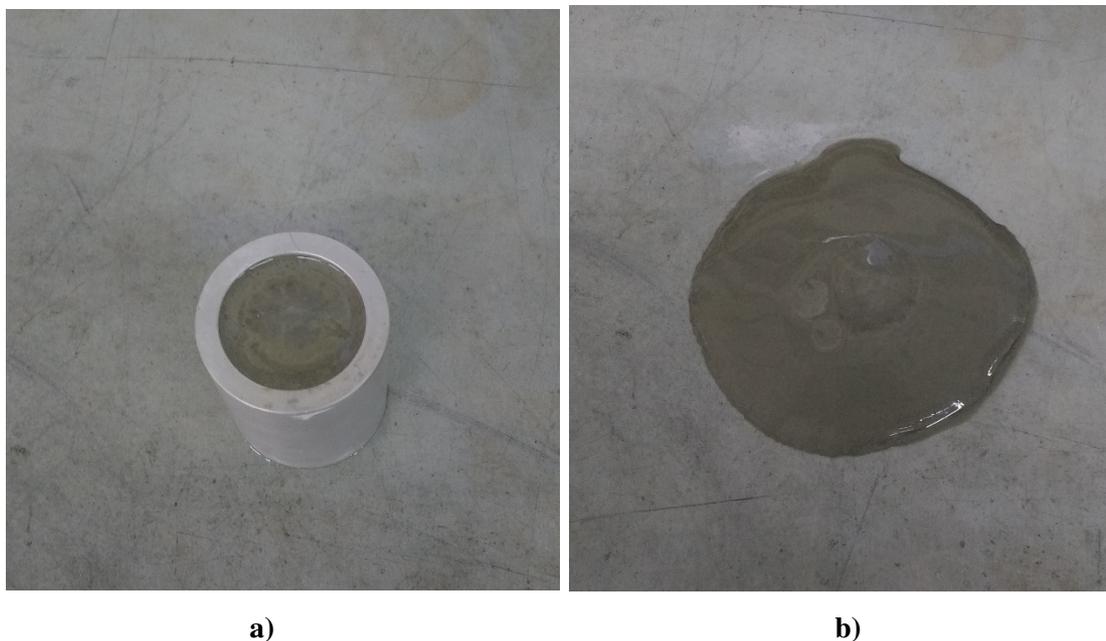
3.2 MÉTODOS

3.2.1 Ajuste da pasta

Para o ajuste da pasta foi realizado o ensaio de mini espalhamento, conforme Silva (2016). Neste ensaio, verificou-se o diâmetro de espalhamento do material para avaliar a fluidez. Foi preenchido o cilindro (30 mm de diâmetro e 50 mm de altura) com a mistura de

cimento, cinza e água, em uma superfície lisa, como é mostrado na Figura 3.5a. Ao retirar o cilindro, observa-se que a mistura espalha e forma um círculo (Figura 3.6b). Com um paquímetro, mede-se o diâmetro de espalhamento para as misturas com todos os teores de substituição: 0%, 15%, 20%, 25% e 30%. A partir disso, verifica-se a perda de consistência da pasta encontrando a relação com o teor de cinza adicionada à pasta e verificando se é necessário alterar a proporção de água nas misturas para manter a mesma consistência do traço de referência (sem adição de cinza).

Figura 3.6 – Ensaio de mini espalhamento



Fonte: Autora (2019)

O ensaio foi novamente realizado, porém com a quantidade a mais de água para cada teor de cinza e foram medidos os diâmetros, cujos resultados foram próximos ao da pasta referência.

3.2.2 Dosagem e moldagem dos corpos de prova

Tendo definida a quantidade de água para cada formulação de argamassa a partir do ensaio de mini espalhamento, foram definidos os teores de substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar que estão apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Teor de substituição

Traço	CBC (%)
T0	0
T10	10
T15	15
T20	20
T25	25
T30	30

Fonte: Autora (2019)

Os corpos de prova de argamassa referência foram executados de acordo com o traço 1:3 (cimento: areia) em massa, traço incomum para argamassas, porém necessário para avaliar o efeito da cinza na resistência à compressão, com fator água cimento 0,55. Porém, para a viabilidade do estudo, foi adicionada água na proporção em que foi adicionado cinza, pois com a relação *a/c* de 0,55 a argamassa aparenta estar muito seca.

As argamassas foram moldadas no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em nove corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm para cada traço. A Figura 3.7 mostra o corpo de prova utilizado.

Figura 3.7 – Corpo de prova

Fonte: Autora (2019)

A moldagem dos corpos de prova seguiu os procedimentos da NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão/1996, norma que remete a NBR 13279: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão/1995, que devido a disponibilidade de fôrmas do laboratório, foram utilizados moldes cilíndricos conforme era previsto na NBR 13279/1995, já que esta indicava que a moldagem seguisse as recomendações da NBR 7215/1996. Primeiramente, os materiais foram pesados, atendendo a quantidade calculada para cada traço de argamassa (Figura 3.8). Os preparos da mistura das argamassas foram realizados manualmente em uma carriola com o auxílio de uma colher de pedreiro. Os corpos de prova receberam uma camada de desmoldante a base de óleo mineral para que a argamassa não grudasse nas laterais do corpo de prova.

Figura 3.8 – Materiais para mistura



Fonte: Autora (2019)

O adensamento manual dos corpos de prova foi realizado em duas camadas de argamassa aplicando doze golpes em cada camada com uso de um soquete metálico. Após o adensamento, foi realizado o arrasamento dos corpos de prova com a colher de pedreiro.

As argamassas foram desmoldadas três dias após a moldagem, levadas para a cura em tanque úmido de acordo com a NBR 7215/1996 com o intuito de não perder água, permanecendo 28 dias na cura. O corpo de corpo de argamassa pode ser observado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Corpo de prova de argamassa



Fonte: Autora (2019)

3.2.3 Resistência à compressão

Com a finalidade de determinar a resistência característica dos corpos de prova foram realizados os ensaios de compressão conforme NBR 7215/1996. Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada teor de substituição, para o rompimento aos 28 dias.

Para a execução do ensaio, os corpos de prova estavam limpos e posicionados na região central da prensa de ruptura universal localizada no Laboratório de Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como mostra a Figura 3.10.

Figura 3.10 – Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autora (2019)

3.3.4 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão em que a água tende a ocupar os poros permeáveis da argamassa seguiu conforme a NBR 9778/2005. Foram utilizados três corpos de prova para cada teor de substituição, que permaneceram na cura até os 28 dias quando foram pesados para determinar o valor da massa saturada e inseridos em estufa para a secagem. Foram retirados da estufa após 24 horas para o resfriamento e posteriormente pesados para assim determinar o valor da massa seca.

Os corpos de prova inseridos na estufa foram pesados duas vezes ao dia até que os valores da massa seca se estabilizassem. Os corpos de prova na cura podem ser observado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Ensaio de absorção



Fonte: Autora (2019)

3.3.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade proporciona a medida de rigidez de um material. Foram utilizados três corpos de prova após a cura e os procedimentos de ensaio foram feitos de acordo com a norma ABNT NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de

paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica/2008.

O ensaio foi realizado com o instrumento ultrassônico (Figura 3.12), na qual é possível estimar a profundidade de fissuras e outras imperfeições e determinar o módulo de elasticidade por meio de ondas longitudinais e/ou transversais. Na figura 3.13 pode-se observar a realização do ensaio.

Figura 3.12 – Instrumento ultrassônico utilizado no ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Autora (2019)

Figura 3.13 – Ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Autora (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como explicado anteriormente, o ajuste da formulação constituiu no ajuste da quantidade de água para as formulações com substituição do agregado miúdo. Isto pois, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar possui a granulometria de uma areia fina, portanto maior área específica de grãos, que conseqüentemente requer maiores quantidades de água para obter uma boa molhagem da mistura sem comprometer a consistência da argamassa produzida.

Os resultados do ensaio de mini espalhamento com a média dos diâmetros e a porcentagem de água necessária para que as pastas com cinza do bagaço da cana-de-açúcar tivessem a mesma abertura que a pasta referência estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de mini espalhamento

Traço	Média dos diâmetros (mm)	Porcentagem de água a ser adicionada (%)
T0	100,46	-
T15	87,01	13
T20	86,28	14
T25	79,02	21,3
T30	70,36	29,9

Fonte: Autora (2019)

Os resultados da porcentagem de água a ser adicionada às pastas com cinza são muito próximos aos teores de substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar utilizados na pesquisa cujos teores de substituição são: 15%, 20%, 25% e 30%. Assim, a mesma porcentagem de cinza adicionada nas argamassas reduz a mesma porcentagem de consistência.

Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mostram que as argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentam resistências menores que a argamassa referência. O traço T15 alcançou o melhor resultado com 13,47 MPa, 16,9% a menos que a argamassa referência e o traço T25 apresentou o menor resultado com 12,66 MPa. Pode-se observar ainda que os traços T15 e T20 e os traços T25 e T30 obtiveram resultados próximos entre si.

Tabela 4.2 – Resistência à compressão

Traço	Resistência média (MPa)
T0	16,21
T15	13,47
T20	13,10
T25	12,66
T30	12,76

Fonte: Autora (2019)

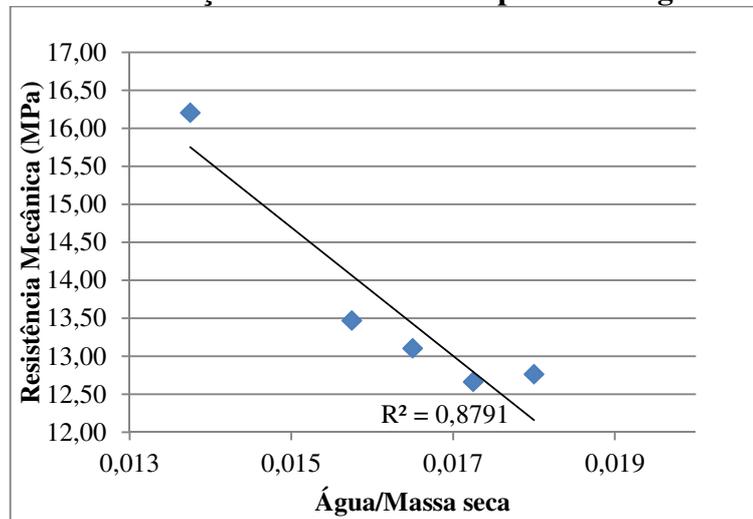
Para uma mesma formulação de argamassa em que a única variável seria a substituição de agregado miúdo, a resistência poderia aumentar devido ao empacotamento de partículas, conforme identificado por Cordeiro et al. (2008). A explicação é que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar preenche os vazios da argamassa por possuir uma granulometria menor que a areia média, apresentando bons resultados de resistência à compressão.

Estão apresentados na Tabela 4.3 a quantidade de água sobre a massa seca (cimento, areia e cinza) da mistura e no Gráfico 4.1 a correlação entre a quantidade de água e a resistência.

Tabela 4.3 – Água/Massa seca

Traço	a/ms
T0	0,013
T15	0,016
T20	0,017
T25	0,017
T30	0,018

Fonte: Autora (2019)

Gráfico 4.1 – Correlação Resistência à compressão x Água/massa seca

Fonte: Autora (2019)

Este gráfico comprova que a quantidade de água colocada reduz a resistência, pois a partir dos dados verifica-se uma correlação de aproximadamente 88%, conforme valor do R^2 . Isso pode ser explicado, pois apenas uma parte da água adicionada na mistura é utilizada na hidratação do cimento, o restante resulta em água livre gerando poros na microestrutura da argamassa e reduzindo a resistência à compressão (NEVILLE, 1997).

Os resultados dos ensaios de absorção por imersão aos 28 dias estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Absorção por imersão

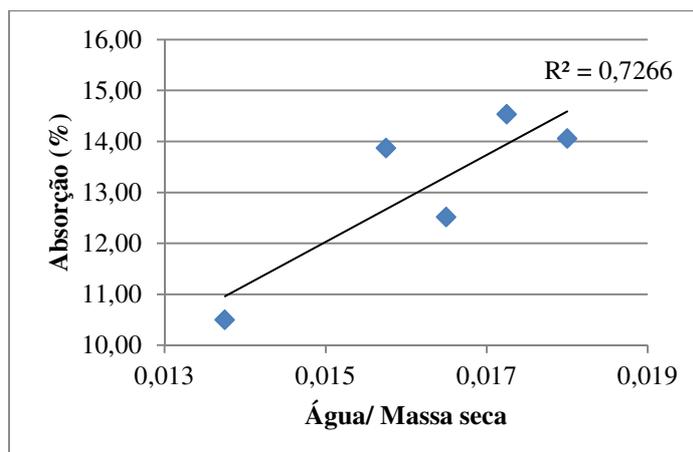
Traço	Absorção de água média (%)
T0	10,50
T15	13,87
T20	12,52
T25	14,53
T30	14,06

Fonte: Autora (2019)

A maior porcentagem de absorção de água por imersão ocorre nas argamassas com cinza do bagaço da cana-de-açúcar, já que a quantidade adicionada a mais de água aumentou a quantidade de poros na mistura e conseqüentemente a permeabilidade, pois é uma propriedade que depende da estrutura de poros. Assim uma estrutura de vazios mais densa representa uma maior permeabilidade.

O excesso de água adicionada para proporcionar boa trabalhabilidade na argamassa pode ter sido evaporado superficialmente causando aumento na porosidade e conseqüentemente na permeabilidade e resistência (SABBATINI, 1998).

No Gráfico 4.2 está apresentado a correlação entre a absorção de água e a água/massa seca. Este gráfico comprova que a quantidade de água inserida aumenta a absorção de água, pois a partir dos dados verifica-se uma correlação de aproximadamente 73%, conforme valor do R^2 .

Gráfico 4.2 – Correlação Absorção de água x Água/massa seca

Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 4.5 estão apresentados os resultados do ensaio de módulo de elasticidade.

Tabela 4.5 – Módulo de elasticidade

Traço	Módulo de Elasticidade (MPa)
T0	18,30
T15	17,10
T20	15,35
T25	17,10
T30	18,16

Fonte: Autora (2019)

A partir desses resultados percebe-se que as argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentam módulos de elasticidade menores que a argamassa referência. O traço T30 obteve 18,16 MPa, o segundo melhor desempenho, apenas 0,77% menor que a argamassa referência e o traço T20, obteve o menor resultado com 15,35 MPa. Observa-se ainda que os traços T15 e T25 obtiveram o mesmo resultado de módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade possui relação direta com a porosidade e por consequência com a resistência à compressão e absorção de água. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior sua resistência à compressão, porém menor absorção e porosidade. Pesquisas realizadas mostram que os resultados de módulo de elasticidade diminuem com a adição de resíduos, verificando uma maior porosidade, o que pode ser provocado pela influência da composição do agregado e seu formato.

Assim como a resistência mecânica diminuiu com o aumento da relação água cimento, o módulo de elasticidade também (NUNES E FIGUEIREDO, 2006), além de que inserir cinza pode aumentar o teor de ar na mistura fazendo com que haja redução do módulo de elasticidade.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que:

- A substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em argamassas obteve resultados relevantes no que se refere a resistência à compressão, absorção de água por imersão e módulo de elasticidade.
- A resistência à compressão das argamassas com cinza do bagaço da cana-de-açúcar não apresentou resultados significativos, pois devido a adição de água para obter uma boa trabalhabilidade reduziu a resistência.
- A absorção de água por imersão das argamassas também não apresentou resultados significativos pelo mesmo motivo de que a adição de água nas argamassas aumentou o número de poros e a permeabilidade, que consequentemente aumentou a absorção.
- O módulo de elasticidade das argamassas com cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentou resultados coerentes com os de resistência à compressão. A argamassa cujo módulo de elasticidade apresentou o melhor desempenho, após a referência, também obteve um bom resultado de resistência à compressão.
- Deve-se levar em conta que os resultados apresentados têm como referência os materiais utilizados na pesquisa, como a areia e a cinza, as técnicas utilizadas e as condições do local.
- Para trabalhos futuros, sugere-se continuar com as proporções de substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e água, porém trocar o traço utilizado para o traço padrão de argamassas. Outra sugestão seria a utilização de aditivos ao invés de aumentar a quantidade de água, o que faria com que as argamassas tivessem uma melhor trabalhabilidade e resultados melhores já que a água foi um fator determinante para os resultados.
- Assim, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar não melhorou as propriedades das argamassas, porém contribuiu para a redução do uso de matéria prima, dos resíduos gerados e da liberação de gás carbônico.

6 REFERÊNCIAS

AUN (São Paulo). **Construção Civil é o ramo que mais consome materiais no mundo, afirma professor da Poli**. 2012. Disponível em: <<http://www.usp.br/aun/antigo/exibir?id=4848&ed=853&f=2>>. Acesso em: 26 maio 2019.

AKASAKI, J. L. *et al.* Revisão bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 51, 2009. Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2010. INBRACON: CD-ROM.

ALTOÉ, S. P. S. **Estudo da potencialidade da utilização de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e resíduos de pneus inservíveis na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2012. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

ALTOÉ, S. P. S. **Resíduos de pneus e da queima do bagaço da cana-de-açúcar na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (pavers)**. 2017. 174 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005. Atlas de energia elétrica do Brasil, 2 ed. Brasília: ANEEL. 243 páginas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502: Rochas e Solo**. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984

_____ **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

_____ **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

_____ **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

_____ **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

_____ **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____ **NBR NM 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2017.

_____ **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

_____ **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

BAHURUDEEN, A. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 77–88, 2015.

BERENGUER, R.A. et al. (2018), “**A influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento na resistência à compressão de argamassa**”, Revista ALCONPAT, 8(1), pp. 30-37, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8il.187>

BESSA, S. A. L. **Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**. 2011, 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

BIODIESEL. **PróAlcool-Programa Brasileiro de Alcool**. 2012. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol>>. Acesso em: 22 maio 2019.

CAMPOS, L. P. **Aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar nos atributos químicos e biológicos do solo**. 2014, 109f. Tese (Doutorado em Agronomia (produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Jaboticabal, 2014.

CARASEK, H. Argamassas. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-941.

CASTRO, T. R. de; MARTINS, C. H. **Avaliação da adição de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas mistas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 137-151, jul./set. 2016. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300097>

CONAB-COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de Cana-de-açúcar 2019/20 – Segundo levantamento.** 2019. Disponível em https://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_06_09_16_49_15_boletim_graos_junho__2016_-_final.pdf. Acesso em: 10 Mai. 2019.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** 2006, 485f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E.M.R. **Uso de cinzas ultrafinas de bagaço de cana de açúcar como aditivo mineral para concreto.** ACI Materials Journal, v. 105, n. 5, p. 487-493, 2008.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO/CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar).** São Paulo: FIESP/CIESP. 90 páginas. 2001.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000, 113f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** 2009, 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MARTINS FILHO, S. T. **Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na confecção de blocos de concreto para pavimentação.** 2015, 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Tradução de Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

NUNES, I. H. S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para uso na construção.** 2009, 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração do Concreto de Cimento Portland.** Boletim Técnico. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006. 59 p.

PITA, P. V. V. **Valorização agrícola de cinza da co-combustão de bagaço de cana-de-açúcar e biomassa lenhosa.** 2009, 120f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

SABBATINI, F. H. et al. **Recomendações para a Execução de Revestimentos de Argamassa para Paredes de Vedação Internas Exteriores e Teto.** São Paulo, 1998. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/17209141-Recomendacoes-para-a-execucao-de>

revestimentos-de-argamassa-para-paredes-de-vedacao-internas-e-exteriores-e-tetos.html>Acesso: 23/10/2019.

SALES, A; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, Vol. 30, p. 1114–1122, 2010.

SILVA, J. P. N.; SILVA, M. R. N. **Noções da cultura da cana-de-açúcar**. Inhumas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2012.

SILVA, S. H. L. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. 2016, 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SILVA, C. et al. **Avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas de revestimento cimentícias produzidas com aditivos químicos plastificantes**. In: CBECIMAT - Congresso Brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, 22., 2016, Natal, RN.

SUPREMO. **Laudo Técnico – Cimento CP II F 32**. Adrianópolis, 2019.

UNICA. **Indústria Brasileira de cana-de-açúcar: uma trajetória de evolução**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linha-do-tempo/>>. Acesso em: 22 maio 2019.

ÚNICA. **União da Indústria de Cana-de-Açúcar**, 2012. Histórico do setor-Linha do tempo. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linhadotempo>> Acesso: 05/06/2019.

USAÇÚCAR. **Usina Santa Terezinha**. Disponível em: <<https://www.usacucar.com.br/>>. Acesso em: 23/04/ 2019.