

**CENTRO UNIVERSITÁRIO
ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO PRESIDENTE PRUDENTE**

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CINZAS DE BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
COMO CARGA NA MATRIZ DE ARGILA NO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO
VISANDO UM NOVO PRODUTO PARA O RAMO CONSTRUTIVO**

Carlos de Macedo Correia Barga

Presidente Prudente/SP
2018

**CENTRO UNIVERSITÁRIO
ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO PRESIDENTE PRUDENTE**

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CINZAS DE BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
COMO CARGA NA MATRIZ DE ARGILA NO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO
VISANDO UM NOVO PRODUTO PARA O RAMO CONSTRUTIVO**

Carlos de Macedo Correia Barga

Trabalho de Curso apresentado como requisito parcial de Conclusão do Curso para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Dr. Elton Aparecido Prado dos Reis.

Presidente Prudente/SP
2018

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CINZAS DE BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
COMO CARGA NA MATRIZ DE ARGILA NO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO
VISANDO UM NOVO PRODUTO PARA O RAMO CONSTRUTIVO**

Trabalho de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Elton Aparecido Prado dos Reis

Prof. Dr. Bruno do Vale Silva

Prof. Dr. Silvio Rainho Teixeira

Presidente Prudente, 22 de Novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me deu saúde e forças para superar todos os momentos difíceis.

Aos meus pais Roberto e Josilda e minha irmã Roberta por todo o incentivo durante os anos de faculdade. A minha sobrinha Mariah, por alegrar nossas vidas diariamente. A minha namorada Mirella pela compreensão, incentivo e apoio em todos os fins de semana dedicado aos estudos.

Ao meu orientador Elton, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos. Também gostaria de deixar um agradecimento especial ao grupo de iniciação científica, que me enriqueceu de conhecimento através dos encontros semanais ao longo de dois anos.

Ao professor Silvio Rainho Teixeira (DFQB – FCT/Unesp) por ceder seus laboratórios e equipamentos para realização de análises.

Ao mestrando Luís, que me ajudou nas principais etapas de laboratório no DFQB – FCT/Unesp.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Neste trabalho foi estudada a influência da adição de cinzas de bagaço da cana-de-açúcar na matriz de argila durante o processo de sinterização. O material argiloso utilizado é proveniente de várzeas, e foram fornecidos pela Olaria Gimenes, do município de Indiana-SP. As cinzas foram coletadas após a queima do bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras da usina sucroalcooleira Alto alegre – Unidade Santo Inácio-PR. Foram confeccionados corpos de prova em triplicata com diferentes concentrações de cinza (0, 10, 20 e 30%) em massa do material argiloso e sinterizados nas temperaturas de 900, 1000 e 1100°C, usando um forno tipo mufla com controle de temperatura. O material argiloso e a cinza foram caracterizados utilizando a Difratomia de Raios X e Análise Térmica. Foram realizados ensaios físicos e mecânicos de Retração Linear de queima (RL_q), Perda de Massa ao Fogo (PF), Módulo de Ruptura à Flexão (MRF), Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) dos corpos de prova. A difratometria de raios X mostrou que a cinza é composta basicamente de material amorfo com picos de quartzo cristalino e na argila foram encontrados argilominerais como caulinita, quartzo, illita/mica e gibsita, através de picos bem definidos que caracterizam as estruturas cristalinas e também a argila montmorilonita com estrutura mal cristalizada. As análises térmicas mostraram as temperaturas que ocorrem as variações de massa e os picos endotérmicos e exotérmicos que indicam a perda de hidróxidos, transformações (inversão do quartzo) e formação de fase (mulita). Os ensaios físicos e mecânicos mostraram que o resíduo incorporado na argila agravaram as propriedades físicas e mecânicas do material argiloso, embora auxiliaram na melhora de outros atributos. Os resultados mostram que a cinza poderá ser incorporado em massa cerâmica forte (com muita argila) em substituição à argila fraca (material menos plástico), para obtenção da massa cerâmica adequada a cada tipo de produto.

Palavras-chave: Argila; Cinza; Cana-de-açúcar; Sinterização.

ABSTRACT

In this work the influence of the addition of sugarcane bagasse ash on the clay matrix during the sintering process was studied. The clayey material used comes from floodplains, and was supplied by Olaria Gimenes, of the municipality of Indiana-SP. The ashes were collected after the burning of sugarcane bagasse in boilers of the Alto Alegre sugar mill - Santo Inácio-PR Unit. Triplicate specimens were prepared with different concentrations of ash (0, 10, 20 and 30%) by weight of the clayey material and sintered at temperatures of 900, 1000 and 1100 ° C, using a muffle-type oven with temperature control. The clay and ash materials were characterized using X-ray diffraction and thermal analysis. Physical and mechanical tests of Linear Burning Retreat (RLq), Fire Mass Loss (PF), Flexural Breaking Modulus (MRF), Water Absorption (AA), Apparent Porosity (PA) and Apparent Specific Mass (MEA) of the specimens. X-ray diffraction showed that ash is composed basically of amorphous material with crystalline quartz peaks and clay were found as clay, quartz, illite / mica and gibbsite, through well defined peaks that characterize the crystalline structures and also the montmorillonite clay with poorly crystallized structure. The thermal analyzes showed the temperatures that occur the variations of mass and the exothermic and endothermic peaks that indicate the loss of hydroxides, transformations (quartz inversion) and phase formation (mullite). The physical and mechanical tests showed that the residue incorporated in the clay aggravated the physical and mechanical properties of the clayey material, although they helped to improve other attributes. The results show that the ash can be incorporated in a strong clay mass (with a lot of clay) instead of weak clay (material less plastic), to obtain the suitable ceramic mass for each type of product.

Keywords: Clay; Ash; Sugar cane; Sintering.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CBC – Cinza do bagaço da cana

CP's – Corpos de prova

DRX – Difração de Raios X

DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial

TGA – Análise Termogravimétrica

RL_q – Retração linear de queima

PF – Perda de massa ao fogo

MRF – Módulo de ruptura à flexão

MEA – Massa específica aparente

AA – Absorção de água

PA – Porosidade aparente

C_s – Comprimento após secagem (cm)

C_q – Comprimento após sinterização/queima (cm)

m_s – Massa do corpo de prova após secagem em estufa (g)

m_q – Massa do corpo de prova após a sinterização/queima (g)

m_u – Massa úmida (g)

m_i – Massa imersa (g)

V_{ap} – Volume aparente (cm³)

σ – Desvio padrão

μm – Micrômetro (unidade de medida)

°C – Temperatura em Celsius

θ – Medida de um ângulo

CaO – Óxido de Cálcio

K₂O – Óxido de Potássio

Fe₂O₃ – Óxido de ferro III

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

SiO₂ – Dióxido de Silício (Sílica)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	Queima do bagaço da cana-de-açúcar produzindo as cinzas	.....17
FIGURA 2 -	Extração de argila em uma jazida	.....21
FIGURA 3 -	Diagrama granulométrico de Winkler	.....23
FIGURA 4 -	Fluxograma do procedimento experimental que será utilizado para produção e análise dos corpos de prova	.....26
FIGURA 5 -	Quebra de torrões manualmente em partículas menores	.....28
FIGURA 6 -	(A) Prensa hidráulica manual SCHULZ (B) Matriz uniaxial para conformação de corpos de prova em triplicata	.....30
FIGURA 7 -	Corpos de prova após conformação em prensa hidráulica: sem resíduo; (b) 10% de cinza; (c) 20 % de cinza; (d) 30% de cinza	.....30
FIGURA 8 -	Ponto de apoio dos corpos de prova e cutelo de ruptura do flexômetro	.....33
FIGURA 9 -	Corpos de prova rompidos e saturados por 24 horas com água em ebulição	.....34
FIGURA 10 -	Processo de obtenção da massa imersa (m_i) dos corpos de prova através de uma adequação de balança hidrostática	.....35
FIGURA 11 -	Difratograma de raios X do material argiloso	.....37
FIGURA 12 -	Difratograma de raios X do resíduo de CBC	.....38
FIGURA 13 -	Termograma de TG e DGT da argila	.....39
FIGURA 14 -	Calorimetria exploratória diferencial (DSC) do material argiloso	.....40
FIGURA 15 -	Termograma de TG e DGT da cinza de bagaço de cana	.....41
FIGURA 16 -	Calorimetria exploratória diferencial (DSC) da cinza de bagaço da cana	.....42
FIGURA 17 -	(a) Retração Linear de Queima (RL_q) em função da temperatura (b) Retração Linear de Queima (RL_q) em função do teor de cinza incorporado	.....43

FIGURA 18 -	(a) Perda de massa ao fogo (PF) em função da temperatura	.....45
	(b) Perda de massa ao fogo (PF) em função do teor de cinza incorporado	
FIGURA 19 -	(a) Módulo de ruptura à flexão em função da temperatura	.....46
	(b) Módulo de ruptura à flexão em função do teor de cinza incorporado	
FIGURA 20 -	(a) Absorção de água (AA) em função da temperatura	.....49
FIGURA 21 -	(a) Porosidade aparente (PA) em função da temperatura	.....51
	(b) Porosidade aparente (PA) em função do teor de cinza incorporado	
FIGURA 22 -	(a) Massa específica aparente (MEA) em função da temperatura	.....53
	(b) Massa específica aparente (MEA) em função do teor de cinza incorporado	

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Composição química do resíduo de CBC	.....18
TABELA 2 -	Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha	.....24
TABELA 3 -	Proporção de incorporação de CBC em massa de argila	.....29
TABELA 4 -	Resultados experimentais: retração linear de queima (RL_q) e desvio padrão (σ) para as diferentes temperatura para diferentes temperaturas de queima	.....43
TABELA 5 -	Resultados experimentais: Perda de massa ao fogo (PF) e desvio padrão (σ) para diferentes temperaturas de queima	.....44
TABELA 6 -	Resultados experimentais: módulo de ruptura à flexão (MRF) e desvio padrão (σ) dos corpos de prova para diferentes temperaturas de queima	.....46
TABELA 7 -	Resultados experimentais: absorção de água (AA) e desvio padrão (σ) dos corpos de prova para diferentes temperaturas de queima	.....48
TABELA 8 -	Resultados experimentais: porosidade aparente (PA) e desvio padrão (σ) dos corpos de prova para diferentes temperaturas de queima	.....50
TABELA 9 -	Resultados experimentais: Massa específica aparente (MEA) e desvio padrão (σ) dos corpos de prova para diferentes temperaturas de queima	.....52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Agronegócio: A cana-de-Açúcar.....	14
2.1.1 Bioeletrecidade: Cogeração de energia.....	15
2.1.2 Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)	16
2.2 Mineração: Argila Sedimentar.....	19
2.2.1 Propriedades e características.....	21
2.2.2 Estruturas cerâmicas.....	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Material.....	27
3.2 Métodos.....	27
3.2.1 Preparo de Corpos de Prova (CP's)	27
3.2.2 Difração de raios X (DRX)	31
3.2.3 Análise térmica.....	31
3.2.4 Retração linear de queima (RL _q)	32
3.2.5 Perda de massa ao fogo (PF)	32
3.2.6 Módulo de ruptura à flexão (MRF)	33
3.2.7 Massa específica aparente (MEA)	34
3.2.8 Absorção de água (AA)	36
3.2.9 Porosidade aparente (PA)	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Difração de Raios X (DRX)	37
4.2 Análise Térmica.....	39
4.3 Retração Linear de Queima (RL _q)	42
4.4 Perda de Massa ao Fogo (PF)	44
4.5 Módulo de ruptura à flexão (MRF)	46
4.6 Absorções de água (AA)	48
4.7 Porosidade aparente (PA)	50
4.8 Massa específica aparente (MEA)	52
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Uma das questões mais discutidas atualmente em âmbito social e ambiental é a grande geração de resíduos industriais e a extração desenfreada de minerais para fabricação de materiais, em especial na construção civil. Assim, buscar maneiras de reutilizar estes resíduos e diminuir a extração de matérias-primas por serem bens esgotáveis, não renováveis, e tendem a escassez à medida que se desenvolve a sua exploração, torna-se indispensável para o desenvolvimento sustentável (SILVA, 2007, p. 1).

Estima-se que o setor da indústria da construção civil consome cerca de 40% dos recursos naturais, 40% da energia e 40% das emissões poluentes. Os preceitos de construção sustentável baseiam-se em um sistema econômico de baixo carbono (baixa emissão de poluentes), preservação e redução de resíduos pelo desenvolvimento de tecnologias limpas, no uso de materiais recicláveis ou renováveis e no uso de resíduos como materiais secundários (MOTTA, 2009, p. 89).

Atendendo o apelo ambiental para um maior controle de materiais poluentes, o Brasil lançou em 1999, o Programa Brasileiro de Reciclagem com o objetivo de incentivar o desenvolvimento de técnicas de reciclagem para a produção de materiais de qualidade. Desta forma, um número crescente de trabalhos sobre a incorporação de resíduos sólidos em massas cerâmicas tem sido publicado em eventos como o Congresso Brasileiro de Cerâmica – CBC e o Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais - CBRCIMAT (TEIXEIRA, 2006, p. 12).

Pesquisadores têm procurado cada vez mais novos materiais com características pozolânicas, principalmente em rejeitos industriais, devido à escassez de minerais naturais provocado pela exploração indiscriminada de jazidas minerais (GRANDE, 2003).

A incorporação de resíduos sólidos em matérias-primas para substituição de algum componente do produto devem satisfazer três critérios: ambiental, técnico e econômico. Do ponto de vista ambiental, a geração de compósitos a partir de cargas residuais não pode ser mais poluidora que o resíduo original. Do ponto de vista técnico, o processo de incorporação e as propriedades do compósito não devem ser prejudicados além de um valor tolerável. E por fim, do

ponto de vista econômico, o custo da incorporação não pode atrapalhar a comercialização do novo produto (GODINHO et. al, 2004, p. 2).

Existe uma gama de resíduos renováveis com potencial para geração de energia a partir da queima, que podem ser utilizados na construção civil. Dentre os resíduos, destacam-se as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) por apresentarem altas porcentagens de sílica, um dos principais elementos utilizados na fabricação de artefatos da construção civil (PAULA et. al, 2006, p. 20).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, na safra 2008/2009 só o Estado de São Paulo processou 337 milhões de toneladas de cana. Cerca de 83,4 milhões de toneladas de bagaço foram usados nas caldeiras gerando um montante de 1,98 milhões de cinzas residual. Além disso, as cinzas podem acarretar na contaminação de solos próximos e águas subterrâneas, se descartadas de forma incorreta, ocasionando problemas sociais e ambientais (FIESP/CIESP, 2001; CASTRO et. al, 2016, p. 2).

A alta concentração de sílica nos resíduos de CBC faz com que este material, ao ser incorporado no material argiloso, atue como agente desplastificante e as pequenas concentrações de óxidos fundentes, podem atuar como agentes formadores e modificadores de rede de novas fases, como a mulita (SOUZA, 2008, p. 2).

A produção de peças cerâmicas envolve varias etapas, sendo o processo de tratamento térmico o processo onde ocorrem as transformações físicas e químicas que definem as propriedades finais dos materiais. Nesta etapa, em altas temperaturas de sinterização, ocorre a formação de uma das fases mais importantes, a mulita, que melhora as propriedades dos materiais cerâmicos. Estudos demonstram que a temperatura que origina a mulita pode ser reduzida através da adição de fundentes na matriz de argila, possibilitando a utilização de resíduos industriais como aditivos ou fundentes na produção de artefatos cerâmicos (SOUZA, 2008, p. 2).

Neste sentido, a utilização de resíduos agroindustriais como as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) e a diminuição da extração de argila sedimentar para fabricação de artefatos cerâmicos, fazem-se necessárias frente a grande produção dessas atividades, tornando-se interessante o desenvolvimento de materiais alternativos.

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de compósito a partir da mistura de argila sedimentar extraída das jazidas da região de Indiana - SP com diferentes proporções em massa de cinzas residuais do bagaço da cana-de-açúcar gerados no processo de queima em caldeiras da Usina Alto Alegre - Unidade Santo Inácio - PR. Para tanto, além do embasamento teórico dos trabalhos de grande impacto sobre o tema, foi realizado ensaios de caracterização das matérias-primas como a difratometria de raios X, análise térmica (análise termogravimétrica - TG e calorimetria exploratória diferencial - DSC) e ensaios físicos e mecânicos de Retração Linear de queima, Perda de Massa ao Fogo, Módulo de Ruptura a Flexão, Absorção de Água, Porosidade Aparente e Massa Específica Aparente dos compósitos produzidos, a fim de determinar a ótima proporção argila/cinza através das mudanças ocorridas nas propriedades estruturais.

Desta forma, deseja-se obter compósitos com características físico-químicas e mecânicas satisfatórias para aplicação tecnológica, em especial na construção civil. Consequentemente, direcionar uma utilização ao CBC que possui poucas aplicações industriais e reduzir a extração de argila, que é uma matéria-prima largamente utilizada na produção de materiais para a construção civil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O texto a seguir aborda o cenário no qual a pesquisa está inserida com uma revisão bibliográfica dos temas mais relevantes do trabalho como o material argiloso, usado na fabricação de produtos cerâmicos e os resíduos de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), produzidos no processo de cogeração de energia nas usinas sucroalcooleiras.

2.1 Agronegócio: A cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar apareceu primeiramente nas ilhas do Arquipélago da Polinésia, mas as primeiras notícias sobre sua existência encontram-se anotadas nas Sagradas Escrituras. As mudas de cana-de-açúcar eram levadas nas caravelas para serem plantadas em novas terras e servirem de suprimento. Foi assim que foi introduzida nas Américas, através da segunda expedição de Cristóvão Colombo em 1493, no Brasil, a cultura chegou em 1502, através de Martim Afonso de Souza (CESNIK, et. al, 2004, p. 1).

A cultura da cana-de-açúcar desenvolveu-se gradativamente no Brasil, modificando o cenário econômico nacional com elevados lucros de exportação dos produtos como açúcar e o álcool. Este último, impulsionado a partir do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), na década de 1970 (ARAÚJO, 2013, p. 10).

Ao longo da década de 1970, os preços dos combustíveis fósseis aumentaram substancialmente devido a crise do petróleo, afetando todos os países importadores do produto, principalmente aqueles em desenvolvimento como o Brasil, prejudicando a economia da época com altos índices inflacionários. O ocorrido trouxe a necessidade de se obter fontes alternativas de energia, evidenciando o surgimento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), sendo viabilizado pelo Decreto nº 76.593, tendo como principal vertente a reestruturação da economia nacional, proporcionando subsídios para o desenvolvimento de pesquisas e implantação do álcool como alternativa de combustíveis de origem vegetal, menos onerosos, em substituição aos derivados do petróleo (ARAÚJO, 2013, p. 10-14).

No mercado interno, o aumento das vendas de veículos flexíveis associado à adição de 25% de álcool anidro na gasolina, gerou uma demanda de 20 bilhões de litros de etanol em 2010. É válido ressaltar, que o uso do álcool anidro reduz em 50% a emissão de monóxido de carbono dos motores à combustão (BRASIL, 2007b, p. 20).

Dessa forma, a plantação de cana-de-açúcar ganhou volumes sem precedentes. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção de cana-de-açúcar para a safra 2017/18 é estimada em 633,26 milhões de toneladas atingindo 37,87 milhões de toneladas de açúcar e 27,76 bilhões de litros de álcool. O centro-sul é responsável por cerca de 90% da produção brasileira de cana-de-açúcar, sendo que o Estado de São Paulo contribui com 60% de toda a produção nacional. Com isso, a grande produção de cana-de-açúcar gera volumosos resíduos provenientes de sua industrialização. De cada tonelada de cana-de-açúcar moída, se extrai 700 litros de caldo de cana e 300 kg de bagaço (DANTAS, 2010; KOHLHEPP, 2010; CONAB, 2018).

No Brasil, a biomassa da cana-de-açúcar, assim como a maioria dos resíduos de biomassa obtidos nas atividades agrícolas e industriais, possuem elevados teores de materiais lignocelulósicos, fazendo com que se tornem matérias-primas capazes de produzir energia a partir da queima (DIAS, et. al, 2009).

O processo de cogeração de energia através da biomassa libera dióxido de carbono – CO₂, porém a quantidade de emissões é significativamente menor se comparada com outras fontes de energia como o petróleo. Entretanto, a utilização da cana-de-açúcar para a produção de açúcar, álcool e energia pode causar outros problemas ambientais como a geração de resíduos: a palha, a cinza da palha quando ocorre a queima para proceder a colheita manual, o bagaço e a cinza do bagaço. (FREITAS, 2005, p. 18; MACEDO, 2009, p.16).

2.1.1 Bioeletrecidade: Cogeração de energia

A cogeração de energia surgiu nos Estados Unidos e é empregado para a produção combinada de energia térmica e potência, mecânica ou elétrica, com o uso de energia liberada por uma mesma fonte primária de combustível. O sistema de cogeração é projetado para satisfazer a demanda interna, já que na

maioria dos casos, não é viável comprar esse tipo de energia de outra empresa (FIOMARI, 2004, p. 37).

No final da década de 70, os EUA demonstraram que além da utilização para produção de açúcar e álcool combustível, como estava fazendo o Brasil, devia se considerar a cana-de-açúcar como grande produtora de biomassa, aproveitando a cultura não só como uma fonte de sacarose, mas também como uma planta energética (ALEXANDER, 1985, apud OLIVEIRA, 2014, p. 15).

Atualmente, grande parte das usinas de açúcar e álcool, além de usarem o bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia térmica (vapor) em substituição à lenha, passaram a utilizar a biomassa para geração de eletricidade necessária no processo, assim, todas elas possuem autossuficiência energética, sendo que algumas vendem o excedente para as concessionárias de energia elétrica (DANTAS, 2010, p. 2).

O bagaço gerado na moagem da cana-de-açúcar é rico em polissacarídeos (açúcares complexos) como a celulose e a hemicelulose, encontrados comumente nas paredes das células vegetais e também pela lignina (biomassa lignocelulósica). Esses três materiais compõem mais de 75% da biomassa vegetal e são responsáveis pela resistência mecânica da planta. O restante é composto por proteínas, óleos minerais e vegetais (SOARES, 2012, p.18).

No Brasil, a biomassa em geral (que inclui as diversas biomassas) tem capacidade instalada de 14,7 MW, valor que supera a usina hidrelétrica de Itaipu, com 14 MW, sendo que a biomassa da cana corresponde a 77% do total. Com 9% da capacidade instalada no país, a biomassa em geral ocupa a 2ª posição na matriz elétrica, ficando atrás das hidrelétricas (107,6 MW) e à frente da fonte de gás natural (14,1 MW) e eólica (12,6 MW). A energia gerada para a rede em 2017 foi equivalente ter abastecido 13,5 milhões de residências ao longo de um ano, reduzindo a emissão de CO₂ em torno de 9,6 milhões de toneladas (ÚNICA, 2018).

2.1.2 Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)

Os resíduos de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar gerados durante a queima em caldeiras para cogeração de energia (Figura 1) são descartados sobre o solo juntamente com a palha e as tortas de filtro servindo de adubação apesar de ser um material pobre em nutrientes minerais. (MACEDO, 2009, p. 38). Para uma

estimativa da geração de resíduos, cada tonelada de bagaço que alimenta as caldeiras das usinas, gera em média 23,8 kg de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (FIESP/CIESP, 2001). Existem poucos estudos sobre a utilização de CBC nas lavouras, sendo mais comum a estocagem sem destinação final deste resíduo nos pátios das usinas sucroalcooleiras.

FIGURA 1 - Queima do bagaço da cana-de-açúcar produzindo as cinzas



Foto: Jonathan Lins/ G1

O interesse em utilizar a CBC se deve ao grande volume produzido e pela composição química e mineralógica que apresentam. Este resíduo apresenta altas porcentagens de sílica, o qual é um dos principais elementos utilizados na fabricação de artefatos da construção civil, podendo ser então utilizadas como pozolana. Uma das principais propriedades da pozolana é a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio formando compostos estáveis e de poder aglomerante (PAULA, 2006, p. 20).

Estudos realizados através do difratograma de raios X, mostram que a cinza é constituída em torno de 70% de dióxido de silício (SiO_2), em geral na forma amorfa e por frações cristalinas, provavelmente quartzo (HERNANDES et. al, 1998 apud TEIXEIRA, 2006, p. 30). As propriedades dos materiais cerâmicos pioram na presença de grandes concentrações de quartzo, porém a presença de álcalis pode favorecer as propriedades finais do material sinterizado em temperaturas acima de 700°C (VIEIRA et. al, 2004).

A cinza do bagaço da cana é constituído principalmente por SiO_2 , seguindo por quantidades significativas de CaO , K_2O , Fe_2O_3 e Al_2O_3 (AMARAL, 2014, p. 19). A NBR 12653 (2012) – materiais pozolânicos, estabelece como requisito químico, que a soma dos percentuais de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 devem ter no mínimo 70% em peso e como requisito físico, o material retido na peneira com abertura de malha de $45\mu\text{m}$ não deve ser superior a 34%.

A Tabela 1 fornece a composição química de resíduos de CBC estudados por Teixeira et. al, 2008, Borlini et. al, 2006 e Freitas, 2005, com valores da soma dos óxidos acima da faixa estabelecida pela NBR 12653 de 2012.

TABELA 1- Composição química do resíduo de CBC

Óxidos	Teixeira et. al (2008) (%)	Borlini et. al (2006) (%)	Freitas (2005) (%)
SiO₂	85,58	77,5	83,1
Al₂O₃	5,25	4,7	5,1
Fe₂O₃	1,31	3,8	2,6
Total	92,14	86	90,8

Fonte: O autor.

As condições de queima do bagaço da cana-de-açúcar, tais como limites de tempo e temperatura, influenciam nas propriedades da cinza. Entre 400 e 500°C, a cinza torna-se rica em sílica amorfa. Acima de 700°C pode ocorrer à formação de quartzo, e níveis de temperatura ainda mais elevados à sílica é essencialmente cristalina (COOK, 1986).

Referente às propriedades da CBC para geração de novos compósitos, algumas pesquisas se destacam no setor da construção civil tais como a de Paula et. al, 2006, LIMA et. al, 2010, Zardo et. al, 2004, Arif, et. al, 2006, visando minimizar os problemas vinculados com o despejo do resíduo.

Paula et. al, 2006 apresentaram em suas pesquisas que a cinza obtida a partir da queima controlada do bagaço da cana-de-açúcar (6 horas a 600°C utilizando-se mufla), obteve 84% de SiO_2 tanto nas fase cristalinas quanto na fase amorfa com índices comprovando a pozolanicidade da CBC. O estudo também apontou a possibilidade de substituição de até 20% do cimento Portland das argamassas, sem prejuízo da resistência à compressão.

Outro fator importante a se destacar é o caso de pozolonas produzidas pela calcinação de vegetais em que a sílica é originalmente amorfa. Com temperaturas próximas do ponto de fusão, as partículas tendem a se aglomerarem e a sílica passa a ser cristalina (PAULA, 2006, p. 34).

Zardo et. al, 2004, ao utilizar as cinzas de bagaço da cana-de-açúcar como filler em compostos de fibrocimento, verificaram que corpos de prova contendo cinza moída apresentaram propriedades mecânicas superiores aqueles que continham cinza sem tratamento. Este resultado está relacionado com o efeito do preenchimento dos espaços vazios em decorrência da redução da granulometria do material.

Amaral, 2014, em sua dissertação para obtenção do título de mestre que avalia a incorporação de CBC em tijolos solo-cimento, apontou que a inserção de resíduo de CBC na mistura solo-cimento resultou em uma menor resistência à compressão e uma menor absorção de água, no entanto, permanece dentro das faixas estabelecidas pela norma NBR 10834 (2013), para produção de tijolo solo-cimento.

Poucos trabalhos são encontrados na literatura sobre a incorporação dos resíduos de CBC na massa cerâmica. Borlini, et. al, 2006, ao verificarem os efeitos da granulometria da cinza de bagaço da cana-de-açúcar nas propriedades de uma argila caulínica, observaram que o novo composto causou um aumento da absorção de água e decréscimos na resistência mecânica, perda ao fogo e retração linear. Concluindo-se que não houve melhorias nas propriedades mecânicas da cerâmica ao utilizarem resíduos de CBC com granulometrias finas.

2.2 Mineração: Argila Sedimentar

A produção mineral no Brasil é muito importante para o desenvolvimento econômico por que envolvem substâncias metálicas, pedras preciosas, jazidas de fertilizantes, combustíveis fósseis, jazida de substâncias para a construção civil, dentre outros. Esta atividade expande continuamente, com muitas reservas descobertas e outras em fase de exploração, gerando emprego e renda para milhares de pessoas no processo de exploração das jazidas, beneficiamento do material e comercialização do produto (PORTELA, 2005, p. 5).

A construção civil sempre se destacou na exploração de minerais. As matérias-primas são facilmente encontradas em algumas regiões do país e a exploração ocorre por empresas de pequeno, médio e grande porte, cooperativas e pequenos grupos que trabalham de forma artesanal. (PORTELA, 2005, p.5).

A argila é considerada como um bem mineral de uso social por sua importância na construção civil, principalmente para os setores de habitação, saneamento e transportes (SILVA, 2007, p.5). Com este minério, são fabricados blocos, telhas, lajotas, pisos, entre outros materiais consumidos em grande escala nos processos construtivos usuais.

O processo de extração das argilas conforme a Figura 2 é relativamente simples: o método ocorre a céu aberto em bancadas que variam de 4 a 8 metros de altura e o primeiro passo compreende a retirada da camada estéril (solo), o que é feito através de pás carregadeiras para em seguida se processar a extração. A argila extraída fica exposta ao ar livre em forma de pilhas para permanecer em descanso. Este processo é conhecido como Sazonamento, e possibilita uma melhora das propriedades tecnológicas da matéria-prima submetida a este processo. (CHRISTOFOLETTI, 2003, p. 68).

A produção de materiais cerâmicos, por fatores mercadológicos, é realizada próximo de centros consumidores, caracterizando-se como uma atividade típica das regiões metropolitanas e urbanas. Contudo, pelo fato do mineral ser um bem esgotável, a região do Oeste Paulista traz alguns dados preocupantes. Para se ter uma ideia, das sete olarias em atividade na cidade de Teodoro Sampaio, duas buscam a matéria prima no Paraná e as outras sobrevivem com as jazidas que restaram, sendo que algumas já precisaram interromper as atividades por meses devido a escassez de argilas (SILVA, 2007, p.5; O IMPARCIAL, 2017).

No entanto, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, através de estudos realizados na cidade de Teodoro Sampaio, divulgou em 2009 que encontrou uma grande reserva de argila para abastecer o Arranjo Produtivo Local – APL de Cerâmica Vermelha por pelo menos 20 anos, porém devido a localização, a jazida possui varias restrições ambientais que entrava a extração, sendo necessários estudos e debates para a exploração da matéria-prima (O IMPARCIAL, 2017).

Além da problemática acima, a atividade de mineração tem alto índice de clandestinidade, que provocam impactos ambientais de forma descontrolada, alterando canais de rios, os aspectos paisagísticos e degradando ambientes de

delicado equilíbrio ecológico. Além do mais, as cavas oriundas da extração, geralmente são utilizadas como bota-fora da construção civil e até mesmo como lixões. As atividades de extração de argila sedimentar, mesmo operada por empresas regulares podem provocar os seguintes impactos: a degradação da paisagem; a poluição das águas provocada por lama; poeira e gases ocasionados pela etapa de beneficiamento e transporte da produção; o uso futuro do terreno, geralmente comprometido devido à ocupação desordenada de áreas alagadas; a destruição dos leitos dos rios (SILVA, 2007, p. 5-10).

FIGURA 2 - Extração de argila em uma jazida



Fonte: <http://www.irmaosalmeida.com.br/fabricacao.php>. Acesso em 31 out. 2018.

2.2.1 Propriedades e características

A argila é um material natural de granulometria fina inferior a $2\mu\text{m}$, composta essencialmente de argilominerais e outros minerais como quartzo, pirita, óxidos de ferro, dentre outros. Os argilominerais são os minerais característicos da argila, sendo os silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, podendo conter outros elementos como lítio, ferro, potássio, etc. Estes minerais, na presença de água apresentam uma série de propriedades tecnológicas (plasticidade, resistência mecânica, retração linear de secagem, compactação) que possibilita o emprego de diversas técnicas de conformação, permitindo a obtenção de peças com variadas formas geométricas, o que justifica o emprego da argila em diversos segmentos cerâmicos. (GOMES, 1988 apud TEIXEIRA, 2006, p. 26; VIEIRA, et. al, 2005, p. 23).

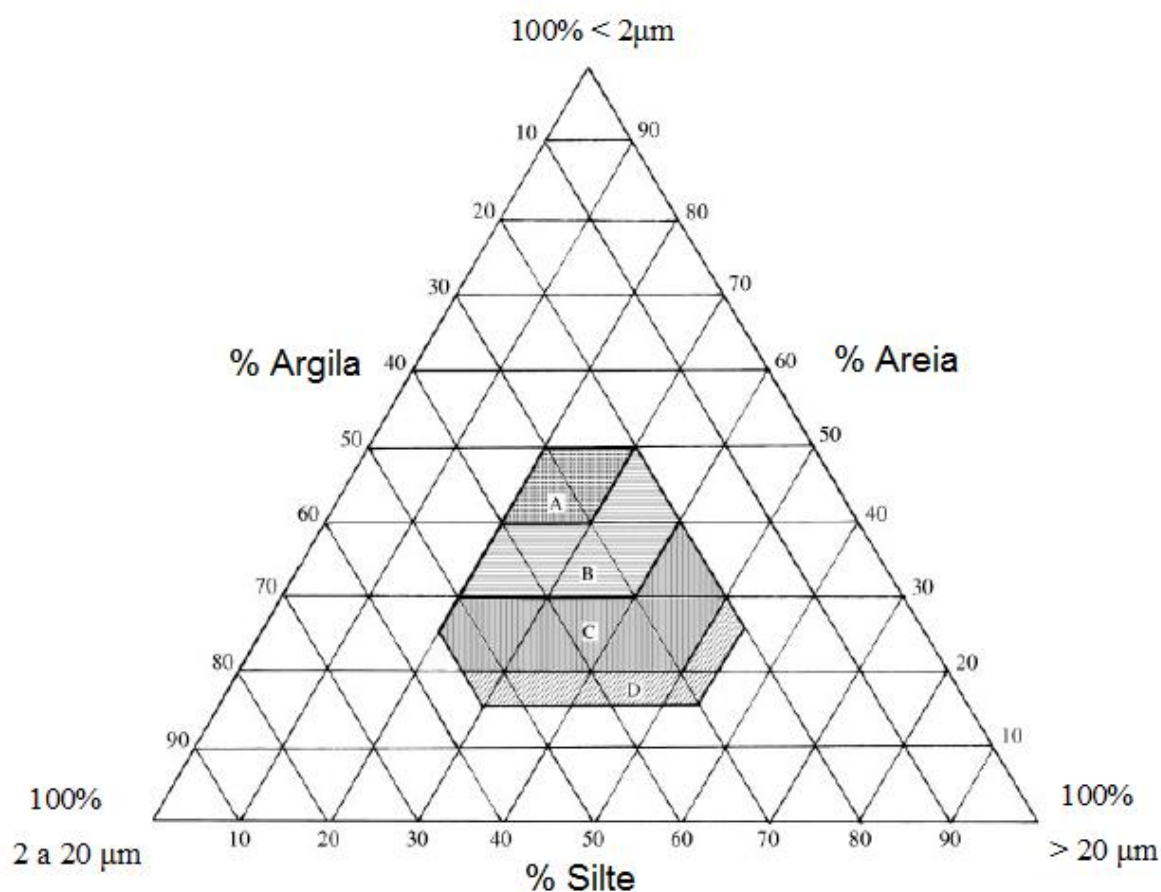
A aplicação industrial de argilominerais esta relacionada pela composição e estruturas que apresenta através do emprego de diversas técnicas de caracterização como exemplo a análise textural, difratometria de raios X, análise térmica e análise química. De forma geral, os argilominerais são constituídos de: O, H, Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, K e Na. Conhecer o tipo de estrutura e as diferentes substituições que podem ocorrer dentro dela, como o silício por alumínio ou ferro, ou alumínio por magnésio ou ferro, ajudam a entender o comportamento durante a sinterização e definir a melhor aplicação tecnológica do material (SOUZA SANTOS, 1989, p. 10-15).

No estado de São Paulo, a região do Oeste Paulista situa-se sobre a bacia sedimentar do Rio Paraná, constituído de solos com granulometria fina e composição mineralógica predominante de quartzo, apresentando ainda minerais de argila (predominando a caulinita), mica e feldspato (MONIZ, et. al, 1973, p. 311). Estudos realizados por Teixeira et. al, (2001) apontaram que as argilas do município de Indiana e Teodoro Sampaio apresentam composição mineralógica parecidas com as argilas das margens do rio Paraná, predominantemente caulinítica, com presença de quartzo fino, mica e em alguns casos com esmectita, gibbsita e óxidos de ferro e de titânio, com coloração clara após a queima, o que indica grande potencial para produção de materiais com maior valor agregado.

Na década de noventa, com base em ensaios físico-químicos, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT fez uma classificação das argilas nas margens do Rio Paraná em relação ao uso do material nas olarias. As argilas foram classificadas em quatro categorias: (1) Argila Plástica (“Gorda”) com plasticidade elevada, indispensável na cerâmica estrutural como elemento plastificante; (2) Argila de Boa, Média e Baixa Plasticidade, utilizada para misturar com argila plástica a fim de controlar algumas propriedades do material cerâmico (retração das peças, a porosidade, perda de massa ao fogo etc.); (3) Argilas Plásticas Fundentes, apresentam baixo índice de ferro e alumina, com diferentes plasticidades, resultam em peças queimadas claras, alto índice de resistência à flexão e baixo índice de absorção de água e (4) Argilas de Alta Plasticidade Viscosa, que são argilas leves e altamente viscosas com baixo índice na massa específica aparente, boa para extrusão. Deve-se ressaltar que, para obter massas cerâmicas com propriedades e condições de trabalhabilidade desejada para cada tipo de produto, são misturados dois ou mais tipos de argilas (TEIXEIRA, 2006, p. 17-18).

As argilas são compostas de materiais plásticos devido à presença de argilominerais e por materiais não plásticos, como areias, siltes, óxidos de ferro e outros. Estes minerais estão concentrados em frações granulométricas diferentes e para obter características adequadas para cada tipo de produto é necessário dosar o tamanho dos grãos finos, médios e grossos da massa cerâmica. A composição granulométrica torna-se, portanto, um dos parâmetros de controle mais importantes. O diagrama granulométrico de Winkler (Figura 3) orienta os estudos da composição granulométrica e fornece as regiões onde se situam os tipos de produtos cerâmicos. Na Tabela 2 são apresentados às faixas de composições granulométricas dos principais produtos de cerâmica vermelha de acordo com o diagrama (PRACIDELLI et. al, 1997, p. 31-35).

FIGURA 3 – Diagrama granulométrico de Winkler



Fonte: Pracidelli et. al, 1997, p. 32.

TABELA 2 - Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha

Tipos de Produtos	Composição Granulométrica (%)		
	< 2µm argila	De 2 a 20µm -silte	> 20µm areia
(A) material de qualidade com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
(B) Telhas e capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
(C) Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
(D) Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Fonte: Pracidelli et. al, 1997, p. 32.

Estudos realizados por Teixeira, 2006, sobre as frações granulométricas de argila da região de Indiana – SP apresentaram a quantia de 38,2% de argila, 27,7% de silte, 34,1% de areia e 5,29% de matéria orgânica. De acordo com o diagrama de Winkler estas amostras se encaixam dentro da faixa ideal para a produção de telhas, capas e tijolos furados.

2.2.2 Estruturas cerâmicas

Grande parte das cerâmicas são compostos de elementos metálicos e elementos não-metálicos, para os quais as ligações interatômicas são totalmente iônicas, ou são majoritariamente iônicas com algum caráter covalente. O termo “cerâmica” significa “matéria-prima queimada” e vem da palavra grega “keramikos”, indicando que as propriedades desejadas dos materiais cerâmicos são obtidas através de um tratamento térmico com temperaturas elevadas, ligeiramente menores que a sua temperatura de fusão. Este processo cria uma alteração na estrutura microscópica do elemento base (CALLISTER, 2002, p. 266).

As ligações interatômicas dão origem a materiais com estruturas cristalinas, com a mesma organização molecular em qualquer ponto, influenciada pela magnitude da carga elétrica em cada íon componente e os raios iônicos dos cátions e ânions. Quando não possuem organização molecular, ou seja, estruturas atômicas indefinidas, são denominadas de estruturas amorfas (CALLISTER, 2002, p. 266).

Os materiais cerâmicos se caracterizam por ser duros e frágeis, com sua aplicabilidade limitada em certos aspectos devido às propriedades mecânicas.

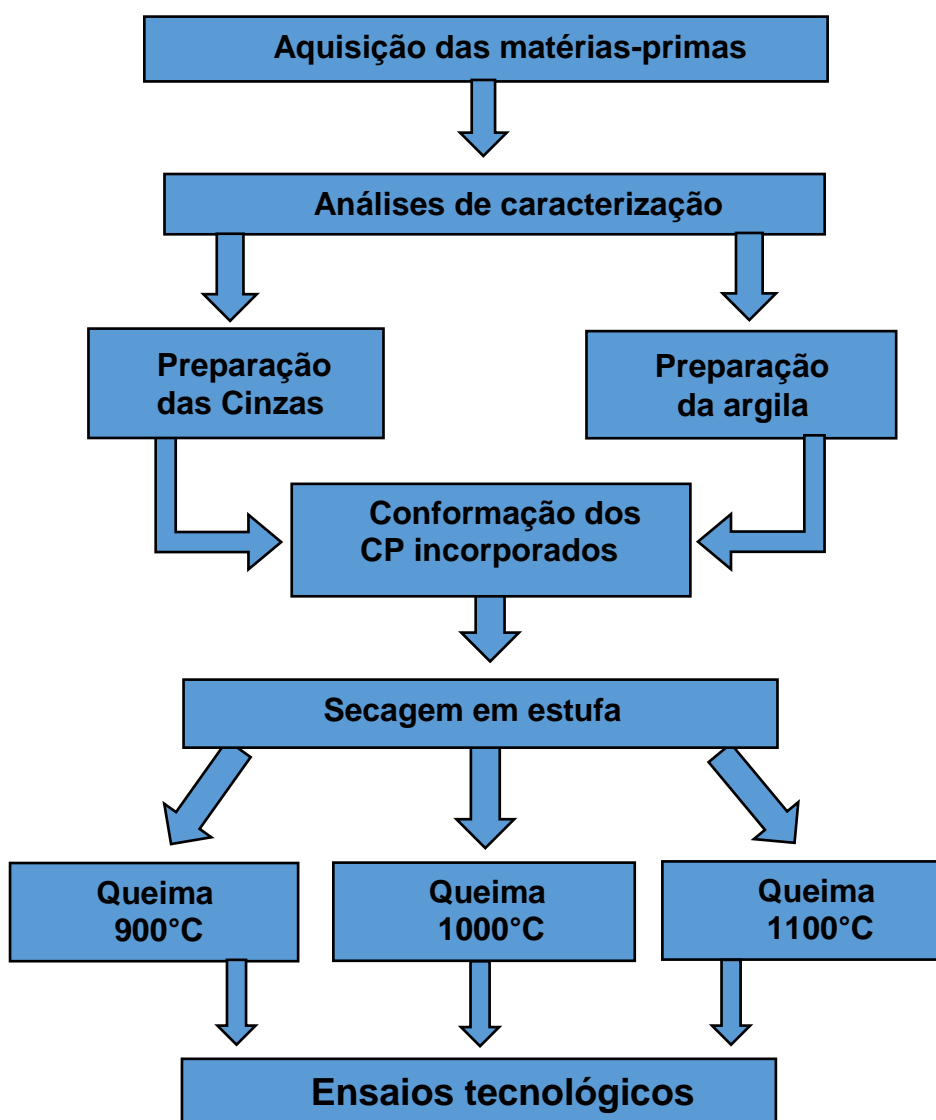
Em temperatura ambiente, tanto as cerâmicas cristalinas como as cerâmicas não-cristalinas apresentam ruptura ainda no regime elástico. Manifestam também, defeitos atômicos pontuais, como os intersticiais (posição que normalmente é vazia, mas está ocupada por uma impureza), e as vacâncias, que é a ausência de um átomo em uma posição normalmente ocupada (CALLISTER, 2002, p. 281).

O processo de fratura frágil consiste na formação e propagação de trincas ao longo do material, perpendicular à direção da força aplicada. Em estruturas cristalinas, as trincas ocorrem entre o encontro dos monocristais da estrutura, local este com maior fragilidade, conhecido como contornos de grãos (CALLISTER, 2002, p. 282).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento dos corpos de prova a partir de argila com incorporação de resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na forma como encontrado nas usinas (*in natura*). A Figura 4 apresenta o fluxograma das etapas envolvidas neste trabalho.

FIGURA 4 - Fluxograma do procedimento experimental que será utilizado para produção e análise dos corpos de prova



Fonte: O autor.

3.1 Material

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram analisados um material argiloso e uma cinza de bagaço da cana-de-açúcar como resíduo industrial.

O material argiloso coletado é proveniente de várzeas, e foram doados pela Olaria Gimenes, do município de Indiana, SP.

As cinzas foram coletadas após a queima do bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras da usina sucroalcooleira Alto alegre – Unidade Santo Inácio, no Estado do Paraná.

3.2 Métodos

Os ensaios de caracterização dos materiais e tecnológicos dos corpos de provas foram realizados nos laboratórios de Materiais da Toledo Prudente e nos laboratórios da FCT/UNESP – Presidente Prudente, de acordo com a metodologia usual (Zandonari, 1987; Souza Santos, 1989; Silva Filho, 1999) e pelas normativas da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) para determinação da contração linear de queima. (CIENTEC C – 026/1995), tensão de ruptura à flexão após queima (CIENTEC C – 027/1995), absorção de água após queima (CIENTEC C – 022/1995), massa específica aparente após queima (CIENTEC C – 024/1995) e perda de massa ao fogo (CIENTEC C – 028/1995).

3.2.1 Preparo de Corpos de Prova (CP's)

Primeiramente, os torrões de argila foram quebrados de forma manual para reduzir as partículas. Em seguida a amostra foi colocada em estufa de secagem e esterilização com circulação e renovação de ar SP- 102 de marca SP Labor do Laboratório de Materiais da Toledo Prudente, a uma temperatura de 100°C ($\pm 10^\circ\text{C}$), por 24 horas para total eliminação da umidade. O procedimento de quebrar os torrões de argila em partículas menores conforme Figura 5, implica no aumento da superfície de contato da amostra, permitindo assim uma melhor difusão do calor em todo o corpo das partículas para eliminação da umidade durante o processo de secagem.

FIGURA 5 – Quebra de torrões manualmente em partículas menores



Fonte: O autor.

A argila seca foi destorroada no moinho de martelo (MA-880) e passada em peneira de abertura de 0,125 mm (120 mesh), a fim de obter partículas finas e possibilitar uma maior mistura das amostras de argila e cinzas residuais.

A cinza passou pelo processo de secagem da mesma forma que o material argiloso. Vale ressaltar que o material residual não passou por qualquer tipo de processamento a fim de diminuir as partículas, sendo então utilizado para confecção dos corpos de provas na forma bruta, conforme encontrados na usina Alto Alegre, de modo a otimizar processos e reduzir custos caso aplicado em escala industrial .

Todas as amostras, após secagem em estufa, foram devidamente armazenadas em recipientes plásticos hermeticamente vedados a fim de impedir a absorção de umidade do ambiente.

A cinza foi adicionada ao material argiloso nos teores de 0, 10, 20 e 30% em relação à massa do material argiloso para confecção dos corpos de prova conforme demonstra a Tabela 3.

TABELA 3 – Proporção de incorporação de CBC em massa de argila

AMOSTRAS	Proporção Cinza CBC em Massa de Argila (%)	CORPO DE PROVA - 20g	
		Cinza (g)	Argila (g)
A	0	-	20g
B	10	2g	18g
C	20	4g	16g
D	30	6g	14g

Fonte: O autor.

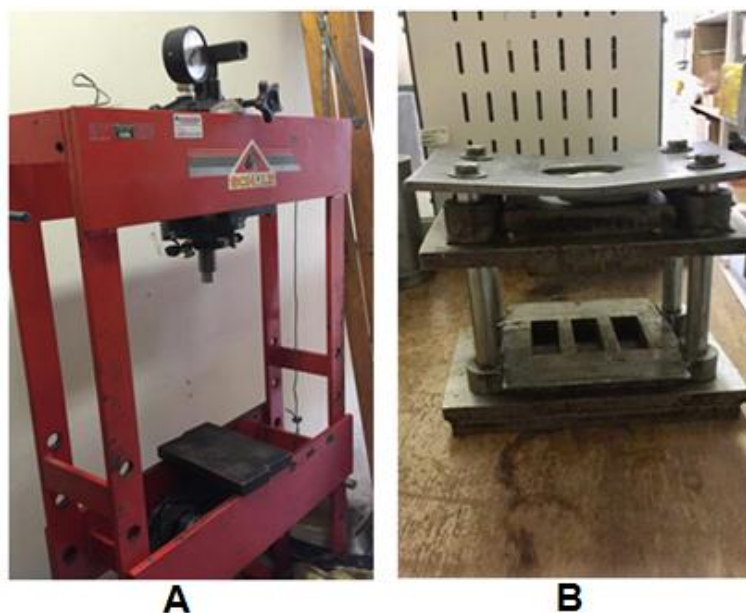
Após a mistura das cinzas com massa cerâmica, foram adicionados 17% em peso de água destilada em todas as amostras para obtenção de plasticidade adequada para a prensagem. As amostras úmidas foram armazenadas em recipientes plásticos vedados por 24 horas a fim de obter uma melhor homogeneização da umidade.

Para conformação de corpos de prova (CP's) prismáticos, foi utilizado uma prensa hidráulica manual SCHULZ (Figura 6 (A)) com uma matriz uniaxial para triplicatas de dimensões 60 x 20 x ~ 5 mm (Figura 6 (B)) e aplicação de 7 ton de pressão de compactação.

Os CP's foram preparados em triplicatas (para cada temperatura de queima), em seguida, secos em estufa por 24 horas a 100°C ($\pm 10^\circ\text{C}$) e submetidos ao processo de queima nas temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C com uma taxa de aquecimento de 12°C/min e patamar de queima de 2 horas usando um forno tipo mufla, modelo EDG 3000 ($T_{\text{máx}} = 1200^\circ\text{C}$) do Departamento de Física, Química e Biologia (DFQB) da FCT/UNESP de Presidente Prudente. Os corpos de prova foram esfriados naturalmente no interior do forno até atingirem a temperatura ambiente.

Todos os CP's foram medidos e pesados após prensagem, secagem e queima, usando-se paquímetro e balança analítica.

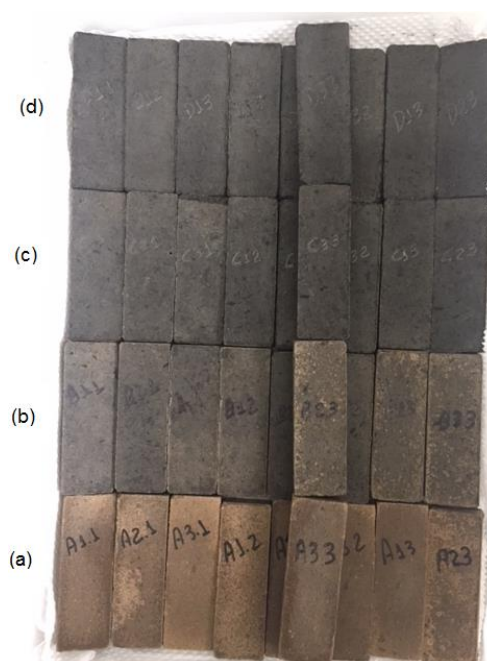
FIGURA 6 – (A) Prensa hidráulica manual SCHULZ; (B) Matriz uniaxial para conformação de corpos de prova em triplicatas



Fonte: O autor.

A Figura 7 mostra os corpos de prova após a conformação na prensa hidráulica. Nela, é possível acompanhar a variação da coloração provocada pelo teor de cinza.

FIGURA 7 - Corpos de prova após conformação em prensa hidráulica: (a) sem resíduo; (b) 10% de cinza; (c) 20% de cinza; (d) 30% de cinza



Fonte: O autor.

3.2.2 Difração de raios X (DRX)

Para análise estrutural e identificação dos principais minerais presentes nas amostras de argila e CBC, foi necessário a técnica de difração de raio-X que consiste em incidir um feixe de raios-x sobre uma camada fina de pó (material analisado), que gira no centro do goniômetro. Como consequência o feixe se difrata e reflete com ângulos que são característicos do retículo cristalino, obtendo-se o difratograma (SABINO, 2016, p. 95). O estudo foi realizado em um equipamento da marca SCHIMADZU, modelo XRD 600 do laboratório do DFQB da UNESP de Presidente Prudente e os dados gerados pelo ensaio foram compilados em difratogramas. As fases cristalinas foram identificadas utilizando-se as seguintes fichas padrão JCPDS: 45-1356, 1-264, 83540, 3-15, 29-84 e 1-649.

3.2.3 Análise térmica

Para permitir observar as transformações térmicas que ocorrem durante o processo de tratamento térmico e auxiliar pela escolha do melhor ciclo de queima, foram realizadas duas técnicas de análise térmicas. A análise termogravimétrica (TGA, *Thermogravimetric Analysis*), que mostra durante o aquecimento as reações e as temperaturas onde ocorrem variações na massa da amostra e a calorimetria exploratória diferencial (DSC, *Differential Scanning Calorimetry*), que durante a sinterização do material cerâmico, mostra as reações exotérmicas com a curva DSC voltada para cima, e as reações endotérmicas com curvas voltadas para baixo (IONASHITO, 2004; TEIXEIRA, 2006, p. 50).

Os efeitos exotérmicos podem ser caracterizados por cristalizações, oxidações, a algumas reações de decomposição, e as reações endotérmicas se relacionam em geral com transição de fase, desidratações e reduções (IONASHITO, 2004).

A análise das amostras de argila e cinza foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Física, FCT/UNESP, Campus de Presidente Prudente, utilizando um equipamento da marca TA Instruments, modelo SQ600 que opera medidas simultâneas de análise termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial. As curvas termogravimétricas foram medidas através da pesagem de 10,56 mg de argila e 10,90 mg de CBC em um cadinho de alumina e

tratadas até 1200°C com razão de aquecimento de 10°C/min sob fluxo de ar atmosférico.

3.2.4 Retração linear de queima (RL_q)

O controle das dimensões e formato dos revestimentos cerâmicos é de fundamental importância para se garantir a qualidade do produto. A retração linear é uma das características das cerâmicas que ocorre através do processo de sinterização, podendo ser definido pelo agrupamento de moléculas que compõem a cerâmica à medida que a temperatura aumenta, fazendo com que as imperfeições e poros diminuam, aumentando assim a densidade do material e diminuindo suas dimensões (MELCHIADES et. al, 1996).

A retração linear é obtida através das medidas dos comprimentos dos corpos de prova após prensagem, após secagem e após queima, que fornecem a variação no comprimento de cada amostra. Também pode ocorrer a dilatação dos CPs (TEIXEIRA, 2006, p.51).

Para o presente trabalho, foi calculada a retração linear de queima dos CP's com a seguinte equação:

$$RL_Q(\%) = \frac{C_s - C_q}{C_s} \cdot 100$$

Onde: C_s é o comprimento após secagem e C_q é o comprimento após sinterização/queima.

3.2.5 Perda de massa ao fogo (PF)

A elevada perda ao fogo se caracteriza pela elevada quantidade de matéria orgânica presente no corpo de prova (MÁS, 2002, apud PASCHOAL, 2004).

A perda de massa ao fogo é a diminuição percentual da massa do corpo de prova queimado em relação à massa do corpo de prova seco em estufa (TEIXEIRA, 2006, p.52). A PF foi calculada através dos dados coletados após secagem em estufa e após a sinterização por meio da seguinte equação:

$$PF(\%) = \frac{m_s - m_q}{m_s} \cdot 100$$

Onde: m_s é a massa do corpo de prova após secagem em estufa e m_q é a massa do corpo de prova após a sinterização/queima.

3.2.6 Módulo de ruptura à flexão (MRF)

O módulo de ruptura à flexão depende da distribuição granulométrica e da composição mineralógica da argila e exprime a tensão máxima de um material não-dúctil, considerando suas dimensões externas, em um carregamento de 3 pontos.

Para a análise da resistência mecânica a flexão, foi utilizado um flexômetro, modelo EMIC 23-100, de marca INSTRON/EMIC do laboratório de materiais da Toledo Prudente.

Após a queima, os CP's foram colocados sobre dois apoios (Figura 8), distantes 40 mm um do outro, em seguida, fornecidas as dimensões (altura e largura) dos CP's para o software *Bluehill*, iniciando a aplicação com o cutelo acoplado a máquina de uma força de descida de 1mm/min no centro dos CP's até a ruptura. O teste foi realizado com três corpos de prova por amostra tendo como resultado uma média da tensão de ruptura em MPa. (TEIXEIRA, 2006, p.51).

FIGURA 8 - Ponto de apoio dos corpos de prova e cutelo de ruptura do flexômetro



Fonte: O autor.

A obtenção do volume aparente (V_{ap}) decorreu com a seguinte equação:

$$V_{ap} = m_u - m_i$$

Onde:

V_{ap} é o volume aparente (cm^3);

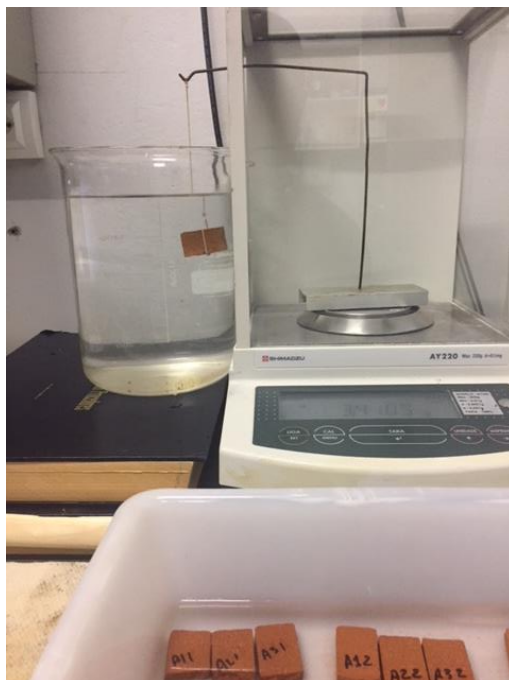
m_u é a massa úmida;

m_i é a massa imersa (g).

Desta forma, através da massa (m) e após obtenção do volume aparente (V_{ap}) dos CP's, foram calculadas as massas específicas aparentes (MEA) expressa em g/cm^3 dos corpos de prova por meio da equação:

$$MEA = \frac{m}{V_{ap}}$$

FIGURA 10 – Processo de obtenção da massa imersa (m_i) dos corpos de prova através de uma adequação de balança hidrostática



Fonte: O autor.

3.2.8 Absorção de água (AA)

A absorção de água é uma propriedade dos materiais cerâmicos e esta diretamente relacionada com a porosidade da peça e a resistência mecânica, pois quanto maior a absorção, mais espaço há entre as partículas para que a água penetre, diminuindo assim a resistência mecânica do CP. Esta propriedade é determinada pelo quociente entre a massa do corpo de prova úmido saturado de água (m_u), pela massa dele seco (m_s) em estufa a 110°C durante vinte e quatro horas (TEIXEIRA, 2006, p. 55).

A absorção de água é expressa pela seguinte fórmula:

$$AA(\%) = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \cdot 100$$

3.2.9 Porosidade aparente (PA)

No processo de sinterização de materiais cerâmicos ocorre a produção de poros (espaços vazios) na estrutura do material. Estes poros podem ou não desempenhar papel importante, o que dependerá da finalidade do produto. Ou seja, poros devem existir em azulejos para promover sua fixação às paredes através da argamassa, em contrapartida, os poros promovem a queda da resistência mecânica, não sendo benéfico para materiais como alvenaria estrutural.

A porosidade aparente é expressa em porcentagem através da razão entre o volume de poros abertos (massa úmida (m_u) menos a massa seca (m_s)) pelo volume aparente V_a ($m_u - m_i$), obtido através do processo de balança hidrostática (TEIXEIRA, 2006, p. 55). Então:

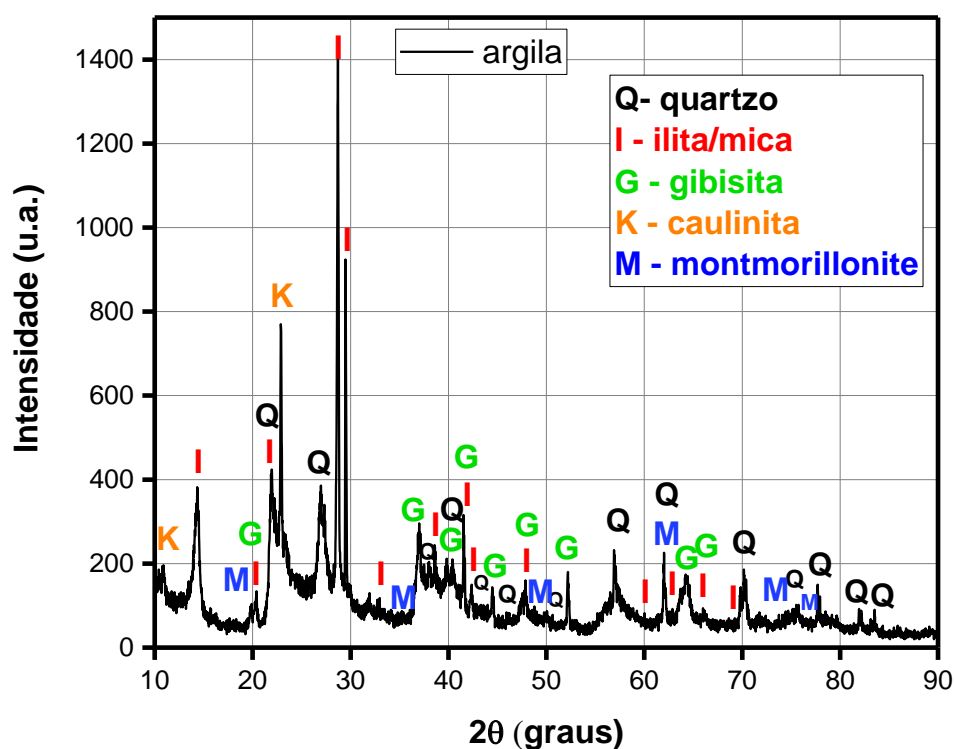
$$PA(\%) = \frac{(m_u - m_s)}{(m_u - m_i)} \cdot 100$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Difração de Raios X (DRX)

A Figura 11 apresenta o difratograma de raios X da fração do material argiloso.

FIGURA 11 – Difratograma de raios X do material argiloso



Fonte: O autor.

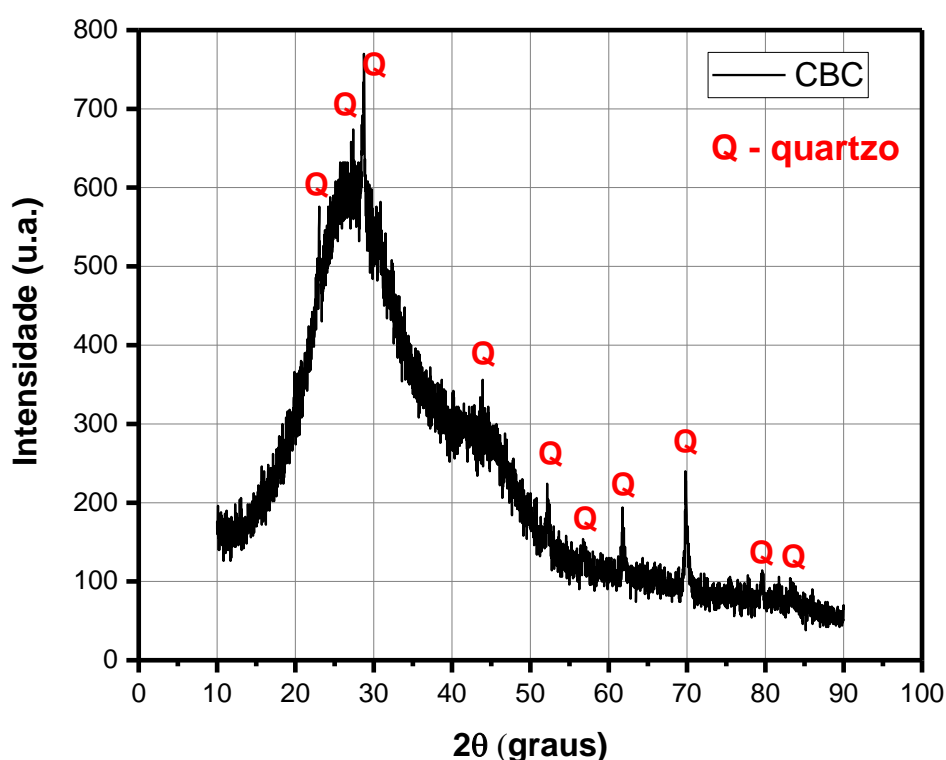
O DRX indicou a presença dos argilomonerais como caulinita (k), quartzo (Q) illita/mica (I) e gibisita (G), através de picos bem definidos que caracterizam as estruturas cristalinas e também da argila montmorillonite (M) com estrutura mal cristalizada devido à baixa intensidade dos picos de difração.

Estudos realizados por Siqueira, 2013, revelam que a gibisita tem contribuição com a perda de massa das argilas durante a queima, enquanto o quartzo (SiO_2) atua como matéria-prima não plástica e inerte durante a queima. E a

fase líquida gerada na sinterização ocorre devido à presença de ilita/mica que são ricos em minerais fundentes.

A Figura 12 apresenta o difratograma de raios X do resíduo de CBC *in natura* utilizado nesse trabalho para determinar composição química e a presença de material cristalino na cinza.

FIGURA 12 – Difratograma de raios X do resíduo de CBC



Fonte: O autor.

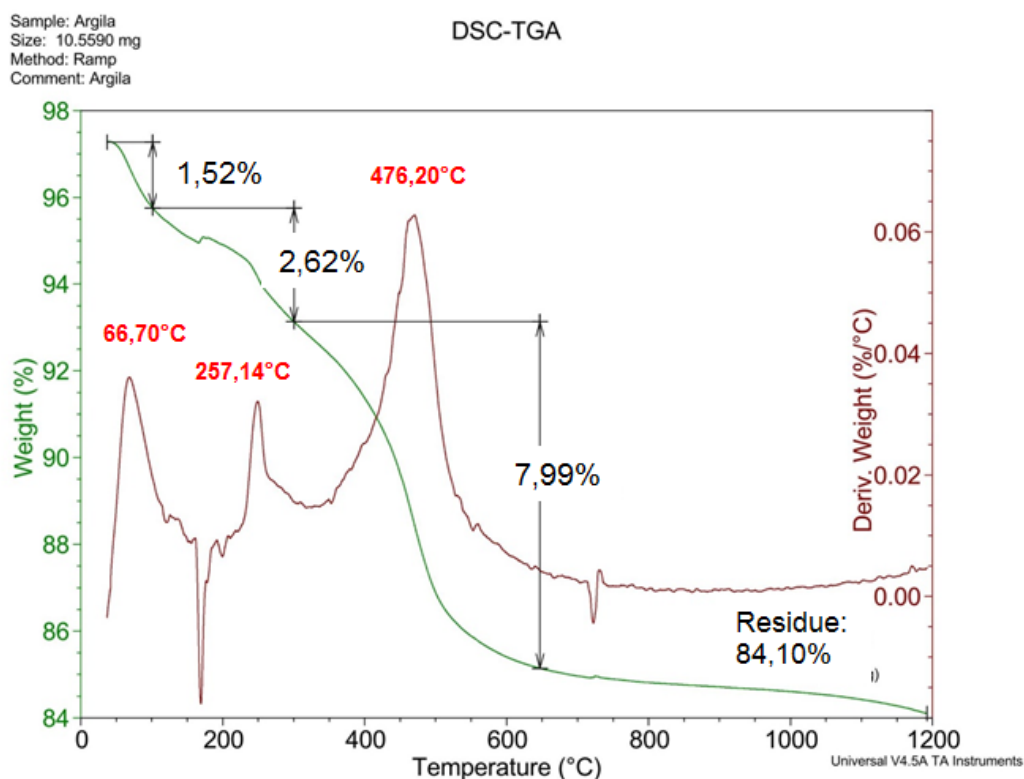
Observa-se que o material é composto basicamente de material amorfo, representado no difratograma por um alo amorfo em torno de 30° , e constituído também por picos de quartzo (SiO_2) cristalino. A formação de sílica amorfa pode estar relacionada com a temperatura de queima (entre 400°C a 500°C) do bagaço da cana nas caldeiras das usinas sucroalcooleiras (COOK, 1986).

Como a atividade pozolânica depende da composição química do material, materiais amorfos (estrutura desordenada) apresentam maiores reatividade em comparação com materiais cristalinos (ZARDO, et. al, 2004, p. 6).

4.2 Análise Térmica

A Figura 13 apresenta as curvas de análise termogravimétrica (TGA/DTG) da argila.

FIGURA 13 – Termograma de TG e DGT da argila



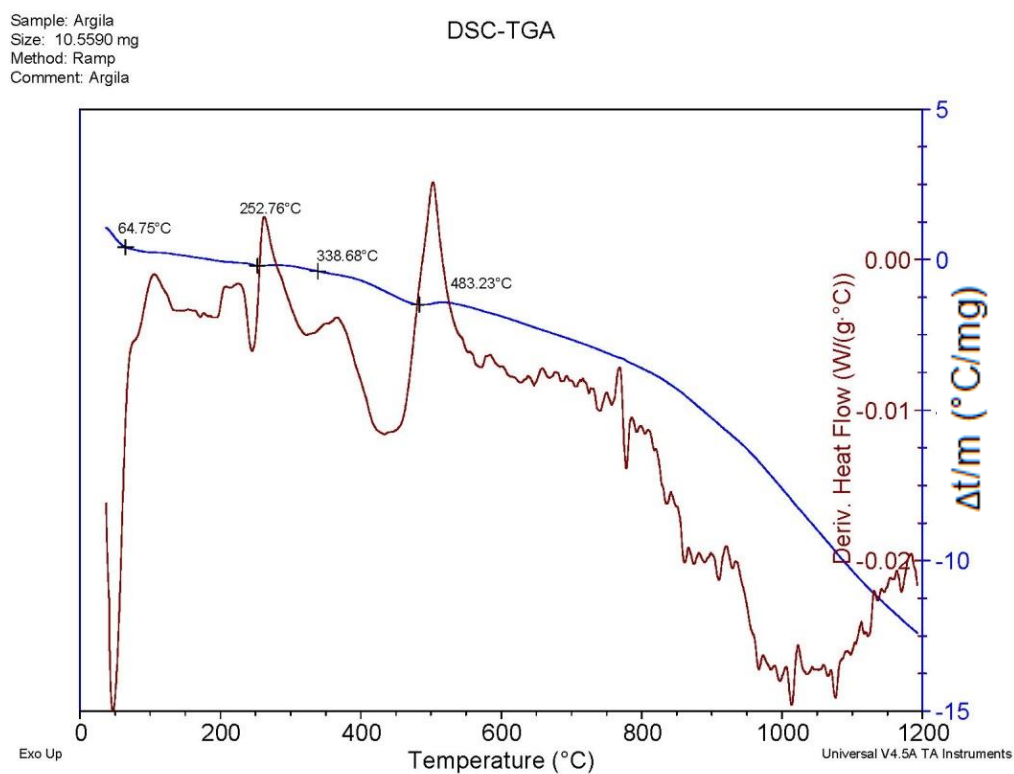
Fonte: O autor.

Observa-se que entre as temperaturas de 60°C a 100°C ocorre à eliminação de 1,52% em massa de água livre entre as partículas. Neste momento acontece uma pequena retração do material proporcional à quantidade de água que foi removida devido à aproximação das partículas por forças capilares (SOUZA, 2008, p.46).

Entre 150°C a 300°C ocorre uma suave perda de massa (2,62%). Nesta temperatura acontece, possivelmente, a oxidação da matéria orgânica e perda de água de hidróxidos. A maior perda de massa, aproximadamente 8%, ocorre em torno de 476°C devido à dissociação da água estrutural, ou seja, as hidroxilas dos argilominerais (SOUZA, 2008, p.46).

Os resultados da análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC), são verificados no termograma da Figura 14.

FIGURA 14 – Calorimetria exploratória diferencial (DSC) do material argiloso

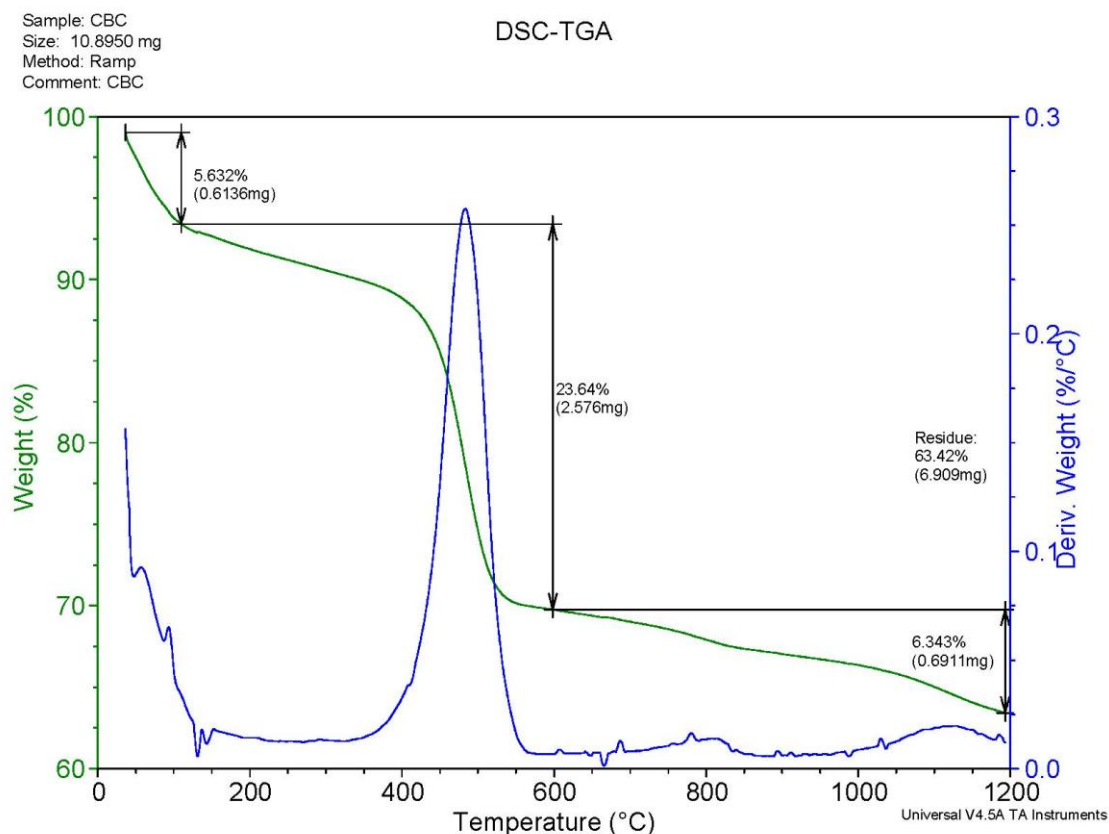


Fonte: O autor.

Os picos endotérmicos abaixo de 100°C relacionam-se com a perda de água adsorvida sobre as partículas finas da caulinita. Os picos endotérmicos (252°C e 340°C) confirma a presença de hidróxidos para o material argiloso. Em 483°C, o pico endotérmico esta associado à perda das hidroxilas dos argilominerais (SOUZA, 2008, p.47).

A Figura 15 apresenta a perda de massa da amostra de CBC em função da temperatura através do termograma de TGA e DTG.

FIGURA 15 – Termograma de TG e DGT da cinza de bagaço de cana

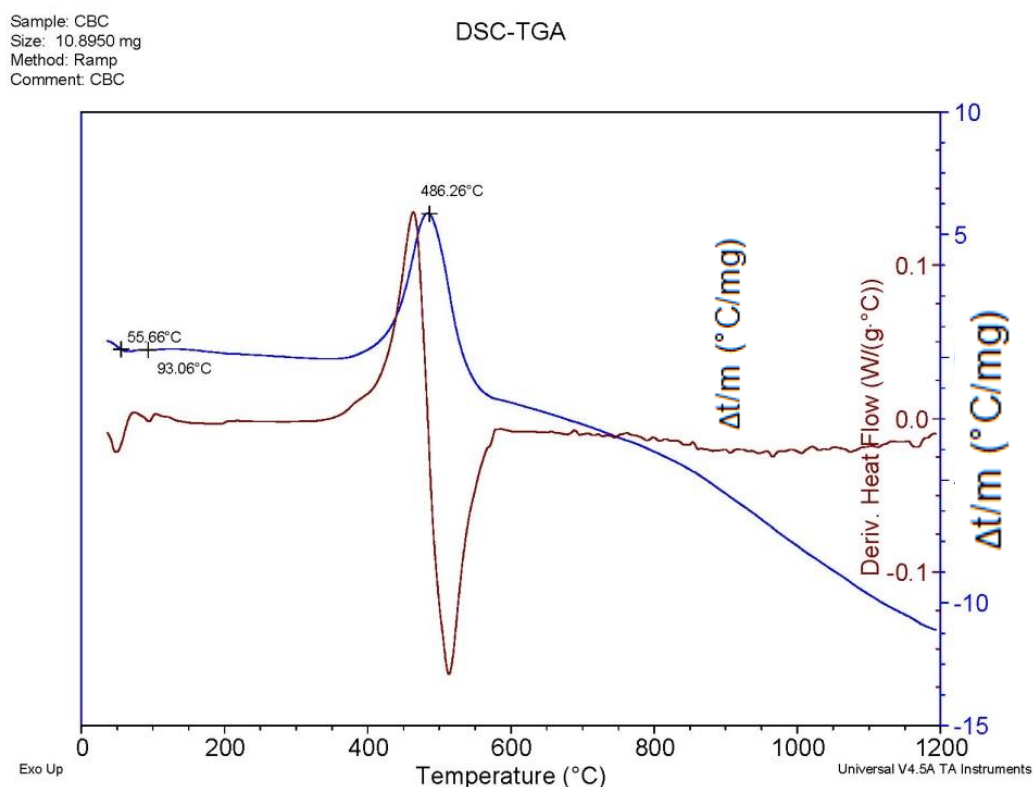


Fonte: O autor.

Observa-se dois picos de perda de massa, sendo a primeira em temperaturas abaixo de 150°C, com perda de 5,63% de massa que corresponde a umidade entre as partículas. Entre 400°C e 450°C ocorre a perda de 23,64% de massa, que correspondem em grande parte pela combustão da matéria orgânica (MEDEIROS, 2017, p. 4). Os dois primeiros estágios correspondem a aproximadamente 30% de perda de massa da amostra analisada.

A Figura 16 apresenta a curva de calorimetria exploratória diferencial (DSC) do resíduo de CBC.

FIGURA 16 – Calorimetria exploratória diferencial (DSC) da cinza de bagaço da cana



Fonte: O autor.

A curva indica um pequeno pico endotérmico nas temperaturas entre 56°C e 93°C devido à perda de água livre na amostra. O pico exotérmico intenso em torno de 486°C se associa a combustão da matéria orgânica e também pode estar relacionado à mudança de fase do quartzo α para quartzo β , o que confirma a predominância de sílica livre no resíduo. (AMARAL, 2014, p. 57).

4.3 Retração Linear de Queima (RL_q)

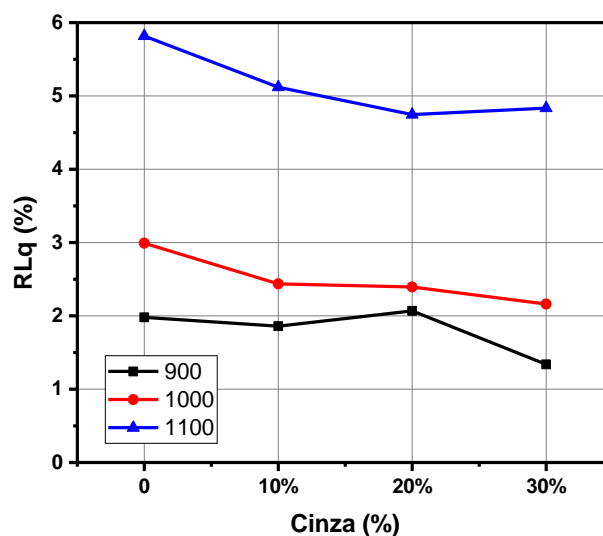
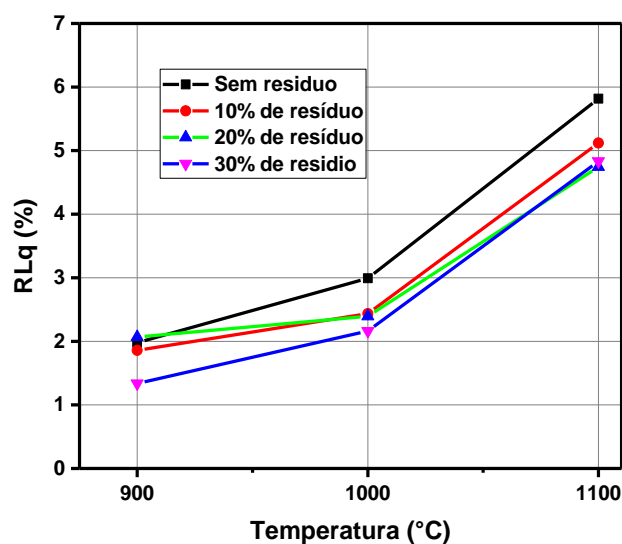
A Tabela 4 e as Figuras 17 (a) e (b) apresentam a retração linear de queima dos corpos de prova em função da temperatura e do teor de cinza.

TABELA 4 - Resultados experimentais: retração linear de queima (RL_q) e desvio padrão (σ) para as diferentes temperatura para diferentes temperaturas de queima

Temperatura		900°C		1000°C		1100°C	
Propriedades		RL%	σ	RL%	σ	RL%	σ
Resíduos CBC	0	1,9790	0,0379	2,9909	0,4305	5,8164	0,3710
	10%	1,8594	0,1046	2,4359	1,0207	5,1193	0,2364
	20%	2,0682	0,9712	2,3944	0,1024	4,7459	0,0898
	30%	1,3379	0,0119	2,1617	0,1626	4,8333	0,1667

Fonte: O autor.

FIGURA 17 - (a) Retração Linear de Queima (RL_q) em função da temperatura; (b) Retração Linear de Queima (RL_q) em função do teor de cinza incorporado



Fonte: O autor.

Observa-se que ocorreu uma melhora da propriedade com a incorporação de cinza (material não plástico) e aumento da RL_q em consequência do processo de sinterização, com valores mais acentuados em 1100°C. Este desempenho da RL_q para todas as amostras indica que a presença dos argilominerais determina o comportamento durante a sinterização (SOUZA, 2008, p. 57).

Em 900°C as amostras com 20% de cinza apresentaram a maior média de RL_q , e houve uma inversão na posição dos pontos na curva em 1100°C, indicando a menor taxa para esta temperatura de queima. Amostras com 30% de cinza incorporada apresentaram menor média de RL_q em 900°C e uma inversão com a reta de 20% de cinza em 1100°C, indicando um pequeno aumento da RL_q com o aumento da concentração de cinza. O que pode estar ocorrendo é a formação de fase líquida e a diminuição da porosidade devidos os modificadores de rede presentes na cinza (Souza, 2008, p. 57).

4.4 Perda de Massa ao Fogo (PF)

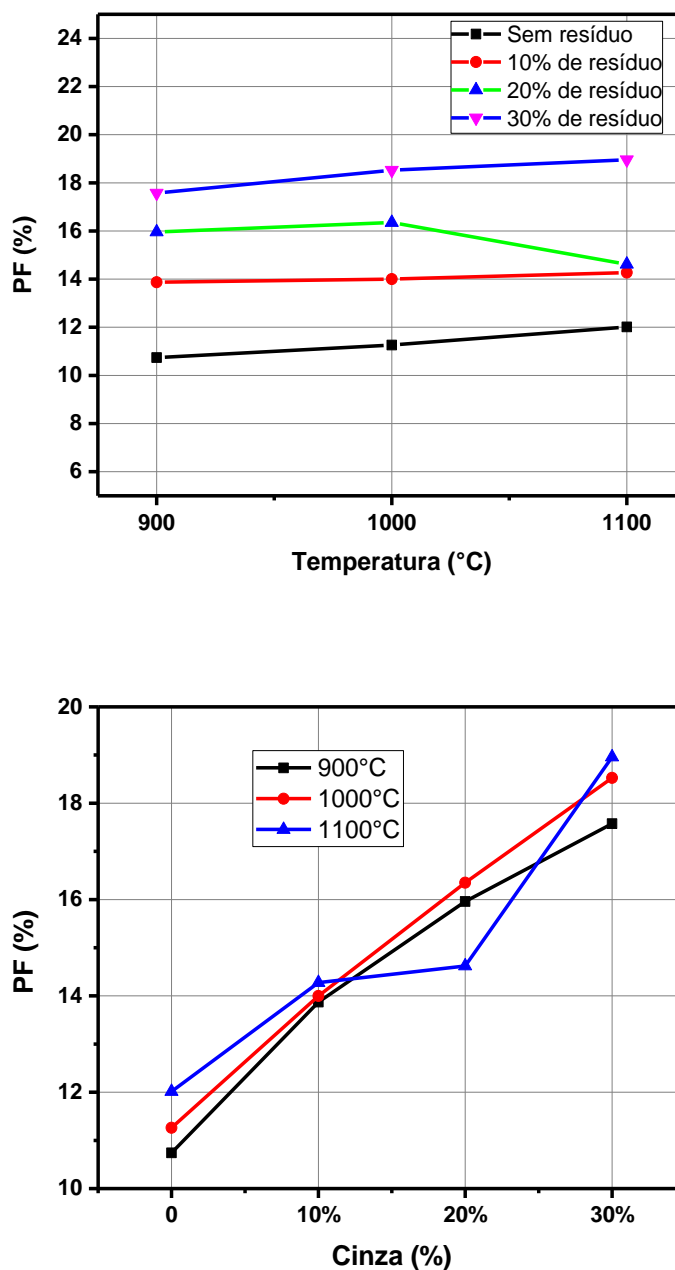
A Tabela 5 e os gráficos da Figura 18 (a) e (b) apresentam a perda de massa ao fogo (PF) em função da temperatura e da concentração de resíduos de CBC.

TABELA 5 – Resultados experimentais: Perda de massa ao fogo (PF) e desvio padrão (σ) para diferentes temperaturas de queima

Temperatura		900°C		1000°C		1100°C	
Propriedades		PF%	σ	PF%	σ	PF%	σ
Resíduos CBC	0	10,7407	1,4303	11,2628	0,5229	12,0133	1,2421
	10%	13,8710	2,3942	13,9994	0,3824	14,2750	0,6278
	20%	15,9586	0,9673	16,3491	0,9453	14,6199	2,4909
	30%	17,5748	1,7712	18,5267	0,2922	18,9584	1,2689

Fonte: O autor.

FIGURA 18 - (a) Perda de massa ao fogo (PF) em função da temperatura; (b) Perda de massa ao fogo (PF) em função do teor de cinza incorporado



Fonte: O autor.

Analisando os dados, percebe-se que quanto maior a concentração de CBC incorporado na matriz cerâmica, mais alto foi a perda de massa ao fogo.

A explicação para este resultado pode estar relacionada à elevada presença de matéria orgânica na cinza de bagaço da cana (MÁS, 2002, apud PASCHOAL, 2004, p. 41). Os corpos de prova sem resíduo apresentaram menores

PF nas três temperaturas de queima e pode estar relacionado com presença de componentes magros como areia, silte e argila rica em quartzo (MÁS, 2002, apud PASCHOAL, 2004, p. 41).

4.5 Módulo de ruptura à flexão (MRF)

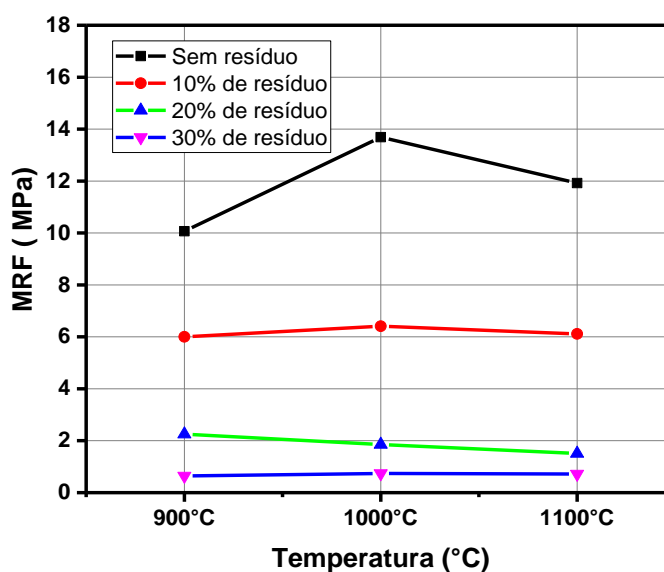
A resistência mecânica dos corpos de prova em função da temperatura e do teor de cinza é mostrada na Tabela 6 e nos gráficos da Figura 19 (a) e (b) respectivamente.

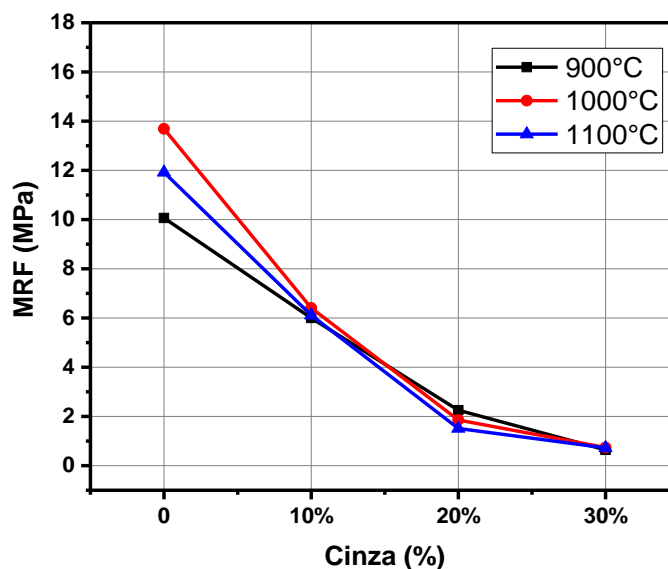
TABELA 6 – Resultados experimentais: módulo de ruptura à flexão (MRF) e desvio padrão (σ) dos corpos de prova para diferentes temperaturas de queima

Temperatura		900°C		1000°C		1100°C	
Propriedades		MRF (MPa)	σ	MRF (MPa)	σ	MRF (MPa)	σ
Resíduos CBC	0	10,0665	0,4364	13,6909	0,6362	11,9210	0,4271
	10%	5,9997	0,7205	6,4088	1,1463	6,1115	0,5141
	20%	2,2539	0,3403	1,8544	0,6054	1,5082	0,7927
	30%	0,6406	0,0435	0,7386	0,3057	0,7186	0,3266

Fonte: O autor.

FIGURA 19 - (a) Módulo de ruptura à flexão em função da temperatura; (b) Módulo de ruptura à flexão em função do teor de cinza incorporado





Fonte: O autor.

Pode ser visto que quanto maior foi a adição de CBC em substituição à massa cerâmica o MRF diminuiu consideravelmente e os melhores resultados foram para a queima em 1000°C. A diminuição do módulo de ruptura à flexão com a adição de CBC na matriz de argila pode estar relacionada com a presença de vazios no corpo de prova devido à calcinação da matéria orgânica presente no resíduo durante o processo de sinterização. Outro fator pode estar atribuído à presença de sílica nos resíduos de CBC, que em várias temperaturas, sofrem transições estruturais com variações na densidade e volume provocando a formação de poros ou tensões. Os poros e tensões podem contribuir para a diminuição da tensão de ruptura pelo surgimento de microtrincas nas peças (SOUZA, 2008, p. 64).

Para a queima de 900°C, a diminuição do MRF foi de 40 a 94% em relação à amostra padrão (sem adição de resíduo) à medida que aumentava a incorporação de cinza. Para a queima de 1000°C, a amostra padrão passou de 10,07 MPa para 13,69 MPa, ou seja, um aumento de 35,9% do MRF, enquanto que a amostra com 20% de cinza incorporada apresentou o valor de 6,41 MPa, um aumento de 6,38% de sua resistência em comparação com o valor à 900°C, que foi de 5,99 MPa.

Em 1100°C as resistências de todos os corpos de prova diminuíram, com a maior queda observada na amostra padrão, enquanto que as amostras com incorporação de cinza apresentaram baixa variação no MRF. A queda de resistência

a partir desta temperatura para a massa cerâmica se assemelha aos resultados obtidos por Teixeira (2006), no entanto, em seu trabalho, as amostras com pó de cinza apresentaram crescimento desta propriedade, possivelmente pela formação de fase líquida devido à presença de óxidos alcalinos que, de acordo com a literatura, estão presentes na cinza de bagaço da cana. No presente trabalho, a formação de fase líquida nos corpos de prova com adição de cinza pode estar compensando o efeito observado na amostra padrão, mas não foi suficiente para aumentar o MRF.

Os resultados com a incorporação de resíduo ficaram abaixo do estipulado pela NBR 15310 (2005), de 10 MPA, para fabricação de telhas cerâmicas.

4.6 Absorções de água (AA)

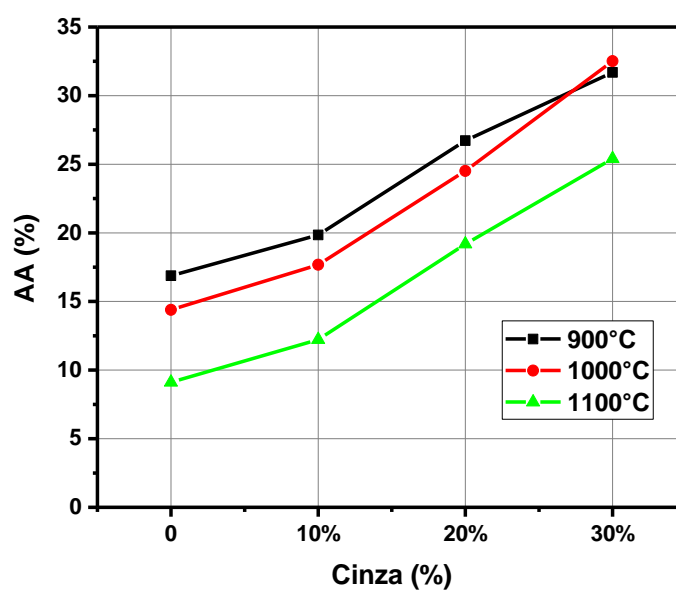
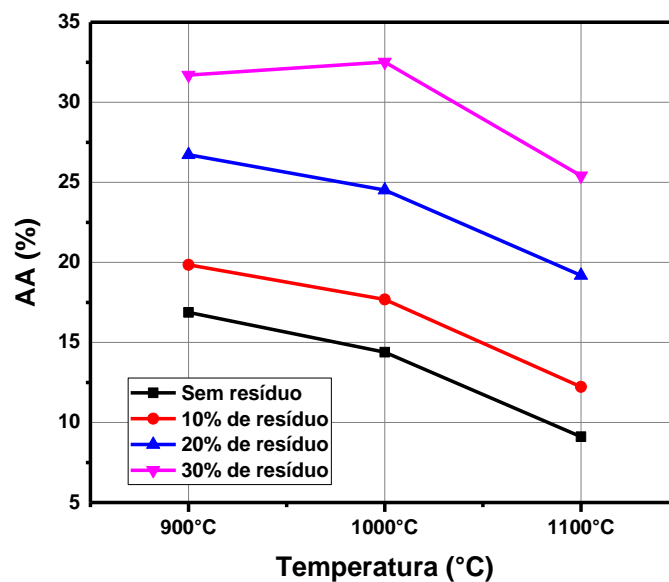
A absorção de água em função da temperatura e do teor de cinza é mostrada na Tabela 7 e Figura 20 (a) e (b), respectivamente.

TABELA 7 - Resultados experimentais: absorção de água (AA) e desvio padrão (σ) dos corpos de prova para diferentes temperaturas de queima

Temperatura		900°C		1000°C		1100°C	
Propriedades		AA (%)	σ	AA (%)	σ	AA (%)	σ
Resíduos CBC	0	16,8726	0,6402	14,3890	2,3400	9,1124	0,5173
	10%	19,8443	0,9379	17,6824	0,8333	12,2214	1,0185
	20%	26,7215	2,0220	24,5144	1,9707	19,1870	0,3950
	30%	31,6963	1,4196	32,5142	1,7145	25,4081	1,3565

Fonte: O autor.

FIGURA 20 - (a) Absorção de água (AA) em função da temperatura; (b) Absorção de água (AA) em função do teor de cinza incorporado



Fonte: O autor.

Observa-se que a absorção diminuiu com o aumento da temperatura para quase todas as concentrações e piora com a incorporação de cinza. Os resultados se assemelham ao trabalho realizado por Souza, 2008, em que a diminuição desta propriedade se acentua nas temperaturas de 1000°C e 1200°C indicando a formação de fase líquida, com diminuição da porosidade aberta.

Pesquisas realizadas por Teixeira, 2006, para obtenção de livre docência, também demonstram que a propriedade de AA aumenta com adição de cinza de bagaço da cana.

A concentração de 10% de cinza obteve os melhores resultados entre as amostras com resíduo incorporado nas três faixas de temperatura, ficando abaixo do limite máximo estabelecido pela NBR 15310 (2005) de 20% de AA para telhas cerâmicas e entre os limites de 8% a 22% da NBR 15270-1 (2005) sobre blocos cerâmicos para alvenaria de vedação. A concentração de 20% de CBC atende aos limites estabelecidos pelas normas somente na temperatura de 1100°C. O maior valor de AA atingido foi de 32,51% na concentração de 30% em 1000°C, que teve um aumento na absorção nesta temperatura.

4.7 Porosidade aparente (PA)

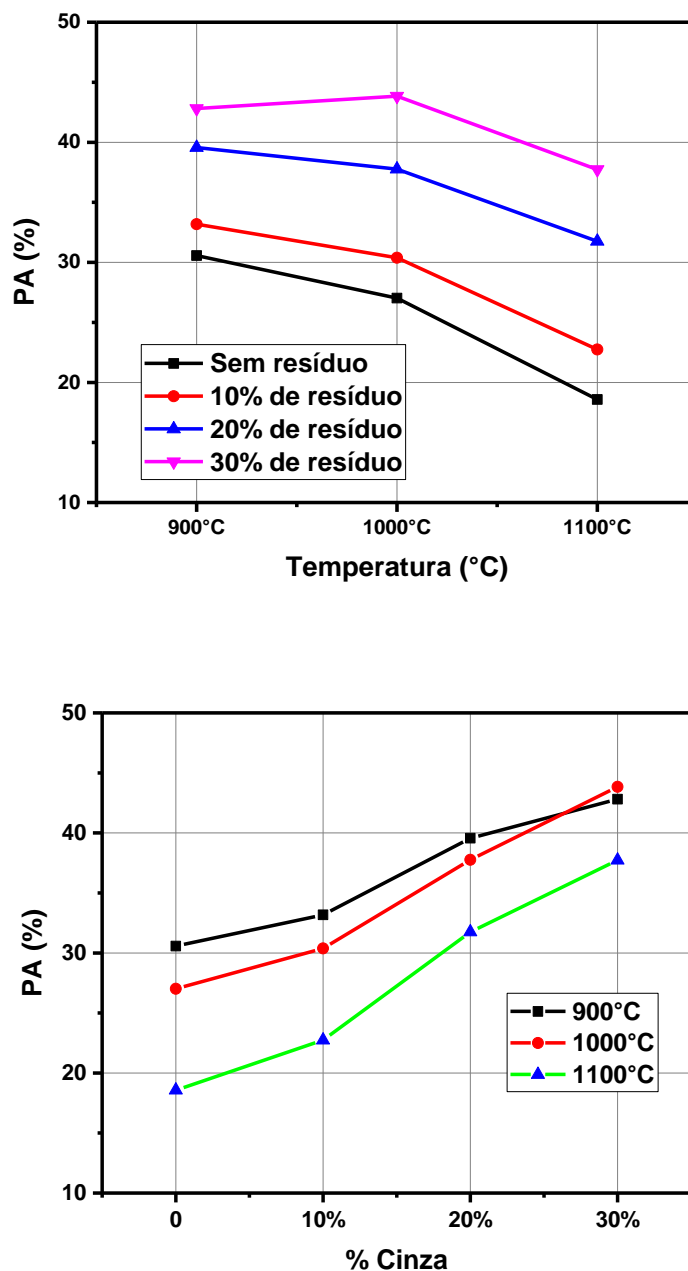
Os resultados da porosidade aparente (PA) podem ser vistos na Tabela 8 e Figura 21 (a) e (b).

TABELA 8 - Resultados experimentais: porosidade aparente (PA) e desvio padrão (σ) dos corpos de prova para diferentes temperaturas de queima

Temperatura		900°C		1000°C		1100°C	
Propriedades		PA (%)	σ	PA (%)	σ	PA (%)	σ
Resíduos CBC	0	30,5701	0,7941	27,0177	3,4074	18,5739	1,2418
	10%	33,1779	0,9170	30,3831	1,3717	22,7421	1,5716
	20%	39,5605	1,5086	37,7613	1,8703	31,7502	0,6349
	30%	42,8157	0,9370	43,8450	1,3438	37,7256	1,2065

Fonte: O autor.

FIGURA 21 - (a) Porosidade aparente (PA) em função da temperatura; (b) Porosidade aparente (PA) em função do teor de cinza incorporado



Fonte: O autor.

Os dados obtidos estão coerentes com os resultados apresentados na absorção de água (AA), pois a diminuição da AA é ocasionada pela diminuição da porosidade aberta. A PA diminui com o aumento de temperatura para quase todas as concentrações e tem uma piora com a incorporação de CBC, o que explica a

redução do MRF, pois o aumento da PA conduz a uma redução na resistência mecânica dos corpos de prova (AZEVEDO, et. al, 2001 apud SABINO, 2016, p.83).

A redução da porosidade, principalmente em temperaturas acima de 1000°C pode ser atribuída ao processo de sinterização e a formação de fases líquida que preenche poros e microestruturas. Uma explicação para a piora desta propriedade com o aumento da concentração de cinza pode ser atribuída ao processo de cristalização de novas fases que podem ocasionar defeitos no material cerâmico e aumentar a porosidade e absorção de água (SOUZA, 2008, p.60-61).

4.8 Massa específica aparente (MEA)

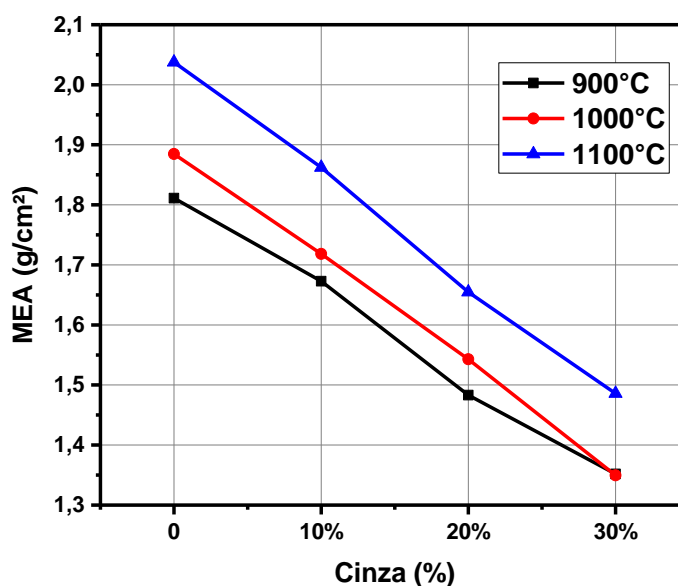
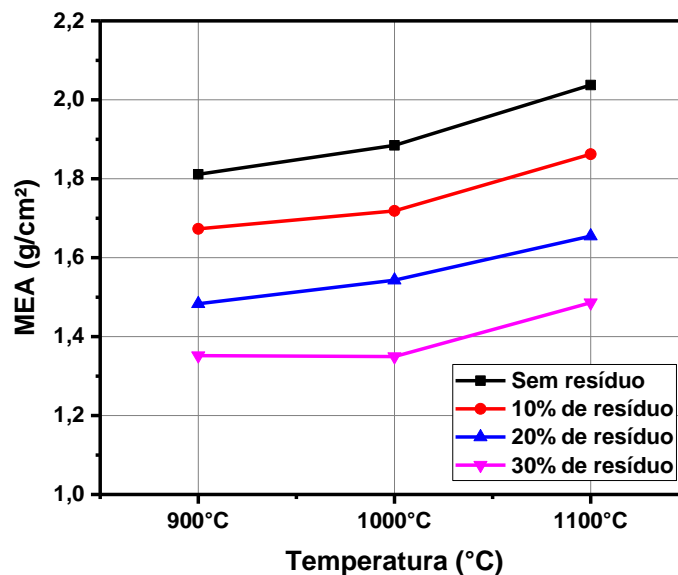
A Tabela 9 e as Figuras 22 (a) e (b) apresentam o comportamento da massa específica aparente (MEA) em função da temperatura e do teor de cinza.

TABELA 9 - Resultados experimentais: Massa específica aparente (MEA) e desvio padrão (σ) dos corpos de prova para diferentes temperaturas de queima

Temperatura		900°C		1000°C		1100°C	
Propriedades		MEA (g/cm ²)	σ	MEA (g/cm ²)	σ	MEA (g/cm ²)	σ
Resíduos CBC	0	1,8112	0,0214	1,8847	0,0881	2,0375	0,0224
	10%	1,6729	0,0326	1,7184	0,0053	1,8623	0,0265
	20%	1,4832	0,0538	1,5430	0,0496	1,6548	0,0036
	30%	1,3518	0,0319	1,3495	0,0296	1,4860	0,0330

Fonte: O autor.

FIGURA 22 - (a) Massa específica aparente (MEA) em função da temperatura; (b) Massa específica aparente (MEA) em função do teor de cinza incorporado



Fonte: O autor.

De maneira geral, observa-se que ocorre um aumento da MEA com a elevação da temperatura para quase todas as concentrações, principalmente na temperatura de 1100°C. A concentração de cinza diminuiu os valores desta propriedade, principalmente nos corpos de prova com 30% de cinza. Os resultados se assemelham com os obtidos por Souza (2008) e condizem com os valores

obtidos na PA, AA e RL, através da diminuição da porosidade dos corpos cerâmicos resultando em maiores retrações e massa específica, conseqüentemente diminuindo a absorção de água.

5 CONCLUSÕES

De acordo a literatura e os resultados apresentados no difratograma de raios X, a cinza de bagaço da cana em seu estado bruto, tem a predominância de fase amorfa, principalmente de sílica (SiO_2) e alguns picos finos de quartzo cristalinos. A sílica comporta-se como material não plástico diminuindo a retração linear das peças durante a queima. Portanto, este material poderá ser incorporado em massa cerâmica forte (com muita argila) em substituição à argila fraca (material menos plástico), para obtenção da massa cerâmica adequada a cada tipo de produto.

Os ensaios físicos e mecânicos mostraram que a incorporação de cinza agravaram as propriedades de PA, AA e MEA dos corpos de prova. Em relação à temperatura, foi constatado que à medida que esta aumenta, a PA e AA diminuem, enquanto que a MEA aumenta, obtendo-se resultados semelhantes e até mesmo melhores do que a amostra padrão em diferentes temperaturas de queima. Todavia, o MRF sempre reduziu com a adição de CBC devido principalmente pelas transformações microestruturais, ficando abaixo do estipulado pelas NBR 15270-1 e 15310 de 2005.

A temperatura é uma das variáveis para obtenção de artefatos cerâmicos adequados a cada tipo de aplicação e irá determinar a quantidade de resíduo a ser incorporado na matriz de argila. Testes de queima para o compósito devem ser feitos em escala industrial tendo em vista que os resultados obtidos foram no laboratório, com condições (razão de aquecimento, patamar de temperatura máxima, resfriamento) de queima diferente das usuais nas olarias da região.

E diante dos resultados e do cenário atual apresentado, a incorporação de resíduos de CBC na matriz de argila, pode ser feita desde que atenda as exigências das normas brasileiras para fabricação de materiais cerâmicos. Desta forma, o desenvolvimento deste trabalho com estudos futuros de análise térmica e difratometria de raios X para os compósitos produzidos, a fim de verificar as reações ocorridas, e também de outras variáveis como, por exemplo, a utilização de frações mais finas de cinza, poderá contribuir de forma sustentável com benefícios ambientais, sociais e econômicos.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653 – **Materiais pozolânicos – Especificação**. 1992c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15310 – **Componentes cerâmicos - Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio**. 1. ed. 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-1 – **Componentes cerâmicos - Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação- Terminologia e requisitos**. 1. ed. 2005.

ARAÚJO, E. S; SANTOS, J. A. P. O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e sua relevância na economia nacional. **FACIDER-Revista Científica 4.4** (2013). Disponível em: <<http://seicesucol.edu.br/revista/index.php/facider/article/view/37>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

AMARAL, M. C. **Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.

ARIF, E; CLARK, M W.; LAKE, N. **Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production**. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 287-297, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816317068>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cadeia produtiva da agroenergia**. Brasília: IICA: MAPA/SPA, 2007b. 112f. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/producao>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

BORLINI, M. C.; MENDONÇA, J. L. C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.11, n. 4, p. 435-443, 2006.

CALLISTER, J. R. W. **Ciência e engenharia dos materiais**. 5. ed. São Paulo: LTC Editora, 2002.

CASTRO, T. R.; 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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300097>>. Acesso em: 06 mai. 2018.

CESNIK, R. **Melhoramento da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil**. Com Ciência: Revista Eletrônica de Jornalismo Científica n. 86, p. 1-7, 2007. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/99990/1/2007AP-008.pdf>>. Acesso em: 06 mai. 2018.

CHRISTOFOLETTI, S. R. **Um modelo de classificação geológico-tecnológica das argilas da Formação Corumbataí utilizadas nas indústrias do Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes**. 2003. 204 f. Tese (Doutorado em geociência) - Rio Claro. 2003.

CIENTEC. Materiais Cerâmicos – Determinação da contração linear de queima. M. **CIENTEC C -026**, 1995. 2p

_____. Materiais Cerâmicos – Determinação da tensão de ruptura à flexão após queima. M. **CIENTEC C -027**, 1995. 2p

_____. Materiais Cerâmicos – Determinação absorção de água após queima. M. **CIENTEC C -022**, 1995. 2p

_____. Materiais Cerâmicos – Determinação massa específica aparente após queima. M. **CIENTEC C -024**, 1995. 2p

_____. Materiais Cerâmicos – Determinação da perda de massa ao fogo. M. **CIENTEC C -028**, 1995. 2p

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira**. Disponível em < <https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safras>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

COOK, D. J.; Rice H A. **Concrete technology and design, cement replacement materials**, v. 3, p. 171-195, 1986.

DANTAS, D. N. **Uso da biomassa de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista** **Uso da biomassa de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista**. 2010. 112f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

DIAS, M. O.; Ensinas, A. V., Nebra, S. A., Maciel Filho, R., Rossell, C. E., & Maciel, M. R. W. **Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process**. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 87, n. 9, 2009. Disponível em: <<https://www.nipe.unicamp.br/docs/publicacoes/production-of-bioethanol-and-other-bio-based-materials.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2018.

FIESP/CIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Ampliação da Oferta de Energia Através de Biomassa. Relatório 2001. -. Disponível: <<http://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4505>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

FIOMARI, M. C. **Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão.** 2004. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual do Estado de São Paulo, Ilha Solteira, 2004.

FREITAS, E. S. **Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil.** 2005. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2005.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa.** 2003. 150f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2003.

GODINHO, K. O.; Rabelo, T. R.; Holanda, J. N. F.; Silva, A. G. P. **corpoação de resíduo de vidros em cerâmica vermelha.** In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48º, 2004, Curitiba, Anais de Congresso, Curitiba, 2004. p.2.

IONASHIRO, M. G. **Fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial, calorimetria exploratória diferencial.** Araraquara: Giz editorial, 2004. 96p.

HERNANDEZ, J.M.; Middendorf, B.; Gehrke, M.; Budelmann. H. **Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction, Cement and Concrete Research** 28, p. 1525-1536, 1998.

KOHLHEPP, G. **Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil.** *Estud. av.* [online]. 2010, vol.24, n.68, pp.223-253. ISSN 0103-4014. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142010000100017>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

LIMA, S. I., Sales, A., Moretti, J. P., Almeida, F. C. R. **Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.** In: Tema Caracterização de Materiais. CINPAR 2010–VI Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas. 2010, Córdoba, Argentina. 2010.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** 2009. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Estado de São Paulo, Ilha Solteira, 2009.

MENDONÇA, G. C., FERREIRA, C. C., PAVAN, F. A. **Análise da perda de massa ao fogo de corpos de prova cerâmicos formulados com cinza leve proveniente da gaseificação do carvão mineral pulverizado.** 2017. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineiral, Criciúma-SC, 2017.

MELCHIADES, F.G. et. al. **A curva de gresificação**: Parte I. Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v.1, n.4/5, p. 30-31, ago./dez. 1996.

MONIZ, A. C., CARVALHO, A. **Sequência de evolução de solos derivados do arenito Bauru e de rochas básicas da região noroeste do estado de São Paulo**. Bragantia, v. 32, n. 17, p. 309-335, 1973.

MOTTA, S. F., AGUILAR, M. T. P. Sustentabilidade e processos de projetos de edificações. Gestão & Tecnologia de Projetos, v. 4, n. 1, p. 88-123, 2009.

O IMPARCIAL. Nova jazida de argila supre demanda de 20-anos. Disponível em <<http://www.imparcial.com.br/site/nova-jazida-de-argila-supre-demanda-de-20>>. anos. Acesso em: 27 Fev. 2017.

OLIVEIRA, S. F. A. **Avaliação Energética Da Biomassa Do Bagaço De Cana De Açúcar Em Diferentes Indústrias Suco energéticos**. 2014. 80f. Dissertação (Mestrado em Produção). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2014.

PASCHOAL, J. A. A. **Estudos de parâmetros de qualidade para cerâmica estrutural vermelha**. 2004. 188f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) da Universidade Federal de São Carlos, 2004.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

PRACIDELLI, S; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 1/2, p. 31-35, 1997.

PORTELA, M. O. B., GOMES, J. M. A. **A extração de argila e suas implicações socioeconômicas e ambientais no bairro Olarias**. Teresina–PI. In: MONTEIRO, Maria e Socorro Lira et al. Teresina: uma visão ambiental. Teresina: Edufpi, 2005.

SABINO, A. R. **Características físico-químicas das argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha no município de Tabatinga – AM: Um estudo de caso em indústrias do município**. 2016. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal do Pará. 2016.

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração**. Revista espaço da Sophia, v. 8, p. 1-13, 2007. Disponível em <<http://www.registro.unesp.br/sites/museu/basededados/arquivos/00000429.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2018.

SIQUEIRA, F. B. **Avaliação da incorporação de resíduo grits nas propriedades e microestrutura de tijolo solo-cimento**. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 2013.

SOARES, L. C. S. R. **Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

SOUZA, A. E. **Argilominerais: influência dos aditivos (cinza de bagaço de cana-de-açúcar e rocha sedimentar) no processo de sinterização**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia dos Materiais) Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

TEIXEIRA, S. R. **Caracterização de argilas usadas para produção de cerâmica vermelha e estudo das alterações nas suas propriedades pela adição de resíduos**. 2006. 181f. Tese (Livre Docência em Física) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

TEIXEIRA, S. R.; DE SOUZA, S. A.; MOURA, C. A. I. **Mineralogical characterization of clays used in the structural ceramic industry in west of S. Paulo State, Brazil**. *Cerâmica*, v. 47, n. 304, p. 204-207, 2001.

ÚNICA - União da Indústria da cana-de-açúcar. **A bioeletrecidade da Cana em Números**. abril de 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/Cliente/Downloads/46a55eef5db05751b0d595143ccaada7%20(1).pdf>. Acesso em: 05 mai. 2018.

VIEIRA, C.M.F.; T.M. Soares, R.; Sánchez, S.N. Monteiro, **Incorporation of granite waste in red ceramics, Materials Science and Engineering**. A, 373, p. 115-121, 2004.

VIEIRA, C. M. F.; Monteiro, S. N.; Duailib, J. F. **Considerações sobre o uso da granulometria como parâmetro de controle de uma argila sedimentar**. *Cerâmica Industrial*, Rio de Janeiro, fev. 2005. Disponível em <<http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v10n01/v10n1a03.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

ZARDO, A. M.; Bezerra, E. M.; Martello, L. S.; Savastano, H. **Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento**. In: I conferência latino-americana de construção sustentável x encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 2004. p. 06-21.