



MAYKMILLER CARVALHO RODRIGUES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE BLOCOS CERÂMICOS
QUEIMADOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE RESÍDUOS
INDUSTRIAIS**

LAVRAS-MG

2018

MAYKMILLER CARVALHO RODRIGUES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE BLOCOS CERÂMICOS QUEIMADOS COM
ADIÇÃO DE FIBRAS DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções Rurais e Ambiente, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes

Orientador

LAVRAS – MG

2018

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rodrigues, Maykmiller Carvalho.

Estudo do comportamento de blocos cerâmicos queimados com
adição de fibras de resíduos industriais / Maykmiller Carvalho
Rodrigues. - 2018.

127 p. : il.

Orientador(a): Francisco Carlos Gomes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Bloco Compósito. 2. Caracterização. 3. Sistema fuzzy. I.
Gomes, Francisco Carlos. . II. Título.

MAYKMILLER CARVALHO RODRIGUES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE BLOCOS CERÂMICOS QUEIMADOS COM
ADIÇÃO DE FIBRAS DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções Rurais e Ambiente, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 09 de novembro de 2018

Dr. Alex de Oliveira Ribeiro	DES/UFLA
Dr. André Geraldo Cornelio Ribeiro	DEG/UFLA
Dra. Denise de Carvalho Urashima	CEFET-MG
Dr. Tadayuki Yanagi Júnior	DEG/UFLA

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

LAVRAS – MG

2018

À DEUS.

Pelas oportunidades e por colocar em meu caminho pessoas maravilhosas como minha esposa

Jéssica, meu filho Lucas e meus pais, Juarez e Marilene.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me deu o dom da vida e colocou em meu caminho tantas pessoas especiais, que de uma forma ou de outra me apoiaram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade concedida para a realização do doutorado.

À CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG pelo aporte financeiro dado ao projeto.

À Cerâmica Sul de Minas pela doação dos materiais e auxílio na produção das amostras de blocos.

Ao professor Dr. Francisco Carlos Gomes pela orientação, paciência, amizade, dedicação e seus ensinamentos que foram de grande relevância para a realização deste trabalho e meu crescimento profissional.

Ao professor Lucas Henrique, pela amizade e pela ajuda prestada.

Aos professores Alex de Oliveira Ribeiro e Adriano Rodrigues pela ajuda nas análises estatísticas dos dados.

À minha esposa Jéssica Assaid Martins Rodrigues, pelo amor, compreensão, confiança, apoio em todos os momentos e por me dar o melhor presente do mundo, o meu filho.

Ao meu filho Lucas Assaid Rodrigues, por me proporcionar uma alegria que nunca havia sentido.

A toda a minha família, minha mãe Marilene Aparecida de Carvalho Rodrigues, meu pai Juarez José Rodrigues, em especial aos meus avós, pelo incentivo e exemplo de vida.

Aos alunos de iniciação científica envolvidos nesta pesquisa, Ana Flávia e Matheus Eduardo.

Às secretárias Helem e Fernanda, pela dedicação e pelo carinho com que desenvolvem seu trabalho.

A todos os amigos, professores, técnicos e alunos do Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras.

RESUMO GERAL

Os Blocos Cerâmicos Queimados (BCQs) são materiais muito utilizados, que necessitam de um aprimoramento constante de sua matriz cerâmica e de seus processos de fabricação. Para esse aprimoramento são necessários muitos estudos a fim de desenvolver novas tecnologias. Desta forma, o reaproveitamento de resíduos industriais para a produção de materiais compósitos tem alavancado várias pesquisas em nível internacional. Neste contexto, os objetivos deste trabalho foram: estudar e caracterizar as matérias-primas para a produção de blocos cerâmicos comuns e blocos cerâmicos compósitos produzidos em uma indústria localizada no Sul de Minas Gerais/Brasil; avaliar as características mecânicas, físicas e químicas de blocos cerâmicos convencionais e compará-las com as características de blocos compósitos fabricados com adição de fibras do bagaço de cana-de-açúcar (FBCA) e como adição de fibras de resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro (FPRFV). As matérias-primas (Solo, bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro) foram processadas, caracterizadas e posteriormente foram preparadas as misturas para a produção dos blocos compósitos, em quantidades de 0 a 7,5% em peso de fibras adicionadas ao solo. Para conhecer as características do solo, da FBCA e da FPRFV utilizadas para a produção dos blocos, foi realizado o teste de Fluorescência por raio X, a fim de determinar as composições químicas. Além disso, foram investigados os limites de consistência das amostras de solo a partir do teste de Limites de Consistências de Atterberg, bem como feita a análise textural. Para avaliar as características das amostras dos blocos após a queima (BCQ), foram realizados os testes de Resistência Mecânica à Compressão (RM), Condutividade Térmica (CT), Absorção de Água (AA) e microscopia eletrônica por varredura (MEV) das áreas de ruptura. Um sistema *fuzzy* foi desenvolvido para avaliar as melhores proporções de adição de fibras, para a obtenção de blocos mais resistentes, mais leves e com menor condutividade térmica. Por fim, pôde-se verificar que a adição de FPRFV em porcentagem entre 2,5% e 5,0% aumentaram a resistência mecânica dos BCQs em 49,18% e 47,54%, respectivamente, e que o sistema *fuzzy* desenvolvido apresentou R^2 de 0,996, 0,991 e 0,995, para RM, CT e AA, respectivamente, evidenciando eficiência do modelo para a tomada de decisões quanto às características da mistura da matriz cerâmica.

Palavras-chave: Bloco Compósito, Solo, Caracterização, Resistência à Compressão e Sistema *fuzzy*.

GENERAL ABSTRACT

Burnt ceramic bricks (BCBs) are widely used materials, which require a constant improvement of their raw-material and their manufacturing processes. Many studies are necessary to this improvement in order to develop new technologies. The reuse of industrial waste to obtain a new composite material have been instigating international researches. By this way, the objectives of this study were: to evaluate and characterize the raw-material to produce common ceramic bricks and composite ceramic bricks, produced in an industry located in the south of the Minas Gerais in Brazil; to evaluate mechanical, chemical and physical characteristics of the common bricks and to compare with the characteristics of composite bricks made by the addition of sugar-cane bagasse fiber (SCBF) and fiber of reinforced plastic with fiber glass (FPRFG). The raw-materials (soil, sugar-cane bagasse and the residue of reinforced plastic with fiber glass) were processed, characterized and the ceramic mixtures were prepared to produce the composite bricks, in quantity of 0 to 7,5% in weight of fiber added to soil. The chemical characteristics of the soil, SCBF and FPRFG used to produce the bricks were evaluated by X-Ray fluorescence. The limits of consistency of the soil were evaluated by Atterberg limits of consistency method as well as the texture analysis. In order to evaluate the characteristics of the burnt ceramic bricks were performed the tests of compressive strength (CS), thermal conductivity (TC), water absorption (WA) and scanning electron microscope (SEM). The *fuzzy* system was developed to evaluate the best proportion of the raw-material mixture, to obtain bricks more resistant, lighter and less thermal conductivity. Therefore, the addition of FPRFG in quantity of 2,5% and 5,0% increased the CS of the bricks in 49,18% and 47,54%, respectively, and the developed *fuzzy* system presented R^2 of 0,996, 0,991 e 0,995, to CS, TC and WA, respectively, that showed the efficiency of the model for decision making about the raw-material mixture characteristics.

Key words: Composite Bricks, Clay, Characterization, Compressive strength and *Fuzzy* System.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1 – Escavadeira realizando o processo de extração da matéria-prima.....	22
Figura 2 – Armazenamento da matéria-prima para produção dos Blocos Cerâmicos Queimados: Solo extremamente argiloso (a), e Solo com maior porcentagem de areia (b).....	23
Figura 3 – Massa de solo logo após o processo de pré-mistura	23
Figura 4 – Processo de transporte da massa cerâmica entre os laminadores pelas correias transportadoras (a), Processo de Laminação e destorroamento da massa cerâmica (b).....	24
Figura 5 – Processo de extrusão da Cerâmica Sul de Minas	25
Figura 6 – Equipamento de corte (a), e Carro transportador (b)	26
Figura 7 – Blocos testemunha e compósitos queimados em um mesmo lote.....	27
Figura 8 – Bloco cerâmicos de vedação com furos na horizontal (a) e Bloco cerâmicos estruturais com furos na vertical (b).	28
Figura 9 – Esquema para medição dos septos e paredes dos blocos cerâmicos.....	29
Figura 10 – Desvio em relação ao esquadro em bloco com furos na horizontal (a) e Desvio em relação ao esquadro em bloco com furos na vertical (b).	29
Figura 11 – Esquema computacional fuzzy.....	40

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

Figura 1 – Etapas do projeto.....	57
Figura 2 – Resíduo de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (a), Bagaço de Cana-de-Açúcar (b), Solo (Argila) (c), Bloco Cerâmico Antes da Queima (d) e BCQ (e).	58
Figure 3 – Resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (RPRFV) (a), fibra triturada a partir do RPRFV (b).	60
Figure 4 – Bagaço de cana-de-açúcar fornecido coletado no pátio da empresa (a), fibra do bagaço de cana-de-açúcar após o processo de secagem e trituração (b).	62

Figura 5 – Processo de capeamento dos BCQs.	64
Figura 6 – Teste compressão estática: posicionamento do bloco de vedação com relação a aplicação de carga (ABNT NBR 15270/2005) (a), e corpo-de-prova posicionado na máquina universal de ensaios para a aplicação de carga (b).....	65
Figure 7 – Bloco cru produzido com 10% de substituição de solo por fibra de resíduos.	67
Figure 8 – Corpo-de-prova para avaliação da condutividade térmica do bloco.....	70
Figure 9 – Esquema do equipamento de avaliação da condutividade térmica utilizado para a realização dos ensaios.....	72
Figure 10 – Seções de ruptura dos blocos aumentadas em 2000 vezes: (a) Bloco sem adição de fibras, (b) Bloco com FPRFV, (c) Bloco com FBCA e (d) Bloco Híbrido.	76
Figura 11 – Termogravimetria do resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (a), termogravimetria do resíduo de bagaço de cana-de-açúcar (b), fibra de vidro agregada à cerâmica após a ruptura (c), e cavidade na cessão de ruptura do BCQ com cinzas da fibra do bagaço de cana-de-açúcar (d).	78
Figure 12 – MEV das regiões de ruptura dos blocos: testemunha (a), 1,25% de FBCA (b), 2,5% de FBCA (c), 5,0% de FBCA (d) e 7,5% de FBCA.....	87
Figure 13 – MEV das regiões de ruptura dos blocos: testemunha (a), 1,25% de FPRFV (b), 2,5% de FPRFV (c), 5,0% de FPRFV (d) e 7,5% de FPRFV (E).	88

ARTIGO 2

Figura 1 – Resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (RPRFV) (a), bagaço de cana-de-açúcar (b), solo (Argila) (c), bloco cerâmico queimado (BCQ) (e).	109
Figura 2 – MEV da região de ruptura dos blocos: testemunha (a), com adição de FRPRFV(b), e com adição de FBCA(c).....	110
Figura 3 – Esquema do sistema fuzzy.	112
Figura 4 – Funções de pertinência para as variáveis de entrada: a) Porcentagem de adição de FPRFV (%), b) Porcentagem de adição de FBCA (%).	114
Figura 5 – Funções de pertinência para as variáveis de saída: a) resistência mecânica (MPa)..	115
Figura 6 – Correlação entre os dados experimentais e os dados obtidos pelo modelo fuzzy: a) RM, b) CT e c) AA.	119

Figura 7 – Resultados do modelo fuzzy para combinação tridimensional de FBCA com a
FRPRFV: a) RM, b) CT e c) AA..... 121

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 – Classificação dos blocos cerâmicos quanto à resistência mecânica.	30
Tabela 2 – Estudos recentes sobre blocos cerâmicos compósitos queimados.....	32
Tabela 3 – Composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar obtida por análise de fluorescência por raio x (XRF).	37
Tabela 4 – Propriedades do Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (RPRFV).	38

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

Tabela 1 – Propriedades do plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV).	61
Tabela 2 – Porcentagens de substituição em peso de solo por fibras de resíduos e quantidade de amostras utilizadas nos ensaios de compressão preliminares.	66
Tabela 3 – Porcentagens de substituição em peso de solo por fibras de resíduos e quantidade de amostras utilizadas nos ensaios de compressão.	68
Tabela 4 – Valores médios dos principais componentes químicos encontrados nas matérias primas FPRFV, FBCA e Solo, e nos blocos depois de queimados e triturados por meio do teste de Fluorescência por Raio-X.	75
Tabela 5 – Limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) do Solo Matriz.	77
Tabela 6 – Classificação textural do solo matriz.....	77
Tabela 7 – Resultados obtidos das médias de resistência para cada tratamento.	80
Tabela 8 – Resultados obtidos das médias de resistência à compressão para cada tratamento com FPRFV.	82
Tabela 9 – Resultados obtidos das médias de resistência para cada tratamento com FBCA.....	85
Tabela 10 – Resultados obtidos das médias de absorção de Água (%) para os tratamentos que deferem da testemunha.	89
Tabela 11 – Resultados obtidos das médias de Condutividade Térmica para cada tratamento. ...	91

Tabela 12 – Resultados obtidos das médias de condutividade térmica para cada tratamento com FPRFV.	93
Tabela 13 – Resultados obtidos das médias de resistência para cada tratamento com FBCA.	95

ARTIGO 2

Tabela 1 – Porcentagens de substituição em peso de solo por fibras de resíduos e quantidade de amostras utilizadas nos ensaios.....	111
Tabela 2 – Valores de resistência mecânica (RM), condutividade térmica (CT) e absorção de água (AA) obtidos experimentalmente para os BCQs.....	113
Tabela 3 – Comparação dos valores obtidos experimentalmente e simulados pelo modelo.....	117

LISTA DE GRÁFICOS

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

Gráfico 1 – Resistência à compressão média (MPa) das amostras de blocos.	79
Gráfico 2 – Resistência à compressão média (MPa) das amostras de blocos com adição de FPRFV, descritas na Tabela 7, obtidos por análise de variância ANOVA.	81
Gráfico 3 – Análise de regressão para resistência à compressão dos BCQs com adição de FPRFV.	83
Gráfico 4 – Resistência à compressão média (MPa) das amostras de blocos com adição de FBCA, descritas na Tabela 7, obtidos por análise de variância ANOVA.	84
Gráfico 5 – Análise de Regressão para resistência à compressão dos BCQs com adição de FBCA.	85
Gráfico 6 – Condutividade térmica média (W/m°C) das amostras descritas na Tabela 7, para os blocos submedidas ao teste de transferência de calor, obtidos por análise de variância ANOVA.	90
Gráfico 7 – Condutividade térmica média (W/m°C) das amostras de blocos com adição de FPRFV submedidas ao ensaio de compressão, descritas na Tabela 7, obtidos por análise de variância ANOVA.	92
Gráfico 8 – Análise de Regressão para a condutividade térmica dos BCQs com adição de FPRFV.	93
Gráfico 9 – Condutividade térmica média (W/m°C) das amostras de blocos com adição de FBCA submedidas ao ensaio de compressão, descritas na Tabela 7, obtidos por análise de variância ANOVA.	94
Gráfico 10 – Análise de Regressão para a condutividade térmica dos BCQs com adição de FBCA.	96

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1	Impacto ambiental do setor da construção civil	19
3.2	Blocos de Cerâmicos Queimados (BCQs)	20
3.3	Produção dos Blocos Cerâmicos Queimados (BCQs).....	20
3.3.1	Solos para produção de Blocos Cerâmicos Queimados	20
3.3.2	Armazenamento da Matéria-Prima.....	22
3.3.3	Preparação da Mistura	23
3.3.4	Transporte e Laminação	24
3.3.5	Extrusão dos Blocos	25
3.3.6	Corte	26
3.3.7	Secagem e Queima	27
3.3.8	Caracterização de blocos cerâmicos	28
3.4	Blocos cerâmicos compósitos.....	30
3.5	Materiais compósitos com bagaço de cana-de-açúcar.....	33
3.6	Materiais compósitos com resíduos de vidro e plástico reforçado com Fibra de Vidro (PRVF)	34
3.7	Mistura de fibras para produção de blocos compósitos (Blocos Híbridos).....	35
3.8	Resíduos sólidos incorporados à matriz cerâmica.....	35
3.8.1	Bagaço de cana-de-açúcar	36
3.8.2	Resíduo de Plástico reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)	37
3.9	Sistema <i>fuzzy</i>	39
3.10	Aplicação da lógica <i>fuzzy</i> na construção civil	41
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44

REFERÊNCIAS.....	45
------------------	----

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1 - FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS QUEIMADOS EM ESCALA INDUSTRIAL: Utilização de resíduos de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro e Bagaço de Cana-de-Açúcar.....	51
---	----

ARTIGO 2 - MODELAGEM <i>FUZZY</i> PARA A PREDIÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA MATRIZ CERÂMICA NA PRODUÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS QUEIMADOS	104
---	-----

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o uso de energias renováveis, a economia de energia e a melhoria da eficiência energética nas várias áreas industriais, vem contribuindo para a proteção do meio ambiente, para a redução de custos e desenvolvimento da sustentabilidade. Neste contexto, a indústria da construção civil tem desenvolvido novas técnicas construtivas e novos materiais de construção com melhores características físicas, químicas e mecânicas, que consomem menor quantidade de energia para serem produzidos e que se adaptam cada vez mais ao ambiente construído.

Um dos principais setores da indústria da construção civil é a indústria da cerâmica, que está dividida em vários segmentos: cerâmica vermelha, materiais refratários, de revestimento, louça de mesa, isoladores elétricos, filtros cerâmicos, cerâmica térmica, louças sanitárias e isoladores térmicos. No Brasil, o segmento da cerâmica vermelha representa um importante papel na indústria da construção civil.

No âmbito nacional, é estimado pela ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (2015), que existam cerca de 6.9 mil empresas de cerâmica vermelha, que representam 4,8% da indústria da construção civil, onde a maioria é de pequeno porte, geradoras de um faturamento anual de R\$18 bilhões e responsável por 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos. A localização das empresas de produção de cerâmicas é determinada por dois fatores principais, os quais são a proximidade das jazidas (em função do volume de matéria-prima processada e da necessidade de transporte de grande volume e peso) e a proximidade dos mercados consumidores. Com isso, a Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM (2015) relata que em um âmbito regional, Minas Gerais é o segundo maior produtor de cerâmicas do Brasil com um grande número de empresas classificadas como de pequeno e médio porte, com maquinários antigos e processos ultrapassados.

No Brasil, os blocos cerâmicos tradicionais são os mais utilizados. Embora haja muitas alternativas disponíveis no mercado, os blocos cerâmicos furados são os mais comuns e devem ter resistência a diferentes condições climáticas. Para atingir as metas de qualidade, a escolha de boas

fontes de matéria-prima é muito importante. As matérias-primas tradicionais são: a argila, a areia e os aditivos que podem ser usados para melhorar as propriedades do produto final.

Para a confecção das alvenarias é necessário desenvolver produtos com uma boa resistência, baixo custo e que não gerem patologias. Além disso, os blocos de vedação e estruturais devem ter boa rigidez, baixo módulo de deformação, resistência à umidade, isolamento térmico e acústico dentre outras características.

Segundo Adazabra; Viruthagiri; Shanmugam (2017) e Faria; Gurgel; Holanda (2012), uma das principais alternativas para reduzir custo de produção da cerâmica vermelha e melhorar a qualidade dos produtos, é a utilização de resíduos industriais como parte da matéria prima.

De acordo com o último senso da FEAM (2015), mais de 78 milhões de toneladas de resíduos industriais são produzidos no estado de Minas Gerais/Brasil. Estes resíduos são alguns dos mais graves problemas que afetam e degradam o meio ambiente, causando a contaminação de cursos d'água e do solo por meio do descarte inadequado.

De acordo com a FEAM (2015) no ano de 2014, foram gerados quase 10 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, representando 12,66% dos 10 resíduos industriais mais gerados de Minas Gerais. No setor dos minerais não metálicos (fibra de vidro) foram gerados quase 31 milhões de toneladas de resíduos correspondendo a 39,24% dos 10 resíduos industriais mais gerados de Minas Gerais. Juntos, os resíduos de bagaço de cana-de-açúcar e os minerais não metálicos são responsáveis pela geração de mais de 50% dos resíduos industriais dentre os 10 mais gerados no estado.

Neste contexto, o reaproveitamento dos resíduos industriais como a fibra de plástico reforçado com fibra de vidro (FPRFV) e a fibra do bagaço de cana-de-açúcar (FBCA) tem um grande potencial para melhorar as características mecânicas, físicas e químicas dos blocos cerâmicos queimados.

Dessa forma, este estudo se justifica pela grande geração de resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro, bagaço de cana-de-açúcar e pela falta de informações sobre as propriedades das matérias-primas e dos produtos finais obtidos pelas cerâmicas do sul de Minas Gerais/Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar as características físico-mecânicas e químicas de blocos cerâmicos queimados fabricados por extrusão e compará-las às características de blocos cerâmicos fabricados com adição de fibras de resíduos de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (FPRFV), bem como a adição de fibras de bagaço de cana-de-açúcar (FBCA) de origem industrial, com o intuito de obter um produto mais homogêneo, mais resistente e de melhor isolamento térmico.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o solo utilizado para a produção dos blocos cerâmicos queimados por meio de análise física e química.
- Caracterizar as fibras de resíduos (FBCA e FPRFV), por meio de análise química, física e Termogravimétrica.
- Avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas de blocos compósitos (com adição de fibras) e testemunha após a queima, utilizando dos testes de Absorção de Água e Resistência Mecânica.
- Avaliar e comparar a condutividade térmica dos blocos cerâmicos queimados convencionais, em relação aos blocos cerâmicos queimados compósitos de fibras de resíduos (FBCA, PRFV e Híbridos).
- Determinar por meio de lógica *Fuzzy* a melhor matriz cerâmica composta por solo e resíduos industriais, para a produção dos blocos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Impacto ambiental do setor da construção civil

Nos últimos anos, a indústria da construção civil tem desenvolvido novas técnicas construtivas e novos materiais de construção que necessitam de menor quantidade de energia para serem produzidos e que se adaptam cada vez mais ao ambiente construído, a fim de se reduzir os impactos ambientais causados pelo setor.

Apesar dos grandes investimentos aplicados na indústria da construção civil, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais e as emissões de CO₂, o maior percentual de consumo de energia ao longo de toda a vida de uma edificação acontece durante a sua construção e demolição, podendo atingir até 40% do seu consumo total de energia. Isso quer dizer que mais de 39,6% do consumo mundial de energia e um terço das emissões globais relacionadas aos gases de efeito estufa (GEE) são produzidos pelo setor da construção civil. Além disso, estima-se que este setor é responsável por cerca de 30% da extração de matéria-prima de todo o planeta, gerando 25% de resíduos sólidos, e consumindo 25% de toda água consumida no mundo e é responsável por 12% da exploração do solo, de acordo com as Organização das Nações Unidas (ONU) (MUÑOZ V. et al., 2016; XU et al., 2014).

O desenvolvimento de novos materiais de construção civil, principalmente para edificações sustentáveis, deve considerar os requisitos operacionais dos edifícios, como por exemplo o isolamento térmico, a absorção de água e a resistência mecânica, dentre outros. Deve-se considerar também o impacto ambiental durante a fabricação de cada material de construção, como o consumo de energia, as emissões de GEE e quantidade de matérias-primas utilizadas, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais causados pelo setor da construção.

Um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo são os blocos cerâmicos queimados (fabricados a partir da moldagem e queima do solo), onde aproximadamente 1,5 trilhões de blocos são produzidos a cada ano, o que envolve mais de 4,0 bilhões de toneladas de extração de solo processado por mais de 100.000 fornos de grande escala (MORALES et al., 2016; MUÑOZ V. et al., 2016; THE FREEDONIA GROUP, 2014).

3.2 Blocos de Cerâmicos Queimados (BCQs)

Os blocos cerâmicos queimados (BCQs) são os materiais de construção mais utilizados na construção civil em todo o mundo devido às suas várias qualidades como a alta resistência mecânica, baixa condutividade térmica, baixo índice de absorção de água e baixo custo de produção.

Devido a sua grande aplicação, várias pesquisas (Tabela 2) têm sido conduzidas a fim de obter um melhor isolamento térmico, juntamente com um bom comportamento mecânico dos blocos nas paredes. Essas pesquisas envolvem o uso de novas geometrias internas ou externas dos blocos ou o uso de materiais isolantes como aditivos ou compósitos (MUÑOZ V. et al., 2015). Tipicamente, o processo de fabricação dos blocos de cerâmica vermelha aborda as etapas de mistura das matérias-primas, moldagem das peças, secagem e a queima (MICHOT et al., 2008).

3.3 Produção dos Blocos Cerâmicos Queimados (BCQs)

3.3.1 Solos para produção de Blocos Cerâmicos Queimados

O solo é a principal matéria-prima para a produção dos blocos cerâmicos (MICHOT et al., 2008), e é geralmente extraído nas margens de rios, lagos, várzeas ou jazidas, conhecidas popularmente como áreas de empréstimo.

Os conhecimentos das características do solo utilizado na produção dos blocos são de fundamental importância. Segundo Muñoz V. et al. (2016), muitos estudos apontam uma similaridade na composição química dos solos onde os principais componentes são a sílica (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3) e o óxido de cálcio (CaO).

Comumente, os solos contêm entre 45% e 60% de sílica. Quanto mais sílica, menos água é necessário para a moldagem dos blocos e menor será a retração durante os processos de secagem e queima. Contudo, blocos com maior quantidade de sílica contêm um maior número de poros levando à obtenção de peças com menor densidade e conseqüentemente menor resistência mecânica (GARCÍA et al., 2010). Com quantidade acima de 60% de sílica, os solos são mais indicados para a fabricação de blocos refratários e não para alvenarias.

O óxido de alumínio representa a segunda maior porcentagem da composição da mistura formadora dos blocos. Sua principal importância é durante a queima, pois a formação de uma

estrutura chamada de Cristal de Mullite melhoram as ligações químicas e a resistência mecânica dos blocos. As porcentagens utilizadas variam entre 10% e 20% para produção blocos de vedação ou estruturais. Para blocos refratários, é possível utilizar mistura com até 40% de Al_2O_3 .

A porcentagem de óxido de ferro não deve exceder a 10% da matéria, quando parte do solo é substituído por resíduos. Porém, alguns estudos demonstrem porcentagens de até 35% quando o solo é inteiramente substituído por resíduos de lama vermelha, originados da indústria do alumínio, ou pela indústria siderúrgica (MUÑOZ V. et al., 2016; XU. et al., 2014). O aumento da concentração de óxido de ferro na produção em escala industrial pode levar à descoloração e/ou à eflorescência durante o processo de queima, influenciada pela presença de pirita (SFe) ou marcassita (S_2Fe). Quando o bloco é queimado com má oxigenação, o óxido de ferro não passa por uma combustão completa e produz óxido ferroso (FeO) que reage com a sílica, causando um efeito de inchaço das peças que é conhecido como "núcleo preto" entre os fabricantes.

Muitos estudos demonstram que a concentração de óxido de cálcio varia entre 0% e 20%. Porém a maioria dos autores utilizam uma porcentagem menor que 8% para a maioria dos casos (76%). Além das características químicas, as características mineralógicas dos solos influenciam diretamente nas propriedades dos Blocos Cerâmicos Queimados (BCQs) (GARCÍA et al., 2010). Teixeira et al., (2001), caracterizaram as matérias primas coletadas nas várzeas dos rios Paraná e Paranapanema e a massa cerâmica usada pela indústria cerâmica do oeste do estado de São Paulo, utilizando a Difractometria de raios X, análise textural, limite de plasticidade e concentração de matéria. A análise textural mostrou que a fração argila variou de 38,2 a 66,3 %, a fração silte de 22,2 a 49,7 % e a fração areia de 3,1 a 34,1 %. A concentração de matéria orgânica variou de 5 a 7 %. Os resultados de difração de raios X mostraram que todas as amostras possuem caulinita e muitas delas têm argilas do grupo das esmectitas, argilas interestratificadas e mica. Gibsita, óxidos de ferro e de titânio e quartzo também foram identificados. Os resultados indicaram que as massas cerâmicas tiveram alta concentração de argila na sua composição e devem ser misturadas com solos magros, ou seja, solos com menor concentração de argila. Caulinita foi a fase majoritária em todas as amostras, dando uma boa plasticidade para a produção de blocos e telhas por extrusão.

A extração do solo, composto basicamente por argila, silte, areia, e matéria orgânica ocorre em várzea próxima à cerâmica (Figura 1), e é realizada por meio de máquina escavadeira, enquanto que o transporte é realizado por caminhões de carga. São extraídos mais de um tipo de solo, para a realização de uma correção da matriz cerâmica. Os solos mais arenosos são misturados a solos

argilosos na busca pelas proporções adequadas de argila, silte e areia indicadas para a produção dos Blocos Cerâmicos Queimados (NUNES; RESENDE, 2013).

Figura 1 – Escavadeira realizando o processo de extração da matéria-prima.



Fonte: Do autor (2017).

3.3.2 Armazenamento da Matéria-Prima

A matéria-prima é armazenada em local onde permanece por um período de descanso, a fim de melhorar suas características de conformação. Por exemplo, no solo muito úmido, ocorre a perda da água para posterior utilização do mesmo. Para isso, pequenas amostras são coletadas para caracterização e definição das proporções de preparo e mistura (NUNES; RESENDE, 2013). Na Figura 2, são ilustrados dois tipos de solos para o processo de mistura.

Figura 2 – Armazenamento da matéria-prima para produção dos Blocos Cerâmicos Queimados: Solo extremamente argiloso (a), e Solo com maior porcentagem de areia (b).



(a)



(b)

Fonte: Do autor (2017).

3.3.3 Preparação da Mistura

Inicialmente é realizado a pré-mistura da matéria-prima que é depositada em um silo, onde é coletada por correias transportadoras e encaminhadas aos misturadores, a fim de se realizar a homogeneização, adição de água, redução de grão e o descanso da massa por um período de 24 a 48 horas (NUNES; RESENDE, 2013) antes da extrusão do bloco. Na Figura 3, é ilustrada a matriz de solo utilizado neste trabalho, logo após o processo de pré-mistura.

Figura 3 – Massa de solo logo após o processo de pré-mistura



Fonte: Do autor (2017).

3.3.4 Transporte e Laminação

Este processo consiste no transporte da mistura da massa cerâmica até os laminadores e destorroamento do solo a fim de se determinar o bom acabamento do produto e evitar perdas por trincas e outros defeitos durante o processo de extrusão (NUNES; RESENDE, 2013). O processo de transporte da massa por meio das correias transportadoras (a) e o processo de laminação da massa cerâmica (b), utilizadas neste trabalho são ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Processo de transporte da massa cerâmica entre os laminadores pelas correias transportadoras (a), Processo de Laminação e destorroamento da massa cerâmica (b).



(a)



(b)

Fonte: Do autor (2017).

3.3.5 Extrusão dos Blocos

O processo de extrusão que consiste em dar forma ao Bloco Cerâmico, ocorre a partir da aplicação de pressão em um volume de massa que é forçada a passar por uma matriz. Esta etapa consome mais de 15% do custo de produção pela alta demanda de energia e desgaste dos componentes (NUNES; RESENDE, 2013). Na Figura 5, é ilustrada a extrusora e o processo de extrusão dos blocos da empresa abordada neste estudo.

Figura 5 – Processo de extrusão da Cerâmica Sul de Minas



Fonte: Do autor (2017).

3.3.6 Corte

O corte é executado por meio de processo automatizado, os quais são responsáveis por determinar o comprimento exato das peças. Neste estudo, as amostras foram produzidas com 9 cm (largura) x 19 cm (altura) x 29 cm (comprimento). Depois de cortadas, as peças são encaminhadas para os carros transportadores onde passam por uma inspeção visual para prosseguir para o setor de secagem (NUNES; RESENDE, 2013). Na Figura 6, são ilustrados os equipamentos de corte e o carro transportador dos blocos crus.

Figura 6 – Equipamento de corte (a), e Carro transportador (b)



(a)



(b)

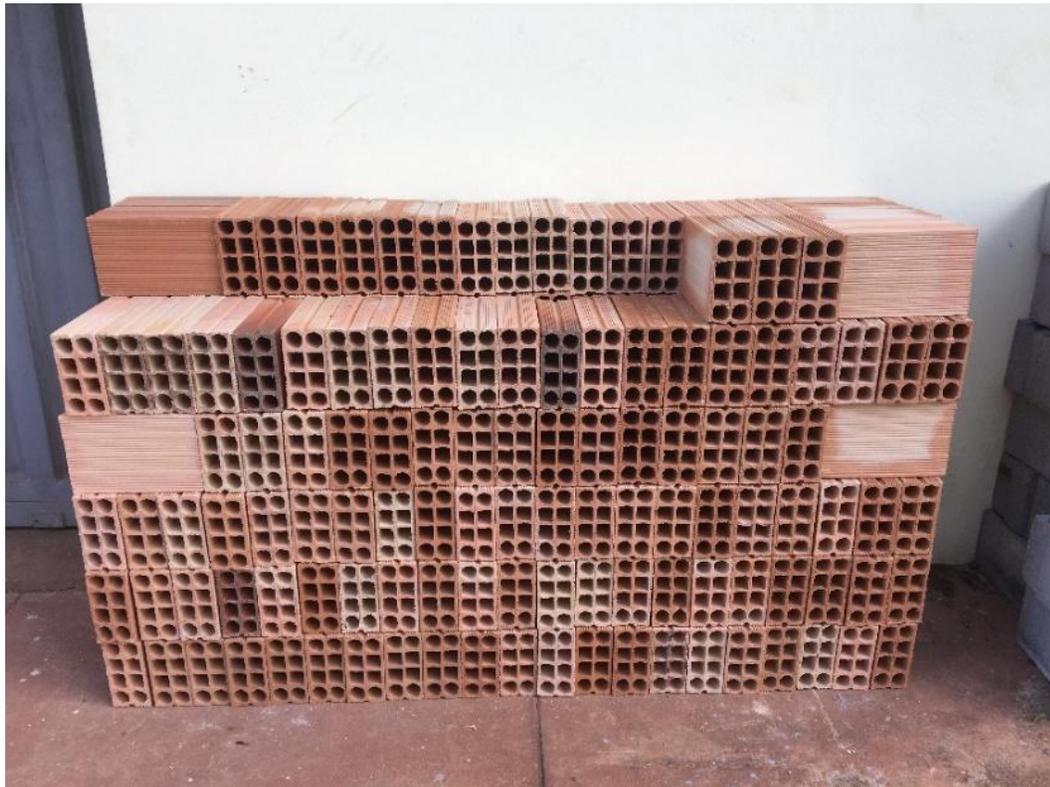
Fonte: Do autor (2017).

3.3.7 Secagem e Queima

A secagem dos blocos pode ocorrer de forma natural ou forçada. A secagem forçada é realizada continuamente pela passagem das amostras de blocos por um túnel aquecido por um período de 24 horas. As amostras após secagem, são levadas ao forno imediatamente, evitando-se choques e trepidações durante o transporte para não interferir na qualidade do produto (NUNES; RESENDE, 2013).

De acordo com (NUNES; RESENDE, 2013), as propriedades finais do produto são adquiridas durante o processo de queima, onde o tratamento térmico força as transformações físico-químicas dos blocos. Os blocos são submetidos a temperaturas que variam entre 800 °C a 1000 °C ocorrendo a perda de massa, desenvolvimento de fases cristalinas, formação da fase vítrea e a sinterização. Os lotes de blocos testemunha (sem adição de fibras) e blocos compósitos (com adição de fibras) ilustrados na Figura 7, foram queimados em forno tipo Vagão. Esses foram queimados em um único lote, portanto, com mesmo tempo de processamento e mesma temperatura de queima.

Figura 7 – Blocos testemunha e compósitos queimados em um mesmo lote.

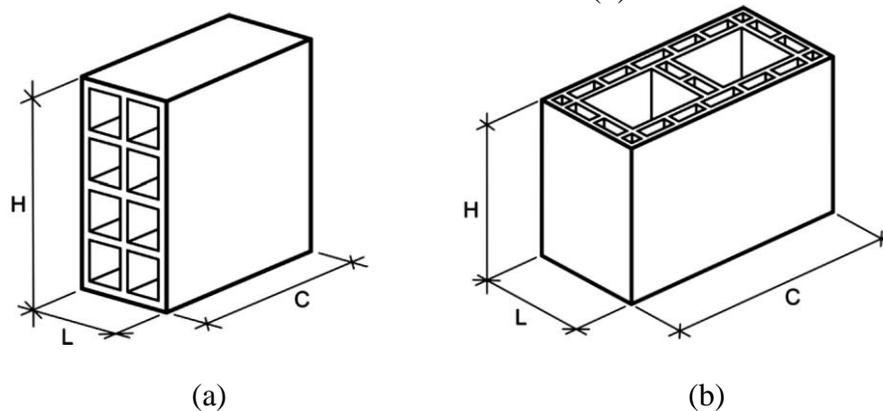


Fonte: Do autor (2017).

3.3.8 Caracterização de blocos cerâmicos

A ABNT NBR 15270/2005 define valores para caracterização física e mecânica para blocos cerâmicos estruturais e de vedação e ainda especifica as características mínimas que devem ser atendidas para a produção e comercialização dos blocos cerâmicos de vedação. Estes blocos devem ser utilizados com os furos na horizontal ou vertical como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Bloco cerâmicos de vedação com furos na horizontal (a) e Bloco cerâmicos estruturais com furos na vertical (b).

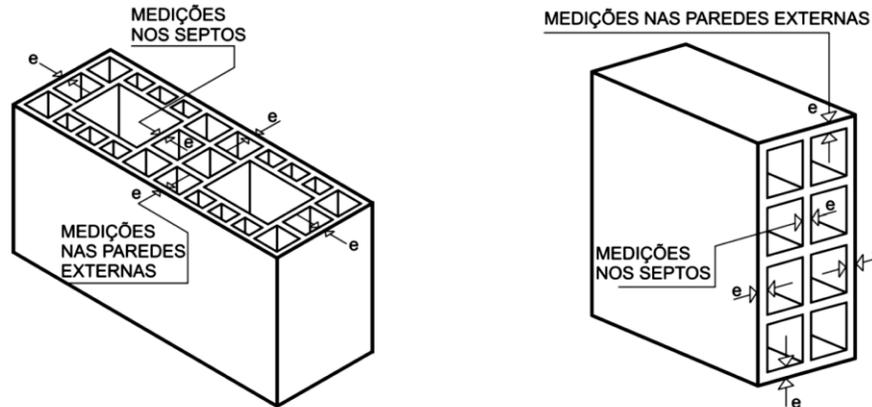


Fonte: ABNT NBR 15270-1/2005.

A tolerância dimensional do bloco cerâmico definida como Largura (L), Altura (H) e Comprimento (C) não podem exceder individualmente a ± 5 mm ou ± 3 mm quando comparados à média das dimensões efetivas.

As espessuras dos septos não devem ser menores que 6mm e a espessura das paredes externas não devem ser menores que 7mm. As posições de medição dos septos e paredes são ilustradas na Figura 9.

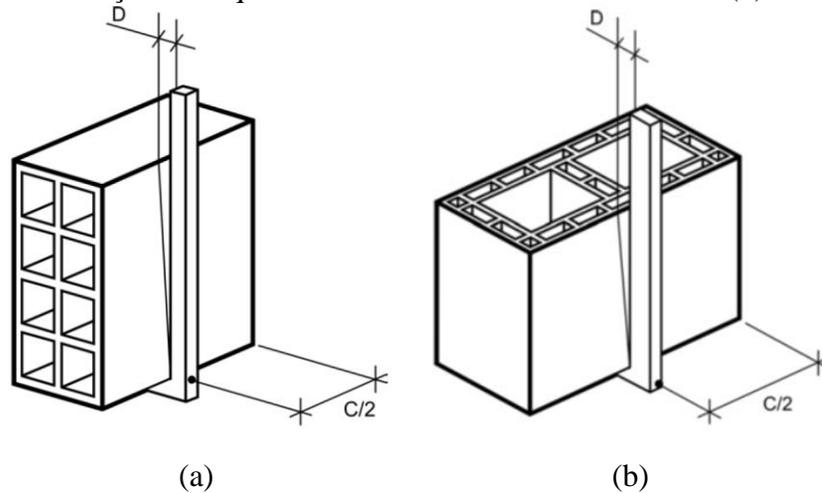
Figura 9 – Esquema para medição dos septos e paredes dos blocos cerâmicos.



Fonte: ABNT NBR 15270-1/2005.

Além da posição de assentamento, são ilustradas na Figura 10 outra característica geométrica importante que leva em consideração o empenamento dos blocos durante os processos de fabricação.

Figura 10 – Desvio em relação ao esquadro em bloco com furos na horizontal (a) e Desvio em relação ao esquadro em bloco com furos na vertical (b).



Fonte: ABNT NBR 15270-1/2005.

Segundo a ABNT NBR 15270-3:2005, os blocos cerâmicos devem ser classificados entre blocos de vedação ou estrutural, de acordo com a classe de resistência à compressão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos blocos cerâmicos quanto à resistência mecânica.

CLASSE	Resistência à Compressão Mínima, MPa
Vedação	1,5 MPa
Estrutural	3,0 MPa

Fonte: ABNT NBR 15270-3/2005.

3.4 Blocos cerâmicos compósitos

Dondi; Marsigli; Fabbri, (1997) apresentaram uma primeira revisão sobre a reutilização de resíduos industriais e urbanos para a produção de blocos cerâmicos. Esta revisão baseou-se em uma pesquisa de literatura desde 1977 cobrindo obras de países como Itália, Reino Unido, Espanha, Alemanha e EUA. O foco principal de Dondi; Marsigli; Fabbri, (1997) foi classificar os resíduos em 5 categorias associadas às principais características, que influenciam nas características do bloco cerâmico queimado, apresentando uma quantidade substancial de informações em termos de caracterização de resíduos, parâmetros de processo e propriedades de incorporação. A partir dessa revisão, concluiu-se que a utilização dos resíduos como aditivos às massas cerâmicas contribuiu para as melhorias das características dos blocos, como a redução de peso e o aumento do isolamento térmico.

Mais recentemente, Vieira e Monteiro (2009) em um levantamento bibliográfico, também avaliaram a incorporação de vários resíduos em BCQs. Nesta revisão, foram adotados diferentes resíduos incorporados às massas cerâmicas, a fim de melhorar a plasticidade das amostras assim como foi estudado anteriormente por Dondi; Marsigli; Fabbri, (1997). Em ambos os estudos concluiu-se que a utilização de resíduos como combustível para a queima e incorporação à massa, permite diminuição considerável de energia necessária para a queima dos blocos além de contribuir de forma substancial para uma economia no processamento de solos, manter a resistência mecânica e reduzir a energia incorporada no processo.

Eliche-Quesada, D. et al. (2011), avaliaram a adição de vários tipos resíduos industriais à massa cerâmica, como lodo de estação de tratamento de esgoto urbano, bagaço de cevada, lodo da estação de tratamento de água da indústria de fabricação de cerveja, resíduo da produção de azeite em moinhos e resíduo da produção de café para produzir blocos. O solo e os resíduos foram caracterizados por difração de raios X, fluorescência de raios X e termogravimetria, diferença de temperatura e análise química elementar. Os blocos foram fabricados de solo com proporção ideal

de resíduos. A influência da adição de resíduos na retração linear, densidade aparente, absorção de água e propriedades mecânicas e térmicas foram investigadas. A absorção de água aumentou para mais de 35%, quando o lodo de estação de tratamento de esgoto urbano, o lodo da estação de tratamento de água da indústria de fabricação de cerveja e o bagaço foram incorporados aos blocos, mas a resistência à compressão obteve uma redução máxima de 19% e o isolamento térmico aumentou em pelo menos 8%. A incorporação de resíduo da produção de café e as águas residuais da produção de azeite foi mais benéfica, com valores de resistência à compressão semelhantes aos blocos sem resíduos e obteve uma redução de 19% na condutividade térmica. O teste de absorção de água e a Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) indicaram que as mudanças nos resultados foram devidas ao tipo de porosidade formada, pela quantidade e pelo tipo de resíduo adicionado.

Recentemente Monteiro et al. (2014) e Zhang et al. (2013), investigaram o estado da arte para produção de blocos cerâmicos com adição de resíduos sólidos. O principal foco de Zhang (2013) foi comparar vários estudos sobre a produção de blocos compósitos utilizando a queima, cimentação e geopolimerização. Ambos os métodos de queima e cimentação foram indicados como grande consumidor de energia e liberaram grandes quantidades de gases de efeito estufa enquanto a geopolimerização deve ser uma tendência.

Monteiro et al. (2014) verificaram que a maioria dos trabalhos utilizando o método de combustão, publicados desde 1987, estavam relacionados a resíduos sólidos incorporados aos produtos de cerâmica. No estudo de caso particular do Brasil realizado por Monteiro et al. (2014), onde existe uma grande quantidade de várzeas para extração do solo que suprem uma extensa rede de indústrias de cerâmica, mostrou que os resíduos podem ser utilizados como combustível para a queima das cerâmicas, assim como para a incorporação à massa cerâmica a fim de melhorar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Este conceito reforçou a hipótese de que pelo menos para as próximas décadas, a incorporação de resíduos às massas cerâmicas parece ser a solução mais realista para a reciclagem de resíduos industriais em países como o Brasil, com grande potencial de produção de produtos cerâmicos.

A utilização de resíduos para substituir uma porção de solo para a produção de blocos de cerâmica queimados, vem sendo muito pesquisada por vários autores. Alguns dos principais estudos estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Estudos recentes sobre blocos cerâmicos compósitos queimados.

Item	Tipo de Resíduo Adicionados	Processo de Fabricação	Testes Conduzidos	Referência
1	Resíduos de Vidro (adição de 0,5 e 10 % de resíduo)	Queimado a 900, 950 e 1000° C	Resistência à compressão, absorção de água, densidade e porosidade.	Phonphuak et al. (2016)
2	Cinza de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar	x	Resistência à compressão, absorção de água, módulo de ruptura e porosidade aparente	Kazmi et al. (2016)
3	Polpa de Papel	Queima	Condutividade térmica em fachadas	Morales et al. (2016)
4	Casca de Café	Queima a 950° C	Resistência à compressão, absorção de água, densidade e porosidade.	Muñoz V. et al. (2016)
5	Lodo de Estação de tratamento de água (85 %) e Pó de granito (15 %)	Queimado a 850, 950, e 1050° C	Retração linear, Resistência à flexão e Absorção de Água	Wolff et al. (2015)
6	Biomassa de Estação de Tratamento	Queima a 1020° C	Absorção de Água, Densidade e Resistência Mecânica	Ukwatta et al. (2015)
7	Lodo, Cinza de carvão, de aterros, de casca de soja, serragem e flocos de girassol.	Queima de 900 a 950° C	Resistência Mecânica, Condutividade Térmica e Absorção de Água	Arsenović et al. 2013, 2015a
8	x	x	Avaliou o estado da arte da produção de Blocos Cerâmicos Compósitos	Zhang (2013)
9	Bagaço de Cana-de-açúcar (adição de até 20%)	Secado a 110 ° C por 24 h e depois queimado em um forno elétrico a 1100 ° C	Contração linear, absorção de água, densidade aparente, resistência mecânica	Faria et al. (2012)

Fonte: Do autor (2018).

3.5 Materiais compósitos com bagaço de cana-de-açúcar

Os materiais compósitos são produzidos por meio da mistura de dois ou mais tipos de matérias-primas que dão origem à um novo material vem sendo empregado na construção civil com o intuito de melhorar a qualidade dos produtos e diminuir os impactos ambientais causados pela extração ou descarte inadequado dessas matérias-primas.

Souza et al. (2011), utilizaram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), resíduo resultante da queima de bagaço em caldeiras na indústria sucroalcooleira, como aditivo para a produção de cerâmicas. Neste trabalho, as propriedades de corpos cerâmicos sinterizados foram avaliadas com base na concentração de CBCA, que substituiu material não plástico. A cinza foi misturada (até 60% em peso) com a matéria-prima (solo) e as amostras foram queimadas com temperaturas de até 1200 °C. Os resultados mostraram que, para temperaturas até 1000 °C, 20% em peso de cinzas podem ser incorporadas em solos para produzir blocos. Acima desta temperatura, os autores concluíram que até 60% em peso de cinzas podem ser incorporadas no solo para produzir blocos e telhas. Portanto, a cinza (CBCA) pode ser usada como aditivo para produzir materiais cerâmicos que atendem os padrões brasileiros (ABNT NBR 15270-1, 2005). Por isso, esse processo pode reduzir o volume de resíduos sólidos dispostos no meio ambiente e aumentar a vida útil das reservas de matérias-primas.

Teixeira et al. (2012) avaliaram o efeito do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) sobre o desempenho de compostos obtidos por extrusão, a partir de três diferentes misturas com BCA, utilizando celulose como micro reforço para melhorar a resistência ao aparecimento de microfissuras. Os compósitos foram preparados usando uma extrusora Auger de laboratório com câmara de vácuo e foram testados após 28 dias de cura em água e após 200 ciclos de envelhecimento acelerado. O módulo de ruptura (MOR) e a tenacidade (TE) dos compósitos extrudados foram avaliados por teste de flexão de quatro pontos. A absorção de água e o volume aparente foram determinados por imersão em água. O comportamento da microestrutura foi avaliado por porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados indicaram que a introdução de fibras maiores aumentou a tenacidade (TE) aos 28

dias e favoreceu uma maior quantidade de macro poros (0,1 a 1 mm). As observações por MEV confirmaram que a degradação das fibras ocorreu após 200 ciclos.

Faria et al. (2012) investigaram a utilização das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para blocos cerâmicos, por meio da substituição do solo natural em até 20% em peso. Inicialmente, a amostra com resíduos foi caracterizada por sua composição química, difração de raios X, análise térmica diferencial, tamanho de partícula, morfologia e potencial de poluição. As amostras dos BCQs foram preparadas e, em seguida, testadas, de modo a determinar suas propriedades tecnológicas (por exemplo, encolhimento linear, absorção de água, densidade aparente e resistência). A microestrutura sinterizada foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde verificou-se que o resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar é composto principalmente por partículas de sílica cristalina. Os resultados do teste indicaram que o resíduo de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar pode ser usado como enchimento em BCQs, aumentando, assim, a possibilidade de sua reutilização de maneira segura e sustentável.

3.6 Materiais compósitos com resíduos de vidro e plástico reforçado com Fibra de Vidro (PRVF)

Os materiais compósitos de resíduos de vidro ou de fibras de vidro tem sido estudado pelo fato de que a adição desses resíduos na composição de um compósito, agrega resistência mecânica aos mesmos, além de propiciar outros ganhos.

Phonphuak (2016) avaliou as propriedades físicas e mecânicas de blocos cerâmicos queimados compósitos de resíduo de vidro, a fim de reduzir a temperatura de queima. Foram incorporados os resíduos de vidro em porcentagens que variaram entre 0,5 e 10% em peso à massa cerâmica que foram queimadas em três temperaturas diferentes, (900, 950 e 1000 °C). A partir dos testes de resistência à compressão, absorção de água, densidade e porosidade, observou-se que a adição dos resíduos melhorou as propriedades dos blocos. Observou-se também que os blocos com 10% de resíduos de vidro queimados a 900 °C atingiram propriedades semelhantes aos blocos comuns, queimados a 1000 °C, que viabilizam a redução da temperatura de queima. Além disso, a fusão de quartzo cristalino com a argila também desempenhou um papel importante no aprimoramento das propriedades de blocos. A partir dos testes realizados, Phonphuak (2016)

concluiu que o resíduo de vidro pode ser utilizado na fabricação de blocos, a fim de melhorar suas propriedades físicas e mecânicas e reduzir a temperatura de queima.

3.7 Mistura de fibras para produção de blocos compósitos (Blocos Híbridos)

O uso de mais de um tipo de fibra na composição de blocos compósitos pode atingir bons resultados, quando exploradas as melhores características de cada material.

Tonoli et al. (2011), descrevem vários estudos sobre a aplicação de dois ou mais tipos de fibras em blocos solo-cimento, os quais demonstram a importância de se encontrar o ponto ótimo de utilização de cada tipo de fibra e a identificação da melhor combinação para melhorar a resistência mecânica, reduzir a capacidade de transferência de calor e melhorar as características químicas e físicas para facilitar o processo de fabricação.

A produção de blocos fibrocimento híbrido com fibra de vidro com resina e polpa de celulose melhoraram extremamente a dureza desse material (TONOLI et al., 2011).

3.8 Resíduos sólidos incorporados à matriz cerâmica

Um crescente número de trabalhos sobre a incorporação de resíduos sólidos aos blocos de cerâmica tem sido publicado em revistas científicas mundiais e apresentado em congressos. Segundo Monteiro e Vieira (2014), as primeiras caracterizações de resíduos para incorporação em BCQs foram realizados por (DONDI; MARSIGLI; FABBRI, 1997).

A gestão dos resíduos sólidos exige uma preocupação mundial com determinadas regiões do planeta onde os problemas ambientais vêm se agravando em consequência do acelerado processo de industrialização, em função da diversificação do parque industrial e a geração de ampla gama de resíduos.

Com base nos dados citados e nas boas características apresentadas em vários estudos realizados por vários autores sobre a reutilização da fibra do bagaço de cana-de-açúcar e a fibra de resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro, na formação de materiais compósitos, evidenciou-se que a adição dessas fibras aos blocos cerâmicos queimados, poderão melhorar suas características físicas, químicas e mecânicas, resultando em blocos mais leves, mais resistentes, de

melhor isolamento térmico e com menor demanda energética de produção (ADAZABRA; VIRUTHAGIRI; SHANMUGAM, 2017; ARSENOVIĆ et al., 2013, 2015a; KAZMI et al., 2016; MORALES et al., 2016; MUÑOZ V. et al., 2016; PHONPHUAK; KANYAKAM; CHINDAPRASIRT, 2016; UKWATTA et al., 2015; ZHANG, 2013).

3.8.1 Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo industrial resultante da produção de açúcar e etanol (FARIA et al., 2012; SOUZA et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2012). O bagaço obtido logo após a extração do suco da cana-de-açúcar pode ser utilizado como combustível para geração de energia por meio da queima ou até mesmo reutilizado para outros fins.

A produção brasileira de etanol atingiu um recorde em 2015 ao produzir 30 bilhões de litros, um crescimento de 6% em relação a 2014 (CONAB, 2016). Segundo levantamento publicado em 13/08/2015, o Brasil estima colher 655,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2015/2016. Um aumento de 3,2% em relação ao ciclo 2014/2015, de 634,8 milhões de toneladas.

Cerca de 66% da matéria-prima colhida será destinada à produção de 28,52 bilhões de litros de etanol, com redução de 0,5% em relação à safra passada. Em compensação está previsto um aumento de 4,8% na produção de açúcar, que deve atingir 37,28 milhões na safra 2015/2016, onde este número representa um incremento de 1,7 milhão de toneladas (CONAB, 2016).

Atualmente, o bagaço de cana-de-açúcar é utilizado como combustível em caldeiras para produzir vapor utilizados em processos fabris e também em turbinas para a produção de energia elétrica, que supre as necessidades energéticas da fábrica, sendo o excesso vendido na região. Aproximadamente 1000 kg de cana-de-açúcar gera 250 kg de bagaço de cana que gera 6 kg de cinzas (CONAB, 2016).

Segundo Faria et al. (2012) e Souza et al. (2011), a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), contém alta concentração de sílica além de óxidos de alumínio, ferro, álcalis e alcalino-terrosos em quantidades menores. Os resultados da análise química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar obtidos por Souza et al. (2011) estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar obtida por análise de fluorescência por raio x (XRF).

Componente	(%)
SiO ₂	85.5
Al ₂ O ₃	5.3
Fe ₂ O ₃	1.3
Na ₂ O	-
K ₂ O	3.5
CaO	2.1
MgO	1.1
MnO	0.1
TiO ₂	0.3
P ₂ O ₅	0.5
PF	-

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2011).

Teixeira et al. (2012) relatam que o bagaço remanescente da queima em caldeiras da indústria sucroalcooleira ainda é uma fonte de contaminação para o meio ambiente, por isso há um grande interesse em explorar novos aplicativos para fibras de bagaço de cana-de-açúcar.

3.8.2 Resíduo de Plástico reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)

O PRFV é um compósito formado pela mistura de um reforço (fibra de vidro) e a matriz polimérica (resina), podendo ser poliéster ou até mesmo outro tipo de resina e uma substância catalisadora de polimerização que forma um compósito, cuja técnica permite a obtenção de peças com grande variedade de formatos e tamanhos como piscinas, caixas d'água, cascos e hélices de barcos, carrocerias de veículos dentre outras. Por ser um material de baixo custo e de alta resistência mecânica, o plástico reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) tem grande aplicação mundial. O resíduo desse material pode ser reaproveitado na produção de vários materiais de construção.

Segundo Evangelista et al. (2012), as fibras obtidas por meio do processamento dos resíduos de lã de vidro possuem baixa condutividade térmica, baixa inércia e é um material muito refratário. As fibras são obtidas a partir de uma mistura de óxidos de Si, Al, B, Ca e Mg e são normalmente usadas como reforços para termoplásticos devido ao seu baixo custo. Este tipo de material é composto por filamentos muito finos de vidro, que se agregam por meio de aplicações de resinas, silicões, fenóis e outros compostos solúveis em solventes orgânicos.

De acordo com o boletim técnico da empresa Elekeiroz (2016), o PRFV é composto principalmente por 3 componentes: a resina, a fibra de vidro e o catalizador. As principais propriedades do PRFV estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades do Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (RPRFV).

Propriedades	Valores/Unidades
Densidade (25 °C)	1,10 g/cm ³
Viscosidade	330 – 350 cPs
Ponto de fulgor	31,00 °C
Resistência Máxima à Tração	40,20 Mpa
Módulo Elasticidade (Tração)	2,20 GPa
Resistência máxima à Flexão	84,20 Mpa
Módulo Elasticidade (Flexão)	2,80 GPa

Fonte: Adaptado do boletim técnico da empresa Elekeiroz (2016).

A adição desta fibra aos materiais de construção melhora as características do produto, deixando-os mais leves, com baixo teor de armazenamento de calor, alta resistência mecânica e não diminui a vida útil do produto. Além disso, a característica termo acústica da lã de vidro, é um dos melhores fatores que viabilizam seu uso na construção civil. Segundo a ABNT NBR 10004, (2004), os resíduos de lã de vidro são classificados como Classe II A – não perigosos e não inertes.

Tonoli et al. (2011), relatam que o uso de pequenas quantidades de fibra de vidro é responsável por manter a dureza do compósito. Desse modo, as fibras de vidro têm sido estudadas como alternativa na produção de vários materiais compósitos e tem grande vantagem sobre as fibras vegetais por possuírem alta ductilidade e são resistentes a ataques alcalinos. As fibras de vidro unifilar de aproximadamente 6mm de comprimento e 28 μ m apresentam 300MPa de resistência à tração e 3,3GPa de módulo de elasticidade, além disso, a adição da fibra de vidro aumenta 10% a absorção de água do compósito (TONOLI et al., 2007).

3.9 Sistema *fuzzy*

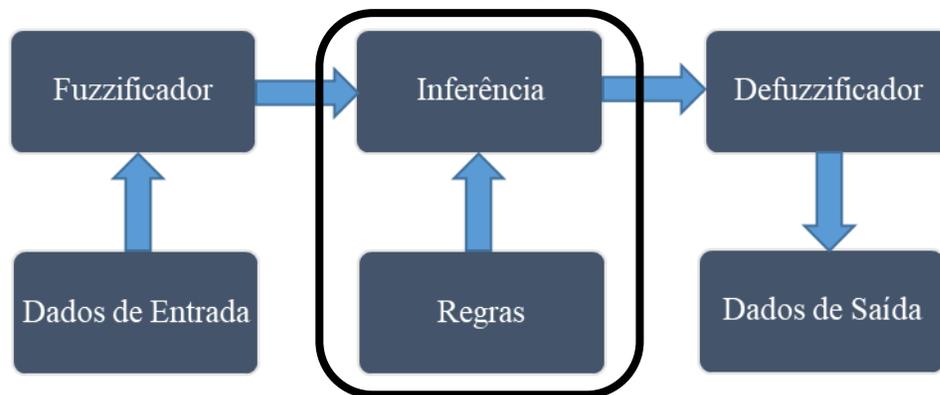
A teoria *fuzzy*, também denominada como teoria dos conjuntos nebulosos, foi estudada inicialmente pelo professor Lotfi A. Zadeh, em 1965 na Universidade da Califórnia em Berkeley, onde o mesmo publicou um artigo referente à teoria dos conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965). Neste estudo ele afirmou que os elementos podiam pertencer parcialmente a dois conjuntos diferentes o que foi entendido naquele tempo pela comunidade acadêmica como uma ideia imprecisa e contra as leis matemáticas.

Embasada pela teoria dos conjuntos *fuzzy*, essa lógica se distingue dos sistemas tradicionais em suas características e particularidades. Essa teoria apresenta respostas que podem pertencer a um conjunto intermediário ou a subconjuntos, que se difere da lógica binária, onde todos os valores são transformados em 1 - verdadeiro ou 0 - falso (GOMIDE; GUDWIN, 1994). Desta forma, os conjuntos *fuzzy* modificaram a ideia dos conjuntos clássicos, pois nele, um elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto. Além disso, permite-se a análise de valores inexatos, possibilitando o processamento destes valores e obter uma resposta, essencial no julgamento dos seres humanos acerca de uma questão que pode ter respostas diferentes de sim ou não (BARROS, 2002).

Os conjuntos *fuzzy* são alimentados pelas variáveis de entrada e de saída, e as funções de pertinência são determinadas para cada uma destas variáveis. Os valores reais de entrada são transformados em valores *fuzzy* e, em seguida, é realizada a ativação e combinação de acordo com o conjunto fornecido para o sistema. Além disso, as regras do modelo podem ser estabelecidas de acordo com os dados numéricos ou opiniões de especialistas. Após a combinação, os conjuntos *fuzzy* de saída se transformam em uma saída racional do sistema.

Na programação dos conjuntos *fuzzy* pode-se utilizar linguagem de programação específicas ou utilizar um *software* que tenha o modelo matemático como algoritmo pré-programado. As principais etapas ou processos do modelo são a fuzzificação (converte os valores de entrada em valores *fuzzy*), inferência (determina os valores de saída com base nos sistemas de regras pré-estabelecidos) e defuzzificação (converte os valores *fuzzy* em valores numéricos) (Figura 11).

Figura 11 – Esquema computacional *fuzzy*.



Fonte: Do autor (2018).

O modelo *fuzzy* é amplamente utilizado em sistemas computacionais, aplicados no controle dos processos de fabricação, como o modelo *fuzzy* desenvolvido por Arsenović et al. (2013), para prever a melhor característica química do solo utilizado para produção de blocos para diferentes finalidades, onde observou-se que o modelo foi adequado quando apresentou um coeficiente de variação (CV) entre os valores simulados e observados para resistência mecânica à compressão (RM) e absorção de água (AA) menores que 10%, que indicaram uma ótima performance do modelo *fuzzy*, como ferramenta para a predição e aprimoramento da composição química de uma matriz cerâmica.

Nazari (2012) também utilizou a lógica *fuzzy* para criar um modelo que avaliasse o índice de absorção de água (AA) em geopolímeros leves com adição de cinza de casca de arroz e óleo de palma, a partir de dados experimentais, observando que os resultados de treinamento, validação e

teste do modelo *fuzzy* se mostraram potencialmente fortes para prever a absorção de água das amostras de geopolímeros.

Pesquisas associadas ao conforto térmico nas edificações demonstram que a lógica *fuzzy* tem grande potencial de aplicação na área de construções e ambiência (AMENDOLA; NETO; CRUZ, 2005; GATES; CHAO; SIGRIMIS, 2001), assim como na suinocultura (QUEIROZ; NÄÄS; SAMPAIO, 2005) e bovinocultura (FIRK et al., 2003).

A modelagem *fuzzy* apresenta eficiência em aplicações onde respostas como “sim” e “não” são insuficientes ou imprecisas, auxiliando nas tomadas de decisões (ARSENOVIĆ et al., 2013). Portanto, o potencial de emprego da metodologia *fuzzy* para predizer a melhor matriz cerâmica para a produção de BCQs de vedação é evidente.

3.10 Aplicação da lógica *fuzzy* na construção civil

A escolha da matriz cerâmica (solo mais resíduos) para melhorar as características físicas, químicas e mecânicas de blocos compósitos dependem das variáveis de entrada como: o tipo de solo, as características físicas, químicas e mecânicas dos resíduos e o processo de produção dos mesmos. Para uma melhor tomada de decisão é necessário desenvolver algoritmos de controle, como a metodologia *fuzzy*, que devido a inúmeras aplicações, tem se mostrado uma ferramenta adequada para esse tipo de análise.

Arsenović et al. (2013), utilizaram a lógica *fuzzy* para determinar a melhor composição do solo e a melhor temperatura de queima de blocos cerâmicos na indústria. Para isso, foi utilizado a função trapezoidal com valores de intervalo ótimo pré-definidos para a resistência à compressão e absorção de água, para cada um dos três grupos de produtos abordados, que foram: Grupo I - blocos sólidos, Grupo II - blocos furados e Grupo III - Elementos de fachada. Para implementar a lógica *fuzzy*, foram utilizados dez dados de entrada: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 e a temperatura de queima. Já como variáveis de saída foram adotados a resistência à compressão e o índice de absorção de água. Para essa modelagem, foi utilizada a Equação 1, com o auxílio do software Microsoft Excel 2007 para o desenvolvimento do algoritmo e processamento dos dados. A partir dos resultados obtidos para os valores ótimos da composição química e temperatura de queima das amostras, dentro dos três grupos citados, comparados com valores

ótimo obtidos por ANOVA e análise polinomial, concluiu-se que a lógica *fuzzy* pode ser usada em diferentes áreas de pesquisa de materiais com relações de parâmetros não-lineares.

$$A(x, a, m, n, b) = \begin{cases} a \leq x < m, & \frac{x-a}{m-a} \\ m \leq x < n, & 1 \\ n \leq x < b, & 1 - \frac{x-n}{b-n} \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

x = valores de resistência à compressão e índice de absorção de água

a e b = intervalo em que os valores medidos ocorreram

m e n = intervalo esperado de valores ótimos para variáveis de saída, escolhido para determinados grupos de produtos.

Arsenović et al. (2015), utilizaram a lógica *fuzzy* a partir da função trapezoidal para analisar a incorporação de resíduos como o lodo orgânico e inorgânico, pó de carvão, casca de soja, serragem, casca de girassol e suas cinzas para a produção de blocos cerâmicos compósitos. Para isso, foram determinados os intervalos dos valores ótimos para a caracterização dos blocos, quanto a absorção de água, a resistência à compressão, a perda de massa durante a queima e retração, com base no uso final de cada produto. Os resultados mostraram que as cascas de girassol, a serragem, a casca de soja e o lodo orgânico são melhores para serem utilizados na produção de blocos sólidos. O pó de carvão e lodo inorgânico, são melhores para ser utilizados na produção de blocos furados. A cinza da casca de girassol pode ser adicionada em maior quantidade ao solo para produzir blocos ou em menor quantidade para produzir telhas. A adição de cinzas volantes de 50% em peso permite a produção de telhas. A temperatura ideal para produção de blocos sólidos e ocos são respectivamente 900 e 950 °C.

Além da construção civil, a metodologia *fuzzy* vem sendo empregada em diversas áreas, como em construções e ambiência (GATES et al., 2001; AMENDOLA et al., 2005; YANAGI JUNIOR et al., 2006; QUEIROZ et al., 2005), produção de animais (FIRK et al., 2003; FERREIRA

et al., 2012), e até mesmo na biomedicina (ORTEGA, 2001; WEBER & KLEIN, 2003) que obtiveram modelos muito satisfatórios para cada aplicação.

Ferreira et. al. (2010) afirmam que estudos comprovam a eficiência na utilização da lógica *fuzzy* para contribuir na tomada de decisões, onde há presença de incerteza nas afirmações de “sim” e “não”.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor da construção demanda um alto gasto energético, uma grande quantidade de recursos naturais e é um grande emissor de CO₂ na atmosfera. A busca por alternativas que possam associar sustentabilidade na construção é evidente. Portanto, a utilização de resíduos industriais como fonte de matéria-prima para a produção dos Blocos Cerâmicos Queimados, visa diminuir o impacto socioambiental regional, além de em alguns casos, aumentar a qualidade do produto em termos físicos e mecânicos.

Os solos utilizados para a produção dos BCQs devem apresentar concentrações de sílica (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de cálcio (CaO) entre 45% e 60%, 10% e 20%, 0% e 10% e 0% e 10% respectivamente. O limite de plasticidade deve variar entre 15 a 30%, o limite de liquidez entre 30 a 60% e o índice de plasticidade entre 10 a 30%. Além disso o solo deve ser classificado como argiloso.

A adição de FBCA e FPRFV à matriz cerâmica, pode melhorar as características físicas, químicas e mecânicas dos blocos, resultando em blocos mais leves, mais resistentes e de melhor isolamento térmico.

A utilização dos resíduos sólidos como aditivos às massas cerâmicas contribui para as melhorias das características dos blocos, como a resistência mecânica à compressão, redução de peso e o aumento do isolamento térmico. Portanto, para as próximas décadas, a incorporação de resíduos às massas cerâmicas pode ser uma solução mais realista para a reciclagem de resíduos industriais em países como o Brasil, com grande potencial de produção de produtos cerâmicos.

Na determinação da melhor matriz cerâmica compósita para a produção de BCQs, pode-se utilizar ferramentas e técnicas de modelagem computacional, como sistemas especialistas inteligentes capazes de executar tarefas ou resolver problemas a partir de uma base de conhecimento. Os sistemas mais utilizados e testados para a predição são a lógica *fuzzy* e as redes neurais artificiais. Portanto, o potencial de emprego da metodologia *fuzzy* para predizer a melhor matriz cerâmica para a produção de BCQs de vedação é promissor, pelos vários estudos já realizados, onde foram encontrados ótimos fatores de correlação entre as saídas do modelo e os valores observados experimentalmente.

REFERÊNCIAS

ADAZABRA, A. N.; VIRUTHAGIRI, G.; SHANMUGAM, N. Management of spent shea waste: An instrumental characterization and valorization in clay bricks construction. **Waste management**, New York, v. 64, p. 286–304, 2017.

AMENDOLA, M.; NETO, M. M.; CRUZ, V. F. Using fuzzy sets to analyze environmental condition in order to improve animal productivity. **Biomatemática**, Campinas, v.15, p. 29-40, 2005.

ARSENOVIĆ, M. et al. Prediction and fuzzy synthetic optimization of process parameters in heavy clay brick production. **Ceramics International**, v. 39, n. 2, p. 2013–2022, 2013.

ARSENOVIĆ, M. et al. Mathematical approach to application of industrial wastes in clay brick production - Part I: Testing and analysis. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 4890–4898, 2015a.

ARSENOVIĆ, M. et al. Mathematical approach to application of industrial wastes in clay brick production—Part II: Optimization. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 4899–4905, 2015b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**. Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3**. Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005c.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA – ANICER. **Relatório Anual**. 2015. Disponível em: < https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/11/relatorio_2015.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

BARROS, L. C. **Teoria fuzzy x biomatemática**. Campinas: IMECC- UNICAMP, 52p. 2002.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2015/16**. Quarto levantamento, Brasília, v. 3, n. 4, p. 1-154, janeiro 2016.

DONDI, M.; MARSIGLI, M.; FABBRI, B. Recycling of Industrial and urban wastes in brick production : A review. **Tile & brick international**, v. 13, n. 3, p. 218–225, 1997.

ELICHE-QUESADA, D. et al. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. **Applied Clay Science**, v. 52, n. 3, p. 270–276, 2011.

ELICHE-QUESADA, D. et al. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 463–475, 2017.

EVANGELISTA, N.; TENÓRIO, J. A. S.; OLIVEIRA, J. R. . Pozolanicidade dos resíduos industriais, lã de vidro e lã cerâmica. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 1, p. 79–85, 2012.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 7–12, 2012.

FERREIRA, L. et al. Desenvolvimento de uma rede neuro-fuzzy para predição da temperatura retal de frangos de corte. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 221-233, 2010.

FERREIRA, L. et al. A fuzzy system for cloacal temperature prediction of broiler chickens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n.1, p.166-171, jan. 2012.

FIRK, R. et al. Improving oestrus detection by combination of activity measurements with information about previous oestrus cases. **Livestock Production Science**, v. 82,n. 1, p. 97-103, 2003.

FREEDONIA GROUP. Brick and block: US industry study with forecasts for 2014 & 2019. 2010. Disponível em: < <https://www.freedoniagroup.com/brochure/26xx/2652smwe.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de resíduos sólidos industriais: ano base 2014**. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: < http://www.feam.br/images/stories/declaracoes_ambientais/inventarios_industriais/Invent%C3%A1rio_Res%C3%ADuos_S%C3%B3lidos_Industriais__2015_ano_base_2014.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2016.

GARCÍA-TEN, J. et al. Thermal conductivity of traditional ceramics: Part II: Influence of mineralogical composition. **Ceramics International**, v. 36, n. 7, p. 2017–2024, 2010.

GATES, R. S.; CHAO, K.; SIGRIMIS, N. Identifying design parameters for fuzzy control of staged ventilation control systems. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v. 31, p. 61-74, 2001.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica *fuzzy*. **SBA controle & Automação**, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994.

KAZMI, S. M. S. et al. Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 372–378, 2016.

MARTÍNEZ, M. L. et al. Utilization of bagasse from the beer industry in clay brick production for building. **Materiales de Construcción**, v. 62, n. 306, p. 199–212, 2012.

MICHOT, A. et al. Thermal conductivity and specific heat of kaolinite: Evolution with thermal treatment. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 14, p. 2639–2644, 2008.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 599–610, 2014.

MORALES, M. P. et al. Influence of the type of lightweight clay brick on the equivalent thermal transmittance of different types of façades on buildings. **Materiales de Construcción**, v. 66, n. 323, p. 096, 2016.

MUÑOZ VELASCO, P. et al. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 241–252, 2016a.

MUÑOZ VELASCO, P. et al. Eco-fired clay bricks made by adding spent coffee grounds: a sustainable way to improve buildings insulation. **Materials and Structures**, v. 49, n. 1-2, p. 641–650, 2016b.

NAZARI, A. Fuzzy logic for prediction water absorption of lightweight geopolymers produced from waste materials. **Ceramics International**, v. 38, n. 6, p. 4729-4736, 2012.

NUNES, A. C. N.; RESENDE, S. S. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte: Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) e Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM), 2013. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2018.

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da teoria de Conjuntos *Fuzzy* a problemas da biomedicina**. 2001. 152 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PHONPHUAK, N.; KANYAKAM, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, n. 4, p. 3057–3062, 2016.

QUEIROZ, M. P. G.; NAAS, I. A.; SAMPAIO, C. A. P. Estimating thermal comfort of piglets considering ammonia concentration. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v.3, sep. 2005.

RAMOS, S. O. et al. Caracterização de argilas usadas para cerâmica estrutural. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5, n. 3, p. 65–70, 2010.

SCHIASSI, L. et al. Modelagem *Fuzzy* aplicada na avaliação do desempenho de frangos de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 140-146, 2015.

SILVA, D. W. et al. Cementitious Composites Reinforced with Kraft Pulping Waste. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 390–398, 2016.

SOUZA, A. E. et al. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 10, p. 2774–2780, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. DE; 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.

TEIXEIRA, R. S. et al. Extruded Cement Based Composites Reinforced with Sugar Cane Bagasse Fibres. **Key Engineering Materials**, v. 517, p. 450–457, 2012.

TONOLI, G. H. D. et al. Performance and Durability of Cement Based Composites Reinforced with Refined Sisal Pulp. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 22, n. 2, p. 149–156, 2007.

TONOLI, G. H. D. et al. Hybrid Reinforcement of Sisal and Polypropylene Fibers in Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 2, p. 177–187, 2011.

UKWATTA, A. et al. Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 76–85, 2016.

UKWATTA, A.; MOHAJERANI, A. Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 11–22, 2017.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima. **Cerâmica**, v. 49, n. 312, p. 245-250, 2003.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Incorporation of solid wastes in red ceramics: an updated review. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 881–905, 2009.

WEBER, L.; KLEIN, P. A. T. **Aplicações da lógica fuzzy em software e hardware**. Canoas: Editora ULBRA, 112p. 2003.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 282–289, 2015.

XU, Y. et al. The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick. **Ceramics International**, v. 40, n. 6, p. 8833–8840, 2014.

ZADEH, L. A. *Fuzzy Sets*. **Information and Control**. New York, v.8, n. 3, p.338-353, 1965.

ZHANG, L. Production of bricks from waste materials - A review. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 643–655, 2013.

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1 - FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS QUEIMADOS EM ESCALA INDUSTRIAL: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO E BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Artigo redigido de acordo com a norma NBR 6022 (ABNT 2003).

**FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS COMPÓSITOS EM ESCALA INDUSTRIAL:
Utilização de resíduos de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro e Bagaço de Cana-de-
Açúcar.**

RESUMO: Os Blocos Cerâmicos Queimados (BCQs) são os materiais de construção mais utilizados em todo o mundo para a composição de alvenarias de vedação ou estrutural. A fabricação desses blocos é realizada a partir da utilização de recursos minerais limitados (Solo), o que pode acarretar em escassez desse importante material de construção a longo prazo. A fim de tornar as construções mais sustentáveis, a incorporação de resíduos sólidos industriais pode minimizar esse impasse, melhorar as características físicas e mecânicas dos BCQs, além de evitar o despejo inadequado de resíduos no meio ambiente. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da incorporação de dois resíduos sólidos industriais à matriz cerâmica, sendo eles o Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) e o Bagaço de Cana-de-Açúcar (BCA). Os resíduos foram triturados e transformados em fibras, e estas, posteriormente foram adicionadas à matriz cerâmica para a produção de amostras de BCQs, com porcentagens de adição de 1,25%, 2,50%, 5,00% e 7,50%. Observou-se que as adições destes resíduos melhoraram a resistência mecânica dos blocos, com destaque para a adição de fibra de PRFV em porcentagem de 2,5% e 5,0%, que aumentaram a resistência em 49,18% e 47,54%, respectivamente, e para a adição conjunta de 2,5% de FPRFV e 1,25% de FBCA (híbrido), que aumentou a resistência em 40,16%, quando comparados ao bloco testemunha. A partir do teste de análise química por fluorescência por raio-X, pôde-se observar que as amostras de blocos com adição de PRFV apresentaram maiores concentrações de SiO₂, o qual proporcionou maior resistência ao compósito. Na análise termogravimétrica, observou-se que na faixa de temperatura de queima dos blocos de 850 a 1000°C, todo o bagaço de cana-de-açúcar foi transformado em cinzas, enquanto o PRFV apresentou uma perda de massa de aproximadamente 55%. Por fim, a partir de imagens obtidas por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV), verificou-se que a melhor aderência à matriz cerâmica foi dada pela adição de PRFV, demonstrando assim que o resíduo de PRFV pode ser incorporado aos BCQs, tornando seu uso adequado à construção Civil.

Palavras-chave: Bloco Compósito, Solo, Caracterização, Resistência e Sistema *fuzzy*.

MANUFACTURE OF COMPOSITE CERAMIC BRICKS IN INDUSTRIAL SCALE: Use of Plastic Reinforced with Fiber Glass Residue and Sugarcane Bagasse.

ABSTRACT: Burnt Ceramic Bricks (BCBs) are widely used building materials worldwide for the composition of structural or closing masonry. The manufacture of these bricks is made from the use of limited mineral resources, which can lead to a shortage of this important building material in long terms. In order to make buildings more sustainable, the incorporation of industrial solid waste can minimize this impasse, improve the physical and mechanical characteristics of BCBs, and prevent the inappropriate disposal of waste in the environment. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of the incorporation of two industrial solid residues to the ceramic matrix, which were the Reinforced Plastic with Fiber Glass (PRFG) and Sugarcane Bagasse (SCB). The residues were ground and processed to fibers and then added to the ceramic matrix for the production of BCBs samples, with the addition percentages of (1.25%, 2.50%, 5.00% and 7.50%). It was observed that the additions of these residues improved the compressive strength (CS) of the blocks, with emphasis on the addition of 2.5% and 5.0% PRFV fibers, which increased resistance by 49.18% and 47.54 %, respectively, and for the addition of 2.5% FPRFV and 1.25% FBCA (hybrid), which increased the resistance by 40.16% when compared to the control brick sample. From the X-ray fluorescence chemical analysis, it was observed that the samples of bricks with addition of PRFV showed higher concentrations of SiO₂, which provided greater resistance to the composite. In the thermogravimetric analysis, it was observed that in the temperature range of burning of the bricks from 850 to 1000 ° C, all the sugarcane bagasse was converted to ash, while the PRFG showed the mass loss of about 55%. Finally, from the images obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM), it was verified that the best adherence to the ceramic matrix was given by the addition of PRFG, thus demonstrating that the PRFG residue can be incorporated into the BCBs, making its use suitable for civil construction.

Key words: Composite Bricks, Clay, Characterization, Compressive strength and *Fuzzy* System.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é um dos principais setores que alavanca a inovação tecnológica no ramo da engenharia. Nesse ramo, encontra-se a indústria de produtos à base de cerâmica vermelha, que produz vários tipos de materiais de construção, como o Bloco Cerâmico Queimado (BCQ), amplamente utilizado na construção civil. Esse material de construção é produzido a partir de solo moldado e queimado em fornos a altas temperaturas, sendo utilizados como elemento de vedação ou estrutural.

No Brasil, embora haja muitas alternativas disponíveis no mercado, os BCQs furados são os mais comuns e devem atender às recomendações da ABNT NBR 15270/2005. Para atingir estas recomendações a escolha de boas fontes de matéria-prima é fator importante. As matérias-primas tradicionais são: a argila, a areia e os aditivos que podem ser usados para melhorar as propriedades do produto final.

De acordo com a FEAM (2015), mais de 78 milhões de toneladas de resíduos industriais são produzidos no estado de Minas Gerais/Brasil. Estes resíduos são alguns dos mais graves problemas que afetam e degradam o meio ambiente, causando a contaminação de cursos d'água e do solo por meio do descarte inadequado.

Em 2014, foram gerados quase 10 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, representando 12,66% e no setor dos minerais não metálicos (fibra de vidro), quase 31 milhões de toneladas de resíduos correspondendo a 39,24% dos 10 resíduos industriais mais gerados no estado de Minas Gerais. Juntos, os resíduos de bagaço de cana-de-açúcar e os minerais não metálicos são responsáveis pela geração de mais de 50% desses resíduos (FEAM 2015).

Com base nos estudos realizados por vários autores, propõe-se a confecção de blocos compósitos de FPRFV ou FBCA e híbridos (utilizando as duas fibras juntas), vislumbrando a melhoria das características físicas, químicas e mecânicas, resultando em blocos mais leves, mais resistentes, de melhor isolamento térmico e com menor demanda energética de produção (ADAZABRA; VIRUTHAGIRI; SHANMUGAM, 2017; ARSENOVIĆ et al., 2013, 2015a; KAZMI et al., 2016; MORALES et al., 2016; MUÑOZ V. et al., 2016; PHONPHUAK; KANYAKAM; CHINDAPRASIRT, 2016; UKWATTA et al., 2015; ZHANG, 2013).

Este estudo se justifica pelo reaproveitamento dos resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro (RPRFV) e bagaço de cana-de-açúcar (BCA), além da falta de conformidade na produção de BCQs de origem das cerâmicas do Sul de Minas Gerais.

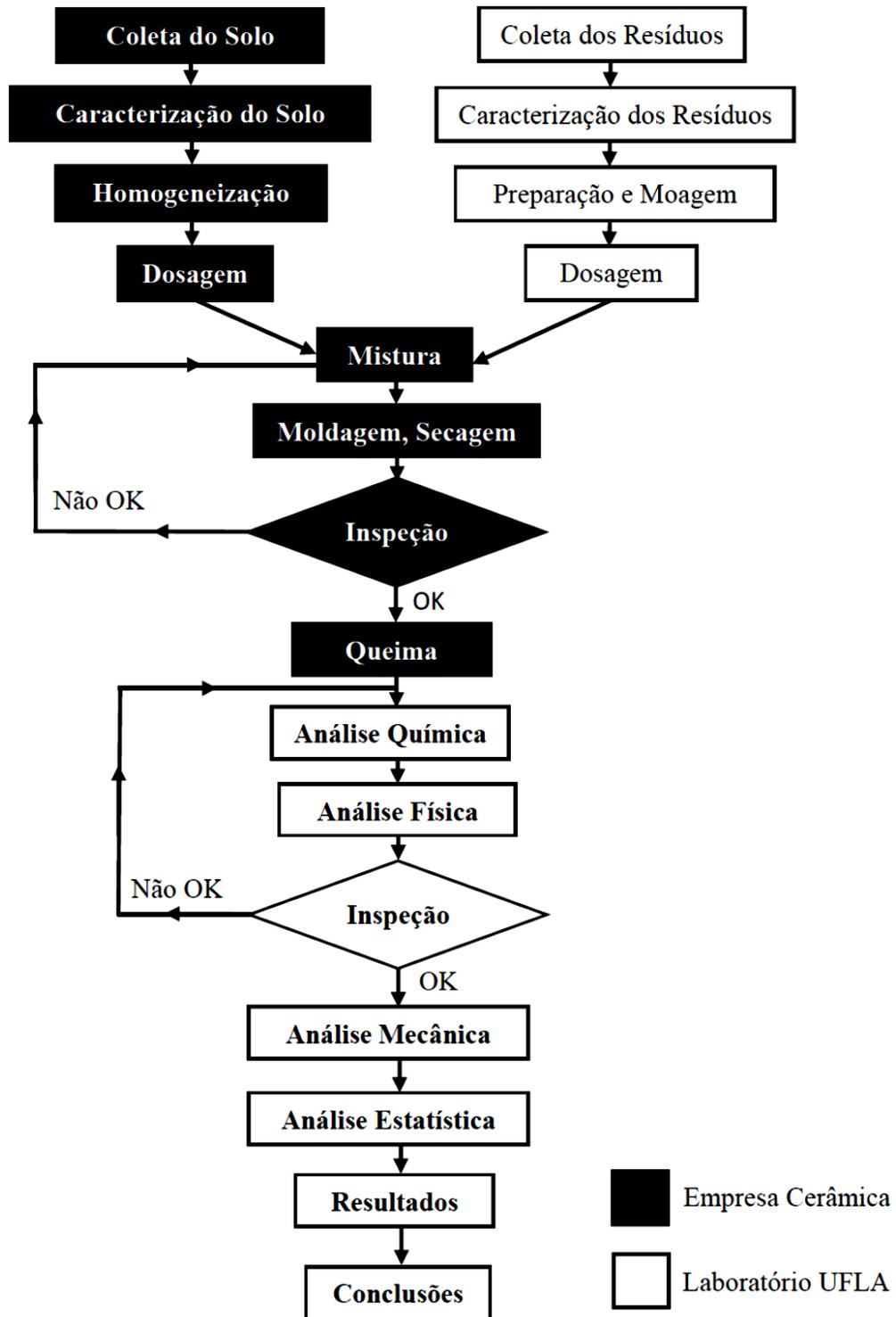
Neste contexto, o objetivo deste estudo foi caracterizar o solo utilizado para a produção dos blocos cerâmicos queimados por meio de análises físicas e químicas, bem como caracterizar as fibras dos resíduos (FBCA e FPRFV) para produção de blocos cerâmicos queimados compósitos e avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas de blocos compósitos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Etapas do projeto

Este trabalho foi desenvolvido de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1. Os quadros destacados em preto, apresentam as etapas que foram desenvolvidas na empresa Cerâmica Sul de Minas. Estes quadros abrangem a produção dos BCQ's, que contemplou o acompanhamento dos processos desde a extração do solo, armazenamento dos mesmos, preparação da mistura, transporte e laminação, extrusão dos blocos, corte, secagem e queima. Nos quadros brancos são abordados todos os testes realizados neste estudo, desenvolvidos em laboratórios da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os testes para caracterização física e química do solo foram realizados no laboratório de análise de solos do departamento de ciências dos solos (DCS). Os testes de Absorção de Água e de Condutividade Térmica foram realizados na Unidade Experimental de Painéis de Madeira – (UEPAM). Os testes de Resistência à Compressão foram realizados no laboratório de Resistência dos Materiais e Mecânica das Estruturas do departamento de engenharia (DEG). E por fim a Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV), utilizada para avaliar a estrutura interna das amostras, foi realizada no laboratório de microscopia do departamento de fitopatologia da UFLA.

Figura 1 – Etapas do projeto.

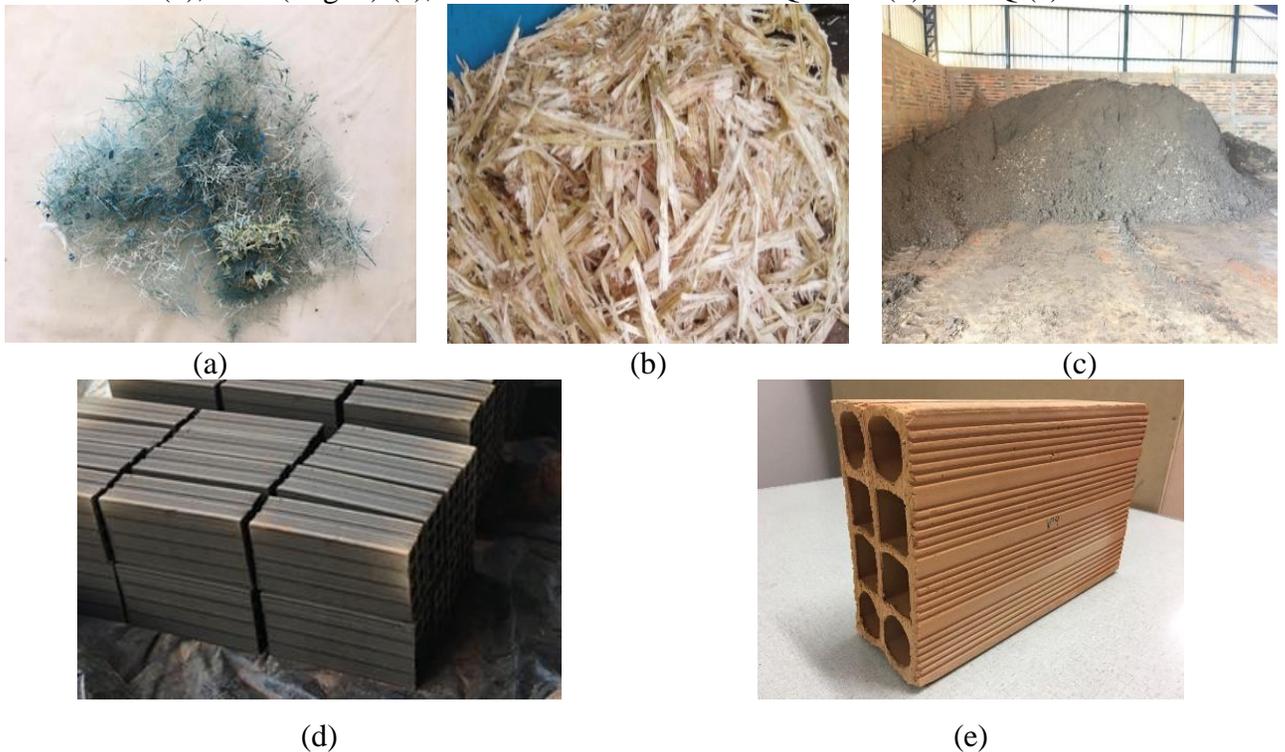


Fonte: Do autor (2017).

2.2 Coleta do Solo e Resíduos

As matérias-primas utilizadas para realização deste trabalho estão apresentadas na Figura 2. Estes materiais foram provenientes de doações de três empresas situadas nas cidades de Lavras e Perdões no Sul de Minas Gerais/Brasil. O resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (RPRFV) utilizado para a produção da Fibra de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (FPRFV), foi doado por uma empresa de fabricação de caixas d'água situada na cidade de Lavras-MG. O bagaço de cana-de-açúcar (BCA) que posteriormente foi processado para a produção das fibras do bagaço de cana-de-açúcar (FBCA) foi doado por uma empresa de produção de cachaça, situada na cidade de Perdões. Os solos, *in natura*, principal matéria-prima para a produção dos blocos cerâmicos, os blocos cerâmicos obtidos por extrusão antes da queima e os blocos queimados foram cedidos por uma cerâmica situada na cidade de Perdões-MG.

Figura 2 – Resíduo de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (a), Bagaço de Cana-de-Açúcar (b), Solo (Argila) (c), Bloco Cerâmico Antes da Queima (d) e BCQ (e).



Fonte: Do autor (2017).

2.3 Caracterização do solo (Argila) para produção dos Blocos

Para avaliar a composição química do solo utilizado para a fabricação dos blocos comuns (testemunha) e dos blocos compósitos, foram extraídas 3 amostras do mesmo e posteriormente foram feitas três leituras em cada amostra utilizando a técnica de Fluorescência por Raio X por meio de um Analisador químico portátil que trabalha por dispersão de energia. Com este equipamento cerca de 30 elementos da tabela periódica podem ser identificados em concentrações acima de 5 ppm.

Foi realizada a classificação textural do solo, que consiste na obtenção das porcentagens de argila, silte e areia, bem como os testes de Limites de Consistência, os quais foram realizados conforme Eliche-Quesada et. al. (2011); Souza et al., (2011); Faria et. al. (2012); Ukwatta et. al (2015) e Kazmi et. al. (2016).

2.4 Preparação e caracterização das fibras dos resíduos para a produção dos blocos cerâmicos compósitos queimados (BCCQs)

As características químicas da fibra do bagaço de cana-de-açúcar (FBCA) e das fibras do resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) foram obtidas por meio de fluorescência por raio X, por meio de um analisador químico portátil que trabalha por dispersão de energia para analisar amostras de distintos materiais.

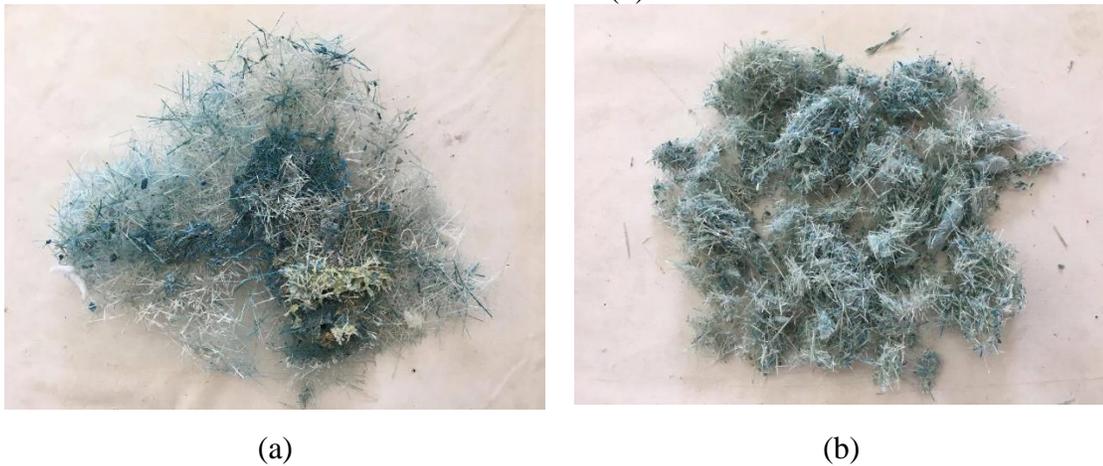
Os resíduos industriais utilizados neste trabalho como aditivos para a produção dos blocos compósitos foram o plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) e o bagaço de cana-de-açúcar (BCA). Estes resíduos foram escolhidos por demandarem um elevado custo no descarte adequado de grandes volumes e por possuírem características químicas (SiO_2) que beneficiam o processo de queima dos BCQs durante sua fabricação, que conseqüentemente acarretam melhorias nas características físicas e mecânicas dos mesmos (FARIA et al., 2012; PHONPHUAK et al., 2016).

2.4.1 Resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (RPRFV)

O RPRFV ilustrado na Figura 3 (a), foi coletado na área de resíduos de uma empresa da cidade de Lavras-MG. Este resíduo é proveniente das rebarbas e sobras do processo de fabricação de caixas d'água e piscinas, dentre outros produtos fabricados com a mesma matéria-prima.

O RPRFV foi triturado em triturador forrageiro com a utilização de peneira com malha de aproximadamente 8mm a fim de manter-se uma granulometria padrão. A fibra do RPRFV logo após ser triturado é ilustrada na Figura 3 (b).

Figure 3 – Resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (RPRFV) (a), fibra triturada a partir do RPRFV (b).



Fonte: Do autor (2017).

De acordo com o boletim técnico da empresa Elekeiroz (2016), a qual é fornecedora da Fibrasil, o PRFV é composto principalmente por 3 componentes: a resina, a fibra de vidro e o catalizador. As principais propriedades do PRFV estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV).

Propriedades	Valores/Unidades
Densidade (25 °C)	1,10 g.cm ³
Viscosidade	330 – 350 cPs
Ponto de fulgor	31,00 °C
Resistência máxima à tração	40,20 Mpa
Módulo elasticidade (Tração)	2,20 GPa
Resistência máxima à Flexão	84,20 Mpa
Módulo elasticidade (Flexão)	2,80 GPa

Fonte: Adaptado de Elekeiroz (2016).

A composição química das fibras de PRFV foi determinada pelo método de Fluorescência por raio X e a perda de massa durante a queima foi realizada por meio de termogravimetria, conforme realizado por Eliche-Quesada et al. (2011); Souza et al. (2011); Faria et al. (2012); Ukwatta et al. (2015) e Kazmi et al. (2016) para outros tipos de resíduos sólidos.

2.4.2 Fibras do bagaço de cana-de-açúcar (FBCA).

O bagaço de cana-de-açúcar ilustrado na Figura 4 (a), foi fornecido por uma empresa, situada na cidade de Perdões-MG e triturado em triturador forrageiro com a utilização de peneira com malha de 8 mm a fim de se manter uma granulometria padrão. Na Figura 4 (b) pode-se observar a fibra do bagaço da cana-de-açúcar após o processo de secagem e trituração.

A composição química das fibras do bagaço de cana-de-açúcar foi determinada pelo método de Fluorescência por raio X e a perda de massa durante a queima foi realizada por meio de termogravimetria, conforme realizado por Quesada et al. (2011); Faria et al. (2012); Souza et al. (2011); Ukwatta et al. (2015) e Kazmi et al. (2016) para outros tipos de resíduos sólidos

Figure 4 – Bagaço de cana-de-açúcar fornecido coletado no pátio da empresa (a), fibra do bagaço de cana-de-açúcar após o processo de secagem e trituração (b).



Fonte: Do autor (2017).

Os trabalhos que aplicaram o bagaço de cana-de-açúcar para a produção de materiais compósitos realizaram o processo de queima do mesmo para a obtenção de cinzas, ou utilizaram as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar proveniente da queima deste resíduo em caldeiras. Neste trabalho, o objetivo é evitar o processo de queima do BCA, pois nem todo este resíduo é reaproveitado para a produção de calor em caldeiras. Sendo assim, o resíduo que não foi reaproveitado para produção de calor em caldeiras, foi utilizado para a produção de blocos compósitos. Dessa forma, o processo de trituração do BCA para produção da FBCA e a mistura dessa fibra às massas cerâmicas, visou evitar a emissão de gases emitidos no processo de queima do resíduo para a produção de cinzas.

2.5 Perda de massa por termogravimetria

As análises termogravimétricas (TGA) do RPRFV e BCA foram realizadas em um equipamento 2050 TGA V5.4A da TA Instruments, com faixa de temperatura de 20 a 1000 °C, taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob atmosfera de “O” com vazão de 50 mL.mim⁻¹, de acordo com a norma ASTM E1131:2014.

2.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada pelas normas (ABNT NBR 15270-1/2005; ABNT NBR 15270-2/2005; ABNT NBR 15270-3/2005). As amostras foram coletadas diretamente nos depósitos das cerâmicas e passaram por um ensaio visual onde as peças com defeitos (trincas, brocas e não conformidade nas medidas e esquadros) foram descartadas. Foi feito o capeamento das amostras que posteriormente foram submetidas ao ensaio de compressão estática.

2.6.1 Capeamento dos BCQs para o teste de resistência à compressão

O capeamento dos blocos para os ensaios de resistência à compressão foi realizado seguindo as especificações da ABNT NBR 15270/2005, a qual exige que o mesmo deve apresentar-se plano e uniforme no momento do ensaio, não sendo permitidos remendos. O capeamento foi utilizado para regularizar as faces de trabalho dos corpos-de-prova, pela aplicação de pastas de argamassas cimento-cola com resistências superiores às resistências dos blocos na área bruta. Além disso a superfície onde o capeamento foi aplicado não deve se afastar do plano mais que 8×10^{-2} mm para cada 4×10^2 mm e o capeamento não deve apresentar espessura maior que 3 mm.

No processo de capeamento adotado neste trabalho, foi aplicado sobre uma mesa de vidro temperado, uma camada bem fina de óleo queimado, o qual foi deixado descansar por aproximadamente 10 minutos. A argamassa cimento-cola foi preparada seguindo as especificações do fabricante e aplicada sobre o filme de óleo formando uma camada fina onde os blocos foram assentados. Após o capeamento, as amostras foram armazenadas durante 28 dias para a cura da argamassa. Este procedimento ilustrado na Figura 5 proporcionou um ótimo capeamento dos blocos mantendo as faces perfeitamente paralelas.

Figura 5 – Processo de capeamento dos BCQs.

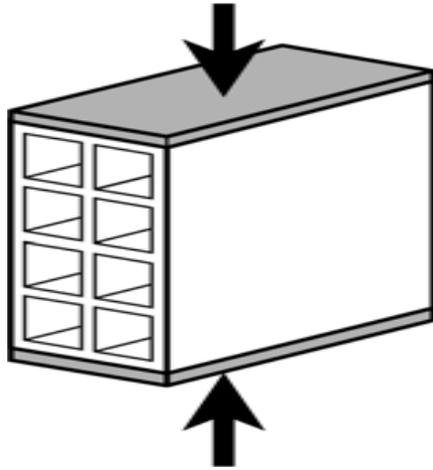


Fonte: Do autor (2017).

2.6.2 Teste de compressão

Após o capeamento, cura da argamassa e imersão em água, os blocos foram submetidos aos testes de compressão estática e deviam atingir uma tensão mínima (resistente) de 1,5MPa antes da ruptura, para os blocos de vedação. Na Figura 6 é ilustrado o ensaio de compressão estática realizado em uma Máquina Universal de Ensaios da marca Arotec com capacidade de carga de 30 toneladas instalada no laboratório de Resistência dos Materiais e Mecânica das Estruturas do Departamento de Engenharia (DEG).

Figura 6 – Teste compressão estática: posicionamento do bloco de vedação com relação a aplicação de carga (ABNT NBR 15270/2005) (a), e corpo-de-prova posicionado na máquina universal de ensaios para a aplicação de carga (b).



(a)



(b)

Fonte: ABNT NBR 15270/2005 (a), e do autor (b) (2017).

Para efeito de comparação, os valores de resistência à compressão foram avaliados estatisticamente utilizando o método de análise de variância ANOVA, assim como utilizado por (SILVA et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2012; TONOLI et al., 2007).

2.6.3 Avaliação da resistência à compressão, absorção de água e isolamento térmico dos BCQs comuns e BCQs compósitos

Para avaliar as melhores proporções de mistura para os blocos compósitos, foram realizados ensaios preliminares. Foram confeccionados 20 corpos de prova convencionais em escala laboratorial, denominados como “testemunha” que serviram como base de resistência e comparação dos blocos com fibra. Também foram produzidos 20 corpos de prova em escala laboratorial para cada adição de fibra do bagaço de cana-de-açúcar, com as seguintes porcentagens: (2,5%, 5% e 10%) de substituição do solo em peso, totalizando uma amostra de 60 corpos de prova. Confeccionou-se ainda 20 corpos de prova para cada adição fibra de PRFV, com as seguintes porcentagens: (2,5%, 5% e 10%) de substituição em peso, totalizando uma amostra de 60 corpos de prova. Finalmente confeccionou-se mais 20 corpos de prova para adição híbrida, com fibra de vidro

e fibra de cana, com as seguintes porcentagens: (2,5%,5%,10%), sendo assim, metade de cada porcentagem para cada fibra, totalizando uma amostra de 60 corpos de prova. Na Tabela 2 estão listadas as porcentagens de substituição em peso de solo por fibras de resíduos e a quantidade de amostras utilizadas nos ensaios preliminares. Os 7 corpos de prova excedentes para cada tipo de amostra foram utilizados para os ensaios de condutividade térmica e Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV).

Tabela 2 – Porcentagens de substituição em peso de solo por fibras de resíduos e quantidade de amostras utilizadas nos ensaios de compressão preliminares.

	BLOCO	QUANTIDADE
1	Testemunha	13
2	FBCA 2,5%	13
3	FBCA 5,0%	13
4	FBCA 10%	13
5	FPRFV 2,5%	13
6	FPRFV 5,0%	13
7	FPRFV 10%	13
8	Híbrido 2,5% (1,25% FBCA* e 1,25% FPRFV**)	13
9	Híbrido 5,0% (2,5% FBCA* e 2,5% FPRFV**)	13
10	Híbrido 10% (5,0 FBCA* e 5,0% FPRFV**)	13

* Fibra de bagaço de cana-de-açúcar

** Fibra de plástico reforçado com fibra de vidro

Fonte: Do autor (2017).

Com base nos resultados dos testes preliminares de resistência à compressão e análise visual de todo o processo de produção dos BCQs e BCQs compósitos e no estudo de Demir et. al. (2008), foram escolhidas as melhores proporções de adição de resíduos, as quais foram adotadas para os ensaios finais. Na Tabela 3 estão listadas as porcentagens de substituição em peso de solo por fibras de resíduos, as quais foram utilizadas nos ensaios finais de compressão, absorção de água, condutividade térmica e MEV.

As proporções de adição de fibras dos ensaios preliminares com porcentagens maiores ou igual a 10% de substituição do solo por fibras de resíduos, não foram adotadas para os testes finais, pois, além de reduzir drasticamente a resistência mecânica dos blocos, influenciaram negativamente no processo de extrusão e corte dos mesmos, dificultando o corte, gerando brocas

nos blocos e conseqüentemente uma má aparência das amostras. A aparência ruim do bloco cru produzido com 10% de substituição de solo por fibra de resíduos está ilustrada na Figura 7.

Figure 7 – Bloco cru produzido com 10% de substituição de solo por fibra de resíduos.



Fonte: Do autor (2017).

Com base nos resultados preliminares e pelo fato de que a adição de fibras em quantidades superiores a 5,0% demonstrarem uma tendência negativa das características dos BCQs, foi adotado uma porcentagem máxima de adição de fibras para os ensaios finais de 7,5%. Além disso, optou-se por um delineamento inteiramente casualizado para a amostragem.

Tabela 3 – Porcentagens de substituição em peso de solo por fibras de resíduos e quantidade de amostras utilizadas nos ensaios de compressão.

Item	BLOCO
1	Testemunha
2	FBCA 1,25%
3	FBCA 2,5%
4	FBCA 5,0%
5	FBCA 7,5%
6	FPRFV 1,25%
7	FPRFV 2,5%
8	FPRFV 5,0%
9	FPRFV 7,5%
10	Híbrido 2,5% (1,25% FBCA* e 1,25% FPRFV**)
11	Híbrido 3,75% (1,25% FBCA* e 2,5% FPRFV**)
12	Híbrido 6,25% (1,25 FBCA* e 5,0% FPRFV**)
13	Híbrido 3,75% (2,5% FBCA* e 1,25% FPRFV**)
14	Híbrido 5,0% (2,5% FBCA* e 2,5% FPRFV**)
15	Híbrido 7,5% (2,5% FBCA* e 5,0% FPRFV**)
16	Híbrido 6,25% (5,0% FBCA* e 1,25% FPRFV**)
17	Híbrido 7,5% (5,0% FBCA* e 2,5% FPRFV**)

* Fibra de bagaço de cana-de-açúcar

** Fibra de plástico reforçado com fibra de vidro

Fonte: Do autor (2017).

Para a produção de todos os blocos descritos na Tabela 3, foi escolhido um único tipo de solo denominada como “Solo Testemunha” a qual foi amostrado e caracterizado.

Os blocos compósitos foram produzidos na Cerâmica Sul de Minas e logo após o corte, todas as amostras de blocos testemunha e blocos compósitos passaram por uma inspeção visual, onde foram descartadas as amostras com trincas, brocas e outras imperfeições. Durante a inspeção visual, foram escolhidas 24 amostras para cada item da Tabela 3, totalizando 408 amostras que passaram pelo processo de secagem em secador contínuo e queima em fornos tipo vagão. As 408 amostras foram queimadas em um único lote com temperatura variando entre 950 e 1000 °C.

Para o ensaio de resistência à compressão, foram coletadas 13 amostras para cada item da Tabela 3 totalizando 221 amostras que foram capeadas de acordo com o item 2.6.1 e submetidas ao ensaio de compressão estática de acordo com o item 2.6.2.

2.7 Absorção de água

Depois de queimadas, 6 amostras de cada tipo de bloco da Tabela 3 foram avaliadas quanto ao índice de absorção de água, totalizando em 102 amostras para este teste.

Para o ensaio de absorção de água foram utilizados os seguintes equipamentos laboratoriais:

- Balança com capacidade mínima de 10 kg e precisão de 0,1 g.
- Estufa para manter a temperatura da amostra entre 105 e 110 °C.
- Tanque de imersão com água em temperatura ambiente.

As amostras foram secadas em estufa com temperatura entre 105 e 110 °C durante 24 horas. Após esse processo o bloco foi pesado para a obtenção da massa seca (M1). Após a pesagem, o bloco foi imerso em água na temperatura ambiente, onde permaneceu durante 24 horas para sua completa saturação. Após esse período, o bloco foi retirado da água e pesado novamente para a obtenção da massa úmida (M2). Os valores de absorção de água (AA) para cada amostra foram calculados conforme a Equação 1. Segundo a ABNT NBR 15270/2005, o índice de absorção d'água não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%.

$$AA = \left(\frac{M2-M1}{M1} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

M1= massa do bloco seco em estufa (kg).

M2= massa do bloco saturado (kg).

AA= absorção de água, em porcentagem (%).

Neste trabalho, foram calculados os valores de absorção de água de 6 corpos de prova para cada amostra (descrita na Tabela 3 do item 2.6.3) de blocos, e posteriormente calculadas as médias dos valores de AA por amostra, possibilitando assim a comparação entre as misturas em estudo.

Para efeito de comparação, os valores de absorção de água (AA) das diferentes amostras foram avaliados estatisticamente utilizando o método ANOVA, assim como utilizado por (SILVA et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2012; TONOLI et al., 2007).

2.8 Condutividade térmica

Para o ensaio de condutividade térmica, foram utilizadas 3 amostras para cada item da Tabela 3, totalizando em 51 amostras.

A condutividade térmica foi medida para o bloco inteiro. Dessa forma, foram produzidos 3 corpos de prova para cada tipo de adição de fibras, assim como para o bloco testemunha. As amostras dos blocos, os quais foram avaliados quanto a condutividade térmica estão ilustrados na Figura 8.

Figure 8 – Corpo-de-prova para avaliação da condutividade térmica do bloco.



Fonte: Do autor (2017).

2.8.1 Equipamento para o ensaio de condutividade térmica

A metodologia para a determinação da condutividade térmica foi a mesma utilizada por Silva (2010). Para a realização dos experimentos de determinação das propriedades de

condutividade térmica dos corpos de prova, foi utilizado um equipamento de transferência de calor, que é constituído de duas câmaras dispostas uma sobre a outra, fabricadas de painéis de madeira reconstituída. As caixas possuem 48,5 cm de largura, 48,5 cm de comprimento e altura de 51 cm. Ambas são revestidas internamente, primeiro com uma camada de isopor de 15 mm de espessura, depois com uma manta aluminizada e com fita adesiva aluminizada para garantir o isolamento térmico do equipamento em relação ao ambiente externo.

No interior da câmara inferior, é gerado calor por meio de uma lâmpada incandescente de 100 W que emite uma radiação de $207,45\text{W/m}^2$. O calor produzido pela lâmpada, por radiação, aquece a câmara inferior cuja temperatura é registrada no termostato (TM01). Esse aquecimento também atinge a amostra onde é registrada a temperatura por um dos termostatos localizado nessa posição nomeado TM04.

O termostato (TM01) e a lâmpada estão ligados a uma placa de prototipagem ou micro controladora conhecida como Arduino, que está conectada a um computador como fonte de energia. O Arduino tem como função receber do termostato TM01 informações sobre a temperatura na caixa inferior e a partir dessa informação, ligar e desligar a lâmpada. Dessa forma o Arduino controla a temperatura da caixa inferior, fazendo com que ela se mantenha em torno de 43°C .

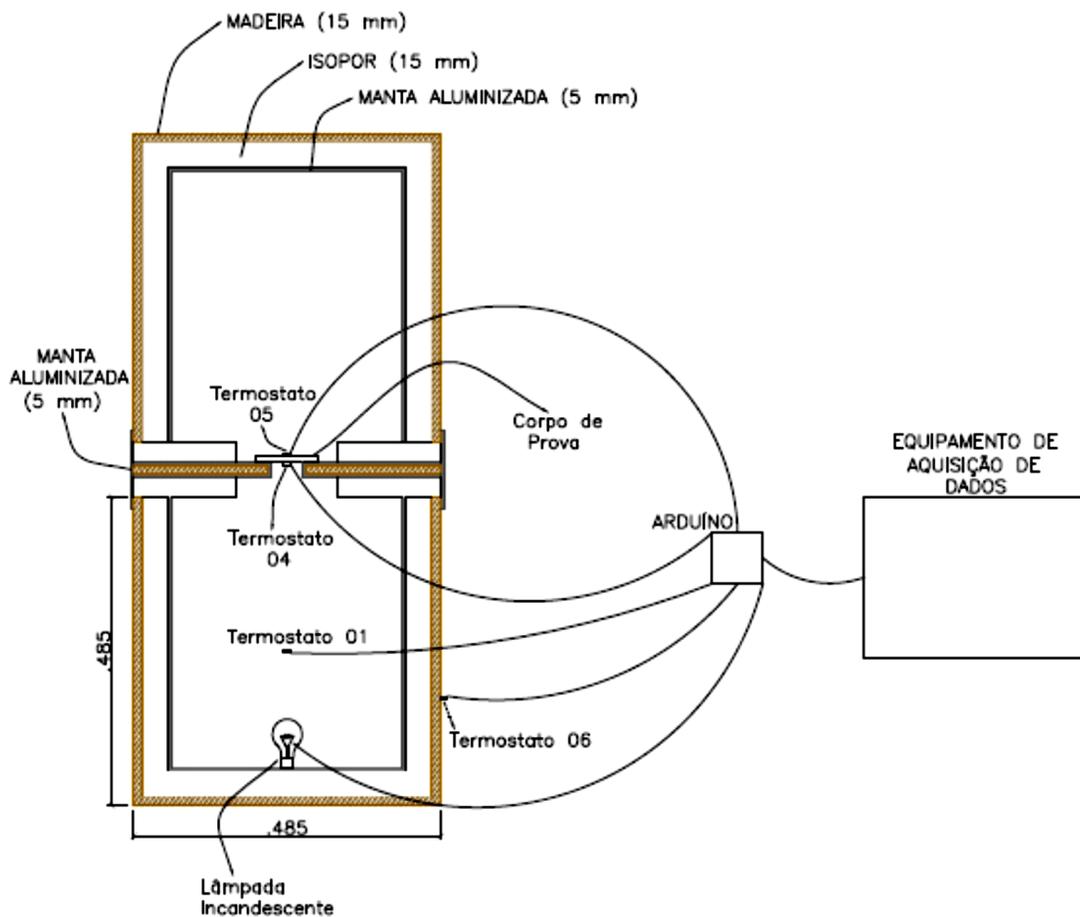
Entre as duas caixas existe uma lâmina de madeira também produzida a partir de painéis de madeira reconstituída e revestida em ambos os lados com isopor de 15mm de espessura e manta aluminizada. Essa lâmina possui um furo em seu centro cuja as dimensões dependem do corpo-de-prova a ser testado, que permite a passagem do calor emitido pela lâmpada da caixa inferior para a superior.

Nesse furo será posicionado o corpo de prova durante o ensaio. Na face inferior do corpo de prova será fixado o termostato nomeado TM04 e na face superior também foi fixado na mesma direção outro termostato nomeado TM05. O termostato TM04 tem como função ler a temperatura da face inferior do corpo de prova, que está diretamente exposta ao calor controlado e fornecido pela lâmpada na caixa inferior, enquanto o termostato TM05 lê a temperatura da face superior do corpo de prova que está diretamente ligada a caixa superior e também isolada do ambiente.

Um termostato é fixado externamente ao equipamento nomeado TM06 cuja função é monitorar a temperatura ambiente e verificar possíveis erros de dados quando houver uma variação brusca dessa temperatura externa.

Todos os termostatos citados foram conectados ao Arduino e esse ligado a um equipamento de aquisição de dados programado para realizar 1000 leituras para as amostras da parede do bloco e 2000 leituras para o bloco inteiro, uma a cada intervalo de tempo de 12 segundos, totalizando um tempo de permanência do corpo de prova na máquina de três horas e meia para as amostras e 7 horas para os blocos inteiros. Na Figura 9 é ilustrado o esquema do equipamento já montado e em funcionamento com o corpo de prova no seu interior.

Figure 9 – Esquema do equipamento de avaliação da condutividade térmica utilizado para a realização dos ensaios.



Fonte: Do autor (2017).

Os dados obtidos por meio do equipamento de medição de condutividade térmica foram plotados em gráficos de temperatura x tempo, com o intuito de se comparar os valores entre os corpos de prova testemunhas e aqueles com adição de fibra.

O aquecimento do corpo de prova foi monitorado até a estabilização da temperatura e os dados são coletados, tanto da face inferior exposta à radiação da lâmpada quanto da face superior não exposta. A determinação da condutividade térmica das amostras é obtida pela Equação 2, a partir dos dados de radiação.

$$K = P.E / \Delta T \quad (2)$$

Onde:

K – Condutividade térmica [W/m°C];

P – Radiação por medida de área [W/m²];

E – Espessura do corpo de prova [m];

ΔT – Variação de temperatura observada entre os termostatos 4 e 5 [°C].

Para efeito de comparação, os valores de condutividade térmica foram avaliados estatisticamente utilizando o método análise de variância ANOVA, assim como utilizado por (SILVA et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2012; TONOLI et al., 2007).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na avaliação do comportamento dos Blocos Cerâmicos Queimados (BCQs) com adição dos resíduos industriais de cana-de-açúcar e plástico reforçados com fibra de vidro, foram estudados e discutidos os resultados relativos a: a) composição química das amostras de solo, do resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (FPRFV), da fibra do bagaço de cana-de-açúcar, além dos blocos depois de queimados; b) limites de consistência do solo matriz; c) classificação textural do solo matriz; d) perda de massa por termogravimetria do RPRFV e do BCA; e) resistência à compressão dos blocos comuns e compósitos; f) condutividade térmica; g) absorção de água; e h) microscopia eletrônica por varredura.

3.1 Composição química das amostras

Na Tabela 4 é apresentado a composição química da fibra do resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (FPRFV), da fibra do bagaço de cana-de-açúcar (FBCA), do solo utilizado para a fabricação dos blocos comuns (testemunha) e dos blocos compósitos, além dos blocos queimados. Os valores médios dos principais componentes químicos encontrados nas matérias primas FPRFV, FBCA e Solo, e nos blocos depois de queimados e triturados (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , K_2O , P_2O_5 e MgO), foram obtidos a partir do teste de Fluorescência por Raio-X.

As amostras de solo e dos BCQs apresentaram predominância de SiO_2 e Al_2O_3 , o que é característico das argilas para produção de materiais cerâmicos e conseqüentemente dos blocos. O primeiro composto é o SiO_2 , encontrado no solo em quantidade de 35,45%, as quais deveriam estar entre 50% e 60% para aumentar a porosidade do produto final (ABNT NBR 15270/2005). Porém, quanto maior a concentração de SiO_2 maior o risco de fissuras durante o resfriamento após a queima (a partir de 570°C aproximadamente). O segundo composto químico mais comum é Al_2O_3 , encontrado em concentração de 21,53%, o que contribui para aumentar a resistência mecânica, por meio da transformação em mullite durante a combustão e representa um bom índice de qualidade do solo. Sua porcentagem geralmente varia entre 10% e 20%. No entanto, verifica-se a presença de teores significativos de K_2O no solo, que podem estar relacionados a presença de mica, esmectita

(policatiônica) e feldspatos nas amostras, o que não é comumente observado nas argilas para a produção de materiais cerâmicos, (RAMOS et al., 2010).

Tabela 4 – Valores médios dos principais componentes químicos encontrados nas matérias primas FPRFV, FBCA e Solo, e nos blocos depois de queimados e triturados por meio do teste de Fluorescência por Raio-X.

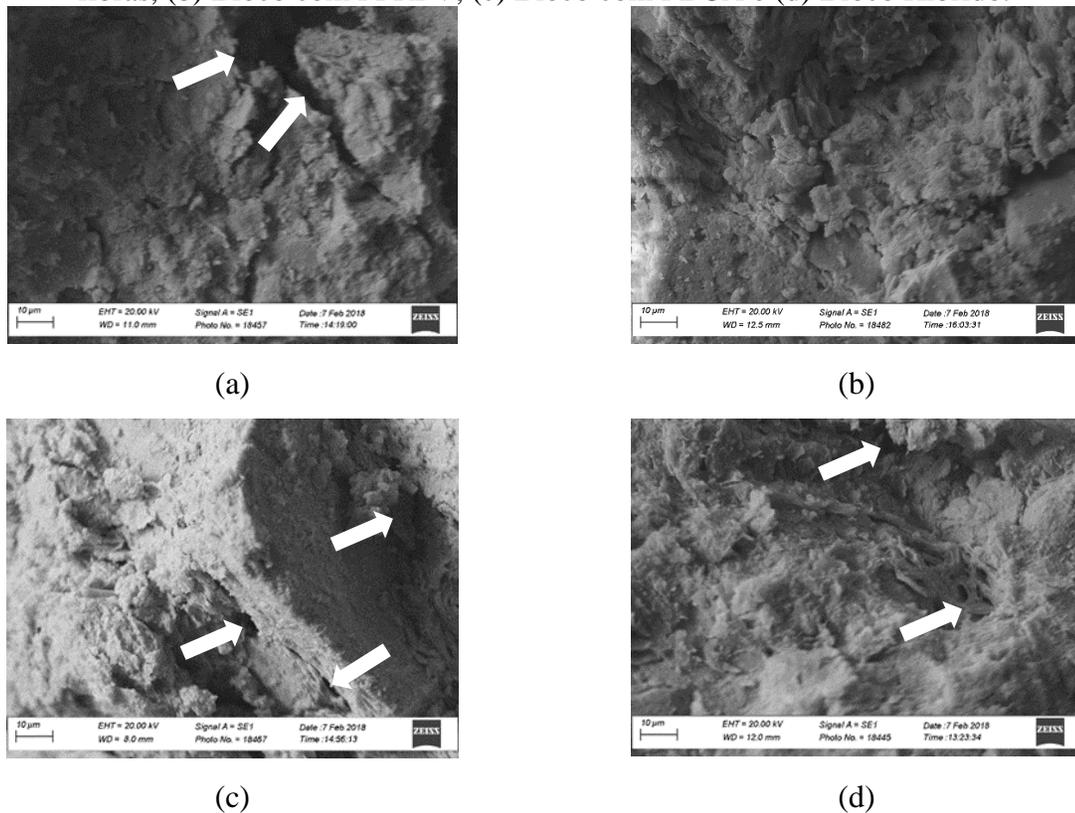
Amostra/	Elemento Químico (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO
FPRFV	11.18	2.12	19.63	0.00	0.10	0.00
FBCA	0.25	0.00	0.41	0,66	0.07	2.00
SOLO Matriz	35.45	21.53	0.19	1.54	0.08	0.00
BLOCO Testemunha	37.56	22.57	0.29	1.55	0.07	0.00
BLOCO C/ FPRFV	38.21	22.43	0.61	1.57	0.07	0.00
BLOCO C/ FBCA	34.46	19.27	0.62	1.47	0.06	0.00
BLOCO Híbrido	37.23	20.62	0.56	1.61	0.07	0.00

Fonte: Do autor (2017).

De acordo com os dados da Tabela 4, observou-se primeiramente que o resíduo de PRFV possui uma maior quantidade de sílica (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃) quando comparado com o BCA. Verificou-se também que o bloco compósito com FPRFV apresentou maior quantidade de sílica que o bloco testemunha, bloco híbrido e bloco com FBCA respectivamente. A porcentagem de SiO₂ presente na matriz cerâmica influencia diretamente na resistência à compressão dos BCQs (ARSENOVIĆ et al., 2013).

Na Figura 10 são apresentadas imagens das seções de ruptura dos blocos, obtidas pela técnica de microscopia eletrônica por varredura (MEV).

Figure 10 – Seções de ruptura dos blocos aumentadas em 2000 vezes: (a) Bloco sem adição de fibras, (b) Bloco com FPRFV, (c) Bloco com FBCA e (d) Bloco Híbrido.



Fonte: Do autor (2017).

De acordo com a Figura 10 (b), pode-se perceber que a porosidade encontrada no bloco com FPRFV são mais homogêneas quando se comparado aos demais. Na Figura 10 (a) é possível perceber grandes fissuras e cavidades causadas pela menor concentração de sílica, assim como observados nas Figuras 10 (c) e 10 (d).

3.2 Limites de Consistência e Classificação textural do solo Matriz

A Tabela 5 apresenta os valores de limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) do solo matriz. Verificou-se que os valores obtidos estão dentro dos intervalos observados na literatura, onde o limite de plasticidade deve variar entre 15 a 30%, o

limite de liquidez entre 30 a 60% e o índice de plasticidade entre 10 a 30% de matérias-primas argilosas para a produção de materiais cerâmicos (ARSENOVIĆ et al., 2013).

Tabela 5 – Limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) do Solo Matriz.

Amostra	LP (%)	LL (%)	IP (%)
Solo Matriz	27,76	41,39	17,35

Fonte: Do autor (2017).

Na Tabela 6 estão descritos os valores em porcentagem de argila, silte e areia do solo matriz. A amostra foi classificada como solo argiloso, indicado para produção de blocos cerâmicos queimados. Com base nesses dados, verificou-se que o solo matriz apresentado é indicado para produção de blocos cerâmicos e não foi necessário adicionar material não plástico para o seu processamento (Campos, et al., 1999; Vieira. et al., 2003).

Tabela 6 – Classificação textural do solo matriz.

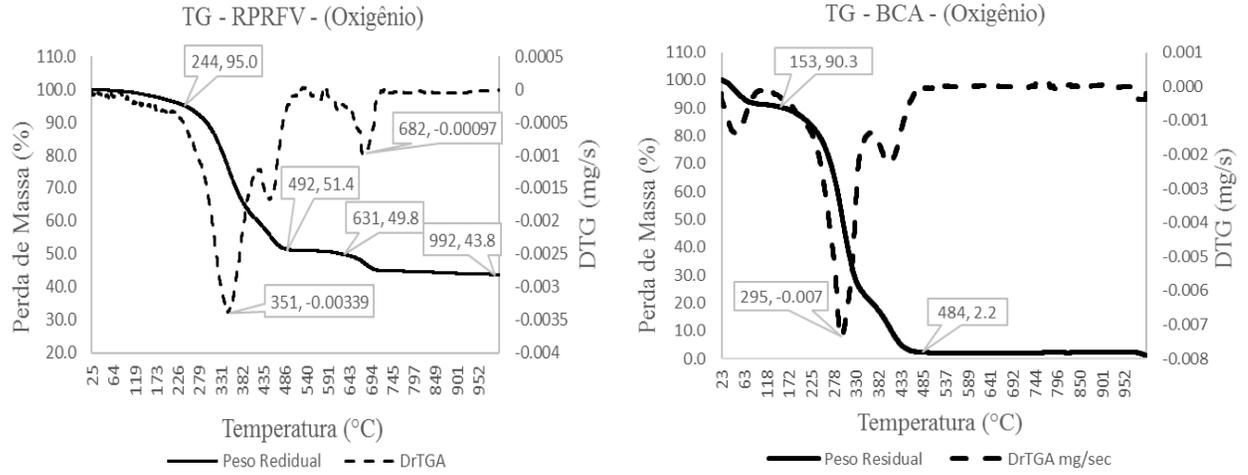
Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação
Solo Matriz	38	30	32	Solo Argiloso

Fonte: Do autor (2017).

3.3 Perda de massa por termogravimetria

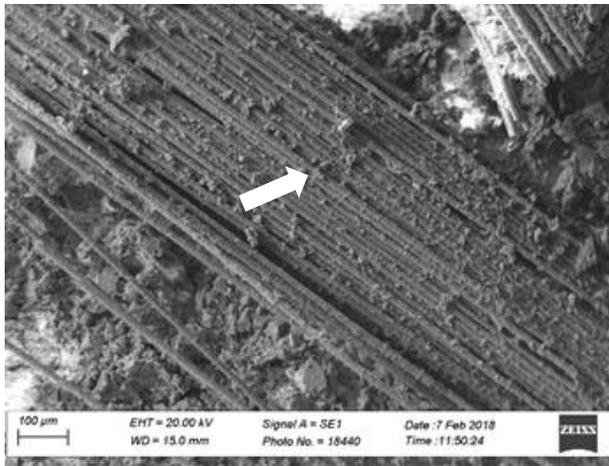
As curvas perda de massa por termogravimetria (TGA) e a derivada da curva de perda de massa (DTG) para a análise termogravimétrica do RPRFV estão apresentadas na Figura 11. Pode-se observar que na Figura 11(a) a maior perda de massa encontra-se na faixa de 300 a 400°C enquanto que na Figura 11(b) a maior perda de massa encontra-se entre 250 a 400°C. Além disso, pode-se observar na Figura 11(a) e 11(b) que após atingir a temperatura de queima dos blocos cerâmicos (850 a 1000°C), as fibras de bagaço de cana-de-açúcar se degradaram por completo, enquanto que aproximadamente 45% da matéria da fibra de vidro não se degradou.

Figura 11 – Termogravimetria do resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (a), termogravimetria do resíduo de bagaço de cana-de-açúcar (b), fibra de vidro agregada à cerâmica após a ruptura (c), e cavidade na cessão de ruptura do BCQ com cinzas da fibra do bagaço de cana-de-açúcar (d).

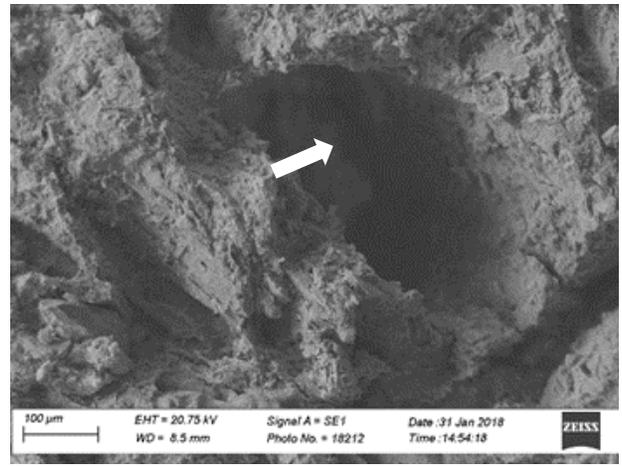


(a)

(b)



(c)



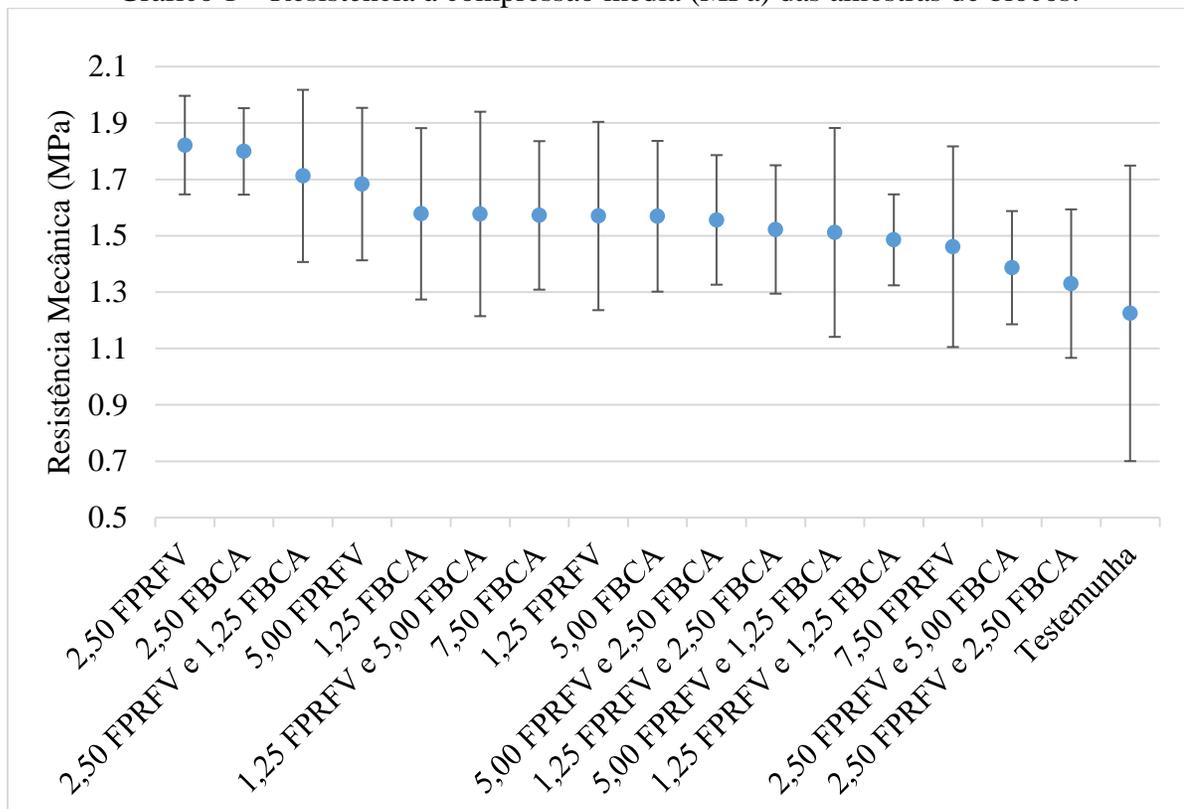
(d)

Fonte: Do autor (2017).

3.4 Resistência à compressão

Para avaliar os resultados experimentais de resistência mecânica à compressão (RM), inicialmente foi verificada a normalidade dos dados a 5% de significância utilizando-se do teste de Anderson Darling, onde se obteve um P-Valor de 0,20. Como $P\text{-Valor} > \alpha$ não se rejeitou H_0 , ou seja, os dados seguem uma distribuição normal. Os valores médios de RM para cada tratamento estão apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Resistência à compressão média (MPa) das amostras de blocos.



Fonte: Do autor (2018).

A análise de variância (ANOVA) foi realizada por meio da plataforma ACTION seguindo um delineamento inteiramente casualizado (DIC) com nível de 5% de significância. Obteve-se um P-Valor de 0,001, sendo este menor do que α , conduzindo à rejeição da hipótese nula (H_0) de igualdade entre médias dos tratamentos. Assim, pelo menos dois tratamentos diferem entre si.

Utilizando a análise de variância, foi possível identificar diferenças entre os tratamentos. Porém, foi necessária a verificação para identificar quais dos tratamentos são melhores. Dessa forma também foi realizado o teste de comparação de médias (Teste Tukey), que consiste em comparar as médias duas a duas dos tratamentos com base na diferença mínima significativa (DMS). Na Tabela 7 são apresentados em ordem decrescente os resultados obtidos das médias de Resistência Mecânica à Compressão para cada tratamento. As médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. A partir dessa metodologia, pode-se verificar que os tratamentos com adição de 2,50% de FPRFV, 2,50% de PBCA e 2,50 FPRFV e 1,25 FBCA (hibrido) diferem estatisticamente do bloco Testemunha.

Tabela 7 – Resultados obtidos das médias de resistência para cada tratamento.

Tipos de Tratamento	Resistência à compressão (MPa)	
2,50 FPRFV	1.82	a
2,50 FBCA	1.80	a
2,50 FPRFV e 1,25 FBCA	1.71	a
5,00 FPRFV	1.68	ab
1,25 FBCA	1.58	ab
1,25 FPRFV e 5,00 FBCA	1.58	ab
7,50 FBCA	1.57	ab
1,25 FPRFV	1.57	ab
5,00 FBCA	1.57	ab
5,00 FPRFV e 2,50 FBCA	1.56	ab
1,25 FPRFV e 2,50 FBCA	1.52	ab
5,00 FPRFV e 1,25 FBCA	1.51	ab
1,25 FPRFV e 1,25 FBCA	1.49	ab
7,50 FPRFV	1.46	ab
2,50 FPRFV e 5,00 FBCA	1.39	ab
2,50 FPRFV e 2,50 FBCA	1.33	ab
Testemunha	1.22	b

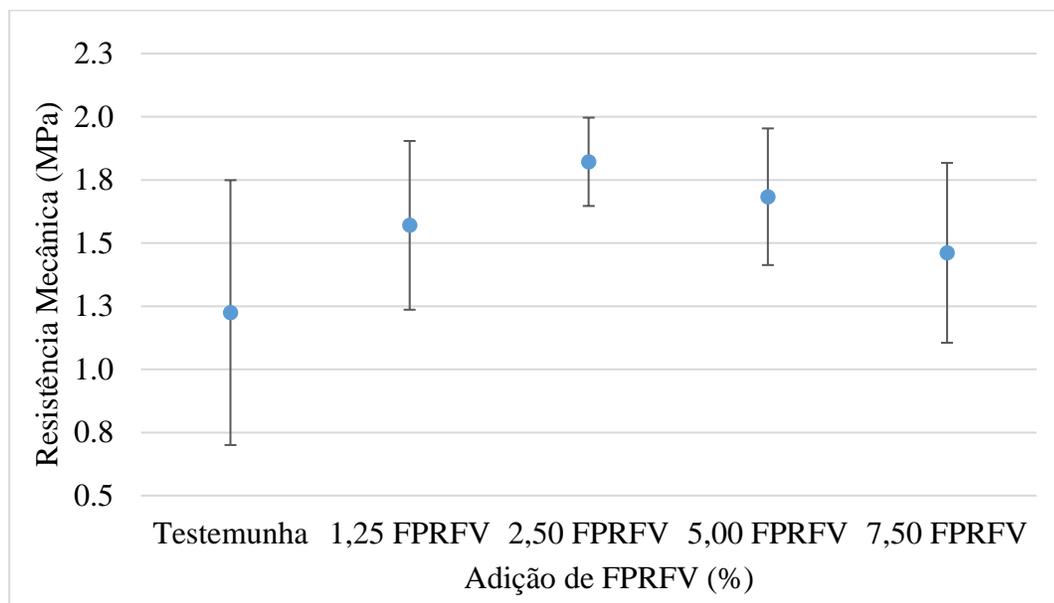
Fonte: Do autor (2018).

Por meio da análise do Gráfico 1 e da Tabela 7 observou-se que a adição de 2,50% de FPRFV, 2,50% de PBCA e 2,50 FPRFV e 1,25 FBCA (hibrido), obtiveram resistência média superior quando comparado à testemunha. Entretanto, a resistência média das demais adições pouco se diferiram estatisticamente entre si.

Para entender melhor as diferenças significativas entre as adições de um mesmo resíduo, foram executados também uma análise estatística para cada resíduo adicionado separadamente.

Para avaliar os dados experimentais de Resistência Mecânica à Compressão (RM) dos blocos com FPRFV, inicialmente foi verificada a normalidade dos dados ao nível de 5% de significância, utilizando-se do teste de Anderson Darling, onde se obteve um P-Valor de 0,78. Como $P\text{-Valor} > \alpha$ não se rejeitou H_0 , ou seja, os dados seguem uma distribuição normal. Os valores de RM para cada tratamento com FPRFV estão apresentados no Gráfico 2, os quais foram obtidos por meio da análise de variância ANOVA.

Gráfico 2 – Resistência à compressão média (MPa) das amostras de blocos com adição de FPRFV, descritas na Tabela 7, obtidos por análise de variância ANOVA.



Fonte: Do autor (2018).

A análise de variância (ANOVA), foi realizada por meio da plataforma ACTION, obtendo-se um P-Valor de 0,004. Como $P\text{-Valor} < \alpha$ rejeitou H_0 , ou seja, os tratamentos diferem entre si ao nível de 5% de significância.

Na Tabela 8 são apresentados em ordem decrescente os resultados obtidos das médias de Resistência Mecânica à Compressão para cada porcentagem de FPRFV. As médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. A partir dessa metodologia, pode-se verificar que os tratamentos com adição de 2,50% de FPRFV e 5,00% de FPRFV diferem estatisticamente do bloco Testemunha. Além disso, pela análise do Gráfico 2 e da Tabela 8, percebe-se que os tratamentos com 2,5% de FPRFV e 5,00% de FPRFV, adicionados à matriz cerâmica alcançaram a resistência mecânica à compressão superior a 1,5MPa exigida pela ABNT NBR 15270-3/2005.

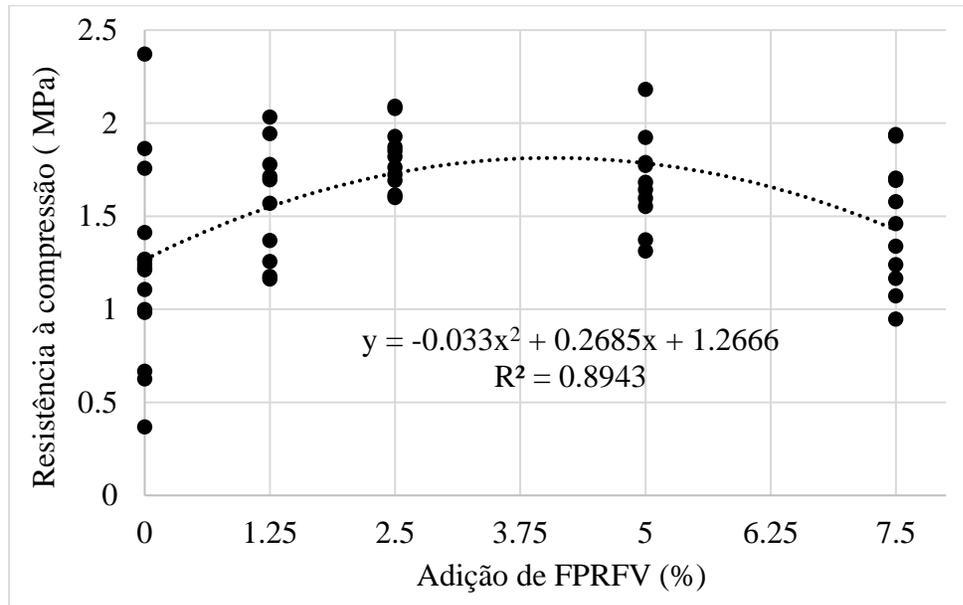
Tabela 8 – Resultados obtidos das médias de resistência à compressão para cada tratamento com FPRFV.

Tipos de Tratamento	Resistência à compressão (MPa)	
2,50 FPRFV	1.82	a
5,00 FPRFV	1.68	a
1,25 FPRFV	1.57	ab
7,50 FPRFV	1.46	ab
Testemunha	1.22	b

Fonte: Do autor (2018).

Foi realizado uma análise de regressão para os dados de Resistência à Compressão dos BCQs com adição de FPRFV. A partir dos dados apresentados no Gráfico 3, pode-se perceber que a função que melhor descreveu a distribuição foi uma função polinomial do segundo grau. Dessa forma, observou-se que melhor porcentagem de a adição de FPRFV encontra-se entre 2,50% e 5,00%, podendo-se ainda obter melhores valores de resistência neste intervalo. Observou-se também que a adição de fibras entre 2,50% e 5,00% diminuiu a dispersão dos dados observados.

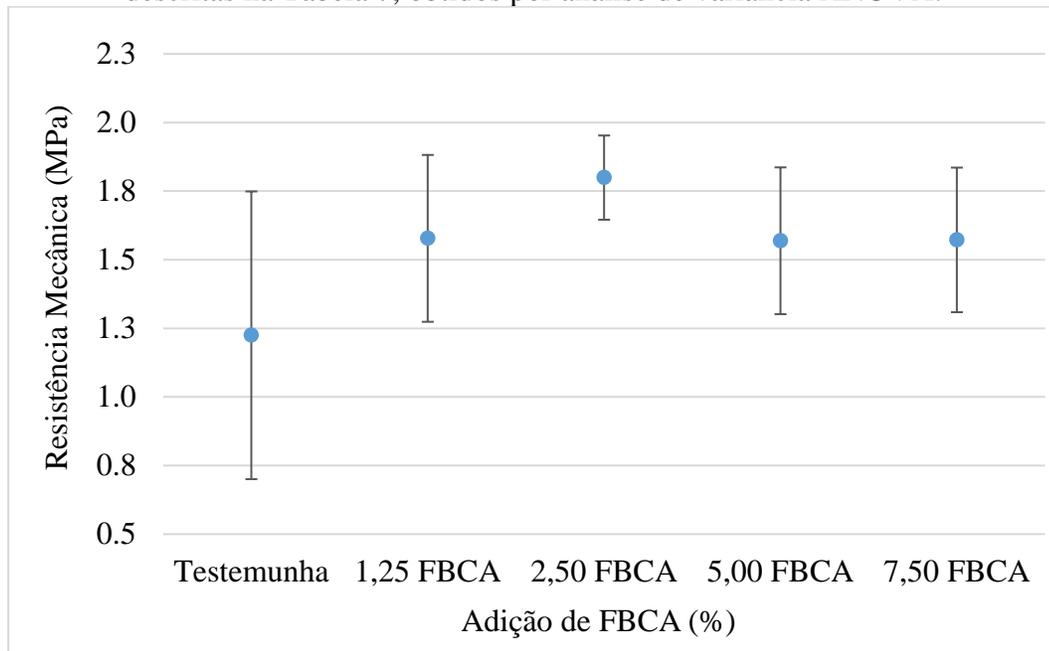
Gráfico 3 – Análise de regressão para resistência à compressão dos BCQs com adição de FPRFV.



Fonte: Do autor (2018).

Para avaliar os dados experimentais de Resistência à Compressão (R.C.) dos blocos com FBCA, foi verificada a normalidade dos dados ao nível de 5% de significância utilizando-se do teste de Anderson Darling, onde se obteve um P-Valor de 0,22. Como P-Valor > α não se rejeitou H_0 , ou seja, os dados seguem uma distribuição normal. Os valores de R.C. para cada tratamento com FBCA estão apresentados no Gráfico 4, os quais foram obtidos por meio da análise de variância ANOVA.

Gráfico 4 – Resistência à compressão média (MPa) das amostras de blocos com adição de FBCA, descritas na Tabela 7, obtidos por análise de variância ANOVA.



Fonte: Do autor (2018).

Por meio da análise de variância, obtendo-se um P-Valor de 0,007. Como P-Valor < α rejeitou H_0 , ou seja, os tratamentos diferem entre si ao nível de 5% de significância.

Na Tabela 9 são apresentados em ordem decrescente os resultados obtidos das médias de Resistência Mecânica à Compressão para cada porcentagem de FBCA. As médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a ao nível de 5% de significância. A partir dessa metodologia, pode-se verificar que o tratamento com adição de 2,50% de FBCA difere estatisticamente do bloco Testemunha. Além disso, pela análise do Gráfico 4 e da Tabela 9, percebe-se que o tratamento com 2,5% de FBCA, adicionado à matriz cerâmica alcançou a resistência mecânica à compressão superior a 1,5MPa exigida pela ABNT NBR 15270-3/2005.

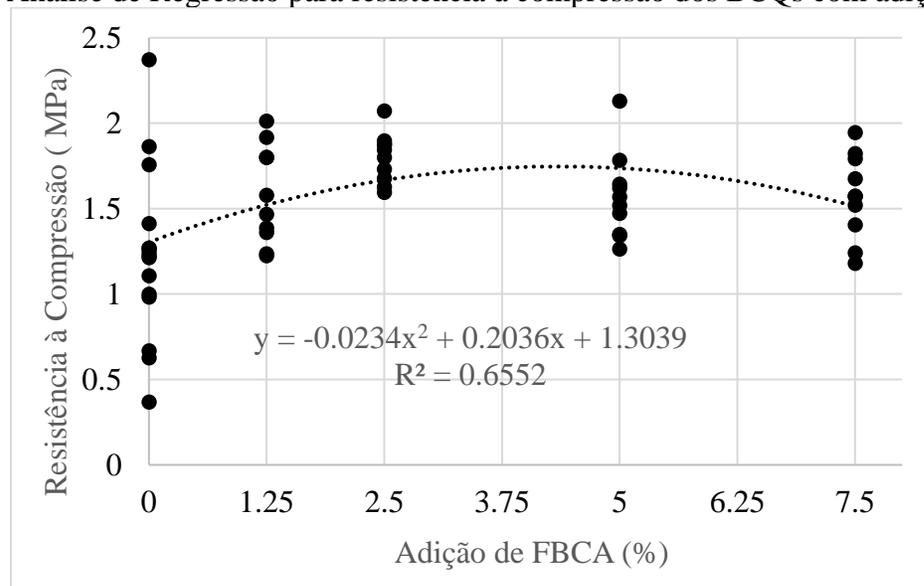
Tabela 9 – Resultados obtidos das médias de resistência para cada tratamento com FBCA.

Tipos de Tratamento	Resistência à compressão (MPa)	
2,50 FBCA	1.80	a
1,25 FBCA	1.58	ab
7,50 FBCA	1.57	ab
5,00 FBCA	1.57	ab
Testemunha	1.22	b

Fonte: Do autor (2018).

Foi realizado uma análise de regressão para os dados de Resistência à Compressão dos BCQs com adição de FBCA. A partir dos dados apresentados no Gráfico 5, pode-se perceber que a melhor porcentagem de a adição de FBCA é de 2,50%, indicando que não é possível obter ganhos de resistência mecânica com maior adição desse resíduo. Além disso, a adição de 2,5% de fibra diminuiu a dispersão dos dados observados.

Gráfico 5 – Análise de Regressão para resistência à compressão dos BCQs com adição de FBCA.



Fonte: Do autor (2018).

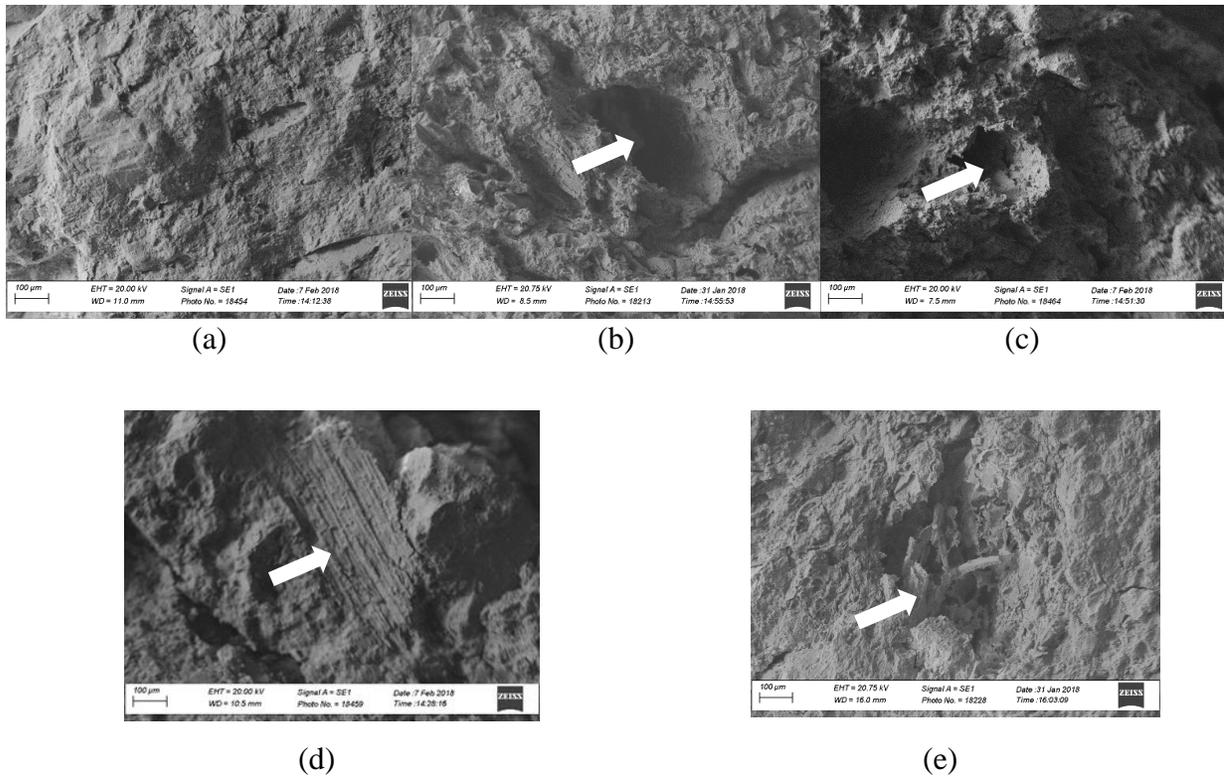
Estes valores comprovam o estudo de Martínez et al. (2012), que adicionou resíduo da indústria cervejeira ao bloco cerâmico e observou que a adição de aproximadamente 2,5% do bagaço, não alterou a resistência a compressão dos blocos e que a adição em porcentagens maiores que 5% reduziram drasticamente a resistência. Verificou-se também que adição de fibras com valores acima de 5,0% reduziram drasticamente a resistência mecânica dos blocos.

Demir et al. (2005), estudaram o uso de resíduos de serragem, resíduos de tabaco e capim em blocos cerâmicos e concluiu que os resíduos orgânicos podem ser utilizados com uma proporção de até 5% em peso de adição de resíduos. O incremento dessa porcentagem aumentou a porosidade, diminuiu a densidade aparente e ao mesmo tempo manteve a resistência mecânica aceitável.

Gregorová et. al. (2006), descreveram o uso de diferentes tipos de amido (de batata, trigo, tapioca, milho e amido de arroz) como formadores de poros nos blocos cerâmicos. Eles mostraram que, após queima, o amido é degradado e deixam uma estrutura de poros cujo tamanho e forma é determinada pelo tipo de amido aplicado.

Na Figura 12, são apresentadas as imagens obtidas por MEV da região de ruptura do bloco testemunha e dos blocos com adição de FBCA. Pode-se observar que o bloco testemunha não possui poros de tamanhos distintos em sua região de ruptura, enquanto que nos blocos com adição de FBCA observou-se um grande número de poros e com tamanhos distintos.

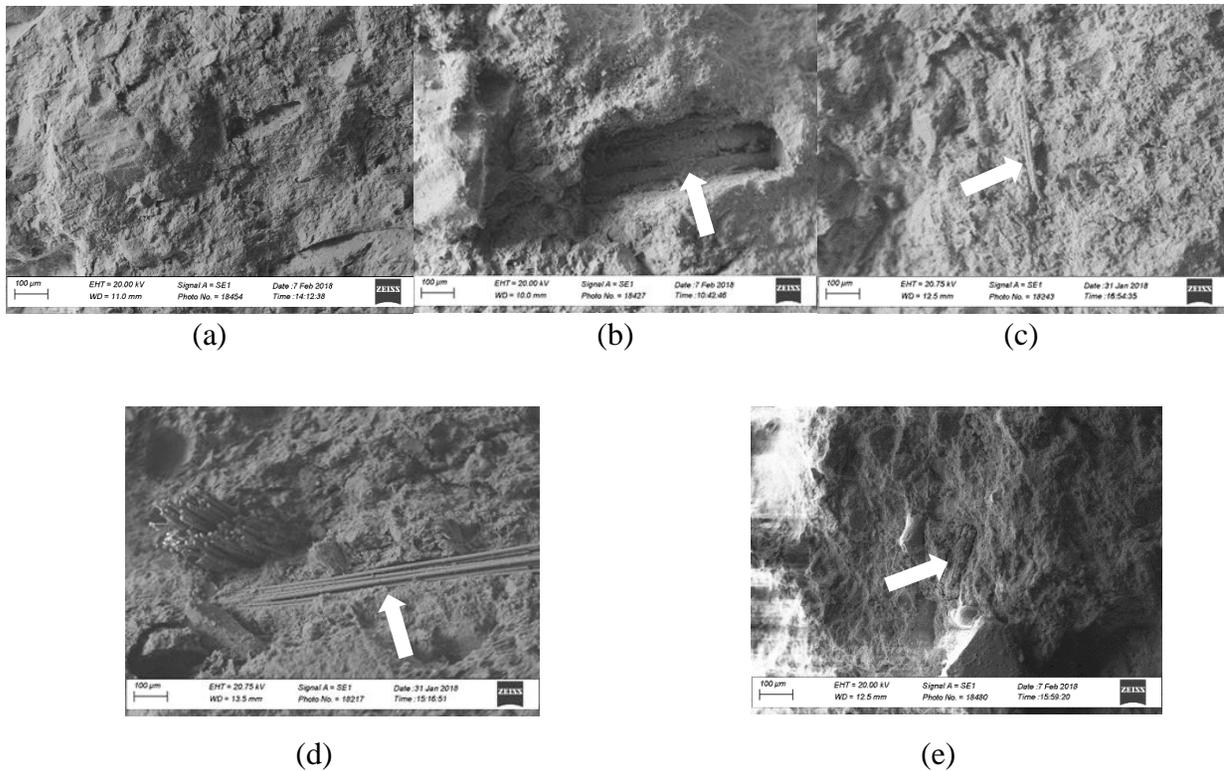
Figure 12 – MEV das regiões de ruptura dos blocos: testemunha (a), 1,25% de FBCA (b), 2,5% de FBCA (c), 5,0% de FBCA (d) e 7,5% de FBCA (e).



Fonte: Do autor (2017).

Na Figura 13, são apresentadas as imagens obtidas por MEV da região de ruptura do bloco testemunha e dos blocos com adição de FPRFV. Pode-se observar que os blocos com adição de FPRFV contém um grande número de poros e com tamanhos distintos.

Figure 13 – MEV das regiões de ruptura dos blocos: testemunha (a), 1,25% de FPRFV (b), 2,5% de FPRFV (c), 5,0% de FPRFV (d) e 7,5% de FPRFV (E).



Fonte: Do autor (2017).

Bartoli et al. (2009), concluíram que as propriedades mecânicas do bloco são altamente influenciadas pelo número de poros, bem como a distribuição de cavidades dentro do corpo sólido.

Tonoli et al. (2011), propuseram a utilização de fibra de Polipropileno juntamente com a fibra da poupa de Sisal para produção de compósito solo-cimento e concluiu que a mistura aumentou a dureza do compósito em um tempo de cura de 28 dias.

Dessa forma pode-se concluir que a criação de poros com tamanhos distintos no interior dos blocos cerâmicos, dentro de uma determinada faixa de adição de fibras de resíduos (entre 2,5 e 5,0%), contribuiu para um ganho de resistência mecânica à compressão dos blocos.

3.5 Absorção de água

Para avaliar os dados experimentais de Absorção de Água (AA), inicialmente foi verificada a normalidade dos dados ao nível de 5% de significância utilizando-se do teste de Anderson Darling, onde se obteve um P-Valor de $1,02 \times 10^{-9}$. Como $P\text{-Valor} < \alpha$ rejeitou-se H_0 , ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Desta forma, optou-se por utilizar uma análise estatística não paramétrica para o estudo desta variável.

Por meio do teste de Kruskal-Wallis obteve-se um P-Valor de 0,014. Como $P\text{-Valor} < \alpha$ rejeitou-se H_0 , ou seja, os tratamentos diferem entre si, porém, necessitou-se de uma próxima análise para descobrir quais dos tratamentos se diferem.

Foi realizado o teste de comparação de médias (Teste de Dunn), para os dados não paramétricos. Na Tabela 10 são apresentados os dados de absorção de água dos tratamentos que diferem da testemunha.

Tabela 10 – Resultados obtidos das médias de absorção de Água (%) para os tratamentos que diferem da testemunha.

Tipos de Tratamento	Absorção de Água (%)	
7,50 FBCA	21.09	a
5,00 FPRFV e 2,50 FBCA	20.44	a
Testemunha	18.63	b

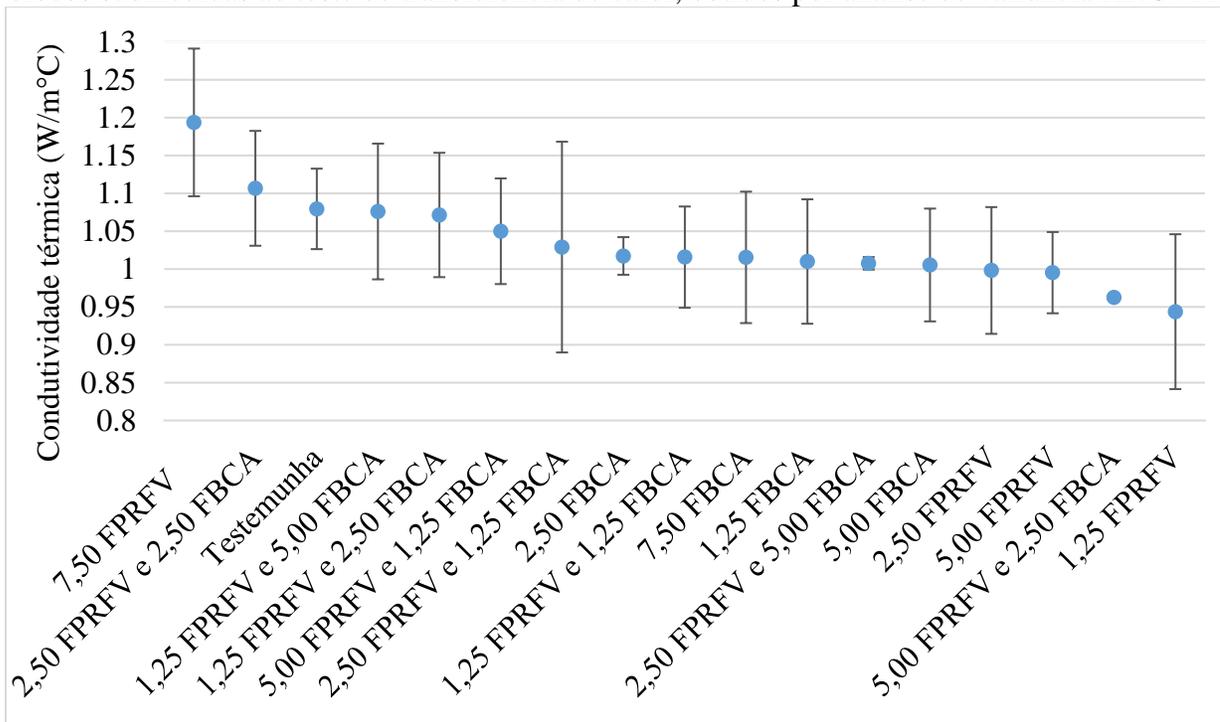
Fonte: Do autor (2018).

Pode-se observar, no entanto que somente o tratamento com 7,50 % de FBCA e outro com 5,00% FPRFV e 2,50% FBCA obtiveram uma absorção de água diferente do bloco testemunha. Além disso, nenhum dos tratamentos atingiram um índice de absorção de água inferior a 8% nem superior a 22%, os quais são exigidos pela ABNT NBR 15270/2005.

3.6 Condutividade térmica

Na avaliação dos dados experimentais de condutividade térmica (CT), inicialmente foi verificada a normalidade dos dados ao nível de 5% de significância utilizando-se do teste de Anderson Darling, onde se obteve um P-Valor de 0,07. Como $P\text{-Valor} > \alpha$ não se rejeitou H_0 , ou seja, os dados seguem uma distribuição normal. Os valores de C.T. para cada tratamento estão apresentados no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Condutividade térmica média ($W/m^{\circ}C$) das amostras descritas na Tabela 7, para os blocos submedidas ao teste de transferência de calor, obtidos por análise de variância ANOVA.



Fonte: Do autor (2018).

Por meio da análise de variância obteve-se um P-Valor de 0,09. Como $P\text{-Valor} > \alpha$ não se rejeitou H_0 , ou seja, os tratamentos não diferem entre si.

Utilizando somente da análise de variância, não foi possível identificar diferenças entre os tratamentos e nem quais dos tratamentos são melhores. Dessa forma também foi realizado o teste de comparação de medias (Teste Tukey). Na Tabela 11 são apresentados em ordem decrescente os

resultados obtidos das médias de Condutividade Térmica para cada tratamento. As médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

A partir dessa metodologia, pode-se verificar que somente os tratamentos de 7,50 FPRFV e 1,25 FPRFV diferem entre si.

Tabela 11 – Resultados obtidos das médias de Condutividade Térmica para cada tratamento.

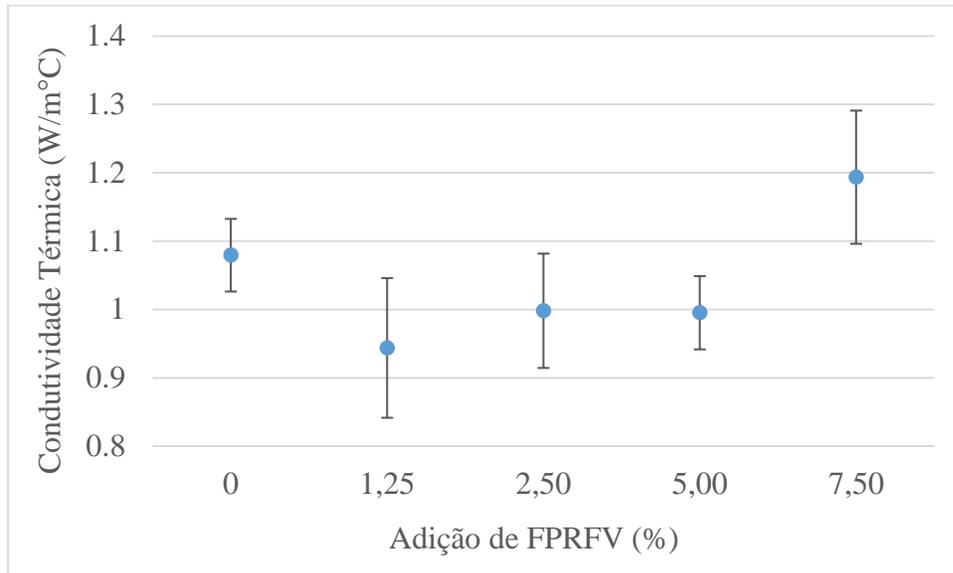
Tipos de Tratamento	Condutividade térmica (W/m°C)	
7,50 FPRFV	1.194	a
2,50 FPRFV e 2,50 FBCA	1.107	ab
Testemunha	1.079	ab
1,25 FPRFV e 5,00 FBCA	1.076	ab
1,25 FPRFV e 2,50 FBCA	1.071	ab
5,00 FPRFV e 1,25 FBCA	1.050	ab
2,50 FPRFV e 1,25 FBCA	1.029	ab
2,50 FBCA	1.017	ab
1,25 FPRFV e 1,25 FBCA	1.016	ab
7,50 FBCA	1.015	ab
1,25 FBCA	1.010	ab
2,50 FPRFV e 5,00 FBCA	1.007	ab
5,00 FBCA	1.005	ab
2,50 FPRFV	0.998	ab
5,00 FPRFV	0.995	ab
5,00 FPRFV e 2,50 FBCA	0.962	ab
1,25 FPRFV	0.944	b

Fonte: Do autor (2018).

Para entender melhor as diferenças significativas de condutividade térmica causadas pela adição de um mesmo resíduo à matriz cerâmica, foram executados também uma análise estatística para cada resíduo adicionado separadamente.

Na avaliação dos dados experimentais dos blocos com FPRFV, inicialmente foi verificada a normalidade dos dados a 5% de significância utilizando-se do teste de Anderson Darling, onde se obteve um P-Valor de 0,71. Como $P\text{-Valor} > \alpha$ não se rejeitou H_0 , ou seja, os dados seguem uma distribuição normal. Os valores de C.T. para cada tratamento com FPRFV estão apresentados no Gráfico 7, os quais foram obtidos por meio da análise de variância ANOVA.

Gráfico 7 – Condutividade térmica média ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$) das amostras de blocos com adição de FPRFV submetidas ao ensaio de compressão, descritas na Tabela 7, obtidos por análise de variância ANOVA.



Fonte: Do autor (2018).

Por meio da análise de variância obteve-se um P-Valor de 0,026. Como $\text{P-Valor} < \alpha$ rejeitou-se H_0 , ou seja, os tratamentos diferem entre si.

Na Tabela 12 são apresentados em ordem decrescente os resultados obtidos das médias de condutividade térmica para cada porcentagem de FPRFV. As médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. A partir dessa metodologia, pode-se verificar que os tratamentos com adição de 1,25% de FPRFV e 7,5% de FPRFV diferem significativamente entre si. Além disso, pela análise do Gráfico 7 e da Tabela 12, percebe-se que os tratamentos com adição de até 5,00% de FPRFV à matriz cerâmica não aumentaram a C.T. dos BCQs, não influenciando na qualidade dos mesmos com relação a condutividade térmica.

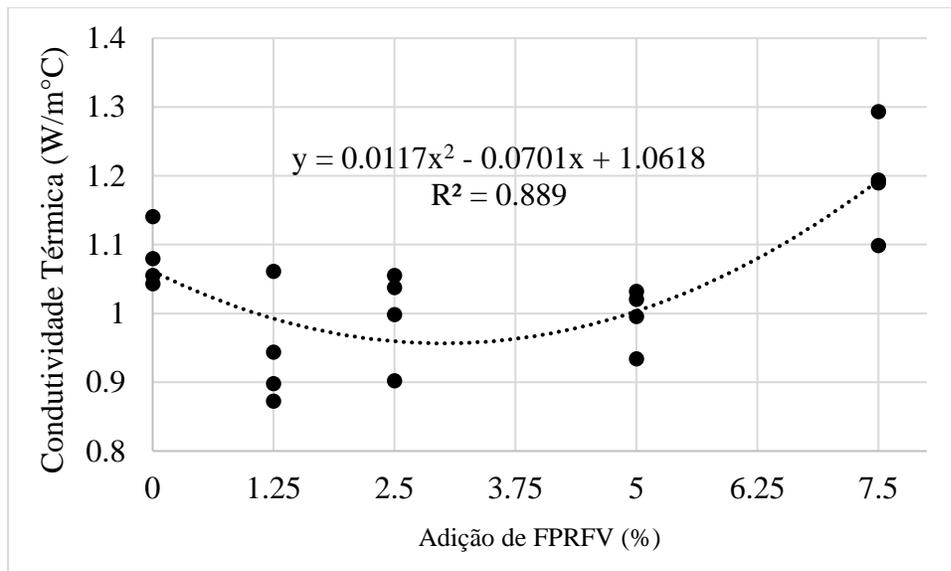
Tabela 12 – Resultados obtidos das médias de condutividade térmica para cada tratamento com FPRFV.

Tipos de Tratamento	Condutividade Térmica (W/m°C)	
7,50 FPRFV	1.19	a
Testemunha	1.08	ab
2,50 FPRFV	1.00	ab
5,00 FPRFV	1.00	ab
1,25 FPRFV	0.94	b

Fonte: Do autor (2018).

Foi realizado também uma análise de regressão para os dados de condutividade térmica dos BCQs com adição de FPRFV. A partir dos dados apresentados no Gráfico 8, pode-se perceber que a função que melhor descreveu a distribuição foi uma função polinomial do segundo grau. Dessa forma, observou-se que melhor porcentagem de a adição de FPRFV encontra-se entre 2,50% e 5,00%, podendo-se ainda obter melhores valores de condutividade térmica nesse intervalo. Além disso, a adição de 5,0% de fibra diminuiu a dispersão dos dados observados.

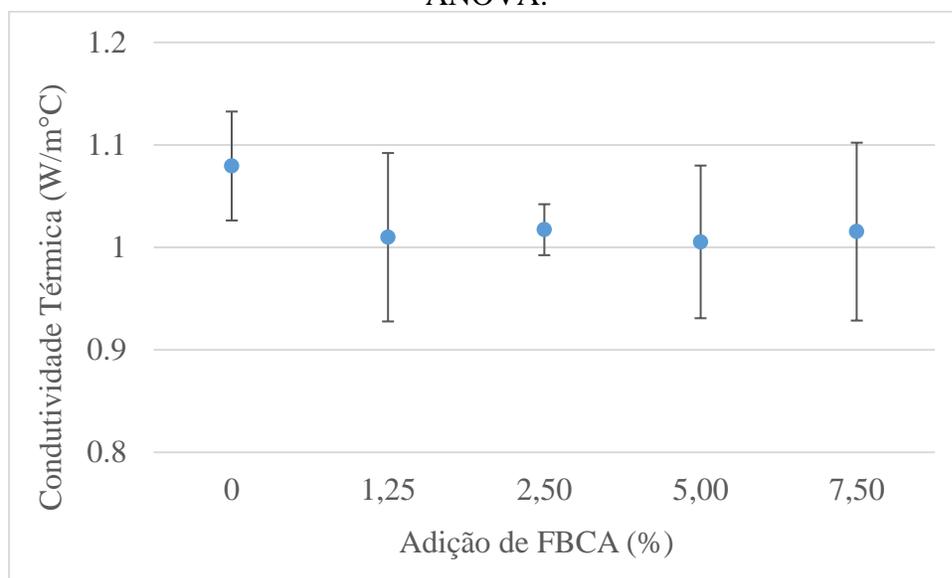
Gráfico 8 – Análise de Regressão para a condutividade térmica dos BCQs com adição de FPRFV.



Fonte: Do autor (2018).

Os dados experimentais dos blocos com FBCA foram avaliados e verificada a normalidade dos dados ao nível de 5% de significância utilizando-se do teste de Anderson Darling, onde se obteve um P-Valor de 0,20. Como $P\text{-Valor} > \alpha$ não se rejeitou H_0 , ou seja, os dados seguem uma distribuição normal. Os valores de C.T. para cada tratamento com FBCA estão apresentados no Gráfico 9, os quais foram obtidos por meio da análise de variância ANOVA.

Gráfico 9 – Condutividade térmica média ($W/m^{\circ}C$) das amostras de blocos com adição de FBCA submedidas ao ensaio de compressão, descritas na Tabela 7, obtidos por análise de variância ANOVA.



Fonte: Do autor (2018).

Por meio da análise de variância obteve-se um P-Valor de 0,671. Como $P\text{-Valor} > \alpha$ não se rejeitou H_0 , ou seja, os tratamentos não diferem entre si.

Na Tabela 13 são apresentados em ordem decrescente os resultados obtidos das médias de condutividade térmica para cada porcentagem de FBCA. As médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. A partir dessa metodologia, pode-se verificar que nenhum dos tratamentos diferem significativamente entre si. Além disso, pela análise do Gráfico 9 e da Tabela 13, percebe-se que os tratamentos não aumentaram a C.T. dos BCQs, não influenciando negativamente na qualidade dos mesmos com

relação a condutividade térmica. Além disso, a adição de 2,5% de fibra diminuiu a dispersão dos dados observados que conseqüentemente diminuiu a variação da qualidade dos blocos, tornando-os mais padronizados.

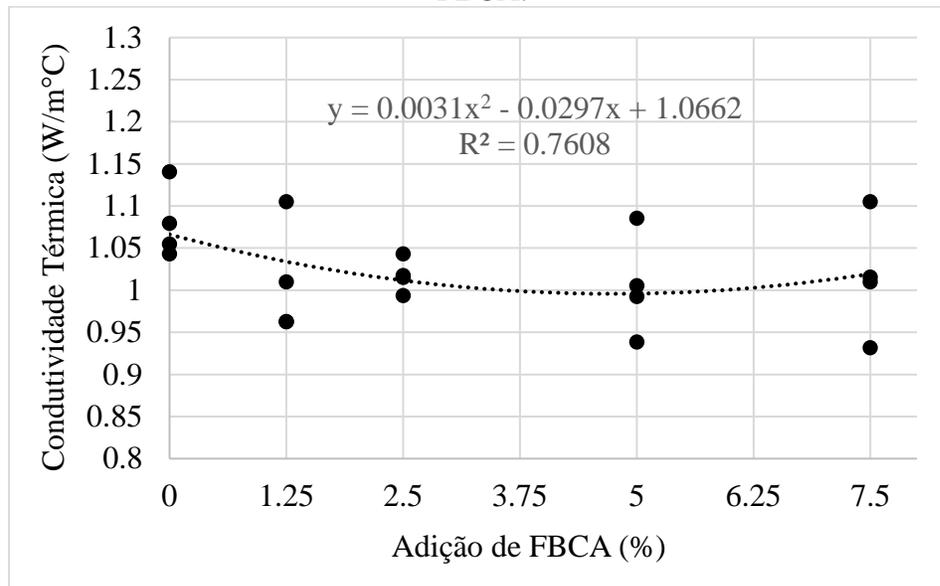
Tabela 13 – Resultados obtidos das médias de resistência para cada tratamento com FBCA.

Tipos de Tratamento	Condutividade Térmica (W/m°C)	
Testemunha	1.08	a
2,50 FBCA	1.02	a
7,50 FBCA	1.01	a
1,25 FBCA	1.01	a
5,00 FBCA	1.00	a

Fonte: Do autor (2018).

Foi realizado também uma análise de regressão para os dados de condutividade térmica dos BCQs com adição de FBCA. A partir dos dados apresentados no Gráfico 10, pode-se perceber que a função que melhor descreveu a distribuição foi uma função polinomial do segundo grau. Dessa forma, observou-se que melhor porcentagem de a adição de FBCA encontra-se aproximadamente em 5,00%, para consumir a maior quantidade de resíduos sem influenciar negativamente na qualidade dos blocos.

Gráfico 10 – Análise de Regressão para a condutividade térmica dos BCQs com adição de FBCA.



Fonte: Do autor (2018).

Outros autores também estudaram a adição de diferentes resíduos na produção de BCQs para se obter uma possível diminuição da condutividade térmica dos mesmos.

Muñoz et al. (2014) estudaram a utilização de resíduo de bagaço da indústria vinícola como aditivo para a produção de BCQs e observaram que, apesar desse resíduo ter diminuído a resistência mecânica do bloco, ele aumentou em 25% o isolamento térmico do mesmo. Esse aumento foi explicado pelo fato de a adição do resíduo ter aumentado a porosidade do bloco, uma vez que os poros incorporaram convecção a transferência de calor o que afetou diretamente a capacidade de condução térmica do mesmo.

Rubia-García et al. (2012) estudaram a incorporação de resíduos de bagaço de moinho de azeitona à produção de blocos leves, e concluiu que a adição desse tipo de resíduo aumenta a porosidade do bloco, que conseqüentemente, melhorou sua capacidade de isolamento em 27%. Essa característica foi alcançada pelo fato da combustão do resíduo durante a queima do bloco ter formado cavidades (poros) no material o que proporciona maior isolamento. Porém, assim como Muñoz et al. (2014) foi observado que a adição do resíduo diminuiu a resistência mecânica do bloco.

Apesar de vários autores relatarem o aumento do isolamento térmico dos materiais compósitos, a partir dos resultados obtidos, não pode-se afirmar que houve uma redução considerável na condutividade térmica dos corpos de prova com adição das fibras assim como descrito por Demir et. al. (2005), que estudaram a utilização de resíduos da produção de papel Kraft na produção de blocos cerâmicos para melhorar a capacidade de isolamento do bloco e gerar porosidade no mesmo.

4 CONCLUSÕES

O solo utilizado apresentou características físico-químicas adequadas para a produção de BCQ de acordo com a ABNT NBR 15270/2005. A porcentagem de sílica (SiO_2) presente na matriz cerâmica influenciou diretamente na resistência à compressão dos BCQs que podem ser aplicados como blocos de vedação.

Na composição química das amostras, verificou-se que nos blocos com adição de FPRFV foram encontradas quantidades de 1,70%, 2,63% 10,88% a mais de sílica quando comparados aos blocos testemunha, bloco híbrido e bloco com FBCA respectivamente.

As adições de fibras dos ensaios preliminares demonstraram que misturas com porcentagens iguais ou superiores a 10% influenciaram negativamente no processo de extrusão e corte dos blocos, gerando brocas e conseqüentemente uma má aparência das amostras.

A adição de FPRFV em porcentagem entre 2,5 aumentou a resistência mecânica dos BCQs em 49,18%, seguido da adição de 2,50 FPRFV e 1,25 FBCA (híbrido) proporcionando uma resistência maior em 40,16% quando comparados ao bloco testemunha.

A adição de FPRFV, FBCA e híbridos em até 7,5% aumentou a porosidade dos blocos, porém, não houve alteração significativa na absorção de água (AA) com relação ao bloco testemunha, pois, nenhum dos tratamentos atingiu um valor inferior a 8% nem superior a 22%, os quais são exigidos pela ABNT NBR 15270/2005.

A adição de 1,25 FPRFV reduziu a condutividade térmica (CT) em 14,30% quando comparado ao bloco testemunha.

REFERÊNCIAS

ADAZABRA, A. N.; VIRUTHAGIRI, G.; SHANMUGAM, N. Management of spent shea waste: An instrumental characterization and valorization in clay bricks construction. **Waste management**, New York, v. 64, p. 286–304, 2017.

ARSENOVIĆ, M. et al. Prediction and fuzzy synthetic optimization of process parameters in heavy clay brick production. **Ceramics International**, v. 39, n. 2, p. 2013–2022, 2013.

ARSENOVIĆ, M. et al. Mathematical approach to application of industrial wastes in clay brick production - Part I: Testing and analysis. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 4890–4898, 2015a.

ARSENOVIĆ, M. et al. Mathematical approach to application of industrial wastes in clay brick production—Part II: Optimization. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 4899–4905, 2015b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**. Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3**. Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005c.

ASTM E1131-08. Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. **American Society for Testing and Materials**, West Conshohocken, Pennsylvania, 2014.

BARTOLI, L. et al. Time-of-flight neutron diffraction characterization of ceramic findings from southern and western Sicily. **Archaeometry**, v. 51, n. 4, p. 568-575, 2009.

CAMPOS, L. F. A. et al. Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. **Cerâmica**, v. 45, n. 295, p. 140-145, maio 1999.

DEMIR, I.; BASPINAR, M. S.; ORHAN, M. Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. **Building and Environment**, v. 40, n. 11, p. 1533–1537, 2005.

ELICHE-QUESADA, D. et al. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. **Applied Clay Science**, v. 52, n. 3, p. 270–276, 2011.

ELICHE-QUESADA, D. et al. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 463–475, 2017.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 7–12, 2012.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de resíduos sólidos industriais: ano base 2014**. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/declaracoes_ambientais/inventarios_industriais/Invent%C3%A1rio_Res%C3%ADuos_S%C3%B3lidos_Industriais__2015_ano_base_2014.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2016.

GREGOROVÁ, E.; PABST, W.; BOHAČENKO, I. Characterization of different starch types for their application in ceramic processing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, n. 8, p. 1301-1309, 2006.

KAZMI, S. M. S. et al. Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 372–378, 2016.

MARTÍNEZ, M. L. et al. Utilization of bagasse from the beer industry in clay brick production for building. **Materiales de Construcción**, v. 62, n. 306, p. 199–212, 2012.

MODESTO, C. et al. Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 4, p. 14-18, 2003.

MORALES, M. P. et al. Influence of the type of lightweight clay brick on the equivalent thermal transmittance of different types of façades on buildings. **Materiales de Construcción**, v. 66, n. 323, p. 096, 2016.

MUÑOZ VELASCO, P. et al. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material—A review. **Construction and Building materials**, v. 63, p. 97-107, 2014.

MUÑOZ VELASCO, P. et al. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 241–252, 2016a.

MUÑOZ VELASCO, P. et al. Eco-fired clay bricks made by adding spent coffee grounds: a sustainable way to improve buildings insulation. **Materials and Structures**, v. 49, n. 1-2, p. 641–650, 2016b.

NUNES, A. C. N.; RESENDE, S. S. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte: Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) e Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM), 2013. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2018.

PHONPHUAK, N.; KANYAKAM, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, n. 4, p. 3057–3062, 2016.

RAMOS, S. O. et al. Caracterização de argilas usadas para cerâmica estrutural. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5, n. 3, p. 65–70, 2010.

RUBIA-GARCÍA, M. D. et al. Assessment of olive mill solid residue (pomace) as an additive in lightweight brick production. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 495-500, 2012.

SILVA, D. W. et al. Cementitious Composites Reinforced with Kraft Pulping Waste. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 390–398, 2016.

SILVA, A. D. R. **Estudo térmico e de materiais na construção de casas populares com blocos confeccionados a partir de um composto a base de cimento, gesso, eps e raspa de pneu**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SOUZA, A. E. et al. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 10, p. 2774–2780, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. DE; 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.

TEIXEIRA, R. S. et al. Extruded Cement Based Composites Reinforced with Sugar Cane Bagasse Fibres. **Key Engineering Materials**, v. 517, p. 450–457, 2012.

TONOLI, G. H. D. et al. Performance and Durability of Cement Based Composites Reinforced with Refined Sisal Pulp. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 22, n. 2, p. 149–156, 2007.

TONOLI, G. H. D. et al. Hybrid Reinforcement of Sisal and Polypropylene Fibers in Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 2, p. 177–187, 2011.

UKWATTA, A. et al. Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 76–85, 2016.

UKWATTA, A.; MOHAJERANI, A. Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 11–22, 2017.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima. **Cerâmica**, v. 49, n. 312, p. 245-250, 2003.

ZHANG, L. Production of bricks from waste materials - A review. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 643–655, 2013.

ARTIGO 2 - MODELAGEM *FUZZY* PARA A PREDIÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA MATRIZ CERÂMICA NA PRODUÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS QUEIMADOS

Artigo redigido de acordo com a norma NBR 6022 (ABNT 2003).

MODELAGEM *FUZZY* PARA A PREDIÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA MATRIZ CERÂMICA NA PRODUÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS QUEIMADOS

RESUMO: Os Blocos Cerâmicos Queimados (BCQs) são os materiais de construção mais utilizados em todo o mundo para a composição de alvenarias de vedação ou estrutural. Muitos fatores ligados à heterogeneidade de suas matérias-primas (solo), influenciam nas propriedades finais deste produto. Desta forma, a correção das características químicas da matéria-prima, principalmente pela adição de resíduos sólidos, é uma alternativa que pode melhorar as características dos BCQs, além de diminuir os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado dos resíduos. Para a tomada de decisão quanto a frações de adição de resíduos sólidos na produção dos BCQs, pode-se utilizar ferramentas e técnicas de modelagem computacional, como por exemplo os sistemas inteligentes. Os sistemas mais utilizados e testados para predição são a lógica *fuzzy* e as redes neurais artificiais. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi aplicar a metodologia *fuzzy* para determinar o melhor traço da matriz cerâmica compósita de dois resíduos, o plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) e o bagaço de cana-de-açúcar (BCA). O PRFV e o BCA foram transformados em fibras e adicionadas à matriz cerâmica nas porcentagens de adição de 1,25%, 2,50%, 5,00% e 7,50%. Os blocos produzidos a partir dessas adições foram queimados a temperaturas entre 850 e 1000°C, e as amostras foram avaliadas quanto à resistência mecânica à compressão (RM), absorção de água (AA) e condutividade térmica (CT). Além disso, as regiões de ruptura das amostras foram estudadas por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). As porcentagens de adição de fibras de plástico reforçado com fibra de vidro (FPRFV) e fibra do bagaço de cana-de-açúcar (FBCA) foram adotadas como variáveis de entrada do modelo *fuzzy* e a RM, CT e AA adotadas como variáveis de saída. Foram encontrados para correlação dos dados simulados pelo modelo e os dados experimentais observados os valores de R^2 de 0,996, 0,991 e 0,995 para RM, CT e AA respectivamente. Com base nos resultados observados, pode-se afirmar que o modelo *fuzzy* é uma ferramenta eficiente na tomada de decisões, pela qual foi possível definir as melhores porcentagens de adição de resíduos à matriz cerâmica.

Palavras-chave: Predição, Sistema *fuzzy*, Parâmetros de Processo, Compósito e Fibras.

FUZZY MODELING TO PREDICT AND OPTIMIZE THE CERAMIC MATRIX IN THE PRODUCTION OF BURNT CERAMIC BRICKS

ABSTRACT: ABSTRACT: Burnt Ceramic Bricks (BCBs) are widely used building materials worldwide for the composition of structural or closing masonry. Many factors like the heterogeneity of its raw materials (soil), influence final properties of this product. In this way, the correction of the chemical characteristics of the raw material, mainly by the addition of solid residues, is an alternative that can improve the characteristics of the BCBs, besides reducing the environmental impacts caused by the inappropriate waste disposal. In order to make decisions regarding solid waste addition fractions to the BCBs production, tools and computational modeling techniques can be used, such as intelligent systems. The most used and tested systems for prediction are fuzzy logic and artificial neural networks. In this context, the objective of this study was to apply the fuzzy methodology to determine the best trait of the composite ceramic matrix of two residues, reinforced plastic with fiberglass (PRFG) and sugarcane bagasse (SCB). The PRFG and SCB were transformed to fibers and added to the ceramic matrix in the addition percentages of 1.25%, 2.50%, 5.00% and 7.50%. The bricks produced from these additions were burned at temperatures between 850 and 1000°C, and the samples were evaluated by mechanical compressive strength (CS), water absorption (WA) and thermal conductivity (TC). In addition, the rupture sections of the samples were studied by Scanning Electron Microscopy (SEM). The percentage of addition of fiber plastic reinforced with fiberglass (FPRFV) and sugarcane bagasse fiber (FSCB) were adopted as input variables of the fuzzy model and the CS, TC and WA adopted as output variables. The values of R^2 of 0.996, 0.991 and 0.995 for CS, TC and WA were respectively found for correlation of the simulated data by the model and the experimental data observed. Based on the observed results, it can be concluded that the fuzzy model is an efficient decision-making tool, through which it was possible to define the best percentages of residue addition to the ceramic matrix.

Key words: Prediction, *fuzzy* system, Process parameters, Composite and Fiber.

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil, os blocos cerâmicos queimados (BCQs) são os materiais mais utilizados nas alvenarias de vedação, ou estruturais. Muitos fatores ligados à heterogeneidade das matérias-primas, influenciam nas propriedades finais dos Blocos Cerâmicos Queimados (BCQs). O solo é a principal matéria-prima para a produção dos BCQs e a complexidade de suas características demandam vários estudos, os quais podem ser observados nos trabalhos de (ADAZABRA; VIRUTHAGIRI; SHANMUGAM, 2017; ARSENOVIĆ et al., 2013, 2015a, 2015b; ELICHE-QUESADA et al., 2017; KAZMI et al., 2016; MUÑOZ V. et al., 2016; PHONPHUAK; KANYAKAM; CHINDAPRASIRT, 2016; UKWATTA; MOHAJERANI, 2017).

Para se determinar a melhor matriz cerâmica compósita para a produção de BCQs, pode-se utilizar ferramentas e técnicas de modelagem computacional, como sistemas especialistas inteligentes capazes de executar tarefas ou resolver problemas a partir de uma base de conhecimento. Os sistemas mais utilizados e testados para a predição são a lógica *fuzzy* e as redes neurais artificiais. A metodologia *fuzzy* vem sendo utilizada em várias áreas do conhecimento, como para a predição e otimização de parâmetros de processo na produção de blocos furados e maciços (ARSENOVIĆ et al., 2013) e na avaliação do conforto térmico animal nas construções (SCHIASSI et al., 2015; PONCIANO et al., 2012; PANDORFI et al., 2011).

Tendo em vista que a interação entre o solo e os resíduos adicionados influencia diretamente na propriedade final do BCQ, a aplicação da lógica *fuzzy* é uma técnica possível de ser utilizada para predizer as características finais de resistência mecânica, condutividade térmica e absorção de água dos blocos. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema *fuzzy*, para predizer a melhor matriz cerâmica com adição de fibras de bagaço de cana-de-açúcar (FBCA) e de fibra de resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (FPRFV) para a produção de BCQs que atenda à ABNT NBR 15270-1:2005.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

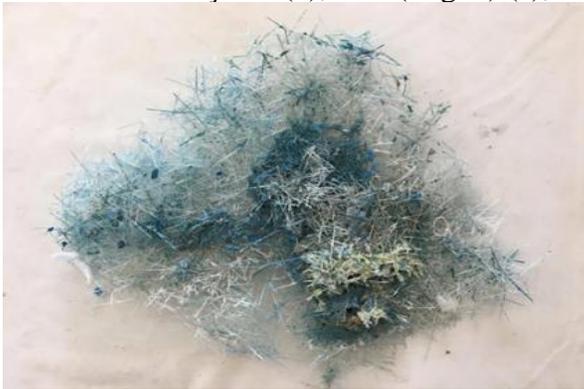
Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos por meio de experimentos realizados na Universidade Federal de Lavras. Os corpos de prova foram produzidos em escala industrial em uma indústria Cerâmica da região Sul de Minas Gerais/Brasil, onde foram adicionadas fibras de bagaço de cana-de-açúcar (FBCA) e de fibra de resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (FPRFV) à matriz cerâmica, e produzidas 374 amostras de BCQs com diferentes proporções de adição.

O solo utilizado para a produção das amostras apresentou composição química de SiO₂ (35,45%), Al₂O₃ (21,53%), CaO (0,19%), K₂O (1,54%), P₂O₅ (0,08%) e MgO (0,00%). Os valores de limite de consistência (LC), limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) foram 17,35%, 27,76%, 41,39% e 13,63% respectivamente, os quais estão dentro dos intervalos observados na literatura, onde o limite de plasticidade deve variar entre 15 a 30%, o limite de liquidez entre 30 a 60% e o índice de plasticidade entre 10 a 30% de matérias-primas argilosas para a produção de materiais cerâmicos (ARSENOVIĆ et al., 2013).

A amostra de solo apresentou ainda porcentagem de argila, silte e areia de 38%, 30% e 32%, respectivamente, a qual foi classificada como solo argiloso, indicado para produção de Blocos Cerâmicos Queimados. Com base nesses dados, verificou-se que o solo matriz apresentado é indicado para produção de blocos cerâmicos e não foi necessário realizar a correção do solo para o seu processamento (CAMPOS, et al., 1999; VIEIRA. et al., 2003).

O resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (RPRFV) apresentou concentrações de SiO₂ (11,18%), Al₂O₃ (2,12%), CaO (19,63%), K₂O (0,00%), P₂O₅ (0,10%) e MgO (0,00%). O resíduo de bagaço de cana-de-açúcar apresentou concentrações de SiO₂ (0,25%), Al₂O₃ (0,00%), CaO (0,41%), K₂O (0,66%), P₂O₅ (0,07%) e MgO (2,00%). Na Figura 1 são apresentadas as três matérias primas utilizadas neste estudo e o BCQs produzidos com estes materiais.

Figura 1 – Resíduo de plástico reforçado com fibra de vidro (RPRFV) (a), bagaço de cana-de-açúcar (b), solo (Argila) (c), bloco cerâmico queimado (BCQ) (e).



(a)



(b)



(c)

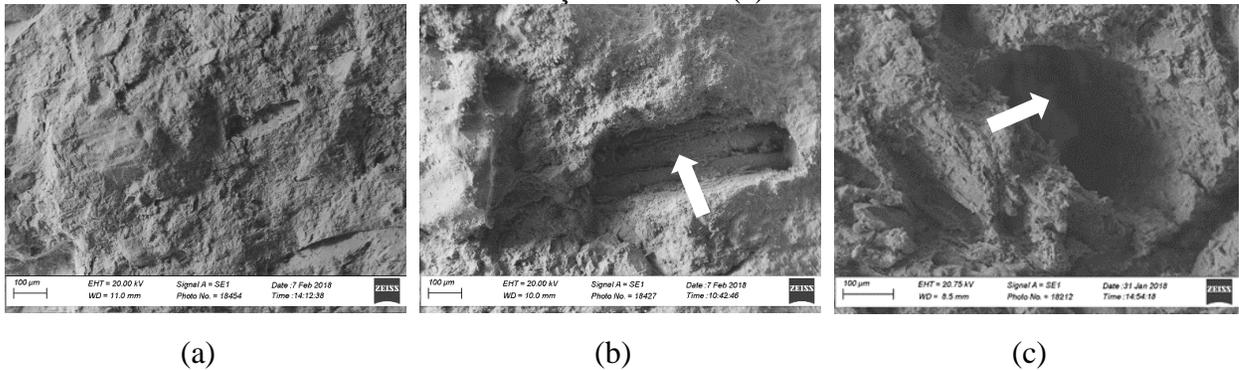


(d)

Fonte: Do autor (2017).

Na Figura 2 são apresentadas imagens das regiões de ruptura das amostras obtidas por imagens de microscopia eletrônica por varredura (MEV), logo após aos testes de resistência mecânica à compressão (RM), sendo estas, do bloco denominado Testemunha (sem adição de resíduo), do bloco com adição de FRPRFV e de FBCA respectivamente, onde é possível observar a interação entre o solo e os resíduos depois da queima das amostras. Na Figura 2b pode-se observar que a FRPRFV aderiu bem à matriz cerâmica, ao contrário da FBCA que se degradou completamente (Figura 2c).

Figura 2 – MEV da região de ruptura dos blocos: testemunha (a), com adição de FRPRFV(b), e com adição de FBCA(c).



Fonte: Do autor (2018).

Na Tabela 1 são apresentadas as amostras de blocos produzidos neste estudo, assim como os testes realizados e suas respectivas quantidades de repetições. Foram produzidas amostras de BCQs sem adição de resíduo, denominado testemunha, que corresponde ao item 1 (Tabela 1), bem como amostras de blocos compósitos onde as quantidades de resíduos adicionados variaram entre 0 a 7,5%. As misturas foram preparadas primeiramente com adição de um único tipo de resíduo, onde foram adicionadas a FRPRFV ou a FBCA, correspondentes aos itens de 2 a 9 (Tabela 1). Posteriormente foram confeccionados os blocos denominados híbridos que correspondem aos itens de 10 a 17 (Tabela 1). As amostras foram avaliadas quanto à resistência mecânica à compressão (RM), ao índice de absorção de água (AA) e condutividade térmica (CT).

Tabela 1 – Porcentagens de substituição em peso de solo por fibras de resíduos e quantidade de amostras utilizadas nos ensaios.

Item	BLOCO	Testes		
		RM	AA	CT
1	Testemunha	13	6	3
2	FBCA 1,25%	13	6	3
3	FBCA 2,5%	13	6	3
4	FBCA 5,0%	13	6	3
5	FBCA 7,5%	13	6	3
6	FPRFV 1,25%	13	6	3
7	FPRFV 2,5%	13	6	3
8	FPRFV 5,0%	13	6	3
9	FPRFV 7,5%	13	6	3
10	Híbrido 2,5% (1,25% FBCA* e 1,25% FPRFV**)	13	6	3
11	Híbrido 3,75% (1,25% FBCA* e 2,5% FPRFV**)	13	6	3
12	Híbrido 6,25% (1,25 FBCA* e 5,0% FPRFV**)	13	6	3
13	Híbrido 3,75% (2,5% FBCA* e 1,25% FPRFV**)	13	6	3
14	Híbrido 5,0% (2,5% FBCA* e 2,5% FPRFV**)	13	6	3
15	Híbrido 7,5% (2,5% FBCA* e 5,0% FPRFV**)	13	6	3
16	Híbrido 6,25% (5,0% FBCA* e 1,25% FPRFV**)	13	6	3
17	Híbrido 7,5% (5,0% FBCA* e 2,5% FPRFV**)	13	6	3
	Total de cada amostra	221	102	51
	Total das amostras		374	

* Fibra de Bagaço de Cana-de-Açúcar; ** Fibra de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (RM) Resistência mecânica à compressão; (AA) absorção de água; (CT) condutividade térmica.

Fonte: Do autor (2018).

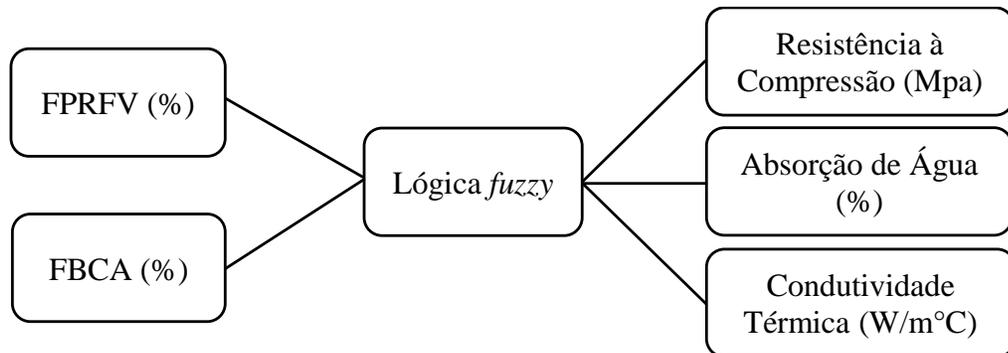
Antes de se aplicar a metodologia *fuzzy*, os dados de RM e CT foram avaliados estatisticamente por meio análise da variância (ANOVA), onde verificou-se que os mesmos seguiram uma distribuição normal e que existem diferenças significativas entre as médias dos tratamentos obtidas pelo teste Tukey. Para os dados de AA, que não seguiram uma distribuição normal, foi realizada uma análise estatística não paramétrica, onde foram utilizados o teste de Kruskal-Wallis e o teste de comparação entre médias duas a duas de Dunn, e observou-se também diferenças significativas entre os valores médios de alguns tratamentos.

2.2 Modelagem *fuzzy*

A metodologia *fuzzy* foi aplicada neste estudo com o intuito de prever quais as melhores porcentagens de FRPRFV e FBCA que adicionadas ao solo para a produção da matriz cerâmica compósita, resultarão na produção de blocos de melhor qualidade e que atendam às exigências da ABNT NBR 15270-1/2005, assim como proposto por Arsenović et al. (2013) e Arsenović et al. (2015) para blocos furados e maciços e por Nazari (2012) que avaliou o índice de absorção de água (AA) em geopolímeros leves.

Para a realização da modelagem foi utilizado *software* Matlab®. Para implementar a lógica *fuzzy*, foram utilizadas duas variáveis de entrada: FPRFV (%) e FBCA (%) adicionados à massa cerâmica. Os conjuntos *fuzzy* foram elaborados para caracterizar cada variável, e as funções de pertinência foram determinadas para os conjuntos de dados. Como variáveis de saída foram adotados a resistência mecânica à compressão (MPa), o índice de absorção de água (%) e os valores de condutividade térmica (W/m°C). Na Figura 3, é ilustrado o esquema do sistema *fuzzy* utilizado neste estudo.

Figura 3 – Esquema do sistema *fuzzy*.



Fonte: Do autor (2018).

Para a análise *fuzzy*, foi utilizado o método de inferência de Mamdani, que fornece as respostas de um conjunto *fuzzy* de acordo com as combinações dos valores de entrada com seus relativos graus de pertinência, por meio de um operador mínimo e em seguida pelas definições das

regras por meio do operador máximo (LEITE et al., 2010). Para a defuzificação foi utilizado o método do Centro de Gravidade (Centroide ou Centro de Área), que admite todas as alternativas de saída, convertendo os conjuntos *fuzzy* em valores numéricos (LEITE et al., 2010).

A determinação das regras e intervalos para as variáveis de entrada e saída foram admitidos de acordo com uma melhor resposta do modelo em relação aos dados coletados experimentalmente, os quais estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de resistência mecânica (RM), condutividade térmica (CT) e absorção de água (AA) obtidos experimentalmente para os BCQs.

FPRFV (%)	FBCA (%)	Dados Experimentais		
		RM (Mpa)	CT (W/m°C)	AA (%)
0	0	1,45	1,064	18,634
1,25	0	1,57	1,007	20,523
2,5	0	1,82	0,996	20,678
5	0	1,68	0,963	20,050
7,5	0	1,46	1,175	19,884
0	1,25	1,58	0,994	18,123
0	2,5	1,8	1,005	19,370
0	5	1,57	1,012	19,758
0	7,5	1,57	1,035	21,089
1,25	1,25	1,49	0,999	20,839
1,25	2,5	1,52	1,063	20,851
1,25	5	1,58	0,996	18,929
2,5	1,25	1,71	1,035	20,405
2,5	2,5	1,33	0,998	19,400
2,5	5	1,39	0,983	21,081
5	1,25	1,58	1,051	19,057
5	2,5	1,56	0,950	20,441

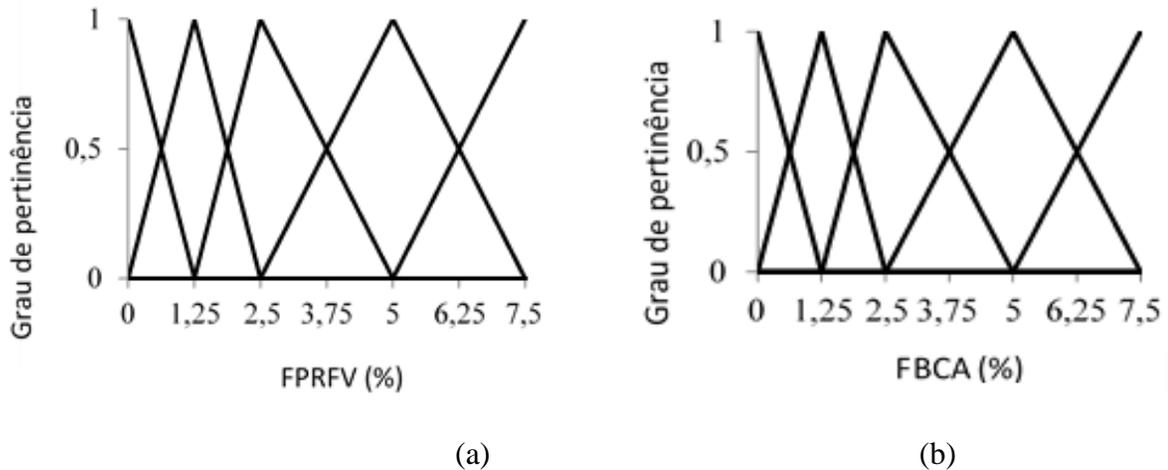
* Fibra de Bagaço de Cana-de-Açúcar

** Fibra de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro

Fonte: Do autor (2018).

A partir destes dados, foram determinados os intervalos para cada variável de entrada, conforme as curvas de pertinência (Figura 4), que foram definidas em formato triangular por melhor representar a divisão dos dados de entrada, conforme utilizado por diversos autores (SANTOS et al., 2009; GANGA et al., 2011; PONCIANO et al., 2012; SCHIASSI et al., 2015).

Figura 4 – Funções de pertinência para as variáveis de entrada: a) Porcentagem de adição de FPRFV (%), b) Porcentagem de adição de FBCA (%).



Fonte: Do autor (2018).

A resistência à compressão (MPa), o índice de absorção de água (%) e os valores de condutividade térmica (W/m°C) definidos como variáveis de saída do modelo, foram avaliados a partir dos dados experimentais (Tabela 2), e a partir desses dados foram elaboradas as funções de pertinência para os dados de saída (Figura 5).

O coeficiente de variação (CV) calculado a partir da Equação 1, foi utilizado para comparar as diferenças entre os resultados experimentais e os resultados simulados pelo modelo *fuzzy*.

$$CV = \left(\frac{O_i - S_i}{O_i} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

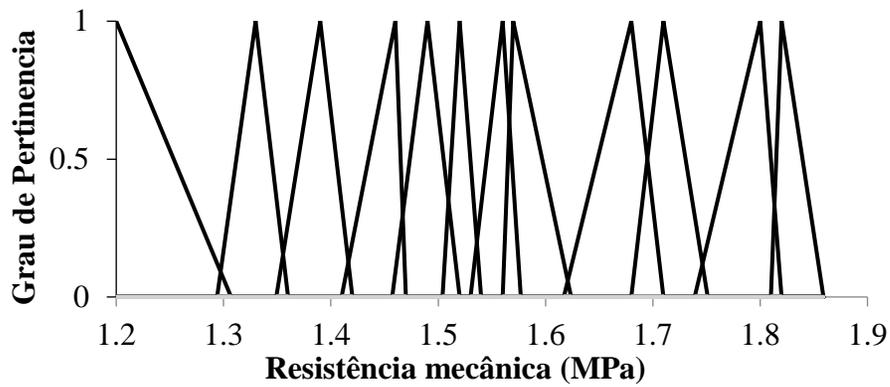
Onde:

CV = Coeficiente de Variação

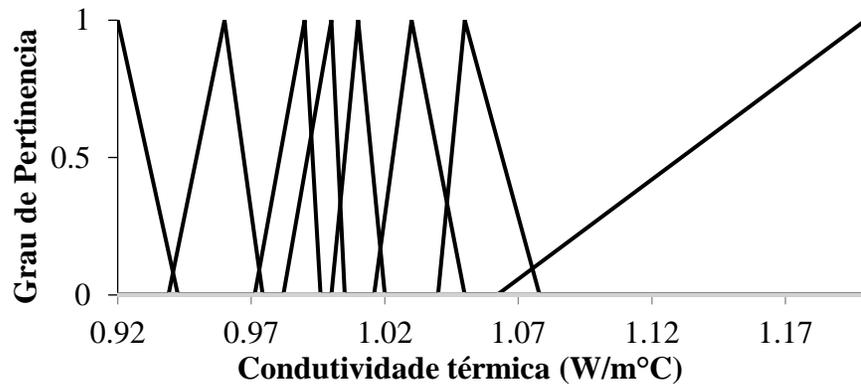
O_i = Valor observado.

S_i = Valor simulado.

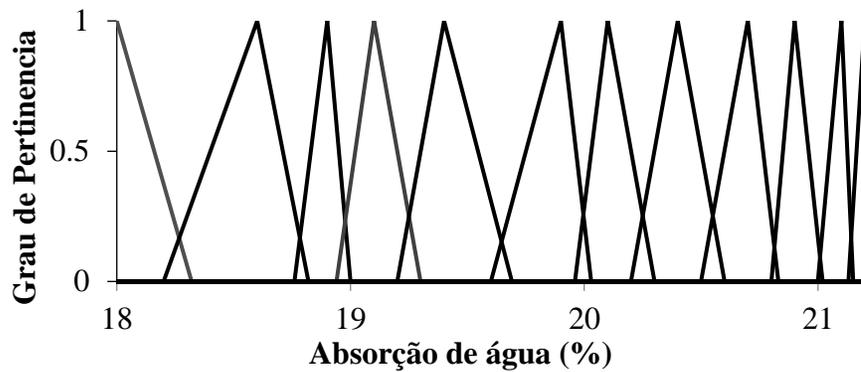
Figura 5 – Funções de pertinência para as variáveis de saída: a) resistência mecânica (MPa), b) condutividade térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$) e c) absorção de água (%).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Do autor (2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de resistência mecânica à compressão (RM), condutividade térmica (CT) e absorção de água (AA) obtidos experimentalmente e pela modelagem *fuzzy* respectivamente. São apresentados também os desvios padrões entre os resultados, bem como o coeficiente de variação (CV) encontrado entre os resultados experimentais e os simulados.

Com base no exposto na Tabela 3, foi possível observar que o modelo *fuzzy* apresentou um CV médio negativo de -0,11% para a RM, o que indica que o modelo subestima os valores de RM para os dados de entrada apresentados, num intervalo de adição de resíduos de 0% a 7,5%. Foi possível observar também que o modelo *fuzzy* apresentou um CV médio positivo de 0,18% para CT, e 0,09% para AA, que indica que o modelo superestima estes valores.

Estes resultados comprovam o estudo de Arsenović et al. (2013), que desenvolveram um modelo *fuzzy* para predizer a melhor característica química do solo, o qual possa ser utilizado para produção de blocos para diferentes finalidades, e observaram que o modelo foi adequado quando apresentou um CV entre os valores simulados e observados para RM e AA menores que 10%. Portanto, em termos médios os CV's obtidos neste trabalho são menores quando comparados ao trabalho Arsenović et al. (2013), e indicam uma ótima performance do sistema *fuzzy*, como metodologia para a predição e aprimoramento da composição química de uma matriz cerâmica.

Nazari (2012) também utilizou a lógica *fuzzy* para criar um modelo que avaliasse o índice de absorção de água (AA) em geopolímeros leves com adição de cinza de casca de arroz e óleo de palma, a partir de dados experimentais, e observou que os resultados de treinamento, validação e teste do modelo *fuzzy* se mostraram potencialmente fortes para prever a absorção de água das amostras de geopolímeros.

Tabela 3 – Comparação dos valores obtidos experimentalmente e simulados pelo modelo.

FPRFV * (%)	FBCA **(%)	Dados Experimentais			Simulação <i>fuzzy</i>			Desvio Padrão			Coeficiente de Variação (%)		
		RM (Mpa)	CT (W/m°C)	AA (%)	RM (Mpa)	CT (W/m°C)	AA (%)	RM	CT	AA	RM	CT	AA
0	0	1,45	1,064	18,634	1,44	1,06	18,5	0,007	0,003	0,095	0,489	0,265	0,510
1,25	0	1,57	1,007	20,523	1,58	1,01	20,4	0,007	0,002	0,087	0,449	0,230	0,425
2,5	0	1,82	0,996	20,678	1,83	1,00	20,7	0,007	0,000	0,016	0,387	0,003	0,075
5	0	1,68	0,963	20,05	1,67	0,96	20,1	0,007	0,004	0,035	0,422	0,448	0,176
7,5	0	1,46	1,175	19,884	1,45	1,17	19,8	0,007	0,004	0,059	0,486	0,319	0,299
0	1,25	1,58	0,994	18,123	1,59	0,99	18,1	0,007	0,006	0,016	0,446	0,601	0,090
0	2,5	1,8	1,005	19,37	1,79	1,01	19,4	0,007	0,004	0,021	0,394	0,349	0,109
0	5	1,57	1,012	19,758	1,58	1,01	19,8	0,007	0,001	0,030	0,449	0,146	0,150
0	7,5	1,57	1,035	21,089	1,58	1,03	21,1	0,007	0,004	0,008	0,449	0,342	0,037
1,25	1,25	1,49	0,999	20,839	1,49	1,00	20,7	0,000	0,002	0,098	0,000	0,244	0,473
1,25	2,5	1,52	1,063	20,851	1,52	1,06	20,9	0,000	0,002	0,035	0,000	0,181	0,166
1,25	5	1,58	0,996	18,929	1,59	1,00	18,9	0,007	0,000	0,021	0,446	0,004	0,108
2,5	1,25	1,71	1,035	20,405	1,71	1,03	20,4	0,000	0,003	0,004	0,000	0,337	0,017
2,5	2,5	1,33	0,998	19,4	1,33	1,00	19,4	0,000	0,001	0,000	0,000	0,149	0,000
2,5	5	1,39	0,983	21,081	1,39	0,98	21,1	0,000	0,005	0,013	0,000	0,537	0,064
5	1,25	1,58	1,051	19,057	1,59	1,06	19,1	0,007	0,007	0,030	0,446	0,628	0,159
5	2,5	1,56	0,950	20,441	1,56	0,95	20,4	0,000	0,002	0,029	0,000	0,176	0,142
Coeficiente de Variação Médio											0,286	0,292	0,177

* Fibra de Bagaço de Cana-de-Açúcar; ** Fibra de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
(RM) Resistência Mecânica à Compressão; (CT) Condutividade Térmica; (AA) Absorção de Água.

Fonte: Do autor (2018).

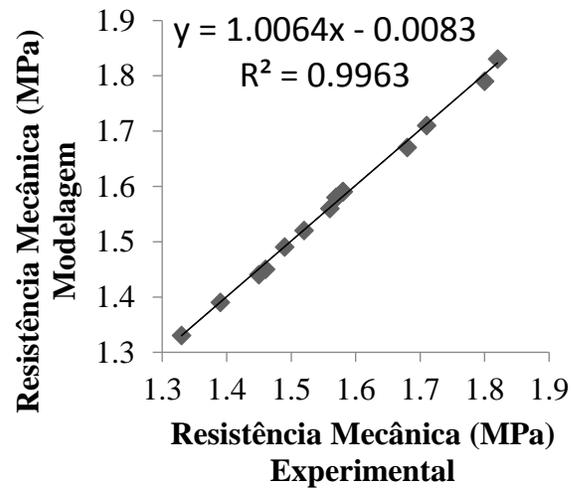
Na Figura 6(a, b e c) são ilustrados os gráficos de correlação entre valores experimentais e do modelo *fuzzy*, para RM, CT e AA respectivamente. Além disso, também são apresentados na Figura 6 as funções lineares de correlação entre os resultados do modelo *fuzzy* e experimentais, assim como seus respectivos valores de R^2 . Com base nos resultados obtidos após o ajuste do modelo, foi possível encontrar valores para R^2 de 0,996, 0,991 e 0,995 para RM, CT e AA respectivamente.

Arsenović et al., (2013) também correlacionaram os dados experimentais com os dados do modelo, encontrando os valores para R^2 de 0,927 para RM de blocos furados, 0,926 de RM para blocos maciços, 0,951 para AA em blocos furados e 0,967 em blocos maciços, e concluíram que o modelo é muito satisfatório para a predição da matriz cerâmica.

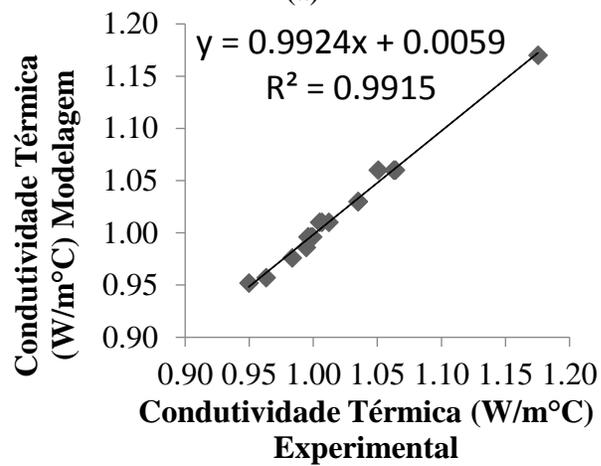
Nazari (2012) também correlacionou os resultados experimentais com os resultados do modelo *fuzzy*, onde obteve valores para R^2 de 0,986 para treinamento e de 0,903 aplicação do modelo, e concluiu que o modelo foi muito satisfatório quanto a predição de AA para geopolímeros.

Com base no exposto, o modelo *fuzzy* apresentado neste trabalho apresentou valores de R^2 maiores que nos estudos de Arsenović et al. (2013) e Nazari (2012). Dessa forma, pode-se afirmar que a performance do modelo apresentado é muito satisfatória para a predição da melhor matriz cerâmica compósita para a produção de blocos cerâmicos queimados para vedação.

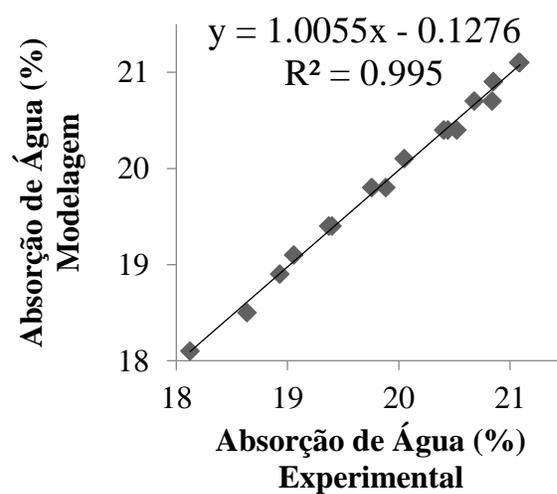
Figura 6 – Correlação entre os dados experimentais e os dados obtidos pelo modelo *fuzzy*: a) RM, b) CT e c) AA.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Do autor (2018).

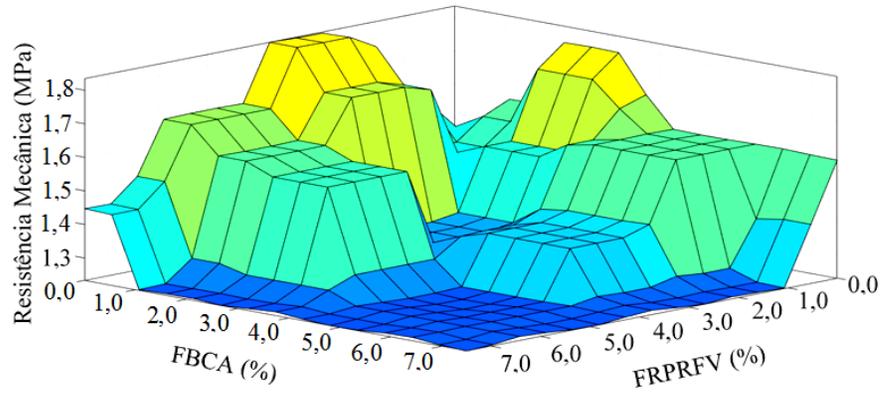
Na análise do sistema *fuzzy* desenvolvido, levando em consideração a adição de dois tipos de resíduos à matriz cerâmica, também foram utilizados gráficos tridimensionais, como forma já consagrada de representação dos resultados simulados pelo modelo *fuzzy* (YANAGI JÚNIOR, T. et al. 2012; OWADA et al., 2007; PEREIRA et al., 2008). As superfícies ilustradas na Figura 7 demonstram as variações de RM (Figura 7a), CT (Figura 7b) e AA (Figura 7c) para as diversas combinações porcentagem de entrada de resíduos possíveis, as quais variaram de 0% a 7,5% de resíduo adicionado.

Para RM, quanto maior o valor encontrado, melhor é a qualidade do bloco. Portanto, de acordo com as respostas do modelo *fuzzy*, a mistura que melhor atinge ganhos de RM deve ser composta por adições de resíduos que variem entre 3,0% a 4,0% de FRPRFV e entre 0,0% a 1,0% de FRBCA adicionados juntamente à matriz cerâmica (Figura 7a).

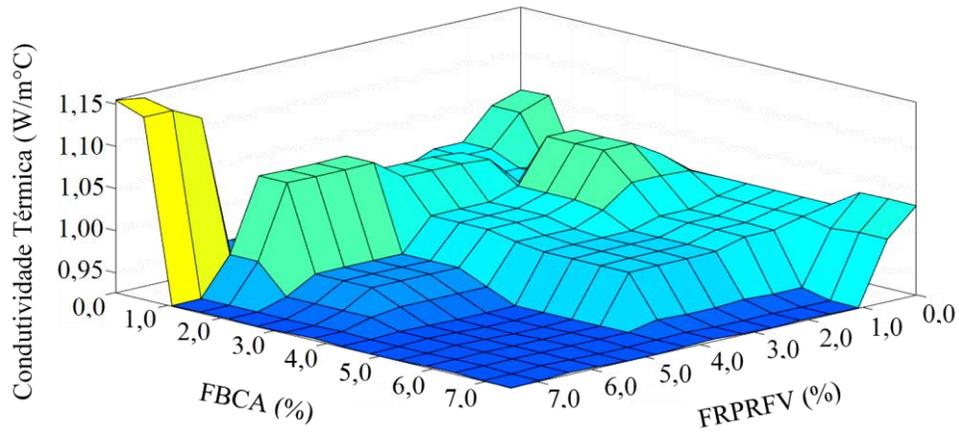
Para a CT dos blocos, quanto menor é o seu valor, melhor conforto térmico pode ser conseguido no ambiente construído. Ou seja, como a porcentagem máxima possível de ser adicionada ao BCQ é de 7,5% do volume total de solo, a melhor mistura descrita pelo modelo corresponde a uma matriz com aproximadamente 5,0% de FRPRFV e 2,5% de FBCA.

Por sua vez, para a AA todas as misturas atenderam à ABNT NBR 15270-1/2005, as quais não interferiram na qualidade final do produto.

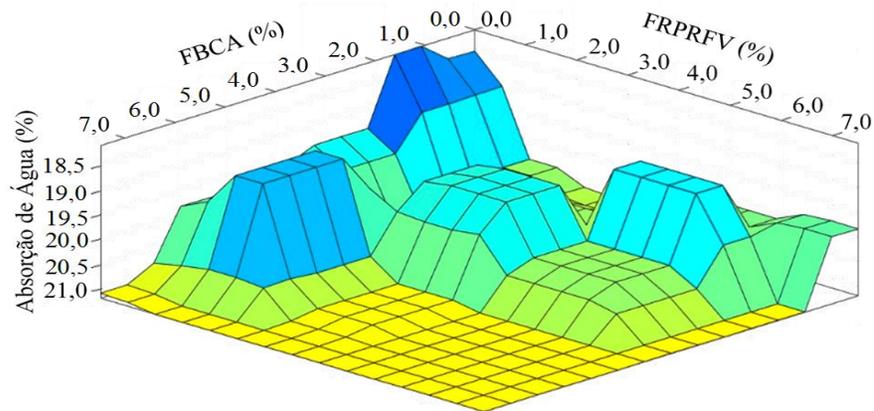
Figura 7 – Resultados do modelo *fuzzy* para combinação tridimensional de FBCA com a FRPRFV: a) RM, b) CT e c) AA.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Do autor (2018).

CONCLUSÕES

A metodologia *fuzzy* pode ser utilizada juntamente com outros métodos estatísticos para a predição e otimização dos parâmetros de produção de BCQ com adição de resíduos sólidos industriais.

Os valores encontrados para R^2 de 0,996, 0,991 e 0,995, para RM, CT e AA respectivamente, comprovam que o modelo *fuzzy* apresentado é eficiente para a tomada de decisões quanto às características da mistura da matriz cerâmica.

A mistura que melhor atingiu ganhos de RM é composta por adições de resíduos que variem entre 3,0% a 4,0% de FRPRFV e entre 0,0% a 1,0% de FRBCA adicionados juntamente à matriz cerâmica.

A mistura de 5,0% de FRPRFV e 2,5% de FBCA (híbrido), 5,0% de FRPRFV e 2,5% de FBCA à matriz cerâmica forneceu BCQs com menor CT de 11,57%, 10,41% e 4,95% respectivamente, quando comparados ao bloco testemunha, que conseqüentemente proporcionarão melhor conforto térmico as edificações.

Todas as misturas adotadas neste trabalho apresentaram índice de AA entre 8% e 22%, as quais atenderam às exigências da ABNT NBR 15270-1:2005 e não interferiram na qualidade final do produto.

REFERÊNCIAS

ADAZABRA, A. N.; VIRUTHAGIRI, G.; SHANMUGAM, N. Management of spent shea waste: An instrumental characterization and valorization in clay bricks construction. **Waste management**, New York, v. 64, p. 286–304, 2017.

ARSENOVIĆ, M. et al. Prediction and fuzzy synthetic optimization of process parameters in heavy clay brick production. **Ceramics International**, v. 39, n. 2, p. 2013–2022, 2013.

ARSENOVIĆ, M. et al. Mathematical approach to application of industrial wastes in clay brick production - Part I: Testing and analysis. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 4890–4898, 2015a.

ARSENOVIĆ, M. et al. Mathematical approach to application of industrial wastes in clay brick production—Part II: Optimization. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 4899–4905, 2015b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**. Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3**. Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005c.

ASTM E1131-08. Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. **American Society for Testing and Materials**, West Conshohocken, Pennsylvania, 2014.

BARTOLI, L. et al. Time-of-flight neutron diffraction characterization of ceramic findings from southern and western Sicily. **Archaeometry**, v. 51, n. 4, p. 568-575, 2009.

CAMPOS, L. F. A. et al. Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. **Cerâmica**, v. 45, n. 295, p. 140-145, maio 1999.

DEMIR, I.; BASPINAR, M. S.; ORHAN, M. Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. **Building and Environment**, v. 40, n. 11, p. 1533–1537, 2005.

ELICHE-QUESADA, D. et al. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. **Applied Clay Science**, v. 52, n. 3, p. 270–276, 2011.

ELICHE-QUESADA, D. et al. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 463–475, 2017.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 7–12, 2012.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de resíduos sólidos industriais: ano base 2014**. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/declaracoes_ambientais/inventarios_industriais/Invent%C3%A1rio_Res%C3%ADuos_S%C3%B3lidos_Industriais__2015_ano_base_2014.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2016.

GANGA, G. M. D.; CARPINETTI, L. C. R.; POLITANO, P. R. Gestão do desempenho em cadeias de suprimentos usando lógica *fuzzy*. **Gestão & Produção**, São Carlos, v.18, n.4, p.755-774, 2011.

GREGOROVÁ, E.; PABST, W.; BOHAČENKO, I. Characterization of different starch types for their application in ceramic processing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, n. 8, p. 1301-1309, 2006.

KAZMI, S. M. S. et al. Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 372–378, 2016.

LEITE, M. S.; FILETI, A. M. F.; SILVA, F. V. Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores *fuzzy* e convencional em um bioprocesso. **Revista Controle & Automação**, v.21, n.2, p.147-158, 2010.

MARTÍNEZ, M. L. et al. Utilization of bagasse from the beer industry in clay brick production for building. **Materiales de Construcción**, v. 62, n. 306, p. 199–212, 2012.

MODESTO, C. et al. Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 4, p. 14-18, 2003.

MORALES, M. P. et al. Influence of the type of lightweight clay brick on the equivalent thermal transmittance of different types of façades on buildings. **Materiales de Construcción**, v. 66, n. 323, p. 096, 2016.

MUÑOZ VELASCO, P. et al. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material—A review. **Construction and Building materials**, v. 63, p. 97-107, 2014.

MUÑOZ VELASCO, P. et al. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 241–252, 2016a.

MUÑOZ VELASCO, P. et al. Eco-fired clay bricks made by adding spent coffee grounds: a sustainable way to improve buildings insulation. **Materials and Structures**, v. 49, n. 1-2, p. 641–650, 2016b.

NAZARI, A. Fuzzy logic for prediction water absorption of lightweight geopolymers produced from waste materials. **Ceramics International**, v. 38, n. 6, p. 4729-4736, 2012.

NUNES, A. C. N.; RESENDE, S. S. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte: Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) e Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM), 2013. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2018.

OWADA, A. N. et al. Estimativa de bem-estar de frango de corte em função da concentração de amônia e grau de luminosidade no galpão de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.3, p.611-618, set./dez. 2007.

PANDORFI, H. et al. Uso de redes neurais artificiais para predição de índices zootécnicos nas fases de gestão e maternidade na suinocultura. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, n.3, p.676-681, 2011.

PEREIRA, D. F. et al. Sistema *fuzzy* para estimativa do bem-estar de matrizes pesadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 624-634, out./dez. 2008.

PHONPHUAK, N.; KANYAKAM, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, n. 4, p. 3057–3062, 2016.

PONCIANO, P. F. et al. Sistema *fuzzy* para predição do desempenho produtivo de frangos de corte de 1 a 21 dias de idade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 3, p. 446-458, jun. 2012

RAMOS, S. O. et al. Caracterização de argilas usadas para cerâmica estrutural. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5, n. 3, p. 65–70, 2010.

RUBIA-GARCÍA, M. D. et al. Assessment of olive mill solid residue (pomace) as an additive in lightweight brick production. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 495-500, 2012.

SANTOS, R. C. et al. Aplicação da lógica nebulosa na simulação de estro de vacas leiteiras. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.5, n.8, p.1-6, 2009.

SCHIASSI, L. et al. Modelagem *Fuzzy* aplicada na avaliação do desempenho de frangos de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 140-146, 2015.

SILVA, D. W. et al. Cementitious Composites Reinforced with Kraft Pulping Waste. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 390–398, 2016.

SILVA, A. D. R. **Estudo térmico e de materiais na construção de casas populares com blocos confeccionados a partir de um composto a base de cimento, gesso, eps e raspa de pneu.** 2010.

92 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SOUZA, A. E. et al. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 10, p. 2774–2780, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. DE; 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.

TEIXEIRA, R. S. et al. Extruded Cement Based Composites Reinforced with Sugar Cane Bagasse Fibres. **Key Engineering Materials**, v. 517, p. 450–457, 2012.

TONOLI, G. H. D. et al. Performance and Durability of Cement Based Composites Reinforced with Refined Sisal Pulp. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 22, n. 2, p. 149–156, 2007.

TONOLI, G. H. D. et al. Hybrid Reinforcement of Sisal and Polypropylene Fibers in Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 2, p. 177–187, 2011.

UKWATTA, A. et al. Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 76–85, 2016.

UKWATTA, A.; MOHAJERANI, A. Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 11–22, 2017.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima. **Cerâmica**, v. 49, n. 312, p. 245-250, 2003.

YANAGI JÚNIOR, T. et al. Procedimento *fuzzy* aplicado à avaliação da insalubridade em atividades agrícolas. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 423-434, 2012.

ZHANG, L. Production of bricks from waste materials - A review. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 643–655, 2013.