



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**MÁRIO ANTÔNIO VILAÇA FILHO**

**INCORPORAÇÃO DE PÓ DE BRITA PARA PRODUÇÃO DE  
MATERIAIS CERÂMICOS**

**ARAXÁ/MG**

**2019**

**MÁRIO ANTÔNIO VILAÇA FILHO**

**INCORPORAÇÃO DE PÓ DE BRITA PARA PRODUÇÃO DE  
MATERIAIS CERÂMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Me. Tamiris Fonseca de Souza

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Me. Fernanda Ribeiro Jordão

**ARAXÁ/MG**

**2019**

MÁRIO ANTÔNIO VILAÇA FILHO

**INCORPORAÇÃO DE PÓ DE BRITA PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS  
CERÂMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, como requisito parcial para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas.

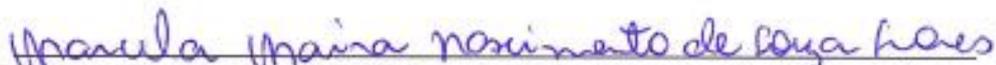
Araxá, 06 de dezembro de 2019



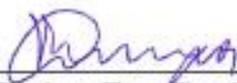
\_\_\_\_\_  
**Presidente e Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Me. Tamiris Fonseca de Souza**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



\_\_\_\_\_  
**Membro Titular e Coordenadora: Prof.<sup>a</sup> Me. Fernanda Ribeiro Jordão**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



\_\_\_\_\_  
**Membro Titular: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marcela Maira Nascimento de Souza Soares**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



\_\_\_\_\_  
**Membro Titular: Eng. Daniel Resende Campos**  
Santa Helena Mineração

*Aos meus pais e aos meus queridos amigos, que sempre me fizeram acreditar na realização dos meus sonhos e trabalharam muito para que eu pudesse realizá-los.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e toda minha família que acreditaram no meu potencial e me deram todo apoio, amor e conforto para que eu chegasse até o fim desse ciclo.

Aos meus amigos, pelo incentivo e apoio constante, em especial ao Fellipi Faria, Misael Gustavo, Yuri Carilli, Bianca Louise, Maria Virgínia, Cecília Borges, Andressa Cavenaghi, Sócrates Melo, Maria Luiza e Guilherme Otávio.

À minha namorada Kelle D'ornellas e sua família, pelo carinho, e principalmente pelos conselhos que levarei por toda minha vida.

Aos professores que me acompanharam ao longo de toda graduação, em especial à minha orientadora Prof<sup>ª</sup>. Tamiris Fonseca de Souza pela atenção e dedicação, à minha coorientadora Prof<sup>ª</sup>. Fernanda Ribeiro Jordão pela colaboração com os testes de caracterização. À Prof. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares e ao Prof. Alexander Martin Silveira Gimenez pelos incontáveis conselhos. Por fim e não menos importante ao Prof. Francisco de Castro Valente Neto pelo apoio na busca do subproduto na Santa Helena Mineração.

Aos técnicos do Laboratório de Tratamento de Minérios e do Laboratório de Edificações do CEFET-MG, unidade Araxá.

Ao Daniel Resende Campos, gerente da Santa Helena Mineração, pela bondade de me conceder a matéria prima estudada no trabalho.

## EPÍGRAFE

*Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,  
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.*

Chico Xavier

vi

## RESUMO

O tratamento e armazenamento de estéreis, subprodutos e rejeitos são cruciais para a mineração, estas etapas devem ser feitas de forma a reduzir ao máximo o custo de processamento, aliado a maximização da segurança. Devido a esses fatores citados, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas para o reaproveitamento destes materiais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a utilização do pó de brita de uma pedreira de granito gnaisse situada entre os municípios de Araxá e Ibiá para a produção de materiais cerâmicos, com o foco em tijolos maciços destinados a construção civil. Para essa avaliação, tem-se como objetivos específicos a caracterização química e física do pó de brita e da argila utilizada para a fabricação dos corpos de prova, e da realização do planejamento experimental fatorial. No planejamento foi avaliado se as variáveis substituição da argila por pó de brita (5% e 15%) e a temperatura de queima (850°C e 1000°C), teriam influência nas propriedades de retração linear, perda ao fogo, absorção de água, massa específica aparente e resistência a compressão uniaxial. Com base nos resultados foi possível concluir que a substituição colaborou para a diminuição da absorção de água, bem como o aumento da resistência a compressão uniaxial, ambas condições extremamente relevantes quando se trata de materiais cerâmicos aplicados a construção civil.

**Palavras-chave:** Pó de brita. Argila. Reaproveitamento. Materiais Cerâmicos. Planejamento Fatorial.

## ABSTRACT

The processing and storage of sterile, byproducts and waste are crucial for the mining, these steps should be made so as to minimise the cost of processing, allied to maximize security. Due to these factors mentioned above, it is necessary to the development of techniques for the reuse of these materials. The objective of this work was to evaluate the use of powder of crushed stone quarry of granite gneiss located between the municipalities of Araxá and Ibiá for the production of ceramics materials, with the focus on solid bricks for construction. For this evaluation, it has as specific objectives for chemical and physical characterization of the dust of gravel and clay used in the manufacture of the bodies of evidence, and the realization of factorial experimental design. The planning was assessed whether the variables replacing powder clay pits (5% and 15%) and the firing temperature (850°C and 1000°C), would have an influence on the properties of linear retraction, loss by fire, water absorption, apparent density and resistance to uniaxial compression. Based on the results it was possible to conclude that the replacement collaborated for the decrease in the absorption of water, as well as the increased resistance of the uniaxial compression, both conditions extremely relevant when it comes to ceramic materials applied to civil construction.

**Keywords:** Powder of crushed stone. Clay. Reuse. Ceramics Materials. Design Factorial.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custos para minimizar o risco de acidentes <i>versus</i> custos de acidentes (MELLO, 1981).....	20
Figura 2 - Principais setores cerâmicos, matérias-primas utilizadas e características do processo de fabricação (MOTTA <i>et al.</i> , 2001).....	26
Figura 3 - Etapas de produção Santa Helena Mineração (< <a href="http://shmineracao.com.br">http://shmineracao.com.br</a> >, 2019). .....	30
Figura 4 – Coleta do pó de brita na Santa Helena Mineração (Autoria própria).....	31
Figura 5 - Fluxograma das etapas de preparação das amostras bem como os ensaios de caracterização e os ensaios tecnológicos para cerâmicas (Autoria própria).....	32
Figura 6 - Homogeneização em pilha cônica com auxílio da enxada (Autoria própria).....	33
Figura 7 - Homogeneização em pilha longitudinal (Autoria própria). ....	34
Figura 8 – Picnometria (Autoria própria). ....	35
Figura 9 - Molde em aço inox utilizado para confecção dos corpos de prova (Autoria própria). .....	38
Figura 10 - Fluxograma de construção dos corpos de prova cerâmicos com substituição de argila por pó de brita (Autoria própria). ....	39
Figura 11 - Massas das matérias primas devidamente separadas para início da fabricação dos corpos de prova (Autoria própria). ....	40
Figura 12 - Prensagem dos corpos de prova (Autoria própria). ....	41
Figura 13 - Corpos de prova após processo de prensagem (Autoria própria). ....	42
Figura 14 - Corpos de prova em estufa a 65°C por 60h (Autoria própria).....	42
Figura 15 - Curva granulométrica recalculada do pó de brita. ....	51
Figura 16 - Curva granulométrica recalculada da argila. ....	52
Figura 17 - Gráfico de pareto para a retração linear de queima. ....	54
Figura 18 - Gráfico de contorno para a retração linear de queima. ....	55
Figura 19 - Gráfico dos efeitos principais para a retração linear de queima. ....	57
Figura 20 - Gráfico de pareto para a retração linear total.....	58
Figura 21 - Gráfico de contorno para a retração linear total. ....	59
Figura 22 - Gráfico dos efeitos principais para a retração linear total. ....	60
Figura 23 - Gráfico de pareto para perda ao fogo.....	61
Figura 24 - Gráfico de contorno para a perda ao fogo.....	62

Figura 25 - Gráfico dos efeitos principais para perda ao fogo. ....	63
Figura 26 - Gráfico de pareto para absorção de água. ....	64
Figura 27 - Gráfico de contorno para a absorção de água. ....	65
Figura 28 - Gráfico dos efeitos principais para absorção de água. ....	66
Figura 29 - Gráfico de pareto para massa específica aparente. ....	67
Figura 30 - Gráfico de contorno para massa específica aparente. ....	68
Figura 31 - Gráfico dos efeitos principais para massa específica aparente. ....	69
Figura 32 - Gráfico de pareto para resistência a compressão dos corpos de prova secos. ....	70
Figura 33 - Gráfico de contorno para resistência a compressão dos corpos de prova secos. ....	71
Figura 34 - Gráfico dos efeitos principais para resistência a compressão dos corpos de prova secos. ....	72
Figura 35 - Gráfico de pareto para resistência a compressão dos corpos de prova úmidos. ....	73
Figura 36 - Gráfico de contorno para resistência a compressão dos corpos de prova úmidos. ....	74
Figura 37 - Gráfico dos efeitos principais para resistência a compressão dos corpos de prova úmidos. ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais impactos ambientais da mineração no Brasil. ....	18
Tabela 2 - Grupos dos materiais cerâmicos; composição e aplicações. ....	25
Tabela 3 - Produtos Santa Helena Mineração. ....	30
Tabela 4 - Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica. ....	36
Tabela 5 - Resultado da análise química dos elementos contidos no pó de brita. ....	37
Tabela 6 - Resultado da análise química dos óxidos contidos no pó de brita. ....	37
Tabela 7 - Massa de argila e de pó de brita em função da % de substituição. ....	39
Tabela 8 – Fatores do planejamento experimental fatorial. ....	43
Tabela 9 - Planejamento fatorial completo $2^2$ com triplicata, (-1) nível mínimo; (+1) nível máximo. ....	44
Tabela 10 - Resultado picnometria do pó de brita. ....	49
Tabela 11 - Resultado picnometria da argila. ....	49
Tabela 12 - % Passante acumulado em função da abertura para o pó de brita. ....	51
Tabela 13 - % Passante acumulado em função da abertura para a argila. ....	52
Tabela 14 - Resultado da análise química dos óxidos contidos na argila. ....	53
Tabela 15 - Retração linear de secagem (RLS). ....	53
Tabela 16 - Retração linear de queima (RLQ). ....	55
Tabela 17 - Retração linear total (RLT). ....	58
Tabela 18 - Perda ao fogo (PF). ....	61
Tabela 19 - Absorção de água (AA). ....	64
Tabela 20 - Massa específica aparente (MEA). ....	67
Tabela 21 - Resistência a compressão uniaxial corpos de prova secos (RC Secos). ....	70
Tabela 22 - Resistência a compressão uniaxial corpos de prova úmidos (RC Úmidos). ....	74

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	Aspectos gerais dos empreendimentos mineiros .....	16
2.1.1	Subprodutos e resíduos da mineração .....	19
2.2	Materiais cerâmicos .....	21
2.2.1	Características dos materiais cerâmicos .....	21
2.2.2	Matérias-primas para produção de materiais cerâmicos.....	22
2.2.3	Processo de fabricação dos materiais cerâmicos .....	24
2.2.4	Classificação e aplicações dos materiais cerâmicos .....	25
2.3	Incorporação de pó de brita para produção de materiais cerâmicos destinados a construção civil.....	26
2.3.1	Estudos de aproveitamento de resíduos e rejeitos para a fabricação de materiais cerâmicos .....	26
2.3.2	Santa Helena Mineração .....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
3.1	Amostragem e preparação das amostras.....	31
3.2	Caracterização das matérias primas.....	34
3.2.1	Picnometria.....	34
3.2.2	Análise granulométrica.....	35
3.2.3	Fluorescência de raios X.....	36
3.3	Conformação dos corpos de prova .....	38
3.4	Planejamento experimental.....	43
3.5	Ensaio tecnológicos para cerâmica .....	44
3.5.1	Retração Linear.....	44
3.5.2	Perda ao Fogo .....	46
3.5.3	Absorção de Água .....	46
3.5.4	Massa Específica Aparente.....	47
3.5.5	Resistência a Compressão Uniaxial.....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
4.1	Picnometria.....	49

4.2	Análise Granulométrica.....	50
4.3	Fluorescência de raios X.....	52
4.4	Retração Linear.....	53
4.4.1	Retração linear de Secagem.....	53
4.4.2	Retração Linear de Queima .....	54
4.4.3	Retração Linear Total .....	57
4.5	Perda ao Fogo .....	60
4.6	Absorção de Água .....	63
4.7	Massa Específica Aparente.....	66
4.8	Resistência a Compressão Uniaxial.....	69
4.8.1	Seco .....	69
4.8.2	Úmido .....	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>

# 1 INTRODUÇÃO

As novas formas de disposição e aproveitamento de rejeitos provindos das atividades minerárias estão sendo cada vez mais estudadas devido aos graves acidentes ocorridos nos últimos anos, dentre eles pode-se destacar o de Mariana ocorrido em 2015 e o de Brumadinho em 2019, que causaram elevados danos socioambientais e econômicos decorrentes do rompimento de barragens. Os resíduos do setor mineral apresentam porcentagens que não são desprezíveis, com isso, devem ser tratados de forma responsável.

A sustentabilidade está em foco, visto que há uma preocupação mundial com as futuras gerações bem como a preservação do planeta, visto isso, tem-se buscado ferramentas que buscam otimizar os processos e produtos, conseqüentemente, aprimorar o uso de recursos naturais. Nos tempos atuais, é de extrema importância conciliar resultados satisfatórios e elevada produtividade, não deixando de se levar em conta os custos de produção.

O tratamento e armazenamento de rejeitos são cruciais, visto isso, deve ser feito de forma a maximizar a segurança, além disso, fatores como falta de espaço físico para disposição, contaminação em casos de ruptura de barragens ou afins deve ser levado em conta. Devido a esses fatores citados, é necessário o desenvolvimento de técnicas para o aproveitamento deste material, com isso, elaborou-se a presente proposta de trabalho, que tem como objetivo avaliar a utilização do pó de brita de uma pedreira de granito gnaisse situada entre os municípios de Araxá e Ibiá para a produção de materiais cerâmicos, com o foco em tijolos maciços destinados a construção civil. Para essa avaliação, tem-se como objetivos específicos a caracterização química e física do pó de brita e da argila utilizada para a fabricação dos corpos de prova, e da realização do planejamento experimental fatorial para investigar os efeitos das variáveis porcentagem de substituição com pó de brita e da temperatura de queima nas diferentes respostas de interesse, que seriam a retração linear, a perda ao fogo, a absorção de água, a massa específica aparente e a resistência a compressão uniaxial.

O trabalho está dividido em cinco capítulos principais. Esse primeiro capítulo aborda a introdução do trabalho, dando um panorama geral do tema estudado, bem como seu objetivo e justificativa. No segundo capítulo está relatada a revisão bibliográfica, com os principais assuntos referentes aos aspectos gerais dos empreendimentos mineiros, as características dos

materiais cerâmicos e a utilização do pó de brita na fabricação de material cerâmico para a construção civil. No terceiro capítulo está exposta a metodologia adotada para os ensaios em laboratório desde a preparação das amostras, caracterização do pó de brita e da argila até a fabricação dos corpos de prova e ensaios tecnológicos para cerâmicos. No quarto capítulo estão os resultados obtidos com os testes e a comparação destes com a bibliografia. O último capítulo revela a conclusão do trabalho, considerando os objetivos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentadas informações sobre os aspectos gerais dos empreendimentos mineiros, a sua importância bem como os impactos ambientais, análise dos subprodutos e resíduos da mineração. Também será tratado as características dos materiais cerâmicos e a incorporação do pó de brita para a produção de materiais cerâmicos destinados a construção civil.

### **2.1 Aspectos gerais dos empreendimentos mineiros**

Para o avanço social e econômico de uma dada população, o consumo de bens minerais é imprescindível, ou seja, a utilização de matérias primas e insumos provindos da mineração são de suma importância (ALMEIDA, 1999). As atividades humanas necessitam dos recursos minerais, uma vez que há a exploração de riquezas para a melhoria da economia dos países, para isso, deve-se levar em conta uma política sustentável, visto que, os minerais não são renováveis (FIGUEIREDO, 2007).

Segundo Portella (2015), uma quantidade significativa de água é consumida no processamento do minério, que permeia pela pesquisa mineral com a utilização de sondagens para reconhecimento de jazidas, passando pela lavra de mina subterrânea e a céu aberto, com desmonte hidráulico de rochas, controle de emissão de poeiras e rebaixamento de lençol freático. O consumo de água também é elevado no beneficiamento através da britagem, moagem, flotação e lixiviação, e por fim o transporte do minério, que muitas das vezes é feito por mineroduto, onde a água tem a função de controlar a viscosidade da polpa evitando que ela sedimente e adense na tubulação.

O quesito visual é de longe o mais impactante em um empreendimento mineiro, visto que, a supressão vegetal para extração do mineral, bem como a disposição de rejeitos causam mudanças bruscas no relevo. Ademais, a construção de estradas de acesso e estradas de rodagem ocasionam também, grande impacto visual.

Segundo Silva (2007), desde as etapas de perfuração e desmonte de rochas, passando pelo beneficiamento mineral até o transporte da produção, há a geração de poeiras, gases tóxicos

provindos dos motores das máquinas e que afetam diretamente os trabalhadores locais e os habitantes ao entorno.

A detonação por explosivos utilizados para desmontar a rocha resulta em ruídos prejudiciais. A fim de minimizar os danos, as empresas normalmente são instaladas em regiões mais distantes dos centros urbanos, porém, nem sempre isso é possível. As vibrações são ocasionadas em função da intensidade da onda de choque, que por sua vez, podem afetar construções em localidades próximas. Algumas medidas podem ser tomadas para evitar ou reduzir esses impactos, dentre elas; determinar a melhor orientação da frente de lavra e controlar a detonação (PORTELLA, 2015).

Outro exemplo de impacto ambiental gerado pelos empreendimentos mineiros é na extração de minerais como argila, areia, saibro e brita que estão diretamente relacionados à degradação do subsolo em ambientes urbanos e periurbanos (IBAMA, 2006 *apud* SILVA, 2007), visto isso, Farias (2002) sintetiza na Tabela 1 os principais impactos ambientais da Mineração no Brasil.

**Tabela 1 - Principais impactos ambientais da mineração no Brasil.**

<b>Substância Mineral</b>	<b>Estado</b>	<b>Principais problemas</b>	<b>Ações Preventivas e ou Corretivas</b>
<b>Ferro</b>	MG	Antigas barragens de contenção, poluição de águas superficiais	Cadastramento das principais barragens de decantação em atividade e as abandonadas; Caracterização das barragens quanto a estabilidade; Preparação de estudos para estabilização
<b>Ouro</b>	PA	Utilização de mercúrio na concentração do ouro de forma inadequada; aumento da turbidez, principalmente na região de Tapajós	Divulgação de técnicas menos impactantes; monitoramento de rios onde houve maior uso de mercúrio
	MG	Rejeitos ricos em arsênio; aumento da turbidez	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
	MT	Emissão de mercúrio na queima de amálgama	Divulgação de técnicas menos impactantes
<b>Chumbo, Zinco e Prata</b>	SP	Rejeitos ricos em arsênio	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
<b>Chumbo</b>	BA	Rejeitos ricos em arsênio	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
<b>Zinco</b>	RJ	Barragem de contenção de rejeito, de antiga metalurgia, em péssimo estado de conservação	Realização das obras sugeridas no estudo contratado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro
<b>Carvão</b>	SC	Contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida provenientes de antigos depósitos de rejeitos	Atendimento às sugestões contidas no Projeto Conceitual para Recuperação da Bacia Carbonífera Sul Catarinense
<b>Agregados para construção civil</b>	RJ	Produção de areia em Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido a criação desordenada de áreas alagadas	Disciplinamento da atividade; Estudos de alternativas de abastecimento
	SP	Produção de areia no Vale do Paraíba acarretando a destruição da mata ciliar, turbidez, conflitos com uso e ocupação do solo, acidentes nas rodovias	Disciplinamento da atividade; Estudos de alternativas de abastecimento e de transporte
	RJ e SP	Produção de brita nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, acarretando: vibração, ruído, emissão de particulado, transporte, conflitos com uso e ocupação do solo	Aplicação de técnicas menos impactantes; Estudos de alternativas de abastecimento
<b>Calcário</b>	MG e SP	Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico	Melhor disciplinamento da atividade através da revisão da Resolução Conama n o 5 de 06/08/1987
<b>Gipsita</b>	PE	Desmatamento da região do Araripe devido a utilização de lenha nos fornos de queima da gipsita	Utilização de outros tipos de combustível e incentivo ao reflorestamento com espécies nativas
<b>Cassiterita</b>	RO e AM	Destruição de Florestas e leitos de rios	Racionalização da atividade para minimizar os impactos

Fonte: FARIAS, 2002.

### **2.1.1 Subprodutos e resíduos da mineração**

Segundo a ABNT NBR 10004/2004, os resíduos sólidos são aqueles que por peculiaridades físicas e/ou químicas, se tornam impraticáveis de serem descartados em redes públicas de esgoto, podendo-se destacar aqueles provindos de atividades industriais. E de acordo com Ibram (2016), destaca-se a existência de dois tipos de resíduos no setor mineral, o rejeito e o estéril.

Nos processos de tratamento e beneficiamento do minério, o que é direcionado novamente a natureza por não possuir valor agregado de mercado, é denominado de rejeito, este pode apresentar elevado grau de toxicidade em função dos metais pesados agregados, e de reagentes adicionados na indústria.

Na etapa de desenvolvimento mineral, normalmente é necessário realizar o decapeamento da jazida, visto que, o solo superficial não possui teor economicamente viável para ser direcionado a planta de tratamento. Este material removido é nomeado estéril e é direcionado a pilhas de estocagem.

Segundo Martin *et al.* (2002), objetivando reduzir os impactos socioambientais, o rejeito oriundo do processo de beneficiamento mineral é retido de forma segura em estruturas específicas e dimensionadas para esse fim, cuja metodologia de disposição varia para cada mineradora.

As estruturas de contenção objetiva a separação sólido/líquido através do processo de decantação de misturas bifásicas heterogêneas, visando o retorno da água no processo industrial afim de controlar novas adições e também conter os sólidos, já que estes podem ser não-inertes e reativos (ROBERTSON, 1987).

As barragens são consideradas o principal mecanismo na contenção de rejeitos gerados pelo processamento mineral na etapa de beneficiamento. Fatores como a localização (normalmente em bacias ou vales), projeto de instalação, construção, operação e fechamento devem ser regulamentados visando as normas ambientais, além disso, critérios sociais, econômicos, geotécnicos, geológicos, topográficos, hidrológicos, estruturais, de segurança e de risco devem ser levados em conta em sua implantação (LOZANO, 2006).

Estas estruturas podem ser construídas em alteamentos sucessivos a montante; jusante ou linha de centro com o próprio rejeito proveniente do beneficiamento. Porém, para que isso possa ser feito, esse rejeito deve atender as especificações químicas e físicas construtivas, caso não se enquadre, a barragem pode ser feita com solo compactado de áreas de empréstimos que são locais fora da mina que oferecem material com características propícias. Um fator importante a ser levado em conta na construção é a impermeabilização do solo usualmente feita com geossintéticos, em função da infiltração de efluentes danosos que podem vir a contaminar o lençol freático, visto isso, uma avaliação geológica e geotécnica é primordial.

A segurança de barragens vem sendo um tema bastante abordado nos últimos anos, em função da quantidade de acidentes ocorridos, que vem aumentando e causando alarde na população. Dentre as principais causas de ruptura de barragens pode-se destacar o galgamento, piping e liquefação.

Mello (1981) apresenta um estudo sobre barragens de rejeitos nos Estados Unidos, onde relata que os custos de acidentes com barragens são muito superiores aos custos para minimizar o risco de acidentes, como mostra a Figura 1.

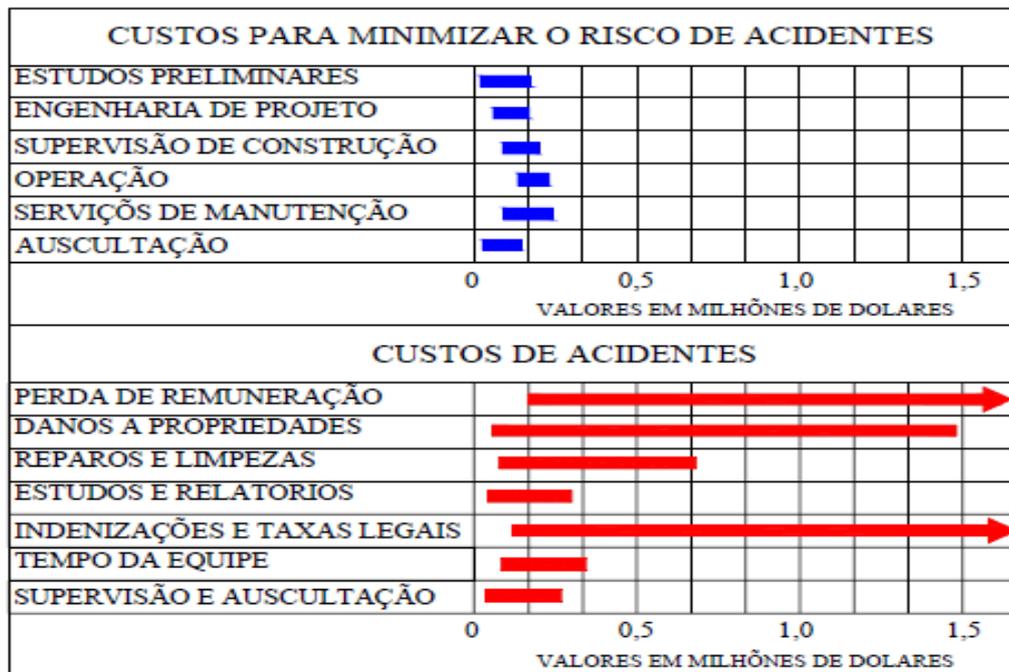


Figura 1 - Custos para minimizar o risco de acidentes *versus* custos de acidentes (MELLO, 1981).

Assim como as barragens, as pilhas são consideradas um sistema de armazenamento de resíduos, para isso, é necessário a retirada da água proveniente da polpa, deixando assim, apenas a fração sólida. Para melhoria da resistência garantindo uma melhor estabilidade, são adicionados ao rejeito um material de empréstimo, podendo ser finos ou granulares. Uma outra forma de assegurar a segurança é remover a fração argilosa. Por não haver necessidade de sistemas extravasores e por não prejudicarem a rede de drenagem, a deposição de rejeito por esse método são ambientalmente satisfatórios (SANCHEZ, 2000).

## **2.2 Materiais cerâmicos**

### **2.2.1 Características dos materiais cerâmicos**

Segundo Bogas (2013), elementos formados por ligações predominantemente iônicas e/ou covalentes, com características metálicas e não metálicas tanto por materiais inorgânicos ou não metálicos, cristalinos ou não cristalinos (ou ambos), são classificados como cerâmicos. Callister Junior (2007) diz que nos materiais cerâmicos há a predominância de ligações iônicas contendo certo caráter covalente, além disso, são inorgânicos e não metálicos.

Os cerâmicos sendo materiais sintéticos podem ser caracterizados por apresentarem fases inorgânicas iônico-covalentes, não sendo por completo amorfos e geralmente são consolidados pela sinterização a elevadas temperaturas (BOCH E NIÈPCE, 2007). A microestrutura, ou seja, o arranjo das fases, assim como os defeitos estruturais, pureza, grau de perfeição das fases e a identidade das fases, são responsáveis por determinar as características físicas e químicas do material cerâmico (WORRALL, 1968 *apud* CAVALCANTE, 2005).

As diferentes matérias-primas bem como suas propriedades químicas e físicas como: tamanho, forma e aglomeração de partículas, densidade, área superficial compactidade da mistura granular estão diretamente ligadas às características da cerâmica final. Características essas como a reologia da pasta, microestrutura, formação de fases após o processo de sinterização, levando em consideração as condições de temperatura, taxa de aquecimento e atmosfera de queima. (BOCH E NIÈPCE, 2007).

De acordo com Bogas (2013), os materiais cerâmicos apresentam elevada dureza, são frágeis, possuem baixa tenacidade, ou seja, fraturam com grande facilidade, baixas ductilidades, pois deformam muito pouco antes de fraturar, além disso, são isolantes, apresentam resistência química e ao desgaste por abrasão e elevada resistência mecânica em altas temperaturas.

### **2.2.2 Matérias-primas para produção de materiais cerâmicos**

As argilas são o principal constituinte das matérias-primas plásticas utilizadas para a fabricação de materiais cerâmicos. As argilas se originam do intemperismo, de processos hidrotermais ou de depósitos de sedimentos em rios e oceanos. São constituídas fundamentalmente por caulinitas (com elevada concentração de matéria orgânica e ácidos húmicos), gipsita, mica (illita), quartzo e argilominerais (SOUZA SANTOS, 1989).

Segundo Motta *et al.* (2008), os principais contaminantes das argilas plásticas são os óxidos de ferro, pirita, siderita, minerais de titânio, gipsita e dolomita, cujas concentrações podem influenciar diretamente no processamento e aplicação na indústria cerâmica, já a matéria orgânica é responsável por determinar a cor escura do material. Tais argilas apresentam granulometria fina inferior a 2  $\mu\text{m}$ , e quando em contato com água, adquirem certa dureza após o processo de secagem e queima (SOUZA SANTOS, 1989).

Segundo Cavalcante (2005) os caulins são constituídos principalmente por caulinita e/ou haloisita, podendo haver a presença também de quartzo, feldspato e mica. Os caulins com estrutura sedimentar possuem teores elevados de  $\text{TiO}_2$  (dióxido de titânio, provindos de anatase e rutilo) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxido de ferro, provindos de hematita, goethita e limonita).

O caulim é uma rocha de granulometria fina e que após tratamento pode ser aplicada em diversos setores, dentre eles na fabricação de papéis comuns e revestidos; cerâmica e refratários. Alguns minerais como quartzo, cristobalita, alunita, esmectita, illita, moscovita, biotita, gipsita, feldspato, anatásio, pirita e haloisita são responsáveis por modificar propriedades como a viscosidade e a abrasividade (LUZ *et al.*, 2008).

Segundo Castro (2016), os feldspatos são denominados de aluminossilicatos, podendo ser de cálcio, bário, sendo os mais utilizados o de potássio e sódio devido a sua baixa temperatura de fusão. O mineral provém de rochas graníticas ou de pegmatitos ácidos. Durante a etapa de sinterização, essa matéria-prima é utilizada como fundente para diminuir a temperatura de formação da fase líquida. Na sinterização, as partículas sólidas se aglomeram em função do aumento da temperatura, que por sua vez deve ser menor que a temperatura de fusão, e para que haja essa coesão, é utilizado os feldspatos como fundentes para formação do amálgama, obtendo assim, uma redução da porosidade e elevação da resistência (RAVAGLIOLI *et al.*, 1989 apud CAVALCANTE, 2005). As indústrias de cerâmica e vidro são as principais consumidoras de feldspato (LUZ *et al.*, 2008).

O mineral quartzo tem origem de rochas areníticas (formadas pela deposição e posterior compactação dos sedimentos arenosos) e quartzíticas (metamorfizadas) e é considerado o mais abundante da crosta terrestre (12%). Na fabricação de barbotina branca, o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), por ser fonte primária de sílica, funciona como controlador de dilatação e ajuste de viscosidade da fase líquida, e por suas propriedades ajuda na secagem e liberação de gases na queima durante o processamento (CASTRO, 2016).

Segundo Guzzo (2008), o quartzo está presente nas rochas magmáticas, sedimentares e metamórfica, no contorno monocristalino (quartzo hialino, ametista e citrino) no policristalino (quartzito, calcedônia e ágata) e amorfo (opala) cujas principais aplicações industriais estão relacionadas ao emprego de areais e quartzitos para a construção civil; fabricação de porcelanas e louças sanitárias e por fim, dispositivos piezelétricos com função de monitorar a frequência de ressonância de ultrassons.

O filito é uma rocha de origem metamórfica com granulometria fina, estratificada ou laminada, sua composição mineralógica é basicamente caulinita, mica sericita (moscovita fina) e quartzo. É utilizado como fundente na fusão da massa cerâmica (barbotina), ocasionando um aumento da resistência mecânica (CASTRO, 2016). Segundo Luz *et al.* (2008), as principais aplicações deste material na indústria cerâmica são para produção de pisos, louças sanitárias e de mesa.

### 2.2.3 Processo de fabricação dos materiais cerâmicos

De acordo com Bogas (2013), o processo de fabricação de cerâmica inicia-se com a adequação granulométrica e homogeneização das matérias primas, seguidas da conformação e processamento térmico de secagem e sinterização.

A cominuição é realizada por meio da britagem e/ou moagem, para adequação da granulometria do material para as etapas seguintes do processo. Após isso, tem-se o fracionamento granulométrico (*sizing*) visando separar a amostra em frações de dimensões específicas por métodos de elutriação, sedimentação ou peneiramento, a análise granulométrica nesta etapa é fundamental (CAVALCANTE, 2015).

Segundo Bogas (2013), o processo de moagem visa reduzir a granulometria dos componentes duros, que seriam a areia e o quartzo, para posteriormente ser feita a adição de argila, esta mistura pode ser feita via úmida, ou semiúmida de modo a formar uma pasta ou suspensão dos materiais em água. Em seguida, é feito o processo de dispersão das partículas no líquido, para assim haver a formação da massa cerâmica que envolve a molhagem, desaglomeração e estabilização da mistura.

Já a conformação dos materiais cerâmicos pode ser feita de diversas formas, as principais são: prensagem cuja a matéria prima é prensada no interior de uma matriz adquirindo forma e textura desejada, extrusão onde o material no estado plástico passa por uma matriz de elevada dureza, adquirindo assim a forma que se pretende, torneamento e colagem. Porém, pode ser feita também através de injeção e técnicas coloidais.

Após a conformação mecânica, ocorre o processamento térmico, que pode ser dividido em algumas categorias, dentre elas: secagem, queima/cozimento, recozimento e fusão (CAVALCANTE, 2015). Na fabricação de cerâmicas tradicionais o processamento térmico é obrigatório, passando pelas etapas de secagem onde há a remoção da água do corpo cerâmico em temperaturas menores que 100 °C, sinterização e vitrificação (BOGAS, 2013).

## 2.2.4 Classificação e aplicações dos materiais cerâmicos

Segundo Motta *et al.* (2001), a categorização das cerâmicas é feita levando-se em conta alguns fatores, dentre eles destacam-se a aplicação na indústria, composição, textura da massa base e mercado.

Os materiais cerâmicos podem ser divididos em dois grupos, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Grupos dos materiais cerâmicos; composição e aplicações.

Grupos	Composição	Aplicações
<b>Cerâmicos tradicionais</b>	Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Cerâmicas piezoelétricas
	Carboneto de Silício (SiC)	Fibras óticas
	Zirconia ( $\text{ZrO}_2$ )	Capacitores
	Nitreto de Silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	Combustíveis nucleares
<b>Cerâmicos técnicos</b>	Argila	Biomateriais (próteses)
	Sílica	Refratários
	Feldspato	Tijolo
		Telha
		Azulejos
		Porcelana Elétrica

Fonte: BOGAS, 2013.

A Figura 2, relaciona os tipos de cerâmicas com os setores produtivos juntamente com os produtos e as respectivas matérias-primas utilizadas na fabricação, bem como as características do processo de conformação e temperatura de queima (MOTTA *et al.*, 2001).

CLASSIFICAÇÃO		PRODUTO	Matéria-prima								Processo de conformação				Temperatura de Queima (°C)							
Tipo de cerâmica*	GRUPO**/ SETOR		Plástica		Não-plástica						Moagem via úmida	Moagem via seca	Extrusão	Tornearia	Prensagem	Colaagem	800	900	1.000	1.100	1.200	>1.200
			Argila comum	Argila plástica	Caulim	Feldspato (***)	Filito	Talco	Calcário	Quartzo												
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica Vermelha	Blocos, lajes	P									P									
		Telha	P			O							P	P								
		Agregado leve	P							O			P									
	2	Cerâmica Branca	Grés sanitário		P	S	P	O	S	O	P											
			Porcelana Mesa		P	P				P	P		S	S	O							
			Porcelana Eletr.		P	P				P	P		S	S	O							
		Faiança		P	O	S	S	S	P	S	P				P							
		3	Revestimentos	Pisos rústicos	P	O						O		P								
	Pisos via seca			P									P		P							
	Azulejo			P	P			O	S	S	P			P								
Piso gresificado	O		P	S	S	P	O	S		P		O	P									
Grés porcelânico			P	S	P		O	S	O	P			P									
Outras	4	Refratários			O				O	P												
	5	Isolantes				O			O	P												
	6	Especiais							O	P												
	7	Cimento	S						P	S	O	P										
	8	Vidro			S				S	P	P											
P	Processo ou composição principal (> 20%)		S	Processo ou composição secundária (< 10%)								O	Processo ou composição ocasional									

Obs.: \* Classificação de Schuller & Henniche<sup>10</sup>; \*\* 21,26; \*\*\* O feldspato (ou concentrado de feldspato) é utilizado apenas nas porcelanas e, eventualmente, no grés porcelânico, enquanto que nos demais produtos são utilizadas rochas feldspáticas.

**Figura 2 - Principais setores cerâmicos, matérias-primas utilizadas e características do processo de fabricação (MOTTA *et al.*, 2001).**

## 2.3 Incorporação de pó de brita para produção de materiais cerâmicos destinados a construção civil

### 2.3.1 Estudos de aproveitamento de resíduos e rejeitos para a fabricação de materiais cerâmicos

O estudo de aproveitamento de estéries, subprodutos e rejeitos tem se tornado cada vez mais necessários devido aos grandes impactos ambientais gerados no processo de armazenamento, principalmente devido ao volume excessivo destes tipos de materiais. Além disso, a busca por um mundo mais sustentável faz com que trabalhos sejam propostos para contribuir de forma positiva para a sociedade e para o meio ambiente.

Barbosa (2017) estudou a viabilidade do uso de rejeito da concentração de minério de ferro proveniente de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero como aditivo na fabricação de cerâmica vermelha, visando diminuir o custo da fabricação dessa cerâmica, bem como a disposição desse rejeito no meio ambiente.

Silva (2018) avaliou a utilização de pó de brita parcialmente (P50) ou totalmente (P100) para produção de argamassas de revestimento e assentamento, visando obter resistência a compressão similar ou superior a argamassas com a mesma finalidade, constituídas apenas de areia natural como agregado miúdo.

Castro (2011) avaliou a possibilidade de utilização dos rejeitos de manganês como matéria prima para produção de cerâmicas vermelhas, utilizadas para blocos de vedação e analisou a influência do conteúdo de resíduo e a temperatura de queima nos experimentos.

Cavalcante (2005) avaliou a possibilidade de redução dos impactos ambientais e as reduções nos custos dos processos de produção de revestimentos cerâmicos mediante a formulação de massas cerâmicas reincorporando percentuais dos resíduos do processo da produção da massa e esmalte e ETE (estação de tratamento de efluentes) da indústria de louças sanitárias, ou seja, aproveitamento de resíduos cerâmicos da indústria de louça sanitária para produção de massa para revestimento cerâmico.

Resende (2015) caracterizou o resíduo sólido de uma lagoa de rejeito gerado no processo de industrialização de louças sanitárias para avaliar seu potencial como adição mineral na substituição do cimento *Portland*, analisando o limite de resistência dessa incorporação.

Cota (2017) avaliou a utilização do lodo da fabricação de ferro-ligas de manganês e de finos de pedra-sabão gerados em oficinas de artesanato, ambos da região de Ouro Preto, na composição de massa para fabricação de cerâmica vermelha.

Segundo o Ibram (2016), um estudo vem sendo realizado pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) para a utilização de rejeito de minério de ferro para fabricação de insumos para a construção civil, como a argamassa, podendo ser aplicado até 85% de rejeitos para produção de blocos de pavimentação e de alvenaria.

Ainda do acordo com o Ibram (2016), o setor de rochas ornamentais é reconhecido por gerar uma elevada quantidade de resíduos, e hoje, existem alternativas tecnológicas para o aproveitamento do mesmo nas indústrias de cerâmicas (fabricação de tijolos) e construção civil (pavimentação).

Silva (2014) estudou a viabilidade do uso de resíduos da concentração de minério de ferro como aditivos na indústria de blocos (*Pavers*) de cimento e na indústria de cerâmica, com vistas a diminuir ou eliminar a disposição desses resíduos no ambiente e estimular novos negócios em comunidades pela atividade mineradora.

Machado (2018) estudou a viabilidade da produção de blocos monolíticos a partir do rejeito da Barragem de Fundão que ficou depositado na Barragem de Candonga, para o emprego na construção civil, com a utilização de um fundente.

Ferreira (2010) caracterizou materiais argilosos caulíníficos oriundos de duas regiões do Quadrilátero Ferrífero, visando o reconhecimento da potencialidade destes para aplicações industriais, como na indústria cerâmica tradicional, através de um estudo sistemático integrado das propriedades físicas e mecânicas e da relação destas propriedades com os parâmetros mineralógicos e químicos, durante as várias etapas dos ensaios térmicos.

Castro (2016) realizou a caracterização dos resíduos de louças sanitárias descartadas após o processo produtivo de uma indústria de cerâmicas para avaliar as características físicas e químicas do resíduo para classificação como pozolana com o intuito de substituir o material como substituinte do granito na produção da massa cerâmica (barbotina), avaliando seu comportamento mecânico.

Pinheiro (2008) caracterizou os resíduos de cerâmica vermelha gerados durante o processo produtivo de blocos cerâmicos estruturais e de vedação, com vistas ao beneficiamento e aplicação como adição pozolânica em argamassas, cimento e concretos.

Gonçalves (2015) determinou a viabilidade econômica para o processamento de escórias de aciaria elétrica e LD (Linz Donowitz: conversor a oxigênio para produção do aço), a partir da

segregação e reutilização das frações metálicas e não metálicas; como matéria-prima em substituição integral aos agregados naturais para a produção de pré-fabricados de concreto (ECOBLOCOS) voltados para a construção civil.

Silva (2006) avaliou a possibilidade da utilização de resíduo siderúrgico gerado na aciaria de conversor LD (Linz Donowitz: conversor a oxigênio para produção do aço), lama de aciaria com baixo teor de ferro metálico, como aditivo na matéria-prima para cerâmica vermelha.

Souza (2016) avaliou a aplicabilidade de resíduos finos de esteatito, gerados em oficinas de artesanato na região de Ouro Preto (MG), no distrito Santa Rita de Ouro Preto, como agente sorvente de óleo diesel analisando posterior utilização dos resíduos da adsorção de óleo para fabricação de materiais cerâmicos.

Teixeira (2017) teve como objetivo a síntese de cerâmicas estruturais para serem utilizadas como tijolos, blocos, telhas, dentre outros materiais, utilizando-se rejeito de pedra-sabão e adicionando-se a esse rejeito um agente recondicionador com o objetivo de melhorar as propriedades físicas das cerâmicas e sua posterior caracterização.

Torres (2015) avaliou tecnologicamente cerâmicas tradicionais tais como tijolos (blocos cerâmicos) e peças de ornamentação, fabricados a partir de misturas de argilas caulínicas com resíduos de esteatito (pedra-sabão) da região de Minas Gerais.

Todos os estudos citados acima propuseram melhorias no aproveitamento de estéreis, subprodutos e rejeitos, que na grande maioria dos casos, obtiveram resultados satisfatórios e até mesmo produtos com qualidade superior aos convencionais no mercado.

### **2.3.2 Santa Helena Mineração**

A mineradora se encontra no município de Ibiá em Minas Gerais, na BR-262, km 646 - Fazenda Serrote – Zona Rural, localizada a cerca de 320 km da capital Belo Horizonte e 40 km da cidade de Araxá.

De acordo com o *site* da empresa, os principais produtos produzidos pelo empreendimento estão listados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Produtos Santa Helena Mineração.**

<b>Produto</b>	<b>Granulometria (mm)</b>
<b>Rachão P7</b>	70 - 300
<b>Rachão P4</b>	50 - 200
<b>Brita 3</b>	25 - 38
<b>Brita 2</b>	19 - 25
<b>Brita 1</b>	9,5 - 21 ou 9,5 - 19
<b>Brita 0 (Pedrisco)</b>	4,8 – 9,5
<b>Pó de Brita</b>	< 4,8
<b>Brita Corrida</b>	< 32

Fonte: <<http://shmineracao.com.br>>, 2019.

Segundo a Licença de Operação Corretiva (2017), a caracterização geológica na região apresenta uma rocha granítica com pouca variação expressiva, podendo ser classificada como fanerítica, ou seja, constituída integralmente de material cristalino identificável, de cor cinza esbranquiçada, inequigranular cujos cristais apresentam dimensões variáveis, granulometria média a fina, os minerais apresentam orientação moderada com certa gnaissificação. Essa rocha é constituída basicamente por feldspato que é mineral mais abundante, quartzo e biotita.

As etapas de produção da pedreira Santa Helena Mineração estão representadas no fluxograma da Figura 3, conforme o informado no *site* da empresa.



**Figura 3 - Etapas de produção Santa Helena Mineração (<<http://shmineracao.com.br>>, 2019).**

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais que incluem a amostragem, preparação das amostras, caracterização das matérias primas, além da metodologia utilizada para a confecção dos corpos de prova, o planejamento experimental e por fim os ensaios tecnológicos para cerâmica.

#### 3.1 Amostragem e preparação das amostras

A amostra de pó de brita utilizada nos ensaios era proveniente da Santa Helena Mineração, localizada no município de Ibiá-MG. A amostragem desse material foi feita de forma manual e aleatória, diretamente da descarga da correia transportadora direcionada a uma pilha de estocagem, conforme Figura 4. Foram coletados 200 kg do subproduto pó de brita e o armazenamento foi feito em baldes e em sacos plásticos transparentes, de acordo com a ABNT NBR 10007/2004.

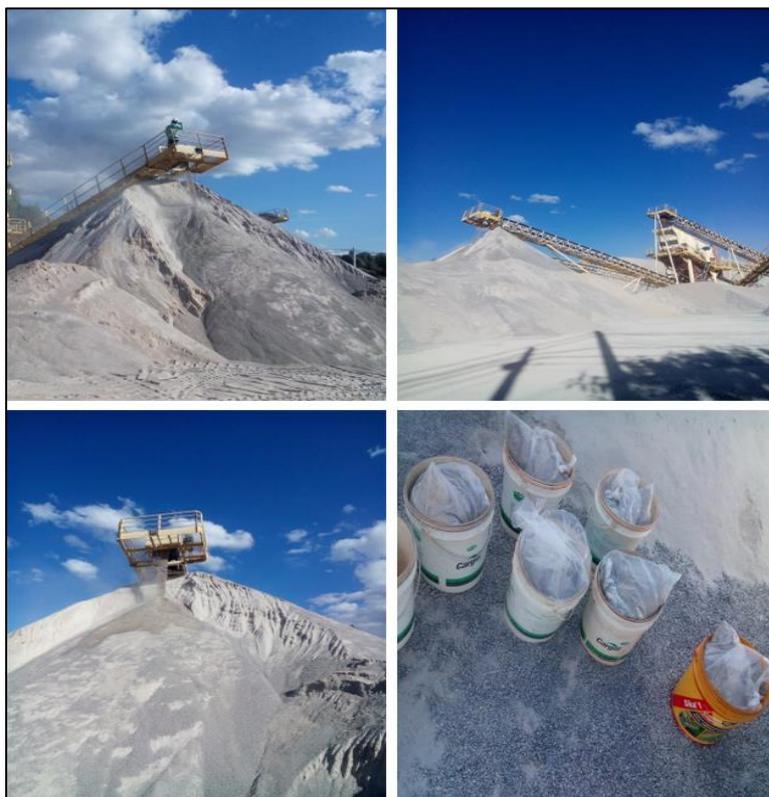
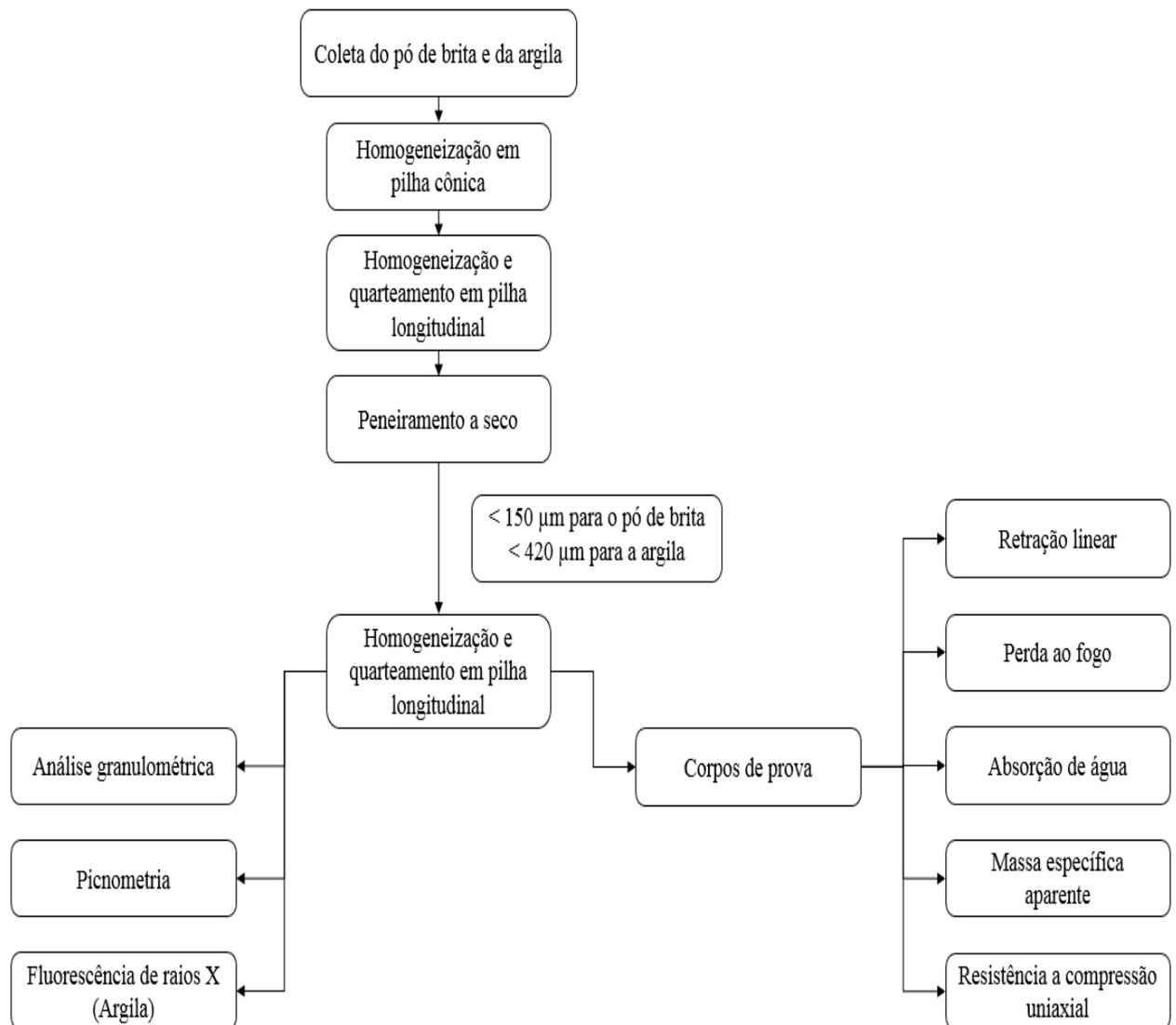


Figura 4 – Coleta do pó de brita na Santa Helena Mineração (Autoria própria).

A amostra de 5 kg de argila vermelha, utilizada na fabricação dos corpos de prova, já estava disponível no Laboratório de Edificações do CEFET-MG, Unidade Araxá.

As etapas de preparação das amostras do pó de brita e da argila foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, Unidade Araxá. A Figura 5 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** traz um fluxograma das etapas de preparação das amostras bem como os ensaios de caracterização e os ensaios tecnológicos para cerâmica.



**Figura 5 - Fluxograma das etapas de preparação das amostras bem como os ensaios de caracterização e os ensaios tecnológicos para cerâmicas (Autoria própria).**

Foi realizada uma homogeneização em pilha cônica tanto para o pó de brita quanto para a argila, visando obter uma distribuição granulométrica mais uniforme dos componentes da amostra em

função da dissipação de agrupamentos de partículas de qualquer natureza, minimizando o erro de segregação. Para a argila este processo foi realizado com o auxílio de uma lona, já para o pó de brita o revolvimento foi feito com enxada, visto que o material apresentava elevado volume, conforme Figura 6.



**Figura 6 - Homogeneização em pilha cônica com auxílio da enxada (Autoria própria).**

Posteriormente, ambas as amostras foram homogeneizadas e quarteadas em pilha longitudinal, como mostra a Figura 7. O quarteamento se deu com o objetivo de retirar alíquotas para o peneiramento a seco, cuja função era separar os materiais nas seguintes faixas granulométricas: pó de brita abaixo de  $150\ \mu\text{m}$  (100#) e a argila abaixo de  $420\ \mu\text{m}$  (35#). Em seguida, foi feita uma nova homogeneização e quarteamento com o passante das peneiras para se obter as alíquotas necessárias para análise granulométrica, picnometria, fluorescência de raios X (apenas para a argila) e confecção dos corpos de prova.

Em relação a argila, por esta apresentar um número de torrões excessivos, foi necessário fazer sua fragmentação com o uso do almofariz (gal) com pistilo antes da homogeneização em pilha cônica.



Figura 7 - Homogeneização em pilha longitudinal (Autoria própria).

## 3.2 Caracterização das matérias primas

### 3.2.1 Picnometria

Para determinar a massa específica das amostras de pó de brita e de argila, foi realizado picnometria em triplicada, garantindo assim, uma precisão dos resultados. Esse teste foi calculado através da Equação (1). A Figura 8 mostra os picnômetros utilizados na picnometria.

$$ds = \frac{(A2) - (A1)}{(A4 + A2) - (A3 + A1)} \quad (1)$$

Onde:

ds: Densidade do sólido ( $\text{g/cm}^3$ );

A1: Massa do picnômetro (g);

A2: Massa do picnômetro + Amostra (g);

A3: Massa do picnômetro + Amostra + Água (g);

A4: Massa do picnômetro + Água (g).



**Figura 8 – Pícnometria (Autoria própria).**

O procedimento consistiu nas seguintes etapas: primeiramente o picnômetro seco foi pesado (A1), em seguida foi adicionado o pó de brita ou a argila de forma a cobrir o fundo da vidraria para então, posterior pesagem do conjunto (A2), após essa etapa, foi adicionada água até que ela preenchesse todo o restante do picnômetro, e então o novo conjunto passou por uma nova pesagem (A3). Por fim, o picnômetro foi lavado e preenchido apenas com água, essa nova massa foi então pesada (A4).

### **3.2.2 Análise granulométrica**

Para as análises granulométricas foi utilizado um peneirador vibratório suspenso, marca CDC e modelo PV-08. Todos os testes foram realizados via úmido e em duplicata, por um período de tempo suficiente para o passante em  $37\ \mu\text{m}$  (400#) saísse clarificado (límpido), esta faixa granulométrica em específico passou pelo processo de sifonagem (remoção do excesso de água após decantação da fração sólida) antes de ser seca em estufa. Após essa etapa, o pó de brita bem como a argila retidos em cada malha da peneira passaram pelo processo de secagem em estufa para então serem pesados. Por fim, foi confeccionada a curva granulométrica de cada ensaio.

Em relação as análises granulométricas, elas se deram da seguinte forma;

1. Para o pó de brita, a análise granulométrica foi realizada em duplicata, com aproximadamente 100 g da fração passante em 150  $\mu\text{m}$  (100#).
2. Em relação à argila, após ela já ter passado pelo processo de fragmentação bem como o corte na malha de 420  $\mu\text{m}$  (35#), foi feita a análise granulométrica em duplicata de aproximadamente 100 g do passante dessa peneira.

A série de peneiras utilizadas em cada um dos três peneiramentos está listada na Tabela 4.

**Tabela 4 - Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica.**

<b>Peneiramento do pó de brita</b>	<b>Peneiramento da argila</b>
<b>*Fração abaixo de 150 <math>\mu\text{m}</math> (100#)</b>	<b>*Fração abaixo de 420 <math>\mu\text{m}</math> (35#)</b>
177 $\mu\text{m}$ (80#)	1000 $\mu\text{m}$ (16#)
150 $\mu\text{m}$ (100#)	420 $\mu\text{m}$ (35#)
105 $\mu\text{m}$ (140#)	150 $\mu\text{m}$ (100#)
74 $\mu\text{m}$ (200#)	105 $\mu\text{m}$ (140#)
52 $\mu\text{m}$ (270#)	74 $\mu\text{m}$ (200#)
44 $\mu\text{m}$ (325#)	52 $\mu\text{m}$ (270#)
37 $\mu\text{m}$ (400#)	44 $\mu\text{m}$ (325#)
	37 $\mu\text{m}$ (400#)

### **3.2.3 Fluorescência de raios X**

A análise química do pó de brita já havia sido realizada por Siqueira (2018) através de fluorescência de raios X (FRX), utilizando o equipamento da marca *Shimadzu*, modelo EDX-720 do Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET MG (Campus I), situado em Belo Horizonte (MG). As etapas de preparação da amostra consistiram basicamente na fragmentação do subproduto utilizando almofariz e pistilo de porcelana até a obtenção de 50g de amostra passante em 200# (74  $\mu\text{m}$ ) com o auxílio de um peneirador.

O resultado obtido por Siqueira (2018) da análise química dos elementos contidos no pó de brita está apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 - Resultado da análise química dos elementos contidos no pó de brita.**

<b>Pó de brita</b>	
<b>Minerais</b>	<b>Resultados (%)</b>
<b>Si</b>	59,10
<b>K</b>	14,31
<b>Al</b>	12,20
<b>Fe</b>	9,48
<b>Ca</b>	2,32
<b>Outros</b>	2,59

Fonte: Siqueira, 2018.

Já o resultado da análise química obtido por Siqueira (2018) dos óxidos contidos no pó de brita está apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6 - Resultado da análise química dos óxidos contidos no pó de brita.**

<b>Pó de Brita</b>	
<b>Minerais</b>	<b>Resultados (%)</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	70,15
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14,93
<b>K<sub>2</sub>O</b>	7,34
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5,02
<b>CaO</b>	1,28
<b>Outros</b>	1,28

Fonte: Siqueira, 2018.

De acordo com Siqueira (2018), o pó de brita foi classificado como um granito gnaisse em virtude de uma alta quantidade do elemento silício (59,10%) que é o elemento que se junta com o oxigênio para formar a sílica, que por sua vez é o óxido mais abundante presente no pó de brita, que representa 70,15% de sua composição.

Foi necessária ser feita a análise química da argila no presente trabalho, visto que a mesma possuía origem desconhecida. A fluorescência de raios X foi realizada pela empresa FRX Service Ltda utilizando o método de pastilhas fundidas com  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . A fusão foi realizada em máquina de fusão Claisse, enquanto a análise foi realizada em espectrômetro de FRX-WDS da marca Philips, modelo PW-2404. As etapas de preparação da amostra consistiram basicamente na fragmentação do subproduto utilizando almofariz e pistilo de porcelana até a obtenção de 50g de amostra passante em 400# (37  $\mu\text{m}$ ) com o auxílio de um peneirador.

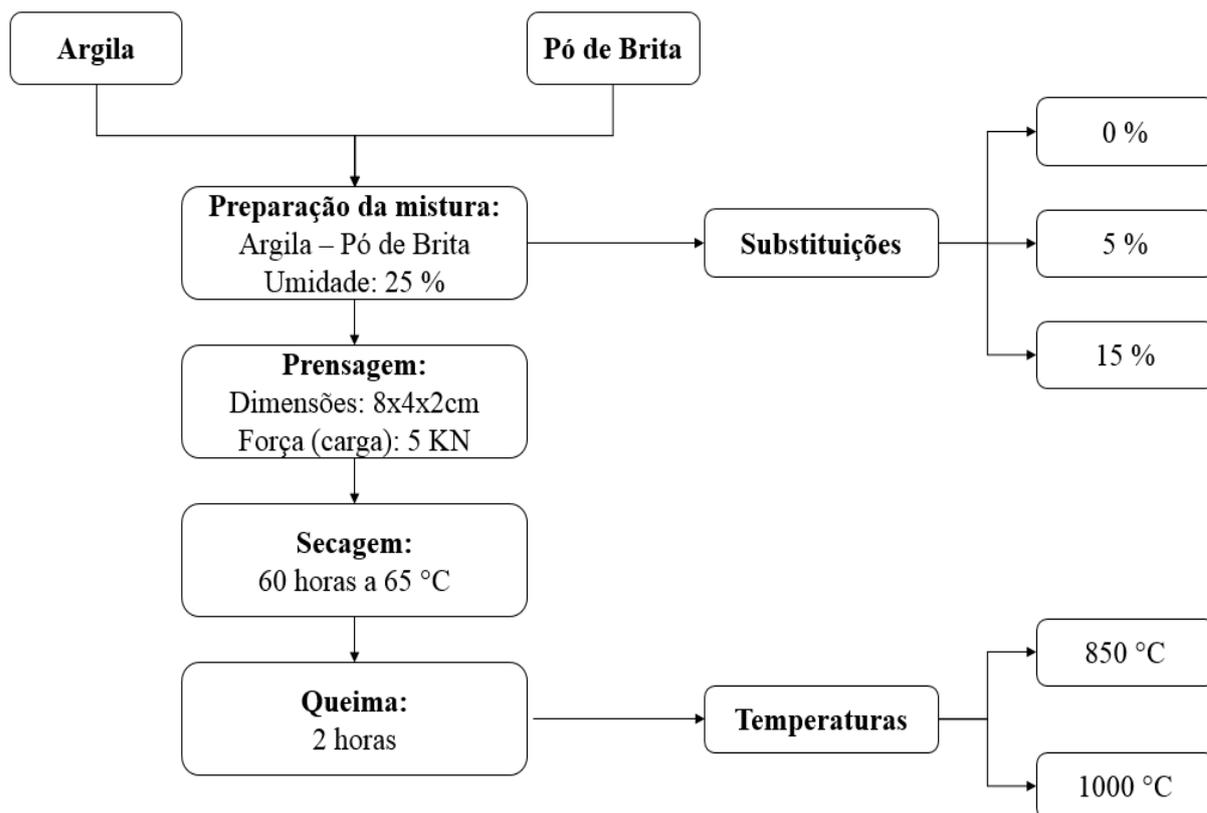
### 3.3 Conformação dos corpos de prova

A conformação dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Edificações do CEFET-MG, Unidade Araxá por meio de um molde de aço inox com dimensões de 8x4x2 cm conforme mostra a Figura 9.



**Figura 9 - Molde em aço inox utilizado para confecção dos corpos de prova (Autoria própria).**

A Figura 10 aborda o fluxograma de construção dos corpos de prova mostrando desde a preparação das amostras, a prensagem, a secagem, a queima e as varáveis de estudo do trabalho, que foram a porcentagem de substituição e a temperatura de queima.



**Figura 10 - Fluxograma de construção dos corpos de prova cerâmicos com substituição de argila por pó de brita (Autoria própria).**

Inicialmente as amostras de argila e de pó de brita foram homogeneizadas e quarteadas pelo método de pilha longitudinal, a fim de se obter alíquotas para a confecção dos corpos de prova. Foi determinada uma massa de 56 gramas para cada corpo de prova, este valor foi definido em função do volume do molde, já as porcentagens de substituição foram variadas conforme Cota (2017).

As massas das matérias primas relacionadas a cada porcentagem de substituição, bem como a quantidade de corpos de prova fabricados para cada condição estão apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Massa de argila e de pó de brita em função da % de substituição.**

<b>% Substituição</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>15%</b>
<b>Massa Pó de Brita (g)</b>	0	2,8	8,4
<b>Massa Argila (g)</b>	56	53,2	47,6
<b>Quantidade de corpos de prova nessa condição</b>	12	12	12

A Figura 11 mostra as massas das matérias-primas devidamente separadas para início da fabricação dos corpos de prova.



**Figura 11 - Massas das matérias primas devidamente separadas para início da fabricação dos corpos de prova (Autoria própria).**

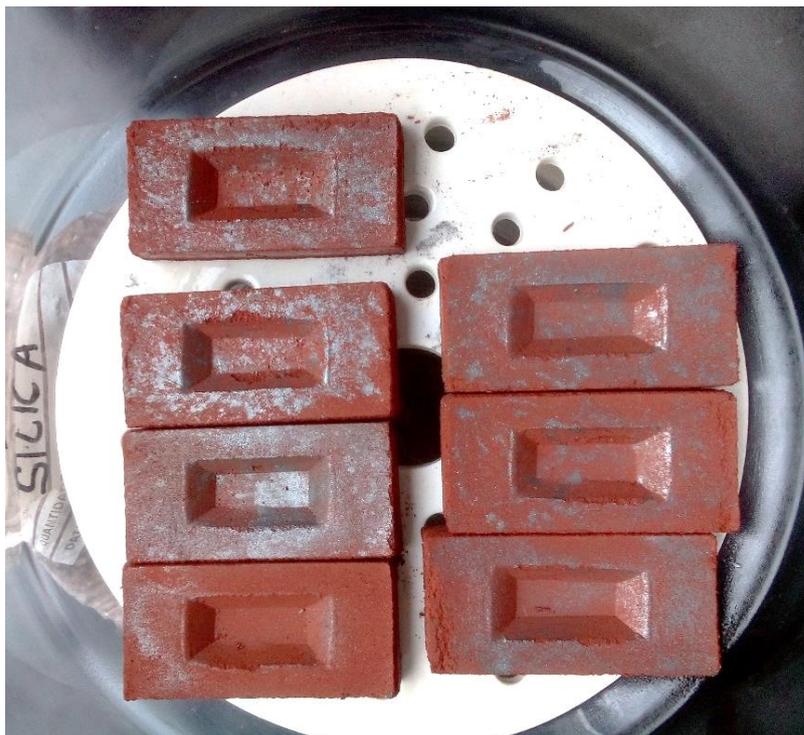
O ajuste da umidade de prensagem é crucial para o processo de fabricação dos materiais cerâmicos, já que ela pode ocasionar deformações, fissuras e erros no momento do preenchimento do molde, visto isso, o valor adotado para este parâmetro foi de 25%. Após a adição de água na mistura do pó de brita com a argila, o composto foi homogeneizado para garantir que a umidade ficasse distribuída uniformemente.

Em seguida, a mistura foi colocada no molde para então ser compactada pelo mecanismo de prensagem, conforme Figura 12. A força adotada de 5 KN se deu com base em testes de resistência do molde, cargas excessivas ocasionaram deformidades no mesmo, visto isso, foi necessário utilizar uma força de prensagem baixa. Antes de adicionar a mistura a ser prensada, o molde foi revestido com uma película de grafita em pó, cuja função era de lubrificar e facilitar a retirada do corpo de prova do molde após a prensagem. Usualmente utiliza-se óleo de máquinas para essa função, porém testes com a grafita surtiram em melhores resultados.



**Figura 12 - Prensagem dos corpos de prova (Autoria própria).**

Após a retirada do corpo de prova do molde, conforme Figura 13, houve a medição do comprimento com uso de um paquímetro manual e pesagem utilizando balança. Em seguida, foram colocados na estufa (Figura 14) e secados por 60 horas a 65 °C. Após a secagem, foi medido o comprimento e o peso dos corpos de prova. A próxima etapa consistiu na queima em mufla durante duas horas a 850°C com uma taxa de aquecimento de 7,1 °C/min, ou a 1000 °C com uma taxa de aquecimento de 8,3°C/min.



**Figura 13 - Corpos de prova após processo de prensagem (Autoria própria).**



**Figura 14 - Corpos de prova em estufa a 65°C por 60h (Autoria própria).**

Em relação a queima dos corpos de prova, como o volume da mufla era reduzido, não foi possível queimar todos os corpos de uma única vez. Dessa maneira, todos os corpos de prova cerâmicos foram colocados em um dessecador com sílica, para garantir que os tijolos permanecessem com a mesma umidade. Por fim, após todos os cerâmicos serem queimados, foi feita a pesagem e medição do comprimento final.

### 3.4 Planejamento experimental

No planejamento fatorial são avaliados os fatores principais, bem como a interação entre eles com a resposta. Este planejamento utiliza-se da metodologia  $2^k$ , onde  $k$  é o número de fatores do experimento, cada fator possui 2 níveis, sendo eles o nível -1, comumente utilizado para o valor mínimo e o nível +1, para valor máximo. (TEÓFILO E FERREIRA, 2006).

Neste trabalho, as variáveis de entrada foram a temperatura de queima e a porcentagem de substituição, em relação a essa segunda variável, apenas as substituições de 5% e 15% fizeram parte do planejamento experimental fatorial, visto que a de 0% de substituição com pó de brita, ou seja, corpos de prova fabricados apenas com a argila, foram usados como título de comparação dos resultados do planejamento. Já as variáveis de saída foram a retração linear, perda ao fogo, absorção de água, massa específica aparente e resistência a compressão uniaxial.

Os fatores bem como os níveis estão abordados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Fatores do planejamento experimental fatorial.**

Níveis	Fatores	
	Substituição (% em massa)	Temperatura (°C)
-1	5	850
+1	15	1000

O planejamento experimental fatorial apresentado na Tabela 9 foi realizado com a assistência do software Minitab 18. Teve-se como objetivo avaliar como os fatores influenciavam na resposta. Os ensaios foram realizados em triplicata e com nível de confiança de 95% em um planejamento fatorial completo  $2^2$ .

**Tabela 9 - Planejamento fatorial completo 2<sup>2</sup> com triplicata, (-1) nível mínimo; (+1) nível máximo.**

<b>Experimento</b>	<b>Ordem</b>	<b>Substituição</b>	<b>Temperatura</b>
<b>1</b>	1	-1	-1
<b>2</b>	2	1	-1
<b>3</b>	3	-1	1
<b>4</b>	4	1	1
<b>5</b>	5	-1	-1
<b>6</b>	6	1	-1
<b>7</b>	7	-1	1
<b>8</b>	8	1	1
<b>9</b>	9	-1	-1
<b>10</b>	10	1	-1
<b>11</b>	11	-1	1
<b>12</b>	12	1	1

### **3.5 Ensaios tecnológicos para cerâmica**

Os ensaios tecnológicos na sua maioria foram realizados em triplicata, apenas a retração linear de secagem foi feita em sextuplicata. Os resultados finais foram as médias dos valores obtidos juntamente com o desvio padrão.

#### **3.5.1 Retração Linear**

A retração linear de secagem é adquirida com o comprimento dos corpos de prova antes e após a secagem, segundo a Equação (2). Este ensaio foi feito em sextuplicata, ou seja, 6 corpos de prova para 0% de substituição, 6 corpos de prova para 5% de substituição e 6 corpos de prova para 15% de substituição, totalizando 18 corpos de prova.

(2)

$$RLS = \frac{Li - Ls}{Li} \times 100$$

Onde:

RLS: Retração linear de secagem (%);

Li: Comprimento do corpo de prova antes da secagem (cm);

Ls: Comprimento após a secagem (cm).

A retração linear de queima é adquirida com o comprimento dos corpos de prova após a secagem e após a queima, segundo a Equação (3). Este ensaio foi feito em triplicata, ou seja, 3 corpos de prova para 0% de substituição e temperatura de queima de 850°C, 3 corpos de prova para 0% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, 3 corpos de prova para 5% de substituição e temperatura de queima de 850°C, 3 corpos de prova para 5% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, 3 corpos de prova para 15% de substituição e temperatura de queima de 850°C e 3 corpos de prova para 15% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, totalizando 18 corpos de prova.

$$RLQ = \frac{Ls - Lq}{Ls} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

RLQ: Retração linear de queima (%);

Ls: Comprimento do corpo de prova após a secagem (cm);

Lq: Comprimento após a queima (cm).

A retração linear total é adquirida com o comprimento dos corpos de prova antes da secagem e após a queima, segundo a Equação (4). Este ensaio foi feito em triplicata, ou seja, 3 corpos de prova para 0% de substituição e temperatura de queima de 850°C, 3 corpos de prova para 0% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, 3 corpos de prova para 5% de substituição e temperatura de queima de 850°C, 3 corpos de prova para 5% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, 3 corpos de prova para 15% de substituição e temperatura de queima de 850°C e 3 corpos de prova para 15% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, totalizando 18 corpos de prova.

$$RLT = \frac{Li - Lq}{Li} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

RLT: Retração linear total (%);

Li: Comprimento do corpo de prova antes da secagem (cm);

Lq: Comprimento após a queima (cm).

### 3.5.2 Perda ao Fogo

Após o processo de queima, o material cerâmico tende a perder parte da sua massa em função da temperatura. A diferença entre a massa após o processo de secagem e a massa após o processo de queima é denominada de perda ao fogo. Consiste basicamente em avaliar o percentual de água e matéria orgânica que foi perdido durante a etapa de queima.

Este ensaio também foi realizado em triplicata e na mesma dinâmica dos testes descrita para a retração linear de queima. Os resultados de massa obtidos com os testes foram lançados na Equação (5).

$$PF = \frac{Ms - Mq}{Ms} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

PF: Perda ao fogo (%);

Ms: Massa do corpo de prova após secagem (g);

Mq: Massa do corpo de prova após queima (g);

### 3.5.3 Absorção de Água

A absorção de água é considerada uma propriedade física de extrema importância para os materiais cerâmicos. Ela está diretamente relacionada a massa de água que os corpos de prova absorvem após a etapa de queima. Com base nisso, o teste consistiu em manter os corpos de prova imersos em um equipamento de Banho Maria da marca SOLOTEST por 2 horas a uma temperatura de 100°C, conforme especificada pela literatura. Após 30 minutos da retirada dos

corpos de prova do banho quente, estes foram pesados depois de serem levemente secados com um pano úmido para retirada do excesso de água da superfície.

Este ensaio foi feito em triplicata e na mesma dinâmica de ensaios descrita para a retração linear de queima. Os resultados de massa obtidos com os testes foram lançados na Equação (6).

$$AA = \frac{Mu - Mq}{Mq} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

AA: Índice de absorção de água (%);

Mu: Massa do corpo de prova úmido (g);

Mq: Massa do corpo de prova após queima (g);

### 3.5.4 Massa Específica Aparente

A massa específica aparente é definida como a razão entre a massa do corpo seco após a queima, que foi calculado por meio da balança de precisão, e seu volume aparente, que foi calculado com o auxílio de uma proveta com água, onde o corpo de prova era mergulhado, acarretando em um acréscimo no volume. Essa diferença entre o volume final e o inicial foi considerado o volume aparente do material cerâmico.

Os testes de massa específica aparente foram realizados em triplicata e seguindo a mesma dinâmica de ensaios descrita para a retração linear de queima. Os resultados obtidos com os testes foram lançados na Equação (7).

$$MEA = \frac{Mq}{Vap} \quad (7)$$

Onde:

MEA: Massa específica aparente (%);

Mq: Massa do corpo de prova após queima (g);

Vap: Volume aparente do corpo de prova (cm<sup>3</sup>).

### 3.5.5 Resistência a Compressão Uniaxial

Esse ensaio consistiu na colocação do cerâmico no centro da placa de compressão da prensa Emic e a mesma era abaixada em uma velocidade constante até que tocasse o corpo de prova, a carga então era aumentada gradativamente até o momento em que acontecia a ruptura, o valor da força aplicada (F) para a ruptura era mostrado na tela e então anotado. A área (A) foi calculada com o auxílio de um paquímetro manual para medir as dimensões do corpo de prova.

Este ensaio foi feito em triplicata para duas condições distintas, a primeira com os corpos de prova secos e a segunda com os corpos de prova úmidos (foram saturados no Banho Maria da marca SOLOTEST por 2 horas a uma temperatura de 100°C). Para este teste foram fabricados 6 corpos de prova para 0% de substituição e temperatura de queima de 850°C, 6 corpos de prova para 0% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, 6 corpos de prova para 5% de substituição e temperatura de queima de 850°C, 6 corpos de prova para 5% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, 6 corpos de prova para 15% de substituição e temperatura de queima de 850°C e 6 corpos de prova para 15% de substituição e temperatura de queima de 1000°C, totalizando 18 corpos de prova via seco e 18 corpos de prova via úmido.

Os resultados obtidos com os testes foram lançados na Equação (8).

$$R_c = \frac{F \times 10}{A} \quad (8)$$

Onde:

Rc: Resistência a compressão (MPa);

F: Carga atingida no momento de ruptura do corpo de prova (KN);

A: Superfície do corpo de prova submetida a tração da prensa (cm<sup>2</sup>).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Picnometria

A Tabela 10 aborda os resultados para a picnometria do pó de brita, bem como a média das massas específicas da triplicata e o seu devido desvio padrão.

**Tabela 10 - Resultado picnometria do pó de brita.**

<b>Picnometria do pó de brita</b>			
	1	2	3
<b>A1 (g)</b>	29,69	31,94	30,81
<b>A2 (g)</b>	33,13	35,92	34,85
<b>A3 (g)</b>	82,69	84,77	83,96
<b>A4 (g)</b>	80,55	82,31	81,45
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,65	2,62	2,64
<b>Média das massas específicas (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,64		
<b>Desvio Padrão</b>	0,01		

Tendo em vista a análise química realizada por Siqueira (2018) nota-se que o valor da massa específica encontrado está condizente com a densidade do granito gnaisse que varia entre 2,6 a 2,9 g/cm<sup>3</sup>.

A Tabela 11 aborda os resultados para a picnometria da argila, bem como a média das massas específicas da triplicata.

**Tabela 11 - Resultado picnometria da argila.**

<b>Picnometria da argila</b>			
	1	2	3
<b>A1 (g)</b>	30,54	30,07	30,71
<b>A2 (g)</b>	33,01	32,28	32,92
<b>A3 (g)</b>	81,50	82,18	81,97
<b>A4 (g)</b>	79,99	80,79	80,59
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,57	2,70	2,66
<b>Média das massas específicas (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,64		
<b>Desvio Padrão</b>	0,06		

Tendo em vista a análise química da argila realizada neste presente trabalho pela empresa FRX Service Ltda, nota-se que o valor da massa específica encontrado é condizente com a densidade dos argilominerais.

## **4.2 Análise Granulométrica**

O resultado da análise granulométrica foi feito com base na alimentação recalculada em função de dois peneiramentos para cada matéria prima, ambos os valores de desvio padrão ficaram abaixo de 5%. A Figura 15 aborda a curva granulométrica do pó de brita e a Figura 16 aborda a curva granulométrica da argila, enquanto as Tabela 12 e Tabela 13 trazem os dados utilizados para a confecção dessas curvas.

Com base na análise granulométrica para o pó de brita (Tabela 12), tem-se 99,15% de material passante acumulado na peneira de 150  $\mu\text{m}$  (100#). Já para a análise granulométrica da argila (Tabela 13), tem-se 59,95% de passante acumulado a peneira de 150  $\mu\text{m}$  (100#). Com base nos dados, pode-se perceber que a granulometria do pó de brita é predominantemente mais fina que a argila na faixa escolhida para fabricação dos corpos de prova, fato que garante ao subproduto um melhor empacotamento, contribuindo assim, para a diminuição dos poros, afetando em propriedades como a absorção de água e a resistência a compressão uniaxial.

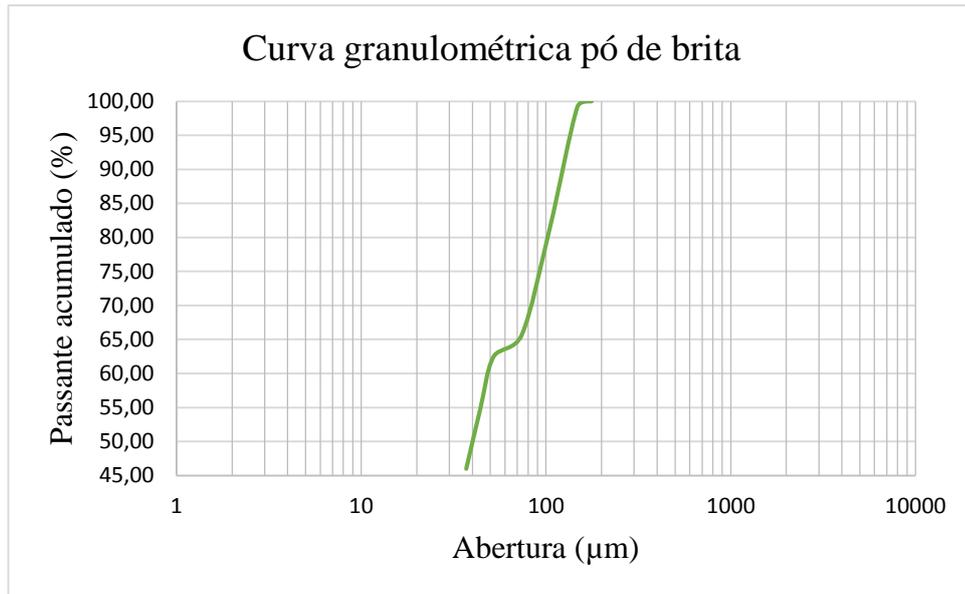


Figura 15 - Curva granulométrica recalculada do pó de brita.

Tabela 12 - % Passante acumulado em função da abertura para o pó de brita.

Pó de brita	
Abertura (µm)	% Passante acumulado
177	100
150	99,15
105	81,39
74	65,68
52	62,47
44	54,68
37	46,00
Fundo	0

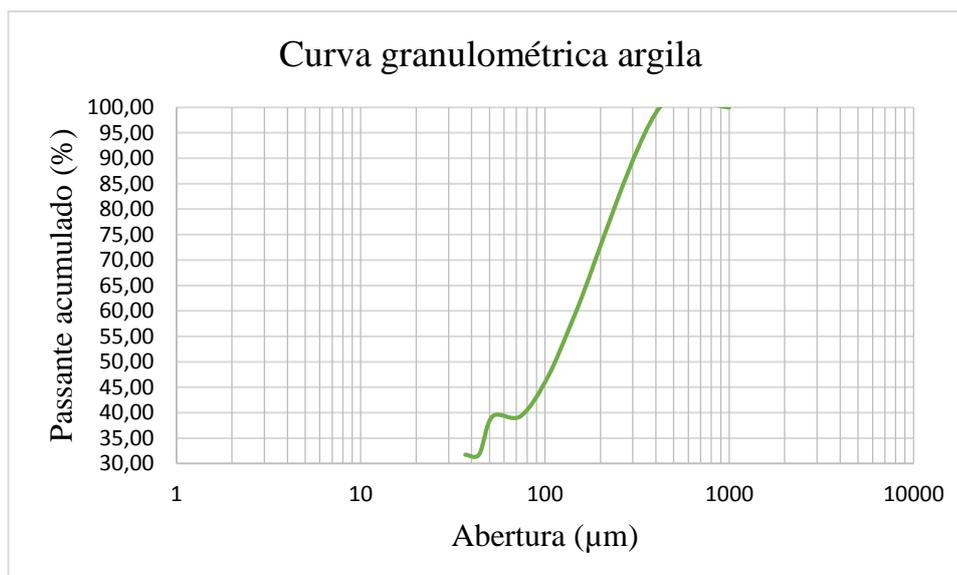


Figura 16 - Curva granulométrica recalculada da argila.

Tabela 13 - % Passante acumulado em função da abertura para a argila.

Argila	
Abertura (µm)	% Passante acumulado
1000	100
420	99,96
150	59,95
105	47,38
74	39,36
52	39,30
44	31,82
37	31,77
Fundo	0

### 4.3 Fluorescência de raios X

O resultado da fluorescência de raios X para a argila, em função dos óxidos formados, está apresentado na Tabela 14. Pode ser visto na análise química a presença considerável de  $Al_2O_3$  (39,26%),  $Fe_2O_3$  (20,94%) e  $SiO_2$  (14,53%), que são compostos comumente encontrados nas argilas.

**Tabela 14 - Resultado da análise química dos óxidos contidos na argila.**

<b>Argila</b>	
<b>Minerais</b>	<b>Resultados (%)</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	39,26
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20,94
<b>SiO<sub>2</sub></b>	14,53
<b>TiO<sub>2</sub></b>	4,08
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,48
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,22
<b>Outros</b>	20,49

#### **4.4 Retração Linear**

##### **4.4.1 Retração linear de Secagem**

Na Tabela 15 são mostrados os resultados médios da retração linear de secagem para todas as condições testadas.

**Tabela 15 - Retração linear de secagem (RLS).**

<b>Retração linear de secagem (RLS)</b>		
<b>Substituição (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
0	0,12	0,06
5	0,33	0,17
15	0,55	0,21

Pode ser observado que a menor retração de secagem se deu para a condição de 0% de substituição (0,12%) e a de maior se deu para a condição de 15% de substituição (0,55%). Como visto, todas as médias obtidas das retrações lineares de secagem são positivas, indicando uma retração dos corpos de prova.

Quando os corpos de prova cerâmicos apresentam baixa umidade, a retração linear de secagem tende a ser nula ou negativa (MELCHIADES *et al.*, 2001). Visto isso, pode-se concluir que pela

umidade utilizada de 25% na fabricação dos corpos de prova ser relativamente alta, os corpos sofreram retração ao invés de expansão.

Variações ente 0 e 0,3% nas dimensões do corpo de prova na secagem evitam a ocorrência de fissuras principalmente nas bordas do cerâmico (OLIVEIRA, 2000). Com base nas análises pode ser visto que a condição de 0% de substituição (0,12%) atende esse quesito, porém as demais não, mesmo que estas se aproximem muito dos valores de referência.

Outro ponto a ser observado é que, ao se aumentar a porcentagem de substituição, há um aumento na retração linear de secagem.

#### 4.4.2 Retração Linear de Queima

A Figura 17 apresenta o gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a retração linear de queima, que mostra que tanto o fator substituição quanto à temperatura de queima foram significativos no experimento visando uma confiança de 95%, porém a interação entre os dois fatores não foi significativa.

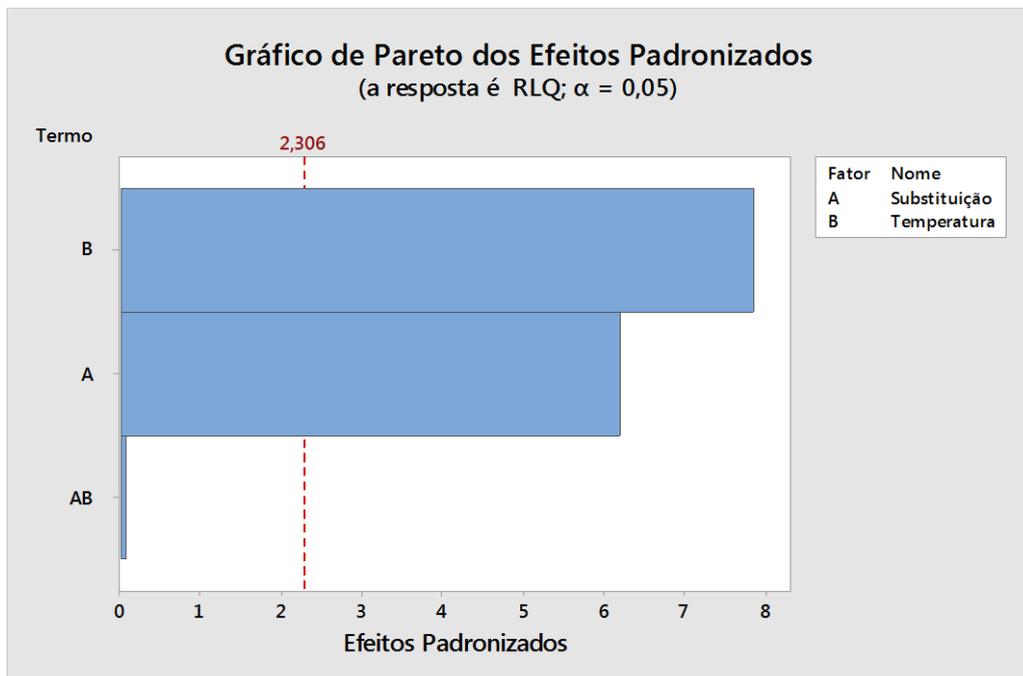
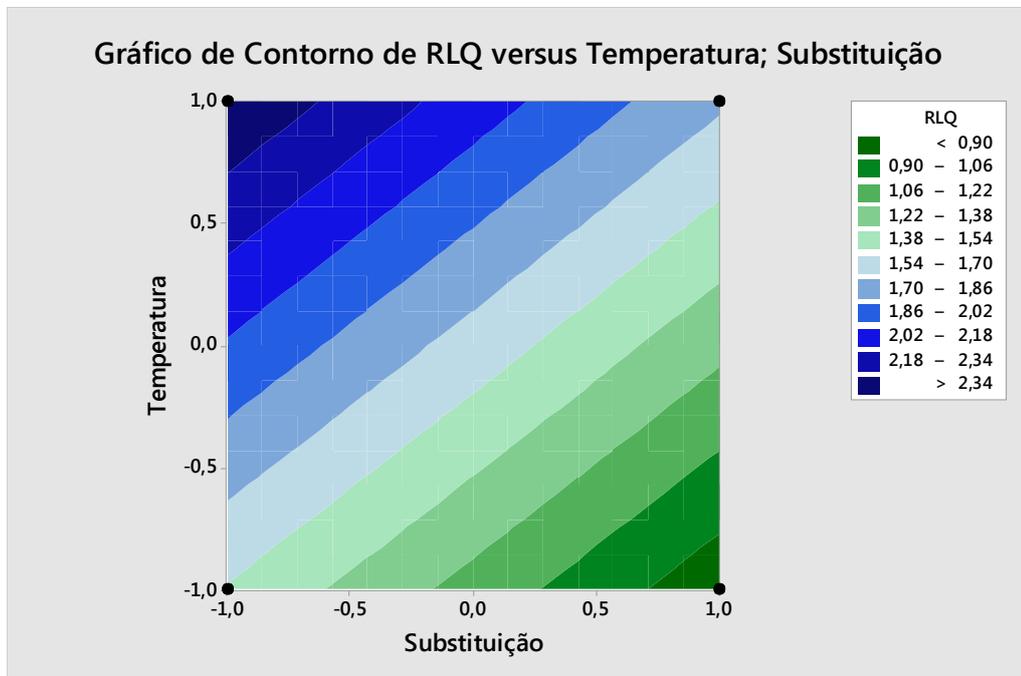


Figura 17 - Gráfico de pareto para a retração linear de queima.

Na Tabela 16 são mostrados os resultados médios da retração linear de queima para todas as condições testadas. A Figura 18 representa o gráfico de contorno onde é possível notar as combinações dos fatores substituição (5% e 15%) e temperatura de queima (850°C e 1000°C) gerando as melhores e piores respostas. Regiões de cor azul apresentam os maiores valores de saída, e as regiões de cor verde apresentam os menores valores de saída.

**Tabela 16 - Retração linear de queima (RLQ).**

<b>Retração linear de queima (RLQ)</b>			
<b>Substituição (%)</b>	<b>Temperatura de queima (°C)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
0	850	1,68	0,13
0	1000	2,71	0,27
5	850	1,53	0,09
5	1000	2,48	0,25
15	850	0,80	0,18
15	1000	1,73	0,26

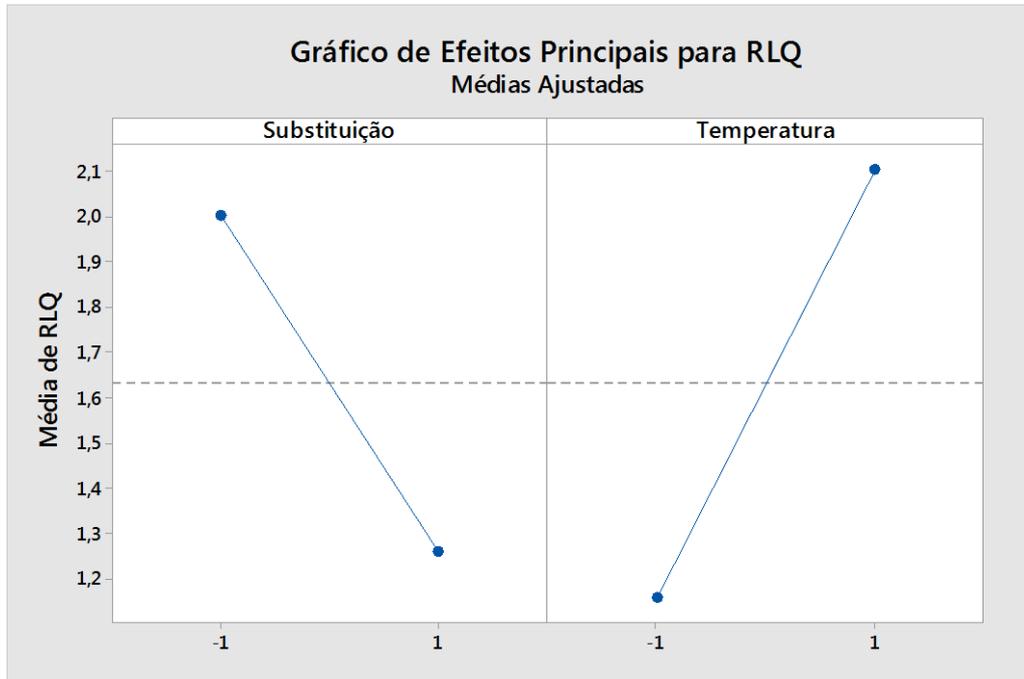


**Figura 18 - Gráfico de contorno para a retração linear de queima.**

Pode ser observado que a menor retração de queima (0,80%) se deu para a condição de 15% de substituição e 850°C de temperatura de queima e a de maior (2,71%) se deu para a condição de 0% de substituição e de 1000°C temperatura de queima, as demais condições tiverem valores intermediários. Como visto, ambos os sinais das retrações lineares de queima são positivos, indicando uma retração dos corpos de prova. Segundo Van Vlack (1973), os materiais produzidos pelo mecanismo de prensagem apresentam baixas variações nas dimensões, isso se deve pelo fato de apresentarem pouca água entre as partículas.

Devido a fusão parcial dos componentes presentes nos cerâmicos que apresentam propriedades menos refratárias, ou seja, que não são capazes de suportar elevadas temperaturas, ocorre a formação da fase líquida no interior do material, que resulta na diminuição do volume dos poros em virtude da aproximação das partículas, acarretando na retração do produto (MELCHIADES *et al.*, 2001).

A Figura 19 apresenta o gráfico de efeitos principais para a retração linear de queima, onde é mostrado que a temperatura de queima é mais relevante que a substituição em virtude da maior inclinação e tamanho da reta. Um outro ponto a ser discutido é que, ao se aumentar a porcentagem de substituição há uma diminuição da retração linear de queima, já quando se aumenta a temperatura de queima, há um aumento na retração linear de queima.

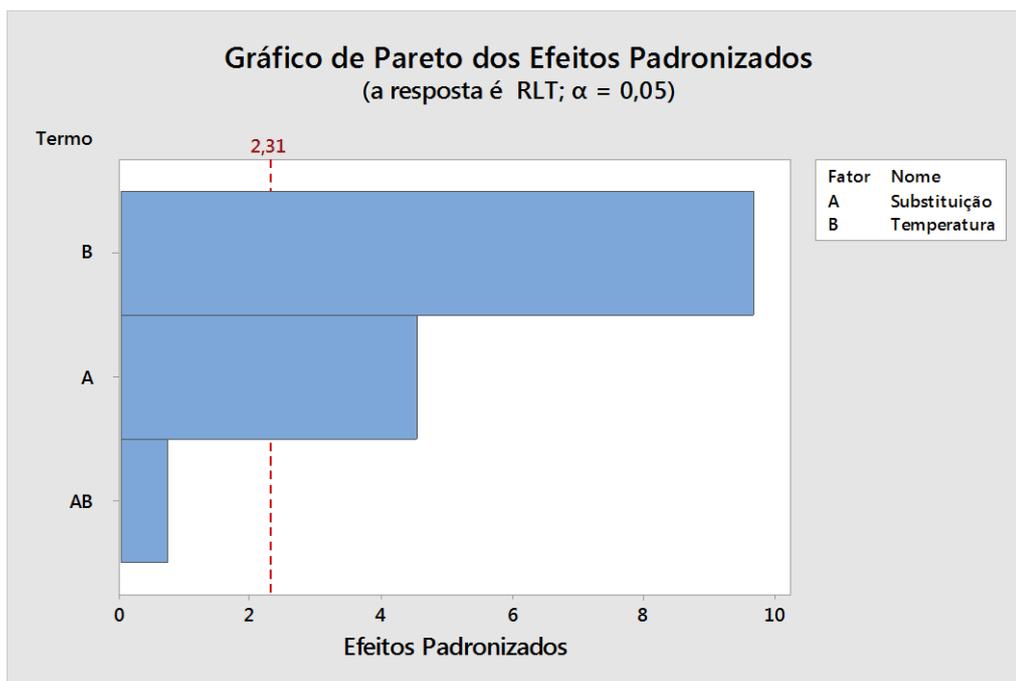


**Figura 19 - Gráfico dos efeitos principais para a retração linear de queima.**

Busca-se na indústria retrações lineares de queima baixas e constantes ao longo da escala produtiva, de modo que venha garantir uma qualidade em função da homogeneidade dos produtos, visto que não existem valores estabelecidos para retração linear de queima em normas específicas.

#### **4.4.3 Retração Linear Total**

A Figura 20 apresenta o gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a retração linear total, que mostra que tanto o fator substituição quanto à temperatura de queima foram significativos no experimento visando uma confiança de 95%, porém a interação entre os dois fatores não foi significativa.

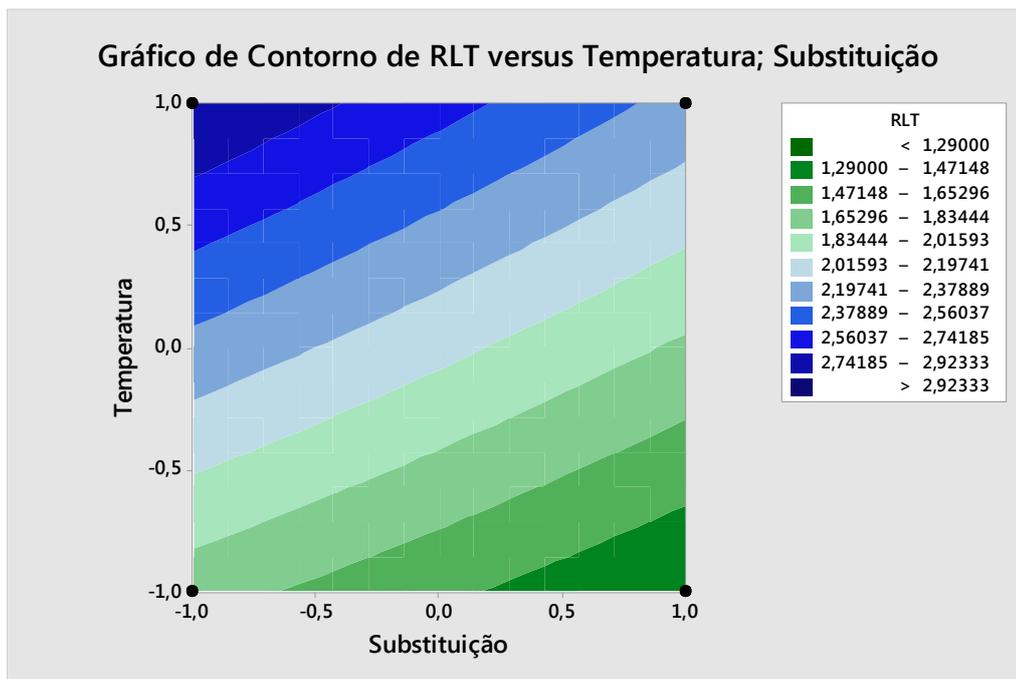


**Figura 20 - Gráfico de pareto para a retração linear total.**

Na Tabela 17 são mostrados os resultados médios da retração linear total para todas as condições testadas. A Figura 21 representa o gráfico de contorno onde é possível notar as combinações dos fatores substituição (5% e 15%) e temperatura de queima (850°C e 1000°C) gerando as melhores e piores respostas. Regiões de cor azul apresentam os maiores valores de resposta, e as regiões de cor verde apresentam os menores valores de resposta.

**Tabela 17 - Retração linear total (RLT).**

<b>Retração linear total (RLT)</b>			
<b>Substituição</b>	<b>Temperatura de queima</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>
(%)	(°C)	(%)	<b>Padrão</b>
0	850	1,76	0,12
0	1000	2,85	0,25
5	850	1,73	0,04
5	1000	2,93	0,25
15	850	1,29	0,14
15	1000	2,32	0,27



**Figura 21 - Gráfico de contorno para a retração linear total.**

Pode ser observado que a menor retração total (1,29%) se deu para a condição de 15% de substituição e 850°C de temperatura de queima e a de maior (2,93%) se deu para a condição de 5% de substituição e de 1000°C temperatura de queima, as demais condições tiverem valores intermediários. Como visto, ambos os sinais das retrações lineares totais são positivos, indicando uma retração dos corpos de prova.

Os valores somados de retração linear de secagem e de queima não deve exceder 12%, em virtude do aparecimento de possíveis fissuras no cerâmico final (ACCHAR, 2006). Com base nos resultados, nota-se que todas as condições estão dentro do valor determinado.

A Figura 22 apresenta o gráfico de efeitos principais para a retração linear total, onde é mostrado que a temperatura de queima é mais relevante que a substituição em virtude da maior inclinação e tamanho da reta. Um outro ponto a ser observado é que, ao se aumentar a porcentagem de substituição há uma diminuição da retração linear total, já quando se aumenta a temperatura de queima, há um aumento na retração linear total.

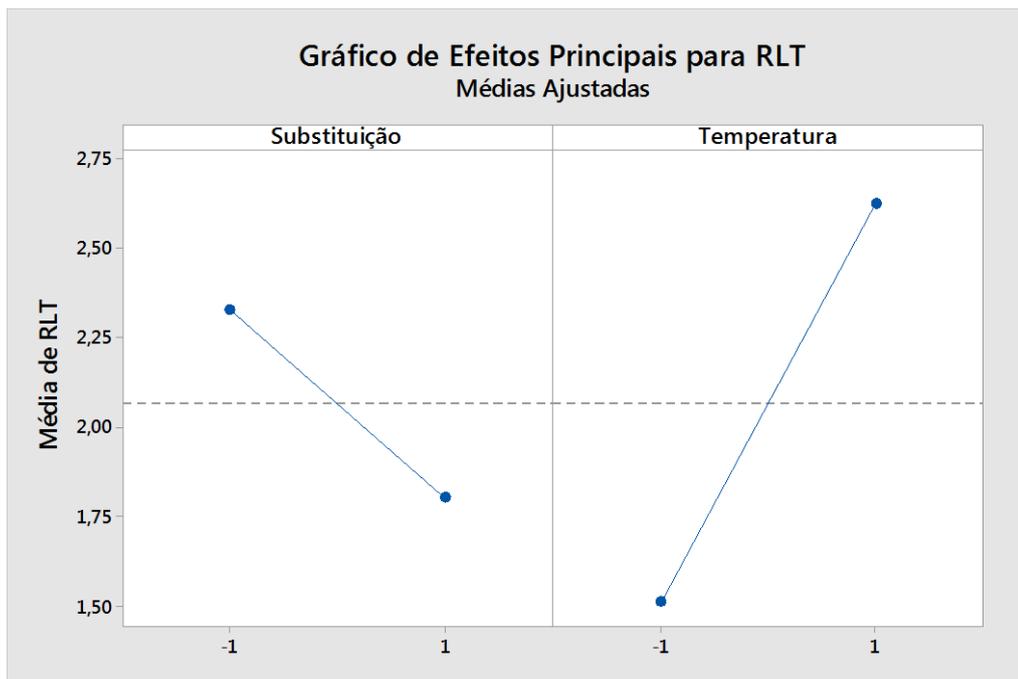
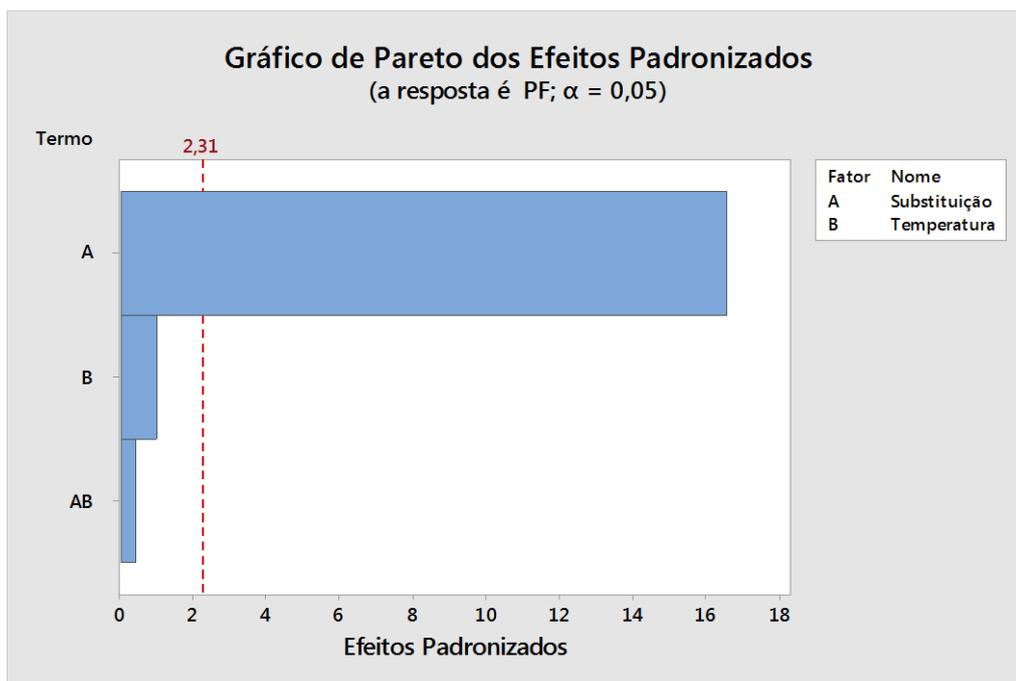


Figura 22 - Gráfico dos efeitos principais para a retração linear total.

#### 4.5 Perda ao Fogo

A Figura 23 apresenta o gráfico de pareto dos efeitos padronizados para perda ao fogo, que mostra que apenas o fator substituição foi significativo no experimento visando uma confiança de 95%, o fator principal temperatura de queima e a interação entre os dois fatores não foram significativos.

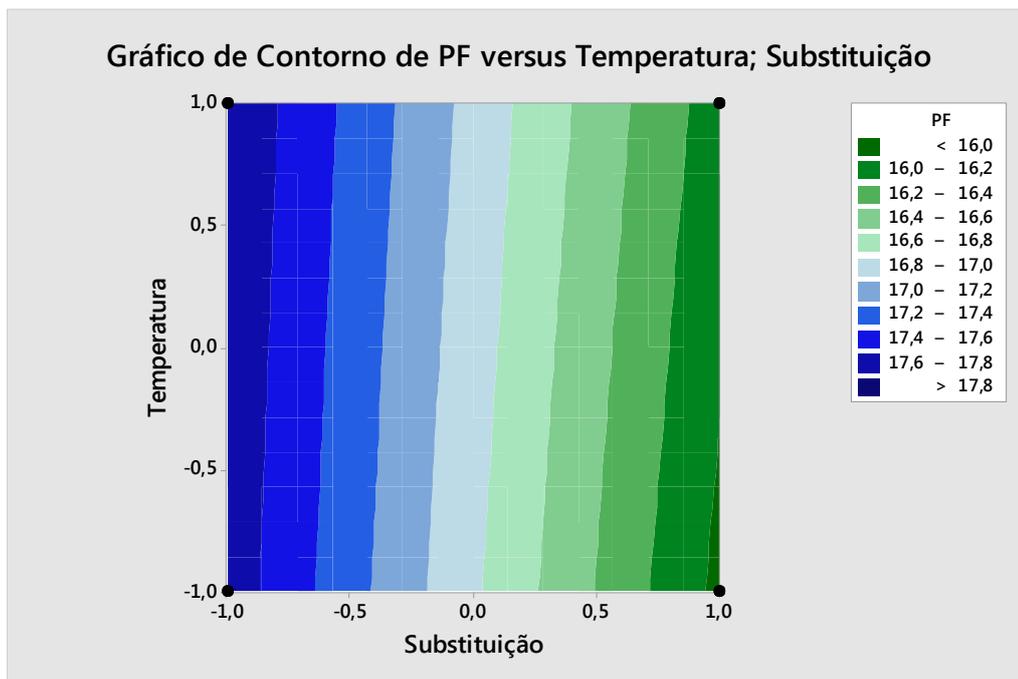


**Figura 23 - Gráfico de pareto para perda ao fogo.**

Na Tabela 18 são mostrados os resultados médios da perda ao fogo para todas as condições testadas. A Figura 24 representa o gráfico de contorno onde é possível notar as combinações dos fatores substituição (5% e 15%) e temperatura de queima (850°C e 1000°C) gerando as melhores e piores respostas. Regiões de cor azul apresentam os maiores valores de perda ao fogo, e as regiões de cor verde apresentam os menores valores de perda ao fogo.

**Tabela 18 - Perda ao fogo (PF).**

<b>Perda ao fogo (PF)</b>			
<b>Substituição</b>	<b>Temperatura de queima</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>
(%)	(°C)	(%)	<b>Padrão</b>
0	850	18,16	0,17
0	1000	18,84	0,19
5	850	17,71	0,16
5	1000	17,77	0,07
15	850	15,95	0,30
15	1000	16,10	0,09



**Figura 24 - Gráfico de contorno para a perda ao fogo.**

Pode ser observado que a menor perda ao fogo (15,95%) se deu para a condição de 15% de substituição e 850°C de temperatura de queima e a de maior (18,84%) se deu para a condição de 0% de substituição e de 1000°C temperatura de queima.

A Figura 25 apresenta o gráfico de efeitos principais para a perda ao fogo, onde é mostrado que a substituição é mais relevante que a temperatura de queima em virtude da maior inclinação e tamanho da reta. Um outro ponto a ser analisado é que, ao se aumentar a porcentagem de substituição há uma diminuição da perda ao fogo, já quando se aumenta a temperatura de queima, há um aumento da perda ao fogo.

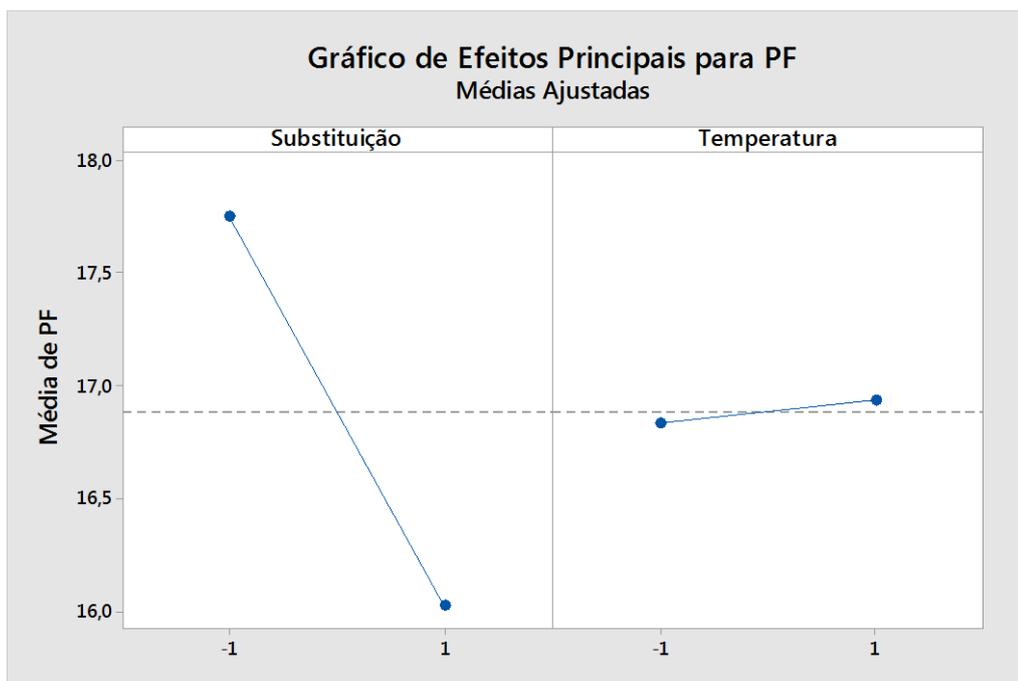
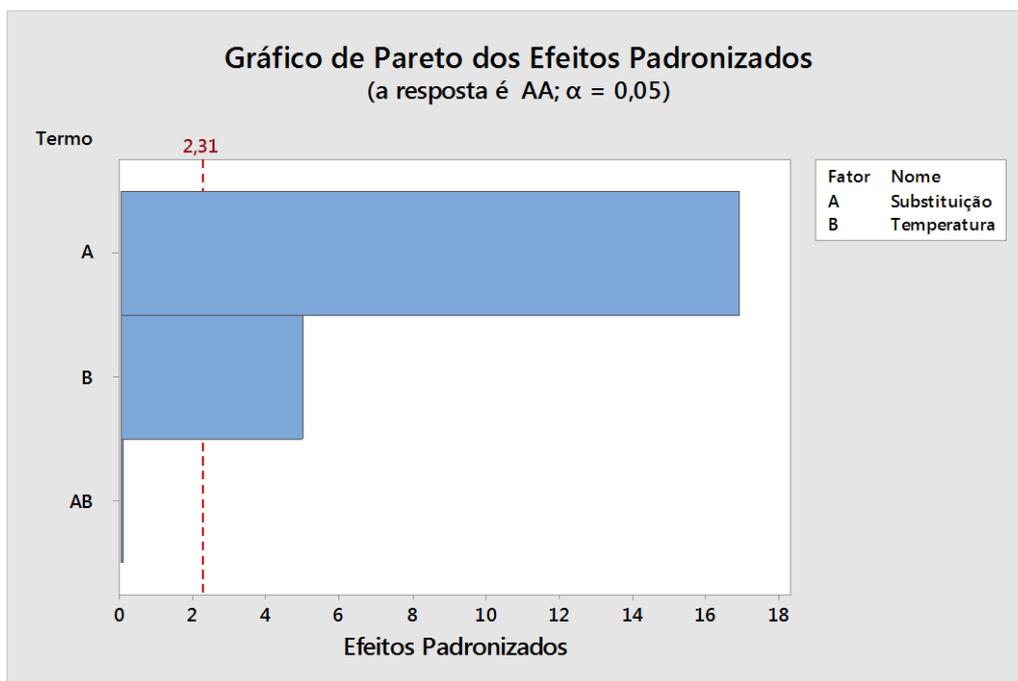


Figura 25 - Gráfico dos efeitos principais para perda ao fogo.

Nota-se que os maiores valores de perda ao fogo são para ambas as temperaturas de queima quando se tem corpos de prova puramente com argila, este fato pode ser explicado pela possível presença de matéria orgânica nesse material, visto que a origem dessa argila é desconhecida, e a mesma pode ter sido retirada de leitos de rios juntamente com restos de vegetais em decomposição. A matéria orgânica evapora com grande facilidade se comparada ao pó de brita, logo a substituição possibilitou menor perda ao fogo.

#### 4.6 Absorção de Água

A Figura 26 apresenta o gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a absorção de água, que mostra que tanto o fator substituição quanto à temperatura de queima foram significativos no experimento visando uma confiança de 95%, porém a interação entre os dois fatores não foi significativa.

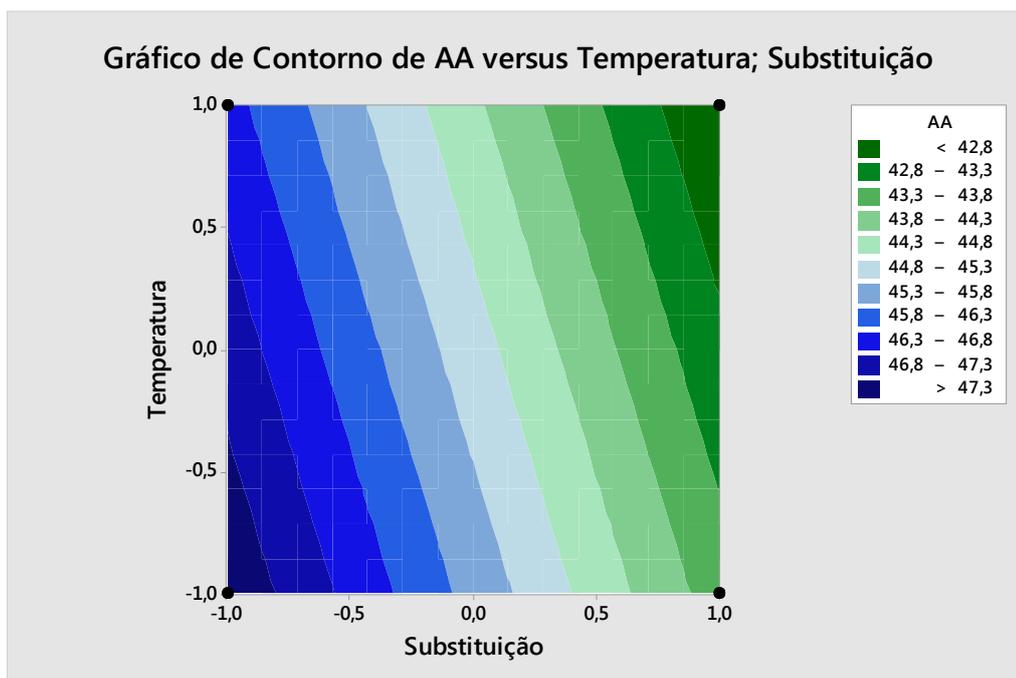


**Figura 26 - Gráfico de pareto para absorção de água.**

Na Tabela 19 são mostrados os resultados médios da absorção de água para todas as condições testadas. A Figura 27 representa o gráfico de contorno onde é possível notar as combinações dos fatores substituição (5% e 15%) e temperatura de queima (850°C e 1000°C) gerando as melhores e piores respostas. Regiões de cor azul apresentam os maiores valores de saída, e as regiões de cor verde apresentam os menores saída.

**Tabela 19 - Absorção de água (AA).**

<b>Absorção de água (AA)</b>			
<b>Substituição</b>	<b>Temperatura de queima</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>
<b>(%)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(%)</b>	<b>Padrão</b>
0	850	48,37	1,03
0	1000	49,27	0,10
5	850	47,71	0,13
5	1000	46,48	0,58
15	850	43,56	0,54
15	1000	42,32	0,29



**Figura 27 - Gráfico de contorno para a absorção de água.**

Pode ser observado que a menor absorção de água (42,32%) se deu para a condição de 15% de substituição e 1000°C de temperatura de queima e a de maior (49,27%) se deu para a condição de 0% de substituição e de 1000°C temperatura de queima, as demais condições tiverem valores intermediários.

A absorção de água foi bastante considerável para todas as condições, fato que pode ser explicado pela elevada porosidade dos corpos de prova. A carga aplicada de 5KN na prensagem da matéria prima no molde pode não ter sido suficiente para aproximar as partículas sólidas, reduzindo assim os espaços vazios e consequentemente diminuir a porosidade. Em outras palavras, um baixo grau de compactação da massa, não contribui para redução da porosidade (SOUZA, 2016). Seria interessante fazer testes com cargas de prensagem mais elevadas, porém para que isso ocorra, seria necessária a reestruturação do molde utilizado no presente trabalho, visando obter uma maior rigidez do mesmo. Caso as modificações não surtiram em ganhos satisfatórios, a fabricação de um novo molde seria o ideal.

As normas ABNT NBR 15270-1/2017 e 15270-2/2017 que abordam os elementos para alvenaria, propõem valores acima de 8% e abaixo de 25% para a absorção de água, considerando tijolo maciço ou perfurado para vedação segundo classe VED40 e tijolo maciço

ou perfurado estrutural segundo classes EST60, EST80, EST100, EST120 e EST140. Visto isso, todos os corpos de prova apresentaram valores de absorção de água superiores ao da referência.

A Figura 28 apresenta o gráfico de efeitos principais para a absorção de água, onde é mostrado que a substituição é mais relevante que a temperatura de queima em virtude da maior inclinação e tamanho da reta. Um outro ponto a ser discutido é que o aumento da porcentagem de substituição e da temperatura de queima propicia uma diminuição da absorção de água.

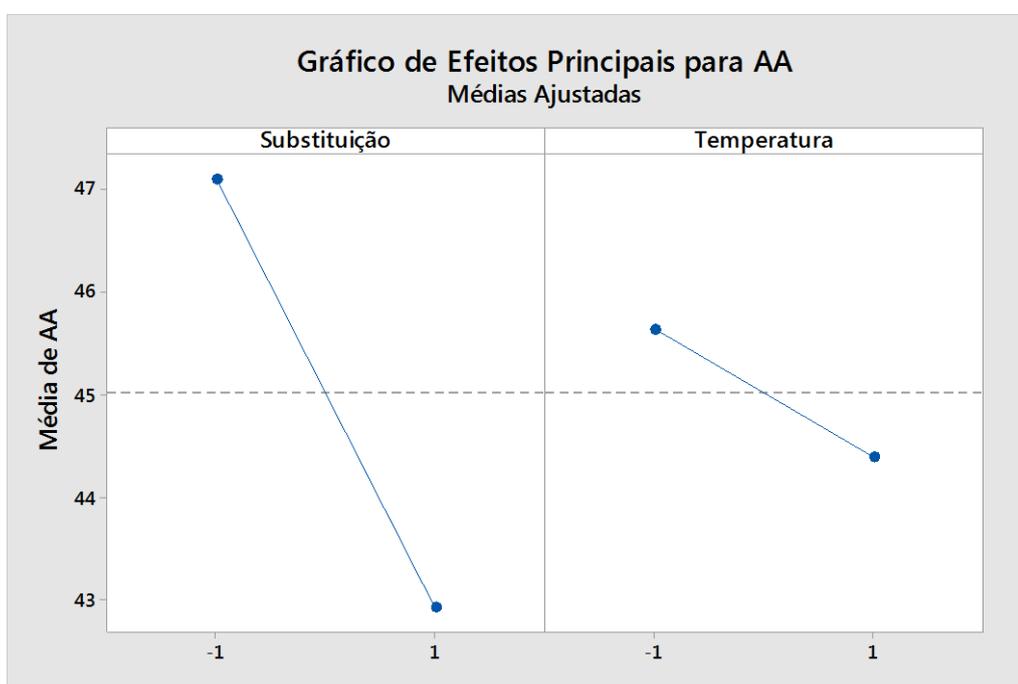


Figura 28 - Gráfico dos efeitos principais para absorção de água.

O fato da absorção de água diminuir com o a adição do pó de brita pode estar relacionado com a distribuição granulométrica da amostra. As partículas do pó de brita apresentam granulometrias inferiores a argila, com isso, favorece o empacotamento, contribuindo para a diminuição dos poros e conseqüentemente diminuindo a absorção de água.

#### 4.7 Massa Específica Aparente

A Figura 29 apresenta o gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a massa específica aparente, que mostra que tanto o fator substituição quanto à temperatura de queima foram

significativos no experimento visando uma confiança de 95%, porém a interação entre os dois fatores não foi significativa.

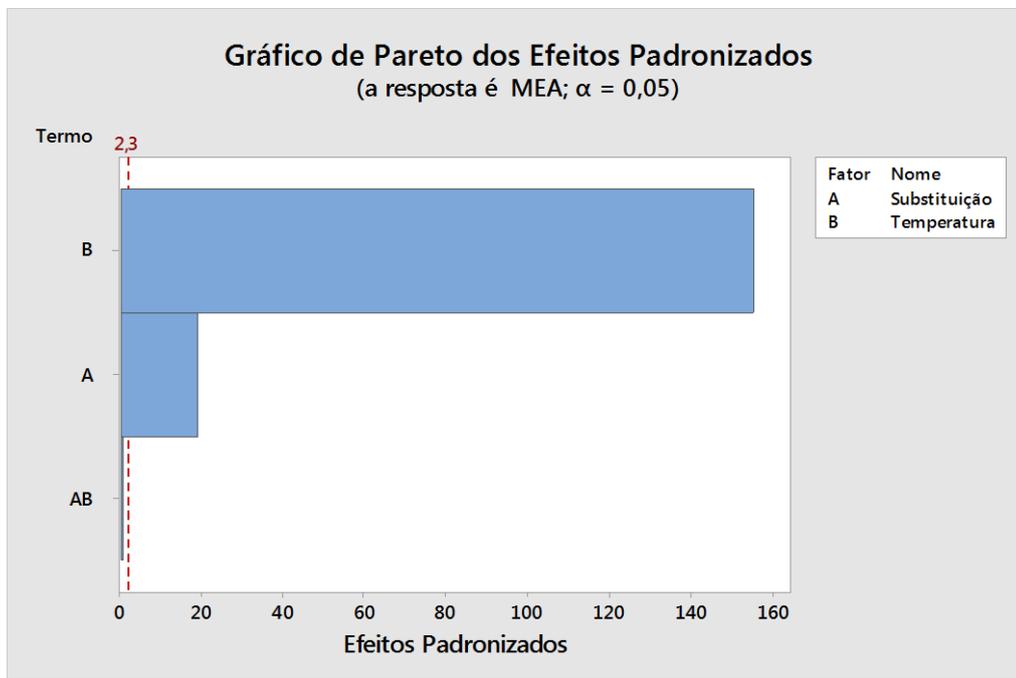
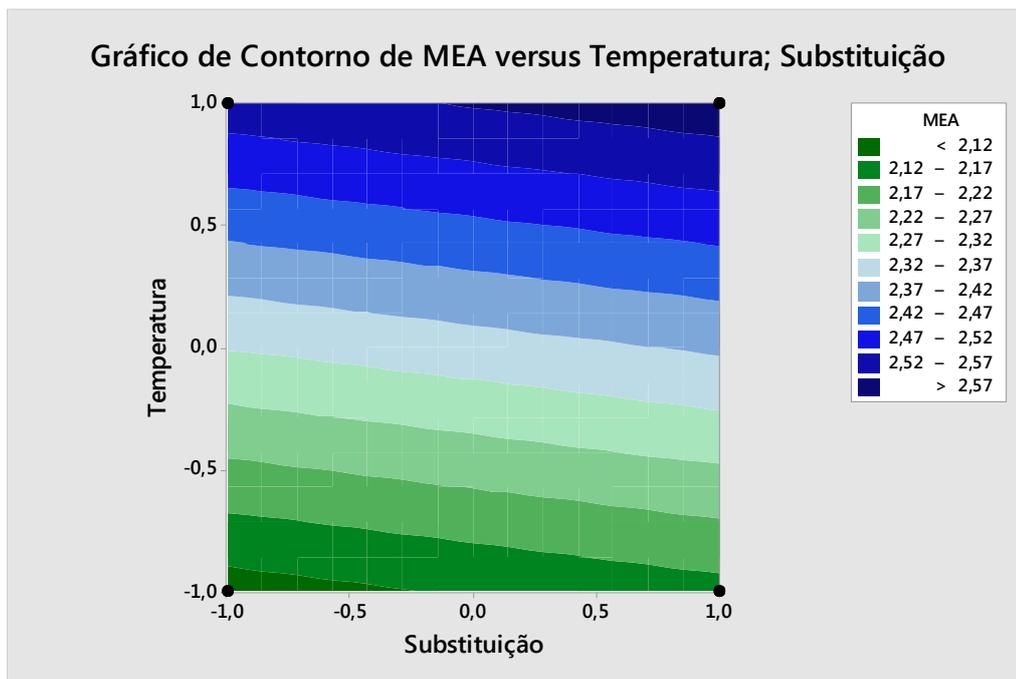


Figura 29 - Gráfico de pareto para massa específica aparente.

Na Tabela 20 são mostrados os resultados médios da massa específica aparente para todas as condições testadas. A Figura 30 representa o gráfico de contorno onde é possível notar as combinações dos fatores substituição (5% e 15%) e temperatura de queima (850°C e 1000°C) gerando as melhores e piores respostas. Regiões de cor azul apresentam os maiores valores de resposta, e as regiões de cor verde apresentam os menores valores de resposta.

Tabela 20 - Massa específica aparente (MEA).

Massa específica aparente (MEA)			
Substituição (%)	Temperatura de queima (°C)	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão
0	850	2,08	0,0069
0	1000	2,53	0,0010
5	850	2,10	0,0056
5	1000	2,55	0,0062
15	850	2,15	0,0051
15	1000	2,60	0,0036



**Figura 30 - Gráfico de contorno para massa específica aparente.**

Pode ser observado que a menor massa específica aparente ( $2,08 \text{ g/cm}^3$ ) se deu para a condição de 0% de substituição e  $850^\circ\text{C}$  de temperatura de queima e a de maior ( $2,60 \text{ g/cm}^3$ ) se deu para a condição de 15% de substituição e de  $1000^\circ\text{C}$  temperatura de queima, as demais condições tiverem valores intermediários.

A Figura 31 apresenta o gráfico de efeitos principais para a massa específica aparente, onde é mostrado que a temperatura de queima é mais relevante que a absorção em virtude da maior inclinação e tamanho da reta. Um outro ponto a ser discutido é que, ao se aumentar a porcentagem de substituição há um aumento da massa específica aparente e quando se aumenta a temperatura de queima, há um aumento da massa específica aparente.

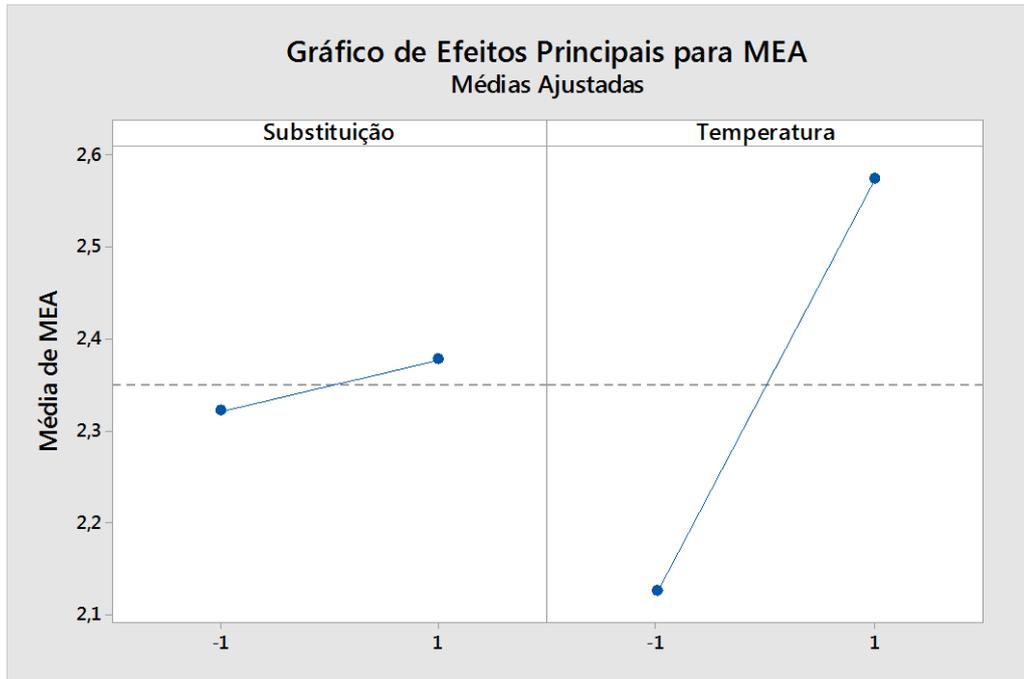
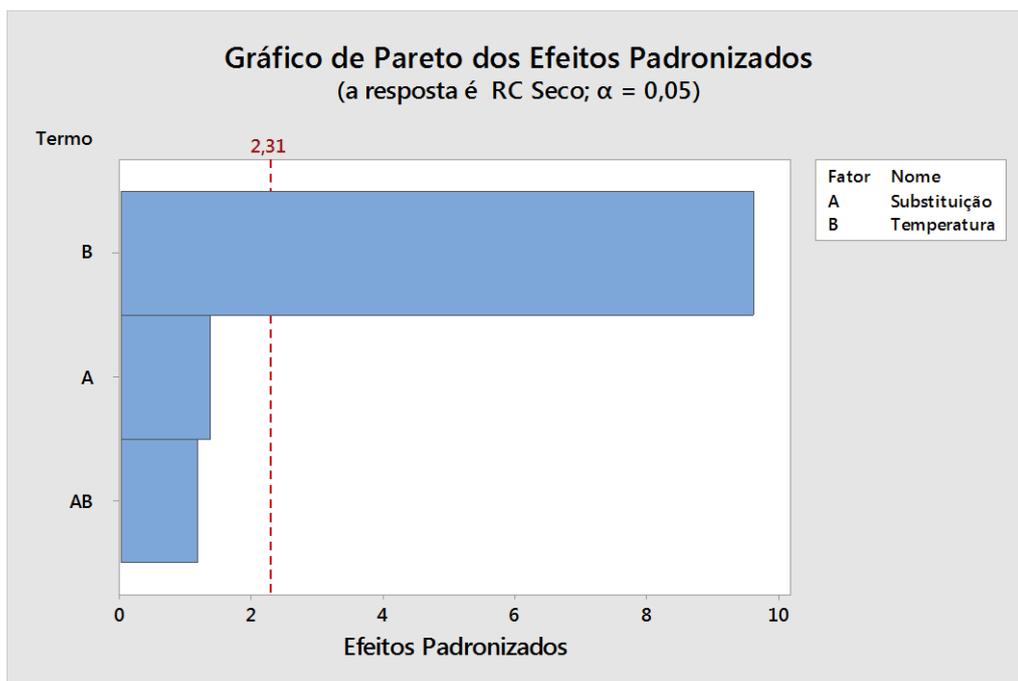


Figura 31 - Gráfico dos efeitos principais para massa específica aparente.

## 4.8 Resistência a Compressão Uniaxial

### 4.8.1 Seco

A Figura 32 apresenta o gráfico de pareto dos efeitos padronizados para resistência a compressão uniaxial de corpos de prova secos, que mostra que apenas o fator temperatura de queima foi significativo no experimento visando uma confiança de 95%, o fator principal substituição e a interação entre os dois fatores não foram significativos.

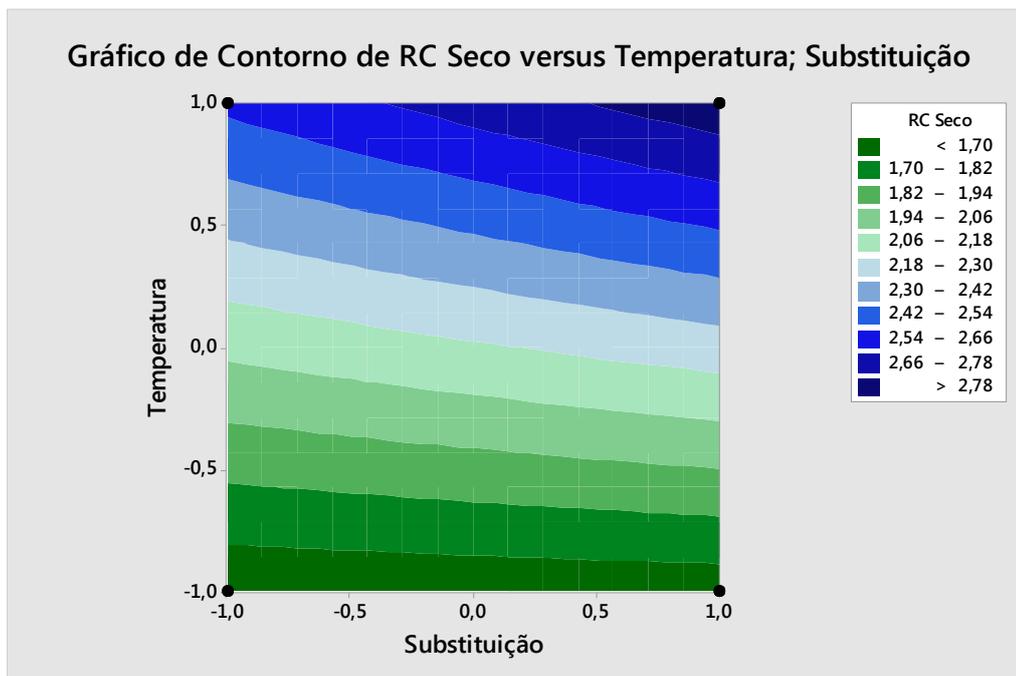


**Figura 32 - Gráfico de pareto para resistência a compressão dos corpos de prova secos.**

Na Tabela 21 são mostrados os resultados médios resistência à compressão de corpos de prova secos para todas as condições testadas. A Figura 33 representa o gráfico de contorno onde é possível notar as combinações dos fatores substituição (5% e 15%) e temperatura de queima (850°C e 1000°C) gerando as melhores e piores respostas. Regiões de cor azul apresentam os maiores valores de resistência a compressão, e as regiões de cor verde apresentam os menores valores de resistência a compressão.

**Tabela 21 - Resistência a compressão uniaxial corpos de prova secos (RC Secos).**

<b>Resistência a compressão uniaxial corpos de prova secos (RC Secos)</b>			
<b>Substituição</b>	<b>Temperatura de queima</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>
<b>(%)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>Padrão</b>
0	850	1,34	0,19
0	1000	1,90	0,28
5	850	1,61	0,11
5	1000	2,56	0,31
15	850	1,63	0,15
15	1000	2,86	0,17



**Figura 33 - Gráfico de contorno para resistência a compressão dos corpos de prova secos.**

Pode ser observado que a menor resistência a compressão de corpos de prova secos (1,34 MPa) se deu para a condição de 0% de substituição e 850°C de temperatura de queima e a de maior (2,86 MPa) se deu para a condição de 15% de substituição e de 1000°C temperatura de queima, as demais condições tiverem valores intermediários

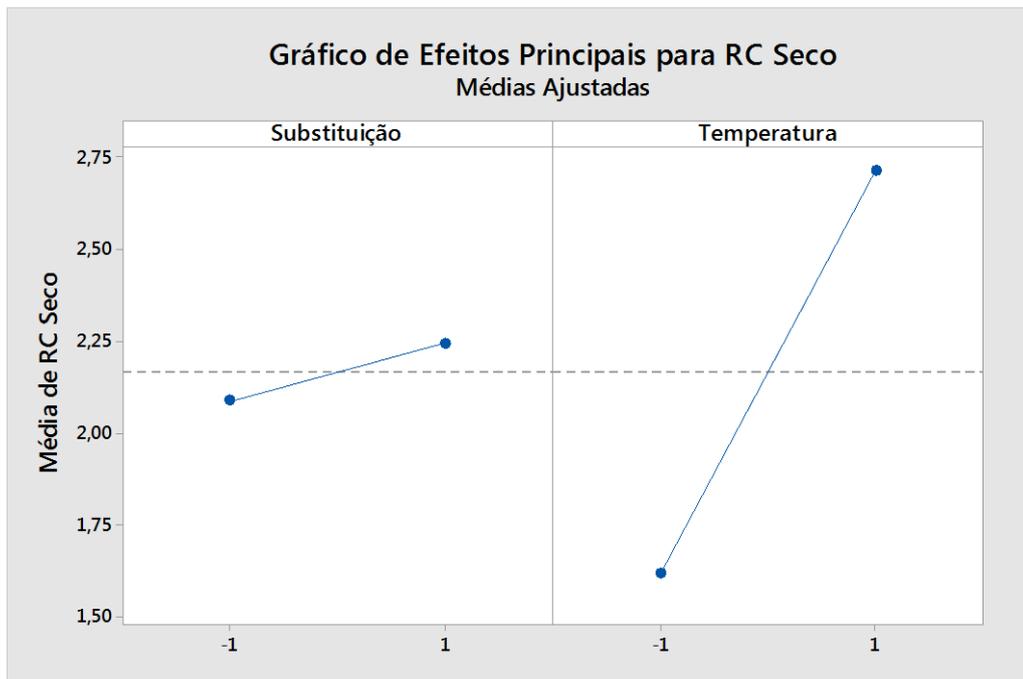
A Figura 34 apresenta o gráfico de efeitos principais para resistência a compressão uniaxial de corpos de prova secos, onde é mostrado que a temperatura de queima é mais relevante que a substituição em virtude da maior inclinação e tamanho da reta. Um outro ponto a ser discutido é que, ao se aumentar a porcentagem de substituição e a temperatura de queima, há um aumento da resistência a compressão.

De acordo com a ABNT NBR 15270-1/2017 e 15270-2/2017 que discutem os elementos cerâmicos, a resistência a compressão uniaxial deve ser:

- Tijolo maciço ou perfurado para vedação:
  - Classe VED40: Superior a 4,0MPa.
- Tijolo maciço ou perfurado estrutural:
  - Classe EST60: Superior a 6,0MPa.
  - Classe EST80: Superior a 8,0MPa.

- Classe EST100: Superior a 10,0MPa.
- Classe EST120: Superior a 12,0MPa.
- Classe EST140: Superior a 14,0MPa.

Para todas as condições testadas os valores de resistência a compressão foram inferiores aos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 15270-1/2017 e 15270-2/2017.



**Figura 34 - Gráfico dos efeitos principais para resistência a compressão dos corpos de prova secos.**

Nota-se com os resultados que com a incorporação de pó de brita houve ganhos satisfatórios na resistência à compressão. A porosidade bem como o tamanho do grão apresenta relação inversamente proporcional a resistência mecânica de um material (VAN VLACK, 1973). Neste sentido, pelo pó de brita possuir granulometria mais fina que a argila, ele irá colaborar para uma menor porosidade dos corpos de prova, conseqüentemente maior resistência. A porosidade está diretamente ligada também a força aplicada no momento de prensagem na fabricação dos corpos de prova, o valor adotado de 5KN pode não ter sido o suficiente para garantir uma redução dos poros e um melhor empacotamento.

## 4.8.2 Úmido

A Figura 35 apresenta o gráfico de pareto dos efeitos padronizados para resistência à compressão uniaxial de corpos de prova úmidos, que mostra que apenas o fator temperatura de queima foi significativo no experimento visando uma confiança de 95%, o fator principal substituição e a interação entre os dois fatores não foram significativos.

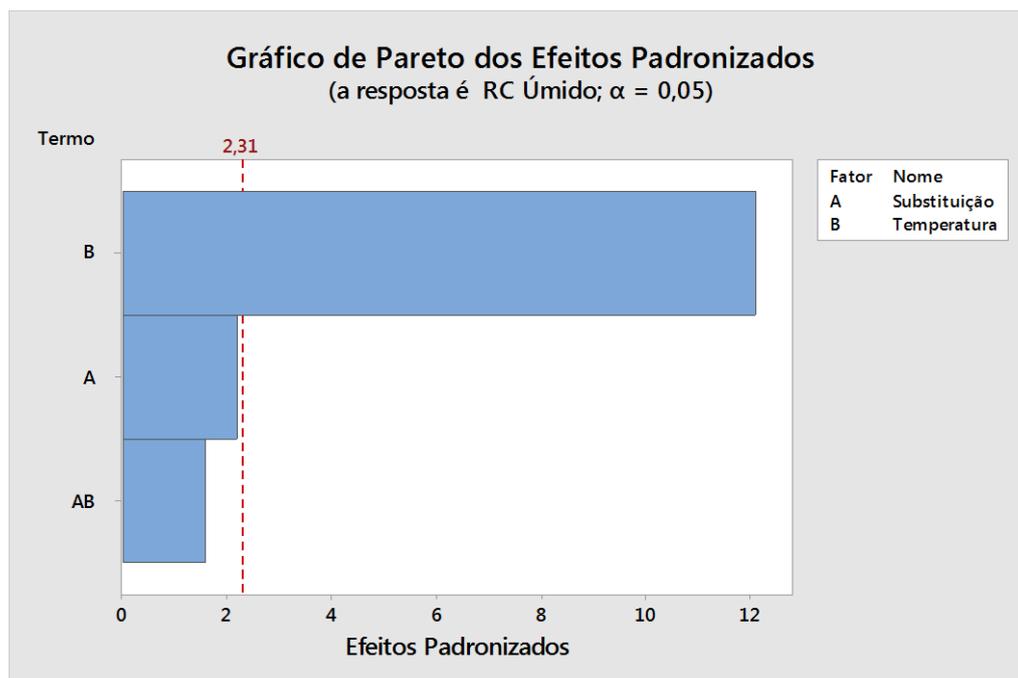


Figura 35 - Gráfico de pareto para resistência a compressão dos corpos de prova úmidos.

Na Tabela 22 são mostrados os resultados médios resistência à compressão de corpos de prova úmidos para todas as condições testadas. A Figura 36 representa o gráfico de contorno onde é possível notar as combinações dos fatores substituição (5% e 15%) e temperatura de queima (850°C e 1000°C) gerando as melhores e piores respostas. Regiões de cor azul apresentam os maiores valores de saída, e as regiões de cor verde apresentam os menores valores de saída.

Tabela 22 - Resistência a compressão uniaxial corpos de prova úmidos (RC Úmidos).

Resistência a compressão uniaxial corpos de prova úmidos (RC Úmidos)			
Substituição (%)	Temperatura de queima (°C)	Média (MPa)	Desvio Padrão
0	850	1,20	0,20
0	1000	1,81	0,15
5	850	1,54	0,14
5	1000	2,44	0,17
15	850	1,59	0,09
15	1000	2,77	0,18

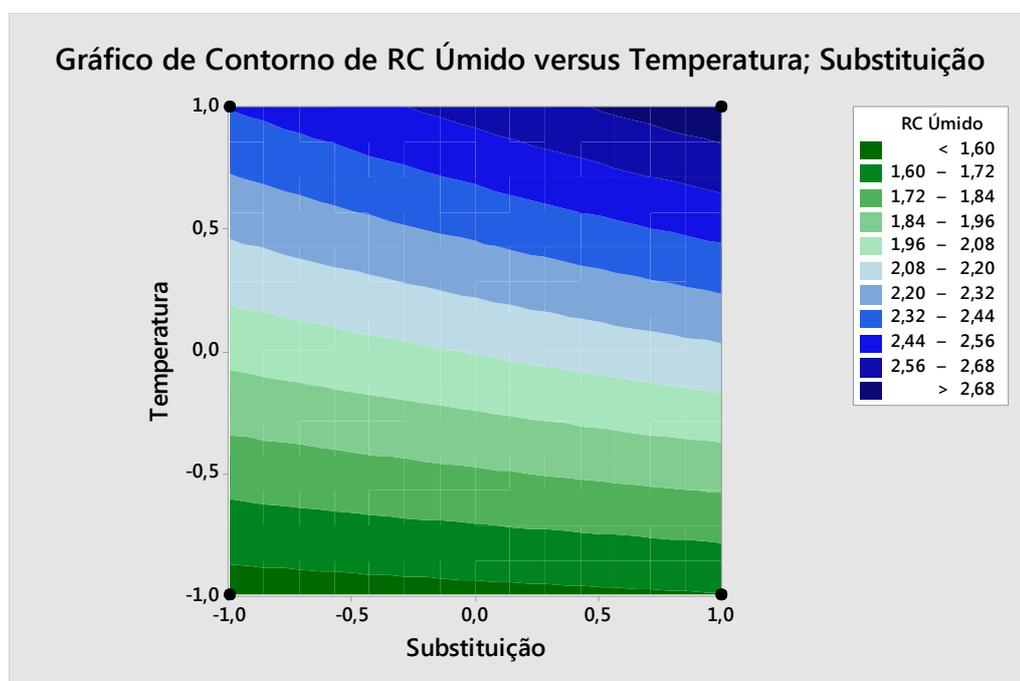


Figura 36 - Gráfico de contorno para resistência a compressão dos corpos de prova úmidos.

Pode ser observado que a menor resistência a compressão de corpos de prova úmidos (1,20 MPa) se deu para a condição de 0% de substituição e 850°C de temperatura de queima e a de maior (2,77 MPa) se deu para a condição de 15% de substituição e de 1000°C temperatura de queima, as demais condições tiverem valores intermediários.

A Figura 37 apresenta o gráfico de efeitos principais para resistência a compressão uniaxial de corpos de prova úmidos, onde é mostrado que a temperatura de queima é mais relevante que a

substituição em virtude da maior inclinação e tamanho da reta. Um outro ponto a ser discutido é que, ao se aumentar a porcentagem de substituição há um aumento da resistência a compressão e quando se aumenta a temperatura de queima, há um aumento da resistência a compressão.

Para nenhuma das condições testadas os valores de resistência a compressão foram superiores aos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 15270-1/2017 e 15270-2/2017.

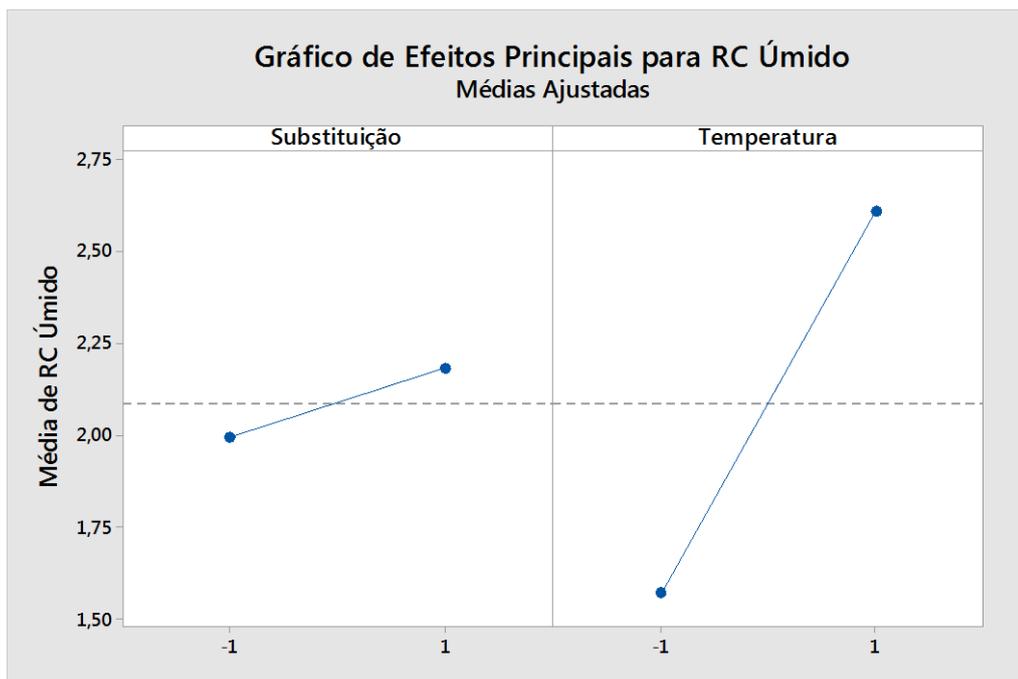


Figura 37 - Gráfico dos efeitos principais para resistência a compressão dos corpos de prova úmidos.

Nota-se com os resultados que com a incorporação de pó de brita houve ganhos satisfatórios na melhora da resistência à compressão. Fazendo um comparativo entre a resistência a compressão de corpos de prova secos e corpos de prova úmidos, pode-se notar que a presença de água interfere de forma negativa na resposta, independente do fator analisado, ela permeia através dos poros enfraquecendo o empacotamento da parte sólida.

## 5 CONCLUSÕES

- Os valores de massa específica do pó de brita e da argila foram idênticos e correspondem a  $2,64 \text{ g/cm}^3$ .
- A análise granulométrica com base na alimentação recalculada mostrou que o passante acumulado do pó de brita na peneira de  $150 \mu\text{m}$  (100#) foi de 90,15%, já o passante da argila na mesma peneira foi de 59,95%, mostrando que a granulometria é predominantemente mais fina no pó de brita do que na argila.
- A fluorescência de raios X da argila mostrou a presença de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (39,26%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (20,94%) e  $\text{SiO}_2$  (14,53%).
- O ensaio de retração linear de secagem mostrou que na condição de 0% de substituição teve-se a menor retração secagem (0,12%), e na condição de 15% de substituição teve-se a maior retração secagem (0,55%), ambos os valores de RLS foram positivos, indicando uma retração dos corpos de prova.
- O ensaio de retração linear de queima mostrou que o fator temperatura de queima é mais significativo que a substituição. Além disso, o menor valor de retração queima (0,80%) se deu para a condição de 15% de substituição e  $850^\circ\text{C}$ , e o maior valor de retração queima (2,71%) se deu para a condição de 0% de substituição e  $1000^\circ\text{C}$ . Ambos os valores de RLQ foram positivos, indicando uma retração dos corpos de prova.
- A retração linear total resultou novamente em uma maior significância da temperatura de queima se comparada a substituição. O menor valor de retração total (1,29%) se deu para a condição de 15% de substituição e  $850^\circ\text{C}$ , e o maior valor de retração total (2,93%) se deu para a condição de 5% de substituição e  $1000^\circ\text{C}$ . Ambos os valores de RLT foram positivos, indicando uma retração dos corpos de prova.
- A condição de substituição de 15% e temperatura de queima de  $850^\circ\text{C}$  resultaram na menor perda ao fogo (15,95%), já a condição de 0% de substituição e temperatura de queima de  $1000^\circ\text{C}$  resultaram na maior perda ao fogo (18,84%), indicando uma maior concentração de matéria orgânica na argila.
- A possível baixa carga aplicada na prensagem pode ter gerado uma elevada porosidade, a absorção de água foi bastante elevada para os corpos de prova em todas as condições. Na condição de 15% de substituição e  $1000^\circ\text{C}$  obteve-se a menor absorção de água (42,32%), e na condição de 0% de substituição e  $1000^\circ\text{C}$  obteve-se a maior absorção de

água (49,27%). Nesta variável, tanto a porcentagem de substituição, quanto a temperatura de queima foram relevantes.

- A menor massa específica aparente ( $2,08 \text{ g/cm}^3$ ) se deu para a condição de 0% de substituição e  $850^\circ\text{C}$ , já a maior massa específica aparente ( $2,60 \text{ g/cm}^3$ ) se deu para a condição de 15% de substituição e  $1000^\circ\text{C}$ . A porcentagem de substituição e a temperatura de queima foram significativas para os resultados obtidos.
- Para corpos de prova secos a resistência a compressão uniaxial foi maior do que para os corpos de prova úmidos. A pior condição para ambos foi de 0% de substituição e  $850^\circ\text{C}$  com valores de 1,34 MPa para os corpos de prova secos e 1,20 MPa para os corpos de prova úmidos, já a melhor condição para ambos foi de 15% de substituição e  $1000^\circ\text{C}$  com valores de 2,86 MPa para os cerâmicos secos e 2,77 MPa para os cerâmicos úmidos.
- Algumas sugestões para trabalhos futuros seriam aumentar a carga de prensagem, reestruturar ou fabricar um novo molde para produção dos materiais cerâmicos, reduzir a umidade utilizada na mistura para confecção dos corpos de prova e por fim, buscar uma nova argila com menor quantidade de matéria orgânica.

## REFERÊNCIAS

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007. **Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-1. **Componentes Cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-1. **Componentes Cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 1: Métodos de ensaios.** Rio de Janeiro, 2017.

ACCHAR, W. **Materiais cerâmicos: caracterização e aplicações.** Natal: Editora da UFRN, 2006.

ALMEIDA, I. T. 1999. **A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto.** (Dissertação, Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas. São Paulo. 194 p.

BARBOSA, P. C. 2017. **Aproveitamento de rejeito da concentração de minério de ferro na produção de cerâmica vermelha.** (Trabalho de conclusão de curso, Graduação, Engenharia de Minas), UFOP, Ouro Preto. 36 p.

BOCH, P.; NIÈPCE, J. C. **Ceramic Materials, Processes, Properties and Applications.** (ISTE, 2007).

BOGAS, J. A. **Materiais de Construção. Materiais Cerâmicos: Estrutura e comportamento dos materiais.** 2013. 43p.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CASTRO, A. C. M. 2016. **Avaliação da reutilização do resíduo de louça sanitária em compósitos cerâmicos**. (Trabalho de conclusão de curso, Graduação, Engenharia de Minas), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá. 94 p.

CASTRO, C. G. 2011. **Estudo do aproveitamento de rejeitos do beneficiamento do manganês pela indústria cerâmica**. (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Materiais), UFOP, Ouro Preto. 109 p.

CAVALCANTE W. F. V. 2005. **Aproveitamento de resíduos cerâmicos da indústria de louça sanitária para produção de massas para revestimento cerâmico**. (Dissertação, Mestrado, Materiais e Fabricação), Centro de tecnologia e geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 63 p.

COTA, T. G. 2017. **Incorporação de resíduos da fabricação de ferro-ligas de manganês e de finos de esteatito na produção de cerâmica vermelha** (Dissertação, Mestrado, Engenharia Mineral), UFOP, Ouro Preto. 77 p.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. PNUD – Contrato 2002/001604. 2002. 42p.

FERREIRA, M. M. 2010. **Caracterização de argilas caulínicas do quadrilátero ferrífero visando seu potencial de aplicação na indústria de cerâmica**. (Dissertação, Mestrado, Evolução Crustal e Recursos naturais), UFOP, Ouro Preto. 119 p.

FIGUEIREDO, M. M. 2007. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – CONGONHAS/MG**. (Dissertação, Mestrado profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais. 127p.

GONÇALVES, D. R. R. 2015. **Análise da viabilidade econômica via simulação de monte calo para utilização da escória de aciaria como agregado na fabricação de pré-fabricados para a construção civil –ECOBLOCOS.** (Dissertação, Mestrado, Engenharia Civil), UFOP, Ouro Preto. 90 p.

GUZZO, P.L. **Rochas e Minerais Industriais. Quartzo.** Cap31. CETEM/2008. 2ed. 41p.

IBAMA. 2006. **O estado dos solos. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.** Disponível em: <http://www2.ibama.gov.br/~geobr/Livro/cap2/subsolos.pdf>.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** Brasília, 2016.

LOZANO, F. A. E. 2006. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica.** (Dissertação, Mestrado, Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, 128p.

LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C.; SCORZELLI, R. B. **Rochas e Minerais Industriais. Argila – Caulim.** Cap12. CETEM/2008. 2ed. 40p.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.; COELHO, J. M. **Rochas e Minerais Industriais. Feldspato.** Cap21. CETEM/2008. 2ed. 20p.

MACHADO, M. S. M. M. 2018. **Blocos para construção civil feitos com rejeitos depositados na barragem de Candonga.** (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Materiais), UFOP, Ouro Preto. 89 p.

MARTIN T.E.; DAVIES M.P.; RICE S.; HIGGS T. and LINGHALL P.C. **O futuro da mineração - MMSD - Minerals and Sustainable Development - Stewardship of Tailing Facilities - B.C Canadá, 2002.**

MELCHIADES, F.G., ROVERI, C.D., SOTÉRIO, J., SILVA, L.L., BOSCHI, A.O., Controle Dimensional e do Formato de Revestimentos Cerâmicos. Parte I: Dimensões. **Cerâmica Industrial**.v.6.p.27-33. 2001.

MELLO, F. M. **Segurança de barragens**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 14., 1981, Recife, PE. Anais... Recife, PE: CBGB, 1981. p 343. v. 4.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. **As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos**. Cerâmica Industrial, 6 (2) Março/Abril, 2001. 12p.

MOTTA, J. F. M.; LUZ, A. B.; BALTAR, C. A. M.; BEZERRA, M. S.; JUNIOR, M. C.; COLEHO, J. M. **Rochas e Minerais Industriais. Argila Plástica para Cerâmica Branca**. Cap34.CETEM/2008. 2ed. 21p

OLIVEIRA, A. P. N. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, 5 (6), 2000.

PINHEIRO, I. S. 2008. **Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozolânica**. (Dissertação, Mestrado, Construção Civil, UFMG, Belo Horizonte. 154 p.

PORTELLA, M. O. **Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente**. Revista Brasileira de Políticas Públicas. Brasília, v. 5, nº 2, 2015. 263-276p.

RAVAGLIOLI, A.; FIORI, C.; FABBRI, B. **Materie prime ceramiche, Argille, materiali non argillosi e sottoprodotti** Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.P.A., 1989.

RESENDE, M. C. 2015. **Caracterização do resíduo sólido da lagoa de rejeito de uma indústria de cerâmicas e aplicação como pozolana**. (Trabalho de conclusão de curso, Graduação, Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá. 58 p.

ROBERTSON, A. MacG. **The Influence Depositional Methods On Engineering Properties Tailing Deposits** - Vancouver – Canadá, 1987.

SANCHEZ, L. E. **Manejo de resíduos em minera.** In: CURSO INTERNACIONAL DE ASPECTOS GEOLÓGICOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL, 2., 2000, Campinas. Notas de clases Montevideo. Montevideo: UNESCO, 2002. P 249-250.

SANTA HELENA MINERAÇÃO E EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA. **Licença de Operação Corretiva – LOC.** Parecer único nº 0176984/2017 (SIAM).

**SANTA HELENA MINERAÇÃO.** Disponível em: <<http://shmineracao.com.br>> Acesso em: 10 de maio de 2019.

SILVA, A. B. 2006. **Reaproveitamento da lama de aciaria com baixo teor de ferro metálico na fabricação de cerâmica vermelha.** (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Materiais), UFOP, Ouro Preto. 98 p.

SILVA, F. C. 2018. **Estudo de aproveitamento de areia industrial em materiais cimentícios.** (Trabalho de conclusão de curso, Graduação, Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá. 58 p.

SILVA, F. L. 2014. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de Pavers e cerâmica.** (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Materiais), UFOP, Ouro Preto. 127 p.

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração.** Revista Espaço da Sophia. nº 8, 2007. 13p.

SIQUEIRA, L. M. 2018. **Avaliação do efeito do aquecimento e choque térmico na fragmentação de partículas minerais.** (Trabalho de conclusão de curso, Graduação, Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá. 65 p.

SOUZA, H. N. 2016. **Adsorção de óleo diesel em resíduo de esteatito e sua incorporação em cerâmica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 69p.

SOUZA, H. N.; REIS, E. L.; LIMA, R. M. F.; CIPRIANO, R. A. S. Using soapstone waste with diesel oil adsorbed as raw material for red ceramic products. **Ceramics International**. v.42, n.14, p.16205-16211. 2016.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2 edição, São Paulo: Edgar Blucher, 1989.

TEIXEIRA, M. P. 2017. **Estudo da viabilidade da utilização de rejeitos de pedra-sabão na produção de materiais cerâmicos**. (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Materiais), UFOP, Ouro Preto. 104 p.

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M.M.C. Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**. v.29, n.2, p.338-350. 2006.

TORRES, H. S. S. 2015. **Aproveitamento do resíduo de esteatito para uso em cerâmicas**. (Tese, Doutorado, Engenharia de Materiais), UFOP, Ouro Preto. 128 p.

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. Tradução Cid Silveira e Shiroyuki Oniki. São Paulo, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1973.

WORRAL, W. E. **Raw Materials**. Institute of Ceramics Textbook Series. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1968.