

Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

Tecnologia em Materiais

Rodrigo Monduzzi Pazin

Incorporação de resíduos na indústria cerâmica

São Paulo

Dezembro - 2013

Rodrigo Monduzzi Pazin

Incorporação de resíduos na indústria cerâmica

**Trabalho de Conclusão de curso
apresentado a Faculdade de Tecnologia do
Estado de São Paulo, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do
título de Tecnólogo em materiais.**

São Paulo

Dezembro – 2013

Rodrigo Monduzzi Pazin

Incorporação de resíduos na indústria cerâmica

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para a obtenção do título de TECNÓLOGO EM MATERIAIS e aprovado pela banca examinadora.

São Paulo, 17 de dezembro de 2013

Prof. Francisco Valenzuela
Doutor pela Universidade de São Paulo.
Orientador.

Prof. Davinson Mariano
Doutor pela Universidade de São Paulo
Co-Orientador

Prof. Maria Regina Ricotta
Coordenadora do Curso de
Materiais

BANCA EXAMINADORA

Prof. Francisco Valenzuela (USP)
Doutor em Engenharia Química/USP

Prof. Davinson Mariano (FATEC-SP)
Doutor em Engenharia Elétrica/USP

Prof. Newton Haruo Saito (FATEC-SP)
Mestre em Tecnologia Nuclear/IPEN

Resumo

Este trabalho descreve uma pesquisa desenvolvida sobre a fabricação de materiais cerâmicos, através da utilização de chamote adicionado à argila. Chamote pode ser definido como um subproduto proveniente de rejeitos de material cerâmico. Nas indústrias cerâmicas vermelha é facilmente visível o descarte de peças com defeitos, em lugares impróprios, ao longo de vias, no pátio da própria indústria ou até em áreas verdes. Na tentativa de reaproveitar este material fez-se um estudo experimental da utilização da incorporação do chamote em massas cerâmicas. Para a transformação dos refugos de bloco em chamote, utilizou-se um triturador, tipo moinho de bolas e o peneirou em uma peneira vibratória de malha ABNT nº200. Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização, para a argila e o chamote, ambos provenientes de uma indústria cerâmica, localizada em Vitória da Conquista-Ba.

Os corpos de prova foram conformados em formas de esferas, nas seguintes proporções de chamote: 0%, 1%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% em peso. Os corpos cerâmicos foram submetidos a temperatura de queima de 905°C para a investigação das suas propriedades. Os ensaios realizados foram, porosidade aparente, absorção de água, massa específica aparente e resistência a compressão, DRX e DSC. A adição de 3% a 10%, apresentou melhores resultados em quase todas as propriedades, inclusive, elevados valores para resistência mecânica.

Por fim, a partir deste estudo, verificou-se que a incorporação de chamote em massa cerâmicas é possível, preferivelmente, para o teor de 10% de adição, garantindo a boa qualidade dos produtos e contribui para reduzir a poluição ambiental.

Abstract

This study describes a survey carried out on the manufacturing of ceramic materials using clay and brick powder. Brick powder can be defined as a waste resulted from a ceramic material. In red ceramic industries is easily visible discarding parts with defects in inappropriate places, along roads, in the courtyard of the industry itself or even green areas. In an attempt to reclaim this material was made an experimental study of the use of the incorporation of brick powder on ceramic. To transform the waste in block brick powder, we used a grinder type ball mill and sieved on a vibrating sieve mesh # 200 ABNT. Initially, characterization tests, to clay and brick powder, coming from a ceramic industry in Vitória da Conquista – Ba.

The specimens were formed into ball shapes , in the following proportions of brick powder : 0 % , 1 % , 5 % , 10 % , 20 % , 30 % , 40 % , 50 % , 60 % , 70 % , 80 % and 90% by weight. The ceramic samples were subjected to firing temperature of 905 ° C to investigate its properties. The tests carried out were, apparent porosity, water absorption and apparent specific gravity compressive strength, XRD and DSC. The addition of 3% to 10 % showed better results in almost all properties, including high values of mechanical strength.

Finally, from this study, it was found that the incorporation of brick powder in ceramic mass is possible, preferably, to the level between 3% and 10 % addition by ensuring good quality of the product and contributes to reduce environmental pollution

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10
1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Argila.....	16
2.2 Estrutura da Caulinita.....	18
2.3 Estrutura da Esmeclita.....	19
2.4 Estrutura da illita.....	20
3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CERÂMICA VERMELHA.....	22
3.1 Beneficiamento.....	24
3.2 Conformação.....	25
3.3 tratamento térmico.....	26
3.4 Sinterização.....	29
4 CARACTERIZAÇÃO.....	32
4.1 Difração de Raios X.....	32
4.2 Calorimetria Diferencial de Varredura.....	34
4.3 Granulometria por peneiramento.....	36

4.4 Ensaio de Compressão.....	37
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
5.1 Matérias-Primas	39
5.2 Preparação das amostras.....	39
5.3 Secagem.....	39
5.4 Queima.....	40
5.5 Caracterização da Matéria-prima.....	41
5.6 Absorção de água, Densidade Aparente e Porosidade Aparente.....	44
5.7 Ensaio de Compressão.....	45
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
6.1 Caracterização por DR X.....	51
6.2 Caracterização por DSC.....	52
6.3 Caracterização Mecânica.....	56
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática da estrutura cristalina da caulinita.....	19
Figura 2: Representação esquemática da estrutura Esmectita.....	20
Figura 3: Estrutura cristalina da illita.....	21
Figura 4: Estrutura cristalina dos argilominerais.....	21
Figura 5: Fluxograma do processo de fabricação da cerâmica vermelha.....	23
Figura 6: Extrusora/Maromba da Indústria cerâmica INCARGEL.....	26
Figura 7: Blocos cerâmicos dentro de uma estufa de secagem.....	27
Figura 8: Forno Intermitente usado na indústria cerâmica CERAMIFOR.....	28
Figura 9: Forno Contínuo na indústria cerâmica CERAMIFOR.....	29
Figura 10: Representação esquemática dos três estágios de sinterização onde (a) são as partículas soltas de pó, (b) o estágio inicial, (c) o estágio intermediário e (d) o estágio final.....	30
Figura 11: Produção de Raios X a nível atômico.....	32
Figura 12: Esquema da difração de Bragg.....	33
Figura 13: Difratoograma de uma argila.....	34
Figura 14: Curva típica de uma análise de calorimetria diferencial de varredura.....	35
Figura 15: Análise de granulometria, difração a laser, peneiramento e sedimentação .	36
Figura 16: Ensaio de compressão em material frágil e dúctil.....	37
Figura 17: Resistência à compressão em função do teor de resíduos.....	38
Figura 18: Ensaio de compressão em uma esfera cerâmica.....	38

Figura 19: Estufa de secagem.....	40
Figura 20: Forno tipo mufla.....	41
Figura 21: Difratograma Rigaku.....	42
Figura 22: Vista de dentro do difratômetro.....	42
Figura 23: Equipamento utilizado para fazer o ensaio de DSC.....	43
Figura 24: Gráfico resultante da absorção de água e porosidade aparente.....	45
Figura 25: Densidade Aparente das amostras queimadas.....	46
Figura 26. Gráfico resultante da absorção de água e porosidade aparente.....	48
Figura 27: Densidade Aparente das amostras secas.....	48
Figura 28: Balança Hidrostática.....	49
Figura 29: Máquina universal de ensaios.....	50
Figura 30: Difratograma das amostras.....	51
Figura 31: DSC da argila pura.....	52
Figura 32: DSC das amostras queimadas com teores variados de chamote.....	53
Figura 33: Gráfico referente a perda de massa das amostras secas.....	54
Figura 34: Gráfico referente a perda de massa das amostras queimadas.....	55
Figura 35: Gráfico resultante do ensaio de compressão das amostras secas.....	57
Figura 36: Gráfico resultante do ensaio de compressão das amostras queimadas.....	58
Figura 37: Representação do empacotamento das partículas.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Amostras analisadas por DR X.....	44
Tabela 2. Média dos resultados das amostras queimadas.....	47
Tabela 3. Média dos resultados das amostras secas.....	49
Tabela 4. Média da compressão das amostras secas.....	57
Tabela 5. Média da compressão das amostras queimadas.....	58

1) INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos como matéria-prima secundária, em diferentes processos industriais, tem sido evidenciada pela necessidade de se obter alternativas que permitam a destinação e/ou aplicação segura desses resíduos.

A incorporação de resíduos na área da cerâmica vermelha deve levar em consideração alguns aspectos importantes, que dizem respeito à compatibilidade entre o resíduo e o material cerâmico, ou seja, o uso de um resíduo não deve comprometer o produto final, em relação às propriedades estabelecidas para a qualidade do produto.

A fabricação de tijolos utilizando argila como matéria prima é uma atividade milenar já dominada na antiga Grécia, que chega à era moderna eleita como um produto de alta qualidade e beleza, hoje produzido em alguns países com tecnologia de ponta.

É chamada indústria de cerâmica vermelha, aquela que fabrica blocos, tijolos, telhas, azulejos, ladrilhos, entre outros. As principais matérias primas são constituídas por argilas plásticas, cujos componentes principais são os argilominerais, matéria-orgânica, óxidos e hidróxidos de alumínio ou de ferro. Retirada normalmente das margens de rios, lagos, montanhas. As suas temperaturas de queima variam entre 850°C a 1200°C, dependendo do tipo de argila e do forno utilizado (SANTOS, 1989).

Podem-se destacar como principais produtores nacionais, os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina e Bahia (ANICER, 2007).

O tijolo de argila se consolidou ao passar dos tempos através de suas características técnicas, além de ser um ótimo isolante térmico e acústico. Devido a sua excelente aceitação no mercado, este produto vem sendo continuamente aprimorado. Com o auxílio da tecnologia utilizada na produção o processo industrial está sendo

parcialmente automatizado, aperfeiçoando as características naturais, dando-lhe maior resistência, beleza, menor peso, durabilidade e segurança.

No processo industrial, de qualquer cerâmica ocorrem quebras de peças já queimadas por falhas no manuseio ou por defeitos gerados durante a fabricação, também se faz necessárias seleções de peças que não devem chegar aos clientes devido a alguma não conformidade. Com o intuito de reaproveitar esses materiais perdidos, fez-se um estudo experimental do efeito da adição do resíduo do bloco cerâmico queimado, denominado por Chamote, em massas cerâmicas para a fabricação de novos tijolos. As matérias-primas que foram trabalhadas neste trabalho (argila e chamote) são providas de uma Indústria Cerâmica localizada em Vitória da Conquista-Ba

Este tipo de adição proporciona em reflexos positivos sobre o processo produtivo, em especial a resistência à compressão, devido à melhoria no fator de empacotamento e a morfologia das partículas. Porém a incorporação de uma alta quantidade gera fatores muito negativos, por isso, neste trabalho foram estudados a adição de chamote nas seguintes proporções: 0%, 1%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%.

A Resolução CONAMA 307/2002 classifica os resíduos cerâmicos como:

Classe A - resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, de reparos de edificações-componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto, de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios).

Classificação dos Resíduos Industriais de acordo com a sua periculosidade, Segundo a NBR 10.004/04 da ABNT.

Para os efeitos desta Norma, os resíduos são classificados em:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;
 - resíduos classe II A – Não inertes.
 - resíduos classe II B – Inertes

As cerâmicas se enquadram na classe II B:

CLASSE II B - Resíduos inertes: são aqueles que submetidos a um contato estático ou dinâmico com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tem nenhum de seus componentes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

A localização geográfica das fábricas é determinada primeiramente devido à localização da jazida (em razão da grande quantidade de matéria-prima processada) e, em segundo lugar, em função da proximidade dos centros consumidores (tendo em vista os custos de transporte). A renda do segmento tende a permanecer nos locais de produção, com impacto econômico e social significativo. Os principais produtos são tijolos, blocos de vedação e estruturais, telhas naturais e coloridas, elementos de enchimento, tubos, pisos, entre outros materiais que compõem acima de 90% das alvenarias e coberturas construídas no País. Dependendo da região do país, as argilas recebem determinadas designações. (ABC, 2002):

- Argila de várzea – Pode ser encontrada às margens de rios ou banhados. Apresenta textura terrosa, esfarelada e em torrões, granulometria fina e quando úmida elevada plasticidade, sendo empregada por isso como ligante e/ou plastificante da massa. A coloração varia do cinza ao preto e, após queima, do rosa ao vermelho. Apresenta com maior frequência impurezas como quartzo, mica e matéria orgânica, esta última quando em teores elevados, é responsável por perdas e contração do produto durante a queima.

- Argila de morro – Encontrada longe de banhados e rios, apresenta textura terrosa, granular ou em blocos, desagregando-se geralmente em pequenos fragmentos. Possui baixa plasticidade e cor variável entre vermelha e amarelada após queima, contendo quartzo e às vezes feldspato como impurezas, além de baixo teor de matéria orgânica. Nessas argilas é muito comum a presença de seixos e cascalhos, além da presença eventual de carbonatos.

- Argila tipo taguá – Pode ser encontrada em camadas bastante profundas sob rios ou encostas de morros. Caracteriza-se por camadas delgadas e muito duras de materiais argilosos de cores variadas, com predominância do vermelho e cinza. Sua extração exige máquinas potentes e às vezes detonações por dinamite, devendo o material ser seco e moído antes de entrar na linha de processamento.

De acordo com dados da ANICER (2011) estima-se que existem aproximadamente 6.903 empresas de cerâmica vermelha no Brasil, somando 293 mil empregos diretos e perto de 900 mil empregos indiretos. Movimentam cerca de 123.600.000 toneladas por ano de matéria prima, com grandes reflexos nas vias de transporte e no meio ambiente nas lavras de argila.

O setor de cerâmica vermelha utiliza como matéria-prima basicamente a argila, a massa resultante pode ser denominada simples ou natural, sendo composta, além da argila, por matéria orgânica, impurezas e minerais de ferro, que permitem sua sinterização a baixas temperaturas (entre 800 e 1.100°C).

Durante o processo de formulação da massa que será utilizada para produção de peças de cerâmica vermelha, busca-se plasticidade para propiciar trabalhabilidade e fusibilidade na queima objetivando proporcionar resistência mecânica nos produtos. A preparação da massa é feita, geralmente, por meio da mistura de uma argila gorda (de alta plasticidade, granulometria fina e composição essencialmente de argilominerais) com uma argila magra (rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como um material redutor de plasticidade).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da incorporação de chamote obtido através de rejeitos de tijolos queimados, em massas cerâmicas dosadas em diferentes proporções, a fim de obter uma estimativa da porcentagem ideal a ser utilizada.

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1) ARGILA

A Norma P-TS-4 da ABNT (1961) definia argila como “uma rocha, geralmente plástica, constituída essencialmente por silicatos de alumínio hidratados, denominados minerais de argila ou argilominerais, que pode conter sílica livre e outras impurezas”.

Atualmente a ABC, define como: Um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente de argilominerais, podendo conter outros minerais que não são argilominerais (quartzo, mica, pirita, hematita, etc.), matéria orgânica e outras impurezas. Os argilominerais são os minerais característicos das argilas; Contendo em certos tipos outros elementos como ferro, potássio, lítio e outros. Graças aos argilominerais, as argilas na presença de água desenvolvem uma série de propriedades tais como: plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação. Os principais grupos de argilominerais são caulinita, illita ou Esmeclita.

O que diferencia estes argilominerais são basicamente o tipo de estrutura e as substituições que podem ocorrer, dentro da estrutura, do alumínio por magnésio ou ferro, e do silício por alumínio ou ferro, principalmente, e consequente neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions. Como exemplo, argilas constituídas essencialmente pelo argilomineral caulinita são as mais refratárias, pois são constituídas essencialmente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), enquanto que os outros, devido à presença de potássio, ferro e outros elementos, têm a refratariedade sensivelmente reduzida. A presença de outros minerais, muitas vezes considerados como impurezas, pode afetar substancialmente as características de uma argila para uma dada aplicação; daí a razão, para muitas aplicações, de se eliminar por processos físicos os minerais indesejáveis. Processo este chamado de beneficiamento (SANTOS 1989; VIEIRA et al., 2003).

Conhecer uma argila e seus constituintes é de fundamental importância para o processo de fabricação, pois a presença e a quantidade de cada um dos componentes

é o que define as propriedades de cada argila. Dentre os principais constituintes de uma argila podemos destacar os argilominerais.

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), os argilominerais são filossilicatos hidratados que se apresentam em forma de cristais muito pequenos ($<4\text{-}8\mu\text{m}$) em forma de lâminas hexagonais ou fibras. A estrutura cristalina desses minerais, com poucas exceções, consiste de um arranjo de folhas, formando as camadas, o que justifica a denominação de silicatos em folhas ou filossilicatos (BARBA et al, 1997). As camadas individuais são compostas de duas, três ou quatro folhas compostas por estruturas tetraédricas de SiO_2 e estruturas octaédricas de brucita $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ ou gibsita $[\text{Al}(\text{OH})_3]$. Formam-se diferentes argilominerais dependendo do tipo de combinação destas estruturas. As argilas são, geralmente, agrupadas para fins de classificação, segundo os argilominerais que predominam em sua constituição. Sendo eles:

- Grupo da caulinita, caracterizado por apresentar predominância de argilominerais cuja estrutura cristalina é constituída de “camadas” constituídas pela alternância de uma “folha” tetraédrica de átomos de silício e oxigênio e de uma “folha” octaédrica de átomos de alumínio e hidroxilas, por isso designadas camadas 1:1, é o argilomineral mais comumente encontrado nas argilas. A estrutura básica é $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$. Argilas constituídas essencialmente pelo argilomineral caulinita são as mais refratárias.

- Grupo da illita, que apresentam estrutura cristalina em que as camadas são constituídas por três folhas, sendo uma central dioctaédrica ou trioctaédrica de alumínio e hidroxilas ligada a duas folhas tetraédricas de silício e oxigênio, tendo entre as camadas cátions potássio adsorvidos.

- Grupo da Esmectita, que como o grupo da illita, reúne argilominerais com camadas 2:1, constituídas de 3 folhas, diferenciando-se daquele principalmente pelos tipos e hidratação dos cátions adsorvidos entre camadas, é caracterizada por partículas extremamente finas, sua fórmula geral é dada por $(\text{OH})_2(\text{Al, Mg, Fe})_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$. Sua principal característica é a capacidade para absorver moléculas de água entre as

camadas, devido a isto, argilas ricas neste argilomineral apresentam uma forte tendência a causar trincas de secagem, além de apresentar elevada plasticidade.

2.2) Estrutura da Caulinita

As caulinitas apresentam, em sua estrutura, igual número de folhas tetraédricas (silício-oxigênio) e octaédricas (alumínio-hidroxilas), comumente designadas “folha de sílica” e “folha de gibbsita”, respectivamente. Diz-se, por isso, que a caulinita é um argilomineral com camadas 1:1 (de 2 folhas) (COLES & YONG, 2002).

Na folha de sílica, cada átomo de silício está ligado a quatro átomos de oxigênio, dos quais, 3 são repartidos com os tetraedros vizinhos, resultando na configuração hexagonal característica dessa folha. Um átomo de oxigênio em cada tetraedro continua apresentando uma valência insatisfeita. Na folha de gibbsita, cada átomo de alumínio é circundado por seis hidroxilas (OH^-), formando os octaedros característicos dessa folha. Na realidade, o tipo de ligação é tal que cada OH^- recebe meia valência de cada 2 Al^{3+} adjacentes, de modo que as cargas dessa folha são equilibradas. A disposição dos átomos e seu espaçamento resultam numa configuração hexagonal semelhante à da folha de sílica, o que permite a justaposição das mesmas formando uma camada 1:1, conforme mostra a figura 1, As ligações entre elas decorrem da eliminação de dois terços das hidroxilas da interface da folha de gibbsita e de sua substituição pelas valências insatisfeitas da folha de sílica. (DANA 1970; DEER et al, 2000; BROWN & BLINDLEY, 2007).

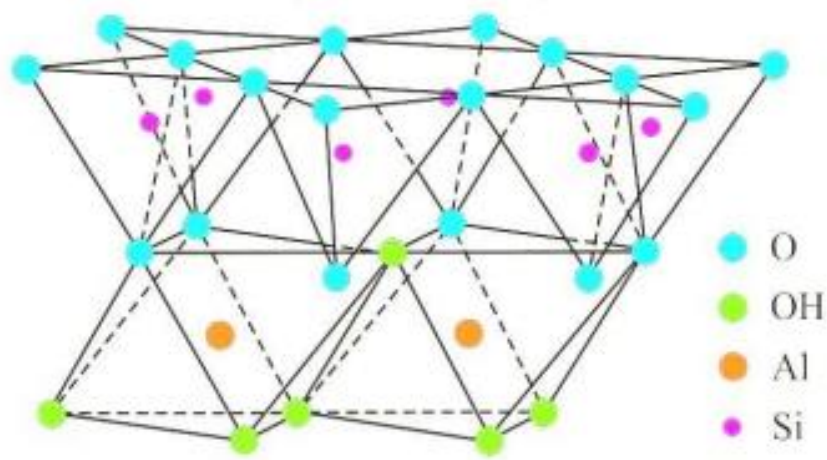


Figura 1. Representação esquemática da estrutura cristalina da caulinita.

2.3) Estrutura da Esmectita

Na Esmectita (assim como na illita) a unidade estrutural consiste, em essência, de uma folha de gibbsita entre duas folhas de sílica, pertencendo, portanto, à família dos argilominerais com camadas 2:1 de 3 folhas. Podemos verificar na figura 2.

As ligações entre as folhas se processam de maneira análoga à que ocorre na caulinita. Nas argilas desse grupo, entretanto, o alumínio (Al^{3+}) foi parcialmente substituído por magnésio (Mg^{2+}). Dessa maneira, a estrutura (que de outra forma estaria totalmente balanceada em termos de cargas) apresenta uma deficiência de cargas positivas (ou excesso de cargas negativas), que são satisfeitas por cátions sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}) ou outros, em geral hidratados, os quais ficam posicionados entre as unidades estruturais de tal modo que permitem alguma movimentação relativa das camadas (SANTOS 1989).

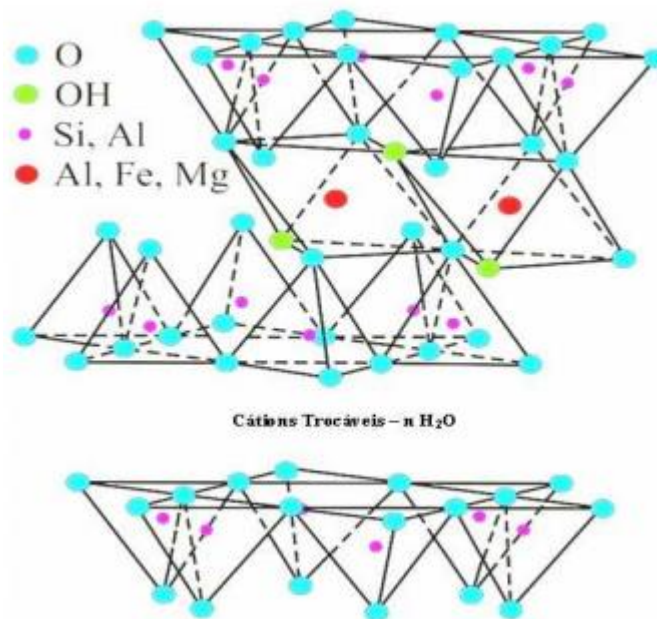


Figura 2. Representação esquemática da estrutura Esmeclita.

Uma característica predominante de cada grupo é a distância interplanar basal. Essa expressão é usada para denominar a distância entre planos basais equivalentes ou correspondentes de duas lamelas unitárias contíguas, medida por difração de raios-X.

Essa distância é de 7,2Å para a caulinita, de 10,0Å para a illita e de 14,0 a 15,0Å para as Esmeclitas.

2.4) Estrutura da illita

O argilomineral Illita é constituído de duas folhas, uma interna tetragonal de sílica e outra octaédrica. Tem uma estrutura cristalina semelhante a Esmeclita, porém a diferença é que há uma substituição maior de alumínio por silício e o cátion neutralizante é o potássio. A semelhança está nitida na figura 3, podemos verificar um resumo da distância basal entre os argilomineiras na figura 4.

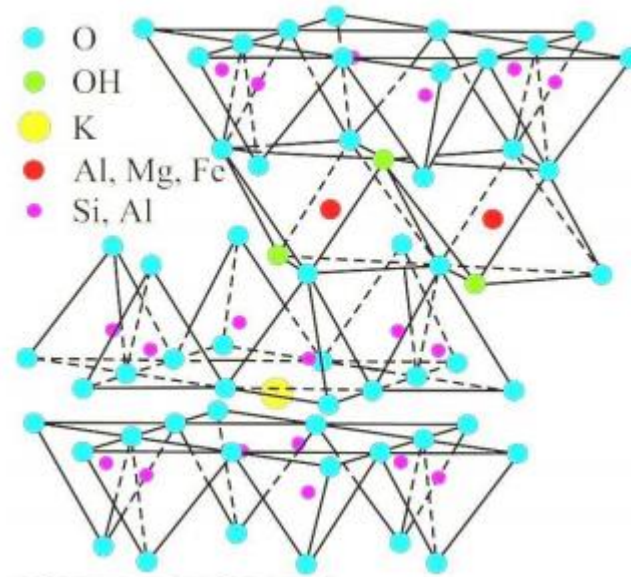


Figura 3. Estrutura cristalina da illita

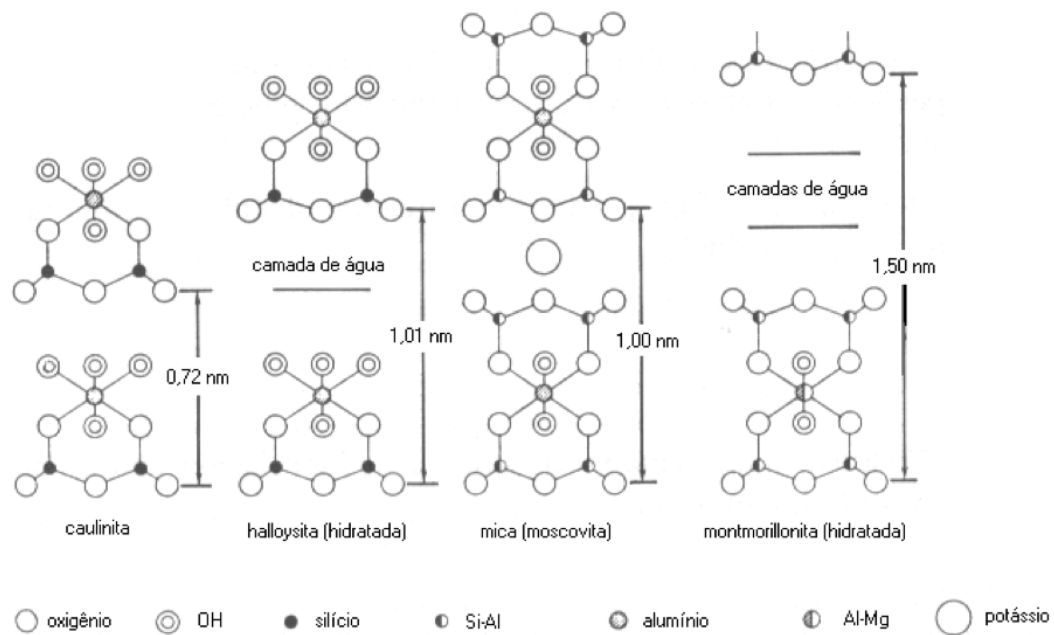


Figura 4. Estrutura cristalina dos argilominerais.

3) PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CERÂMICA VERMELHA

Na fabricação de um tijolo, em olarias de pequeno porte o processo de produção é simples, e em geral consiste nas seguintes etapas: extração da matéria-prima seguido da estocagem a céu aberto e/ou em local coberto (para épocas de chuva, evitando assim o excesso de umidade), então ocorre à desagregação, mistura de no máximo duas argilas, ajuste do teor de água se necessário, com isso ele vai para a conformação por extrusão deixando-a exposta a secagem natural, posteriormente é queimada em fornos intermitentes, em temperatura na faixa de 1000°C. . O processo de fabricação de tijolos foi representado na forma de fluxograma (figura 5) onde são apresentadas as principais etapas envolvidas, a única matéria-prima empregada é a argila, que está dividida em argila “dura” e “mole”, esta nomenclatura leva em conta exclusivamente a plasticidade, argilas Esmeclitas são conhecidas como moles por serem mais plásticas enquanto as caulinitas as argilas duras, precisando passar por um processo de britagem e moagem (ABC, 2013).

FLUXOGRAMA 1 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

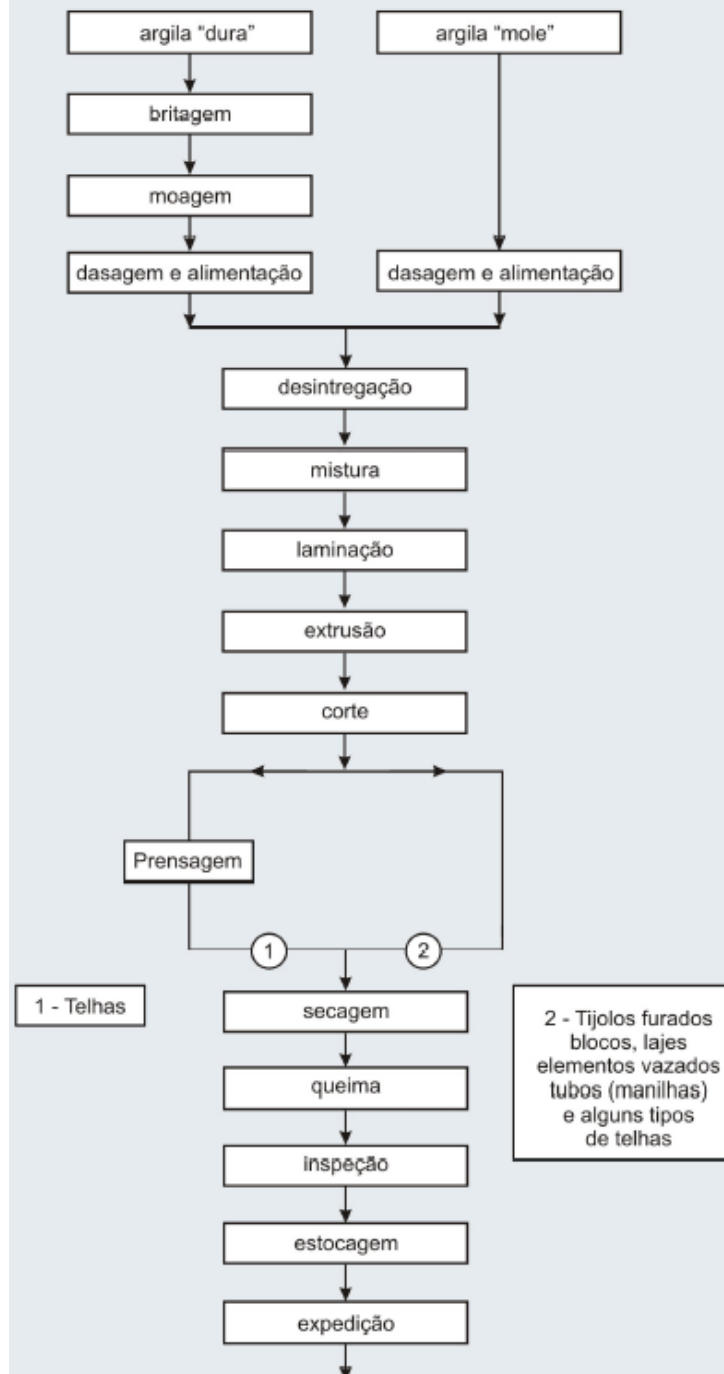


Figura 5. Fluxograma 1 do processo de fabricação da cerâmica vermelha.

3.1) Beneficiamento:

Compreendem as etapas de moagem, dosagem e alimentação, controle de umidade, desintegração e laminação. A moagem ou britagem é um método de cominuição que tem por objetivo diminuir o tamanho das partículas, ou seja, transformá-las em pó. A etapa de dosagem consiste em abastecer o processo produtivo com as matérias primas, respeitando as devidas proporções, basicamente é feita por volume de material ou por peso (com maior precisão) (MÁS, 2002).

As matérias-primas naturais geralmente são dosadas em volumes. Onde os volumes são as “conchas” da pá-carregadeira. Este método exige que as matérias-primas individuais estejam armazenadas em lotes separados. No caso de dosagem por peso pode ser feito através de esteira rolante, onde as matérias-primas são dosadas através de um caixão alimentador com fundentes registro regulável sobre uma esteira aferida (é preciso verificar o peso dosado por minuto), ou por meio de balanças eletrônicas (MÁS, 2002).

Em seguida as matérias-primas são misturadas e o teor de água é verificado, passam então por um desintegrador que desmancha os torrões maiores (até 30cm) que porventura possam estar presentes nas argilas. Em alguns casos para se obter um melhor resultado são necessárias várias repetições. Na etapa de mistura é utilizado um misturador que apresenta facas intercaladas girando em sentidos opostos que diminuem ainda mais o tamanho dos torrões. Se necessário pode ser adicionada água à mistura.

Logo após, esta mistura é passada para o laminador, cuja finalidade é ajustar a granulometria, completar a homogeneização e cortar a massa em lâminas. A laminação da massa cerâmica é obtida pela passagem do material por entre meio a dois cilindros em alta velocidade realizando a laminação e compressão do material. Através deste processo, pedriscos e outras impurezas semelhantes são moídos, laminados e misturados à massa cerâmica, proporcionando ao produto maior uniformidade e qualidade (GELENSKI, 2009).

3.2) Conformação

Envolvem as etapas de extrusão e prensagem, a extrusão para o caso da fabricação de tijolos e prensagem para as telhas, neste caso, foi utilizada a extrusora, popularmente chamada de “Maromba”, onde a massa cerâmica é empurrada através de uma boquilha, para formar uma barra de seção constante. Seu princípio de funcionamento consiste na adição da massa plástica no equipamento, onde é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, através de bocal com determinado formato. Como resultado obtém-se uma coluna extrudada, com seção transversal com o formato e dimensões desejadas; em seguida, essa coluna é cortada, obtendo-se desse modo peças como tijolos vazados, blocos, tubos e outros produtos de formatos regular.

A extrusão pode ser uma etapa intermediária do processo de formação, seguindo-se, após corte da coluna extrudada, como é o caso da maioria das telhas (ABC, 2013). A figura 6 mostra claramente uma extrusora.



Figura 6. Extrusora/Maromba da Indústria cerâmica INCARGEL

3.3) Tratamento Térmico

Esta etapa consiste na exposição das peças conformadas ao efeito da temperatura, fazendo parte deste processo a secagem e a sinterização. No caso da secagem é uma etapa bastante complexa, pois se deve tomar cuidado para evitar o surgimento de trincas e defeitos estruturais. Seu objetivo está ligado à eliminação da água nas peças que foram conformadas, requisito para a obtenção de uma massa plástica.

Esta secagem pode ser feita a céu aberto, em um galpão, ou em uma estufa (figura 7) com temperaturas que variam entre 80°C à 110°C, pois para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água, de forma lenta e gradual. Em um tempo mínimo de 40 minutos.

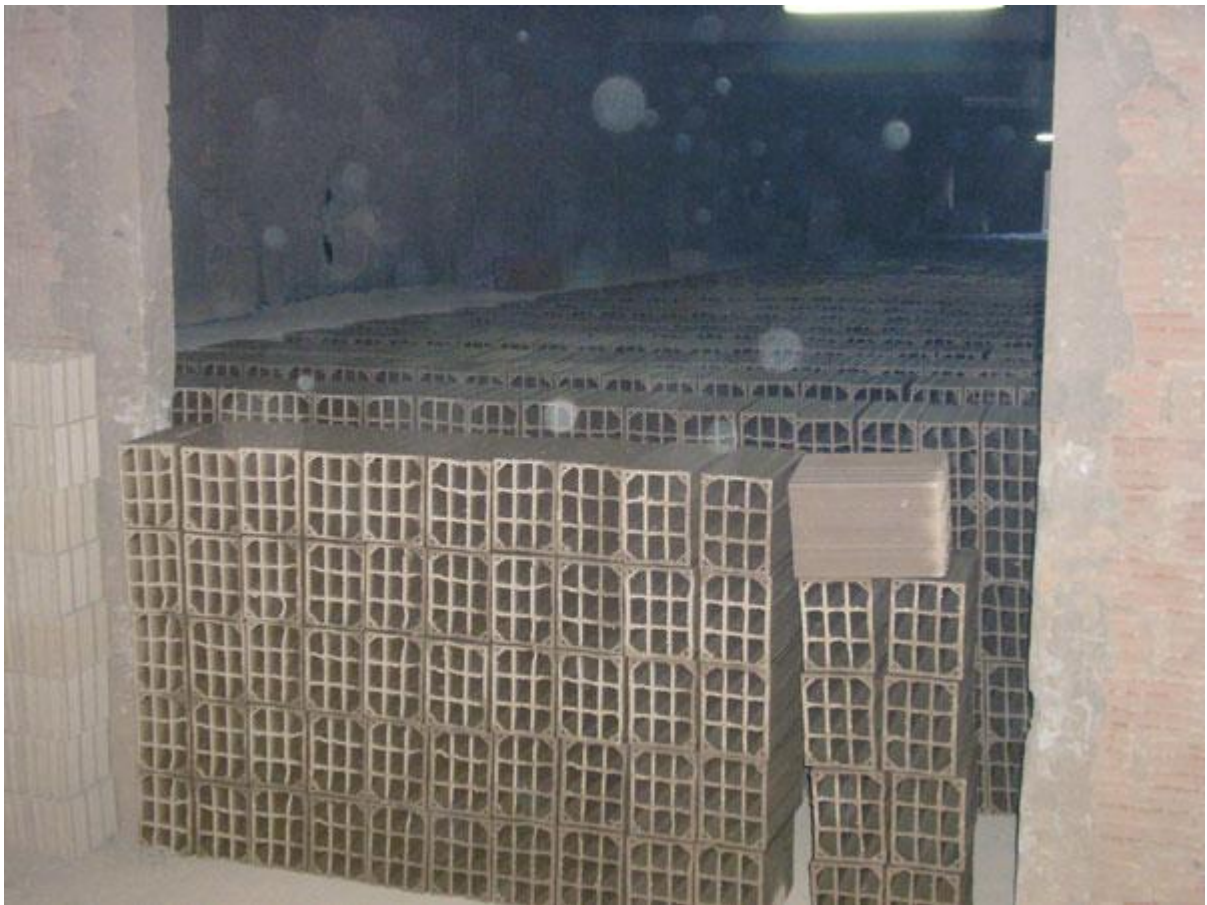


Figura 7. Blocos cerâmicos dentro de uma estufa de secagem.

Feito isto, temos o processo de queima, através da sinterização do material, esta parte do processo produtivo pode ser considerada a mais importante, devido ao fato do material adquirir as suas propriedades finais, como resistência mecânica, dureza e inercia química. O objetivo desta etapa é aglomerar as partículas, e como consequência reduz-se a área específica, volume aparente e aumento da resistência mecânica e da dureza.

As peças são submetidas a altas temperaturas, que na maioria dos produtos varia entre 800°C a 1200°C, em fornos contínuos ou intermitentes, que trabalham em três fases:

- Aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada;
- Patamar durante certo tempo na temperatura especificada;
- Resfriamento até temperaturas inferiores a 200°C.

Os fornos mais utilizados pela indústria cerâmica são os citados acima, fornos contínuos e intermitentes (figura 8). Para os fornos intermitentes são fornos antigos, usado pelas pequenas indústrias, e nele consiste em carregar o forno com as peças, e queimar até a temperatura escolhida, e depois disso retirar a fonte de energia.



Figura 8. Forno Intermitente usado na indústria cerâmica CERAMIFOR.

Enquanto o forno contínuo (figura 9) é um forno utilizado pelas grandes e médias indústrias, nele as peças são colocadas em vagões que se deslocam ao longo do forno, que é dividido em zonas de pré-aquecimento, queima e resfriamento.



Figura 9. Forno Contínuo na indústria cerâmica CERAMIFOR.

Durante esse tratamento ocorre uma série de transformações em função dos componentes da massa, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações. Este processo é denominado sinterização via fase sólida.

3.4) Sinterização

Sinterização via fase sólida:

Sinterização é um processo no qual a temperatura de processamento é sempre menor que a sua temperatura de fusão, na qual as pequenas partículas do material se ligam entre si por difusão no estado sólido, transformando o material compacto poroso num produto resistente e denso. À medida que as partículas se tornam maiores com o tempo de sinterização, a porosidade do compactados diminui com isso atingindo-se um

tamanho de grão de equilíbrio (NORTON, 1973), a figura 10 resume estas etapas. A sinterização pode ser dividida em três estágios:

Primeiro Estágio: Caracterizado pela formação de pescoço gerado pela ligação formada pelo contato entre as partículas, com pequena retração do material.

Segundo Estágio: Ocorre o alongamento do pescoço, ou seja, os pontos de contatos entre as partículas aumenta significativamente, fato que leva a diminuição da porosidade. A densidade aumenta em até 95% e é importante ressaltar que as propriedades do material são desenvolvidas neste estágio.

Estágio final: Sinterização final, crescimento dos grãos e remoção lenta dos poros sem alterar a densificação.

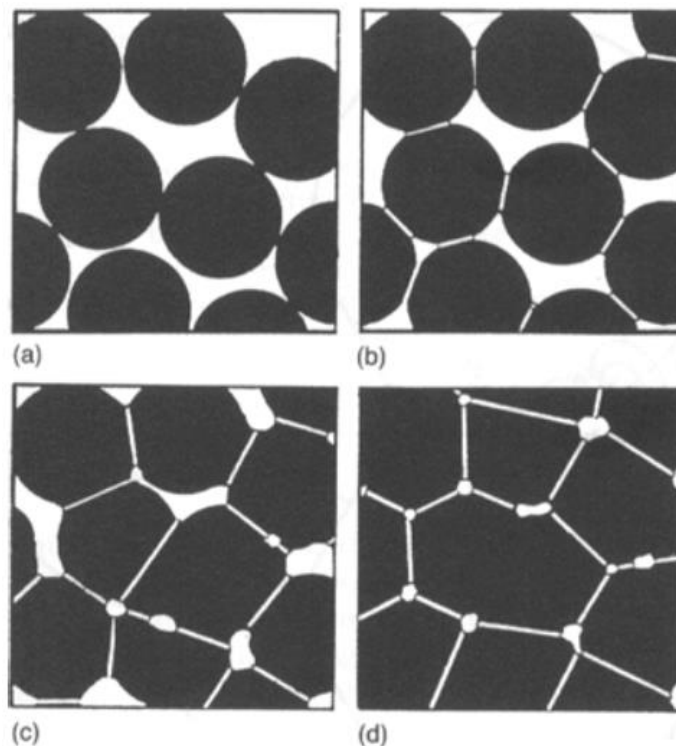


Figura 10. Representação esquemática dos três estágios de sinterização onde (a) são as partículas soltas de pó, (b) o estágio inicial, (c) o estágio intermediário e (d) o estágio final.

Sinterização via fase líquida:

Na sinterização via fase líquida (também conhecido como via estado vítreo ou via fase vítrea), é necessário que na composição da sua massa haja um composto que tenha um ponto de fusão inferior aos demais, fazendo com que ele se funda e se forme uma fase líquida que irá molhar parcial ou completamente uma fase sólida. Boa quantidade de fase líquida;

Para que se tenha uma eficiente sinterização por este método devemos considerar os itens abaixo:

- Tamanho de partícula de pó (o material fundente deve ter a granulometria próxima à da matriz);
- Grau de mistura;
- Molhamento da fase sólida pelo líquido formado (avaliação feita pelo ângulo de contato);
- Viscosidade do líquido formado;
- Solubilidade e difusividade do sólido no líquido;
- Temperatura (no caso de adição de vidro nas massas cerâmicas, a temperatura de amolecimento do vidro é uma variável importante no desempenho da sinterização);
- Tempo de sinterização;

Este tipo de sinterização possui grandes vantagens em relação à sinterização via fase sólida. Dentre elas podemos citar a maior velocidade de sinterização (coeficiente de difusão no estado líquido é maior do que no estado sólido), um rápido rearranjo (a presença de um líquido na matriz sólida diminui a força de atrito entre as partículas) e um melhor empacotamento da microestrutura.

Entretanto, a sinterização via fase líquida possui suas restrições, como no uso de materiais para a indústria de refratários, pois a sinterização via fase vítrea diminui a resistência mecânica do corpo cerâmico em trabalhos a altas temperaturas, devido ao amolecimento da fase intergranular formada.

4) CARACTERIZAÇÃO

4.1) Difração de Raio X

São radiações eletromagnéticas que correspondem a uma faixa do espectro que vai desde 10nm a 0,1nm, foram descobertos em 1895, quando o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen realizava experimentos com os raios catódicos. Propagam-se com a velocidade da luz e, como qualquer outra onda eletromagnética, esses raios estão sempre sujeitos aos fenômenos da refração, reflexão, difração, polarização e interferência.

Raios X podem ser produzidos quando elétrons são acelerados em direção a um alvo metálico. Os elétrons emitidos pelo catodo são fortemente atraídos pelo anodo, e chegam a este com grande energia cinética em dezenas de KeV. Chocando-se com o anodo, eles perdem a energia cinética, e cedem energia aos elétrons que estão nos átomos do anodo. Estes elétrons são então acelerados. E acelerados, emitem ondas eletromagnéticas que são os raios X, quando o elétron proveniente do catodo incide no anodo, ele pode expulsar um elétron orbital. A órbita de onde o elétron será expulso depende da energia do elétron incidente e dos níveis de energia do átomo do anodo. A lacuna deixada por este elétron será preenchida por um elétron mais externo. Neste processo, a radiação X será emitida, conforme figura 11 abaixo.

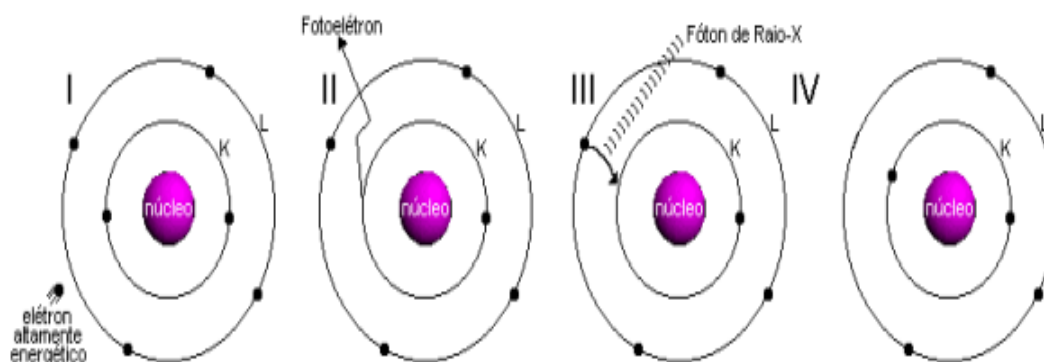


Figura 11. Produção de Raios X a nível atômico

Lei de Bragg

A lei de Bragg refere-se à equação: $n \lambda = 2 d \sin \theta$, sendo n = ordem da difração, λ = comprimento da onda, d = distância interplanar aos planos h, k e l, e θ = ângulo de incidência dos raios-X, figura 12. Ela explica porque as faces clivadas de cristais refletem feixes de raios-X a certos ângulos de incidência.

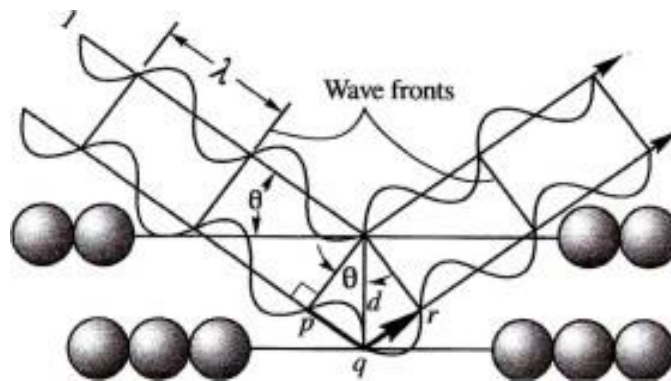


Figura 12. Esquema da difração de Bragg

Princípio de funcionamento

Quando um feixe de Raios X difrata em um cristal desconhecido, a medida dos ângulos de difração dos raios emergentes podem elucidar a distância dos átomos no cristal e, conseqüentemente, a estrutura cristalina. Onde os átomos estão regularmente espaçados (periodicidade do arranjo cristalino), cada átomo será uma fonte de emissão esférica de radiação. Netas condições poderá haver interferências construtivas ou destrutivas entre as ondas eletromagnéticas se estiverem em fase entre si ou defasadas, respectivamente. O comprimento de onda da radiação incidente deve ser da mesma ordem de grandeza do tamanho da partícula a ser analisada, a incidência ocorre em um único átomo isolado. Os elétrons deste átomo ficarão excitados e vibrarão com a mesma frequência do feixe incidente. Estes elétrons vibrando emitirão raios-X em todas as direções com a mesma frequência do feixe incidente. A figura 13 mostra a intensidade dos picos em relação ao ângulo.

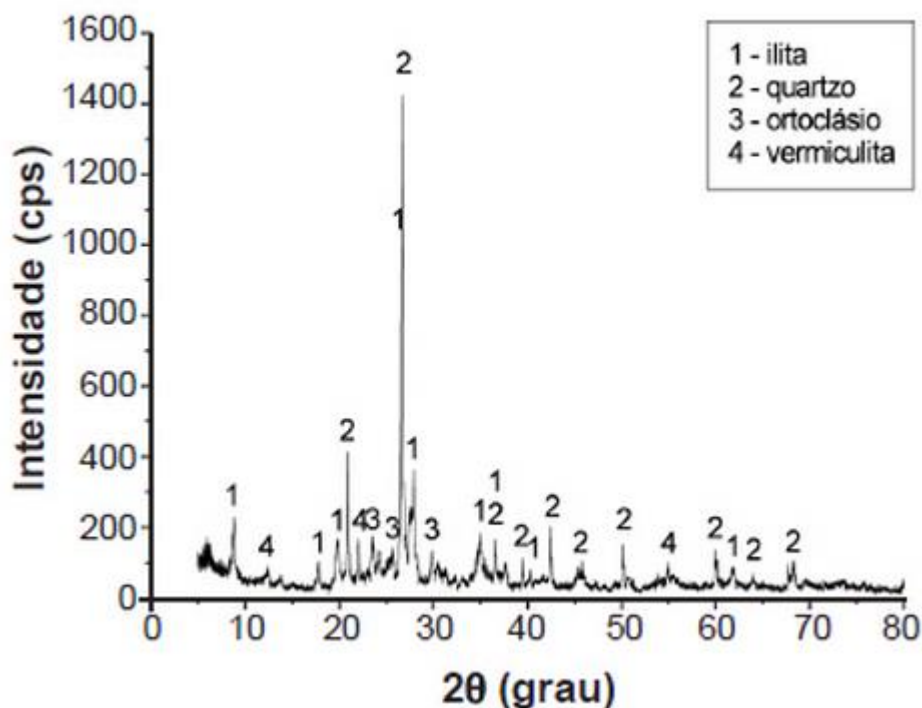


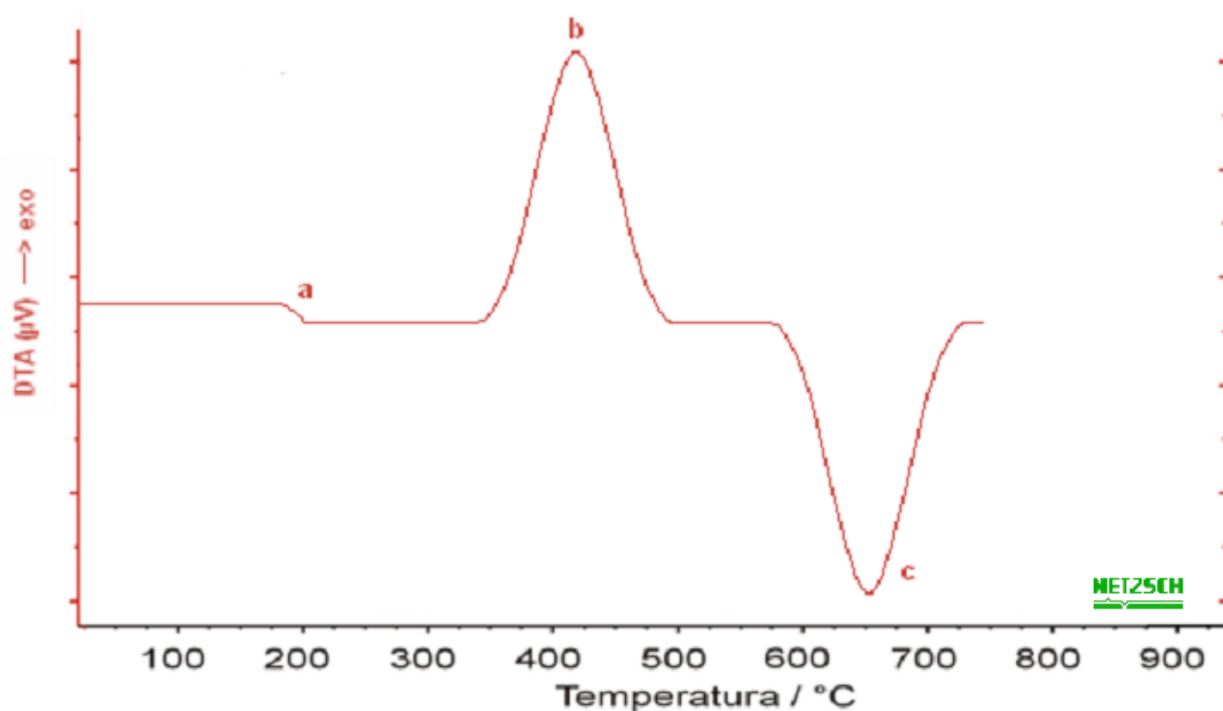
Figura 13. Difratoograma de uma argila.

4.2) Calorimetria Diferencial de Varredura

A DSC é a técnica de análise térmica, na qual se mede a diferença de energia fornecida à uma substância e a um material de referência (termicamente estável), em função da temperatura, enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura. A configuração do DSC utilizada neste trabalho foi DSC com fluxo de calor, onde a amostra e o material de referência são colocados em cápsulas idênticas, localizadas sobre o disco termoeletrico e aquecidas por uma única fonte de calor. As curvas obtidas nesse sistema mostram picos ascendentes que caracterizam eventos exotérmicos, enquanto os descendentes eventos endotérmicos, vide figura 14, (Wendlandt, 1986; Machado Matos, 2004).

Estas medidas fornecem dados qualitativos e quantitativos em processos endotérmicos (absorção de energia calorífica) e exotérmicos (libertação de energia calorífica), permitindo obter informações referentes a alterações de propriedades físicas

e/ou químicas como, por exemplo: Identificação e análise da pureza de materiais; determinação de temperaturas e entalpias características de mudanças de estados físicos; transformação de fases e reações e avaliação da cinética de decomposição térmica. Proporciona resultados qualitativos e quantitativos, quantitativos em relação à termodinâmica e as propriedades dos materiais. Sua grande vantagem está na utilização de pequenas quantidades de amostras e o tempo do ensaio ser pequeno. (Cammenga, Epple, 1995).



a) Variação da capacidade calorífica b) Reação exotérmica c) Reação endotérmica.

Figura 14. Curva típica de uma análise de calorimetria diferencial de varredura

4.3) Granulometria por Peneiramento

Granulometria é a distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos, é a determinação das dimensões das partículas, esta caracterização é feita pelo fato da composição granulométrica ter grande influência nas propriedades do pó.

Esta análise pode ser realizada em diferentes métodos são eles, por peneiramento, por sedimentação, pela combinação de peneiramento e sedimentação e por difração a laser. Neste trabalho foi utilizado o procedimento por peneiramento, utilizando uma peneira vibratória com uma peneira ABNT nº200, que corresponde a uma abertura de 0,074mm. A figura 15, mostra as diferentes análises de granulometria.

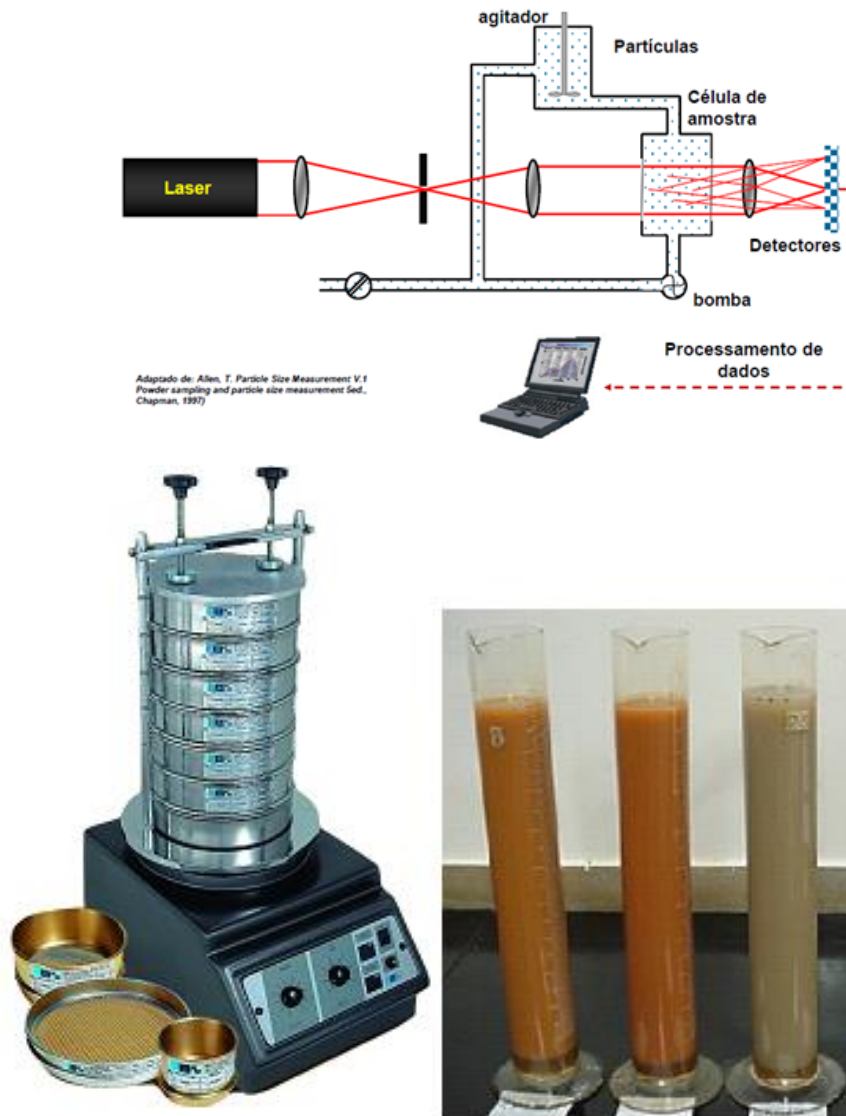


Figura 15. Análise de granulometria por diferentes métodos.

4.4) Ensaio de compressão

É um processo aonde se utiliza de uma força compressiva e o corpo de prova se contrai ao longo da direção da tensão, reduzindo o seu volume, consiste na aplicação de uma carga uniaxial para dentro do material, tendendo a uma distribuição uniforme ao longo do material. A figura 16, representa o processo de compressão de diferentes materiais, a figura 17 e 18, mostram o gráfico de uma cerâmica em relação a sua resistência à compressão e a forma da sua fratura respectivamente.

No caso de materiais frágeis o único dado que podemos encontrar é o seu limite de resistência à compressão que seria a força necessária para romper um material, enquanto nos materiais dúcteis ocorre uma pequena deformação lateral, até que o material fique na forma de um disco, sem que haja uma ruptura, nele é possível de avaliar: Limite de proporcionalidade que significa que as tensões aplicadas são proporcionais as deformações, limite de escoamento quando o material entra na zona plástica, e módulo de elasticidade, ou seja, o quanto que o material se deforma que quanto maior este módulo menor sua deformação.

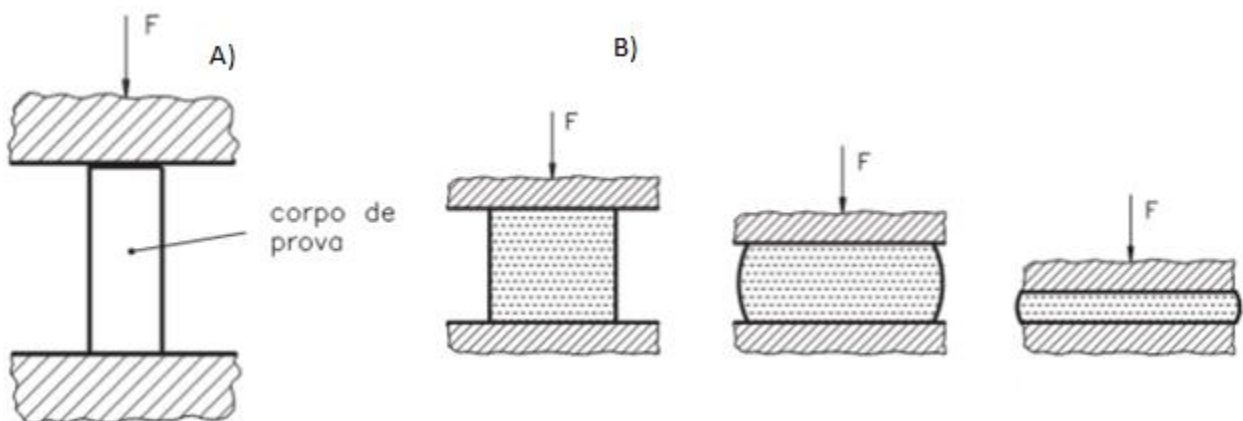


Figura 16. Ensaio de compressão em material frágil (A) e dúctil (B).

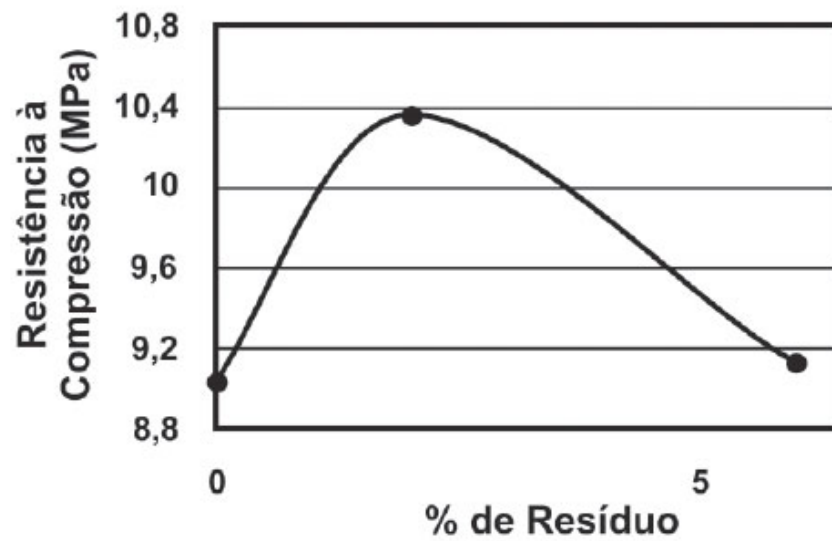


Figura 17. Resistência à compressão em função do teor de resíduos.



Figura 18. Ensaio de compressão em uma esfera cerâmica

5) MATERIAIS E MÉTODOS

5.1) Matérias-primas

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado uma argila proveniente de uma jazida localizada em Vitória da Conquista – Ba, e o chamote foi gerado de tijolos que foram fabricados com defeitos, houve a sua moagem até que o mesmo passasse na peneira ABNT 200.

5.2) Preparação das amostras

Os corpos-de-prova foram confeccionados com diferentes teores de chamote, nas seguintes proporções: 0%, 1%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%. Sendo 8 tipos de amostras para cada porcentagem, todas foram secas a 110°C e apenas quatro queimadas em 905°C, com intuito de se verificar a influência do resíduo na massa cerâmica, a mistura da argila com o chamote foi feita manualmente, adicionando-se água lentamente com a ajuda de um borrifador até que ela atingisse plasticidade suficiente para que pudesse se formar a esfera.

Os corpos de provas tiveram um formato de esfera, devido a praticidade em molda-las e também para o ganho de tempo, pois como eram muitas amostras, isso exigiria um trabalho muito maior, a secagem em 110°C garante que toda a água superficial será eliminada, e a temperatura de queima escolhida em 905°C é devido a capacidade dos fornos industriais atingirem esta temperatura.

5.3) Secagem

Depois de conformadas elas foram para a etapa de secagem a temperatura ambiente durante dois dias dentro de um recipiente de plástico que foi coberto com um pano úmido, para que a secagem não fosse rápida o suficiente para que o surgimento de fissuras, trincas, rachaduras e porosidade. Com essa eliminação superficial da água, elas seguiram a estufa aquecida em 110°C (figura 19) durante 24 horas, para que

finalmente a água contida nos poros fosse eliminada, e que ela adquirisse uma boa resistência a verde.



Figura 19. Estufa de secagem.

5.4) Queima

A taxa de aquecimento foi de 5°C/min até a temperatura de 905° C, mantida esta temperatura por duas horas, para que se tenha uma boa sinterização. O resfriamento ocorreu de forma natural, ou seja, apenas houve o desligamento do forno, até que atingisse a temperatura ambiente, as amostras foram enformadas no forno tipo mufla conforme figura 20.



Figura 20. Forno tipo mufla.

5.5) Caracterização da matéria prima

As matérias-primas foram caracterizadas através das seguintes técnicas: Difração de raios X (DRX), e por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC),

A primeira técnica a ser utilizada por a difração de raios X, adotando os parâmetros, com ângulo de início de $2^{\circ}\Theta$ e terminando o procedimento em $90^{\circ}\Theta$, com um passo de tamanho 0,025 e com tempo de contagem em 0,5 s. O equipamento utilizado foi da marca Rigaku, modelo Miniflex II (figuras 21 e 22) com uma tensão de 30 kV e corrente de 15 mA, lembrando que o equipamento é protegido para não liberar radiação, podendo contaminar os usuários. Estes experimentos foram realizados no Laboratório de Processamento e caracterização de materiais, FATEC-SP.



Figura 21. Difratorograma Rigaku.



Figura 22. Vista de dentro do difratômetro

Ao finalizar o experimento os dados são coletados no computador e com a ajuda do software Xpert Highscore é possível identificar seus respectivos picos de difração e os componentes mineralógicos contidos na amostra.

Feito o DRX, a pesquisa seguiu para a análise de calorimetria diferencial de varredura, que consiste em um equipamento que dispõe de dois cadinhos de alumina, sendo um com a amostra e o outro como referência (sem amostra) que ficam sob uma placa condutora de alta pureza, a figura 23 mostra o equipamento utilizado. Enquanto o aquecimento desses cadinhos, termopares são capazes de medir a temperatura a que estão sendo submetido as amostras, podemos analisar os tipos de picos que o material apresenta ao longo do ensaio, podendo ser picos exotérmicos ou endotérmicos, isso varia de acordo com a perda de matéria orgânica, perda de hidroxilas, perda de água, transformações de fase, ou seja, tudo isso será mostrado no item sobre resultados, e a tabela 1 mostra as amostras analisadas por DRX e DSC.



Figura 23. Equipamento utilizado para fazer o ensaio de DSC.

Tabela 1. Amostras analisadas por DRX e DSC.

Amostras	Temperatura de Queima
Argila Pura queimada	905° C
Argila com 90% de resíduo	905° C
Argila com 10% de resíduo	905° C
Argila Pura	-

Nesta parte do trabalho, falaremos sobre os ensaios que definiram algumas propriedades do material, tais como: resistência à compressão, porosidade aparente, absorção de água e a sua densidade aparente. Todas as amostras passaram por estes testes, tanto as queimadas quanto as que foram apenas secas.

5.6) Absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente

A metodologia para se determinar tais resultados foi baseada no Princípio de Arquimedes e teve como etapas a secagem das amostras em uma estufa a 60°C, a fim de retirar a umidade presente, então, pesaram-se as amostras em uma balança hidrostática semi-analítica, ou seja, com precisão de 0,01g. Observando a massa da amostra seca, em seguida ela é despejada em uma cestinha com água que esta acoplada no próprio equipamento, e medindo sua massa submersa, seca-se com um pano úmido e mede sua massa total, que seria a massa da amostra somada ao peso da água que foi introduzida nos poros do corpo-de-prova. Com essas medidas de massa seca, massa submersa e massa úmida são possíveis determinar os seguintes resultados citado no subtítulo, obedecendo as seguintes equações. A figura 24 mostra o equipamento utilizado para obter tais resultados. Para a obtenção da densidade aparente foi levado em conta que a densidade da água varia de acordo com a temperatura, foi medido sua temperatura antes e durante o experimento.



Figura 24. Balança Hidrostática

5.7) Ensaio de compressão

Para a realização deste ensaio utilizamos a Máquina Universal de Ensaio com capacidade de 100N, nela é possível fazer vários tipos de testes como: Tração, Compressão e Flexão, mas neste caso iremos fazer o ensaio de compressão, que consistiu na montagem do equipamento com duas placas, uma fixada na parte superior do pistão e outra na parte de baixo que não se move, então é determinado a velocidade de descida e a máquina mostrou o quanto de força foi necessário para a ruptura da amostra. Logicamente os valores das amostras variam, devido a diferença de porcentagem de resíduos contidas em cada amostra, além da temperatura a qual foram submetidas ao tratamento térmico, a figura 29 mostra a máquina utilizado para fazer o ensaio de compressão.



Figura 25. Máquina universal de ensaios

6) RESULTADOS E DISCUSSÕES

As fórmulas abaixo se referem a absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente, descobertas por Arquimedes em meados do século III a.C, e as tabelas 2, 3 a seguir mostram os resultados deste procedimento nas diferentes amostras.

$$\text{Absorção de água} = 100 \times \frac{\text{Massa úmida} - \text{Massa seca}}{\text{Massa seca}} \quad (1)$$

$$\text{Porosidade Aparente} = 100 \times \frac{\text{Massa úmida} - \text{Massa seca}}{\text{Massa úmida} - \text{Massa submersa}} \quad (2)$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{\text{Massa seca} \times \text{Densidade da água}}{\text{Massa seca} - \text{Massa submersa}} \quad (3)$$

Tabela 2. Média dos resultados das amostras queimadas.

Media dos resultados das amostras queimadas em 905°C			
Porcentagem de Resíduo (%)	Absorção de água (%)	Porosidade Aparente (%)	Densidade Aparente (g/cm³)
0%	15,30%	20,58%	1,817
1%	13,50%	22,64%	2,489
5%	12,36%	36,07%	6,386
10%	13,19%	19,03%	1,880
20%	12,64%	22,15%	2,260
30%	16,00%	26,53%	2,263
40%	15,33%	24,66%	2,136
50%	15,77%	23,50%	1,971
60%	17,04%	26,74%	2,165
70%	20,24%	29,13%	2,057
80%	16,84%	18,80%	1,914
90%	28,93%	35,24%	1,901

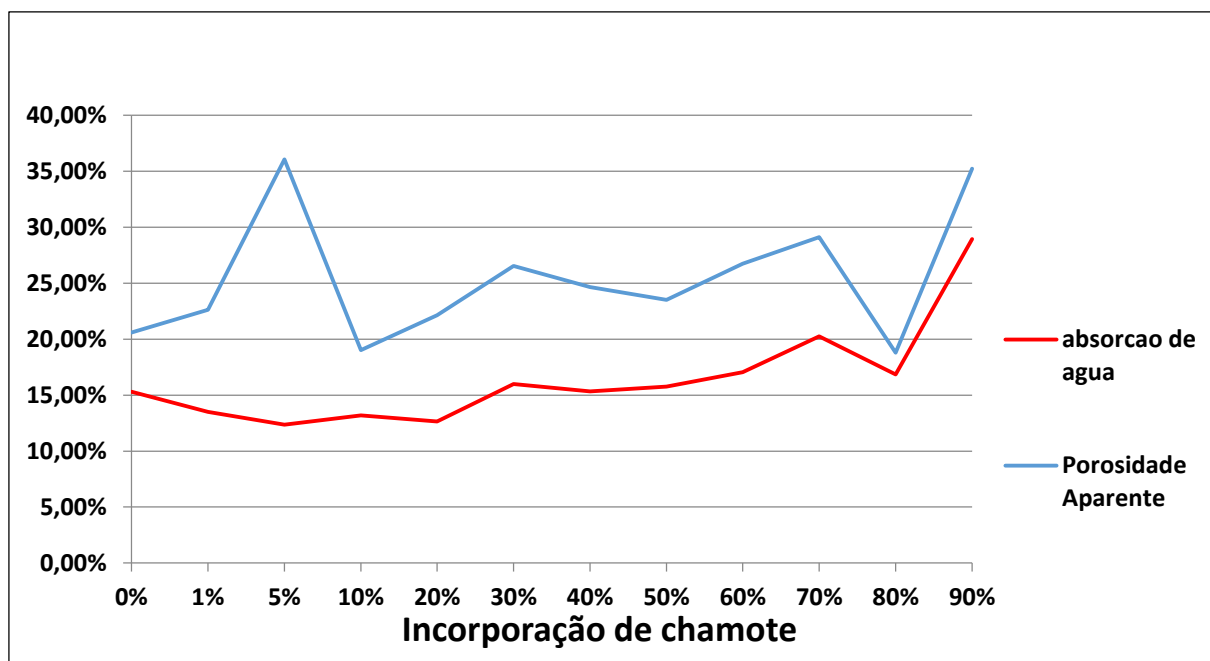


Figura 26. Gráfico resultante da absorção de água e porosidade nas amostras queimadas.

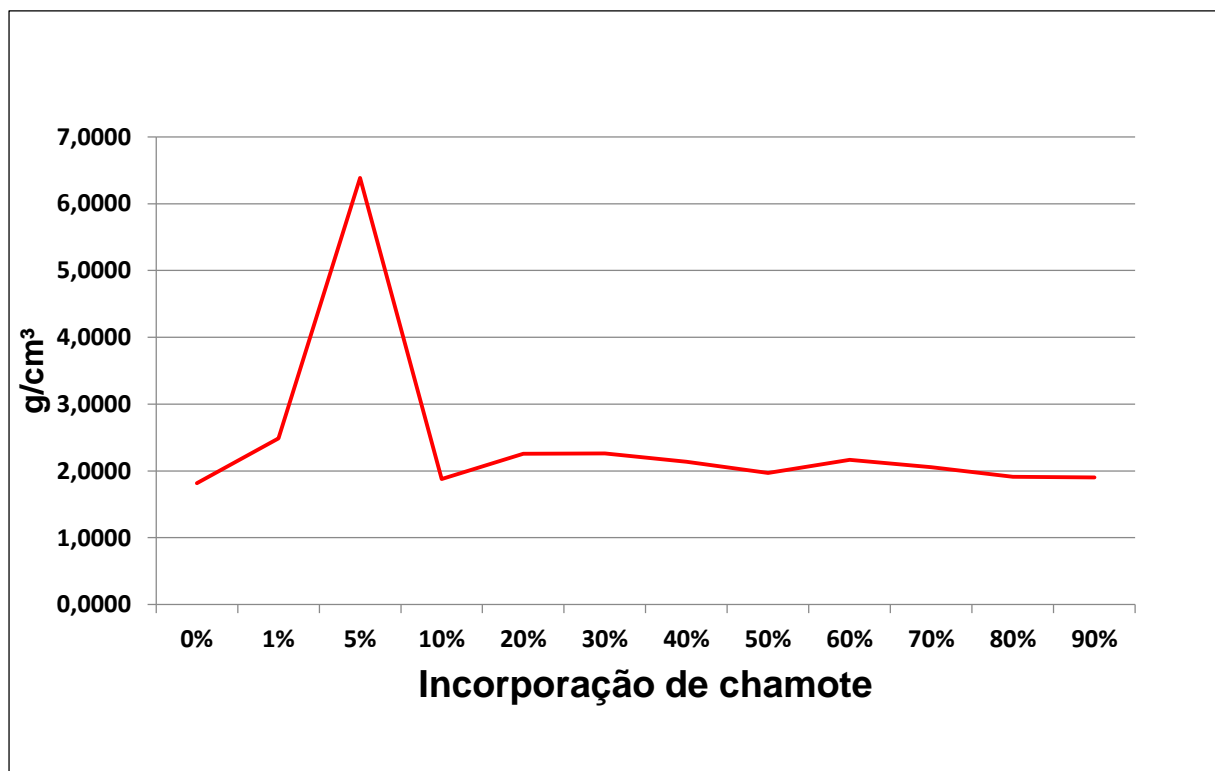


Figura 27. Densidade Aparente das amostras queimadas.

Tabela 3. Média dos resultados das amostras secas.

Média dos resultados das amostras secas em 110°C			
Porcentagem de Resíduo (%)	Absorção de água (%)	Porosidade Aparente (%)	Densidade Aparente (g/cm³)
0%	0,0821	5,23%	1,8711
1%	0,0307	5,16%	2,1547
5%	0,0260	4,39%	1,9280
10%	0,0370	7,62%	2,2165
20%	0,0296	5,17%	1,8763
30%	0,0577	9,69%	2,0139
40%	0,0468	7,97%	1,8839
50%	0,0238	2,95%	1,8433
60%	0,0561	8,79%	0,9766
70%	0,0206	3,08%	1,8226
80%	0,0898	11,56%	1,7090
90%	0,1260	14,32%	1,6780

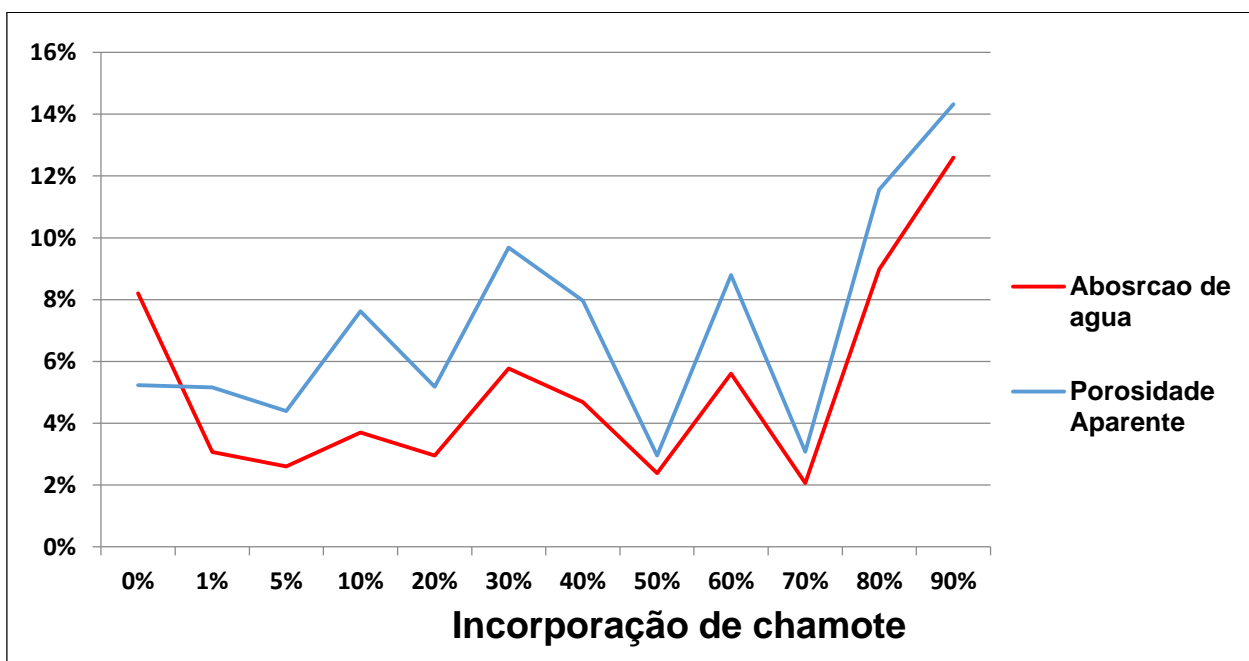


Figura 28. Gráfico resultante da absorção de água e porosidade nas amostras secas.

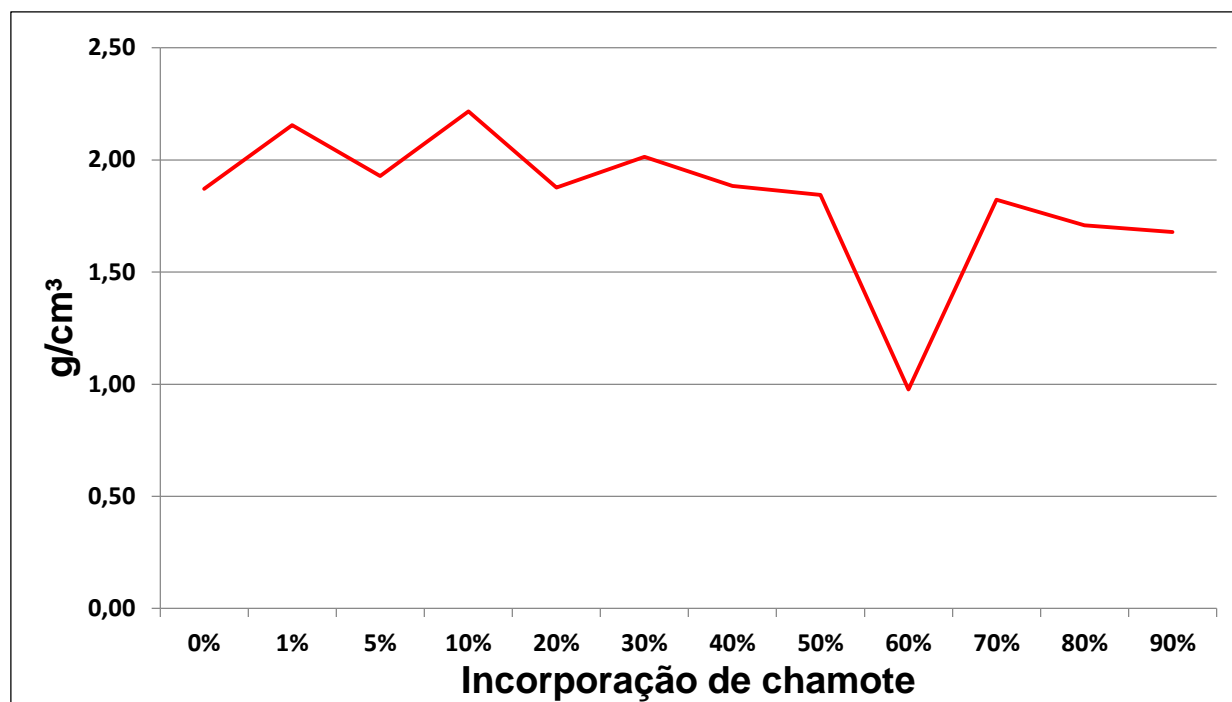


Figura 29. Densidade aparente das amostras secas.

6.1) Caracterização das argilas por DR X

A figura 30 determina os elementos presentes nas diferentes amostras, e seus respectivos componentes mineralógicos.

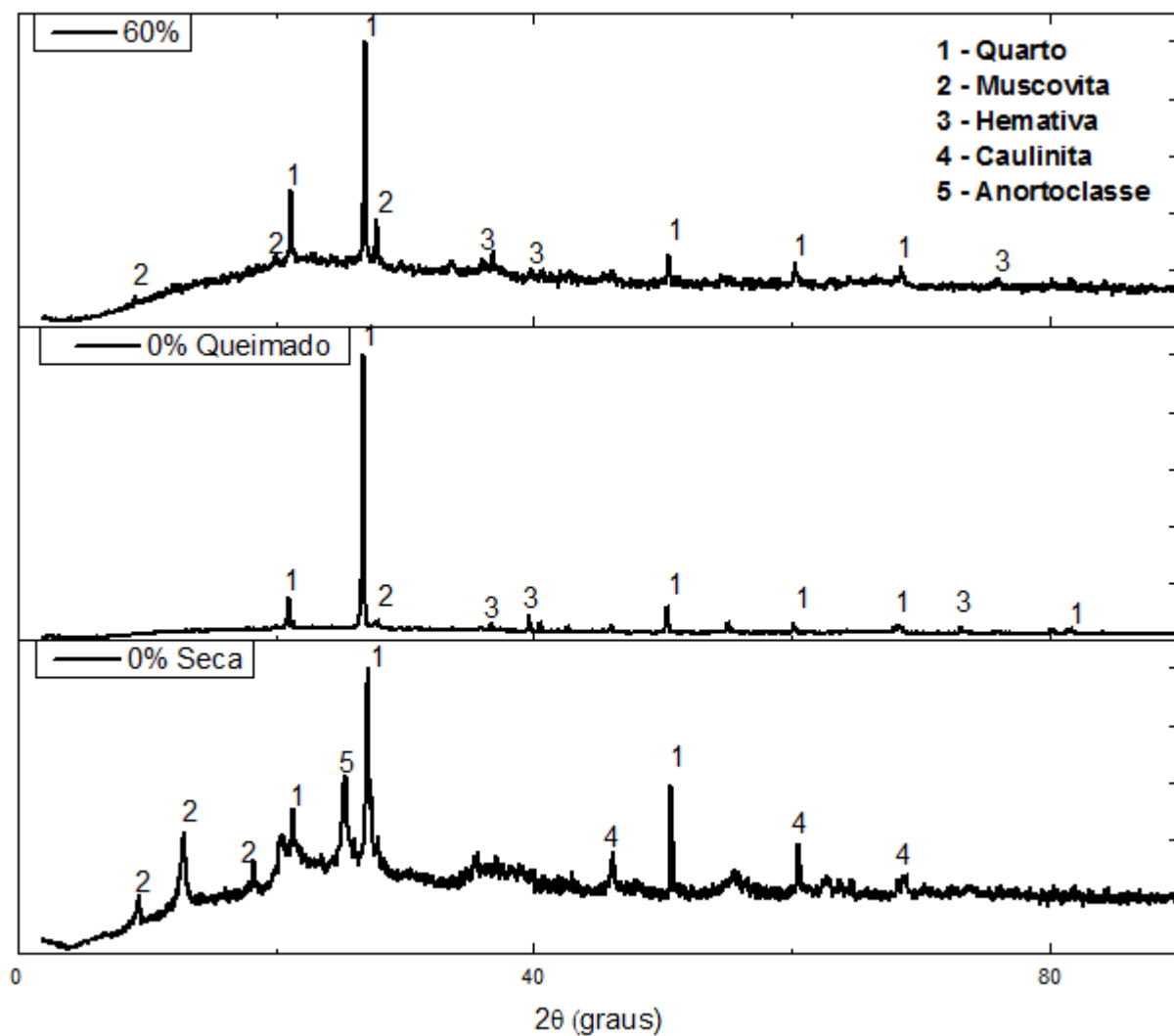


Figura 30. Difratoograma das amostras.

Nesta imagem, figura 30, é possível observar os elementos contidos nas amostras são eles: Quartzo (SiO_2) que confere ao material a estabilidade dimensional. A Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), atua como plastificante, ela quem ajuda

na etapa de conformação do material. Hematita (Fe_2O_3), este elemento provoca a coloração avermelhada da amostra após a queima. A Muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), atua como fundente diminuindo a temperatura de sinterização, e por último temos a Anortoclase ($\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$, atua também como um fundente.

6.2) Caracterização das argilas por DSC

As figuras a seguir (31 e 32) são referentes as amostras queimadas com diferentes proporções de chamote (90%, 60% e 0%), assim como a argila pura abaixo.

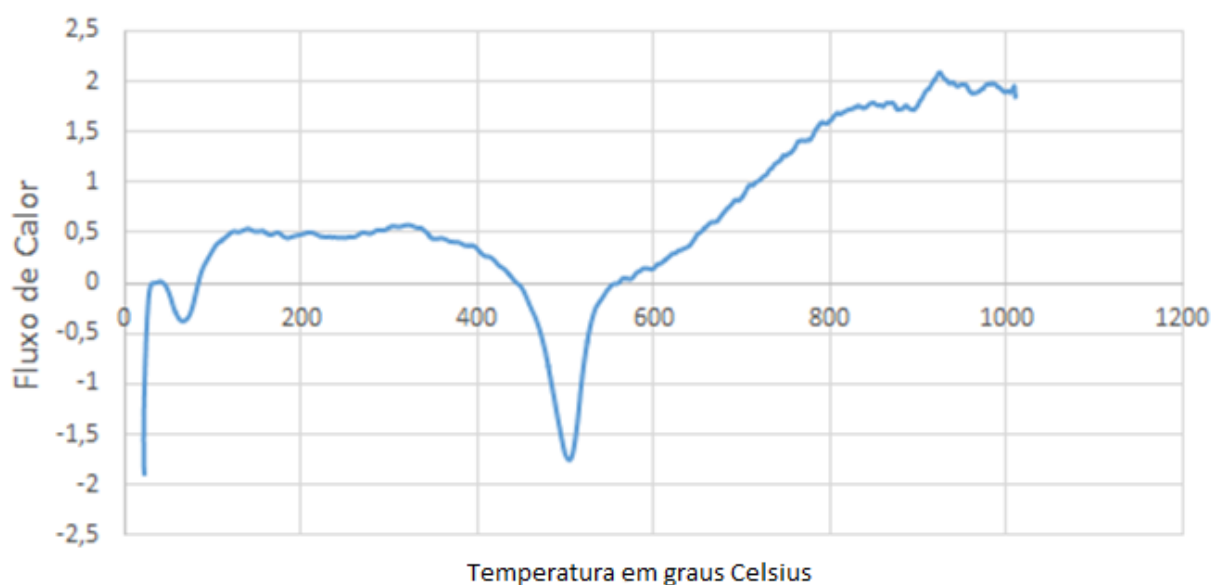


Figura 31. DSC da argila pura.

Nesta figura 31, consideremos o pico endotérmico existente entre a temperatura entre 30°C e 100°C, que nada mais é que a perda de água contida nos poros. Entre 400°C e 600°C, podemos ver outro pico endotérmico significando a perda de hidroxilas (OH^-), e o último pico por volta de 900°C, corresponde a uma reação exotérmica, pois está ocorrendo a formação de mulita no material, que de fato diminui a energia livre de Gibbs.

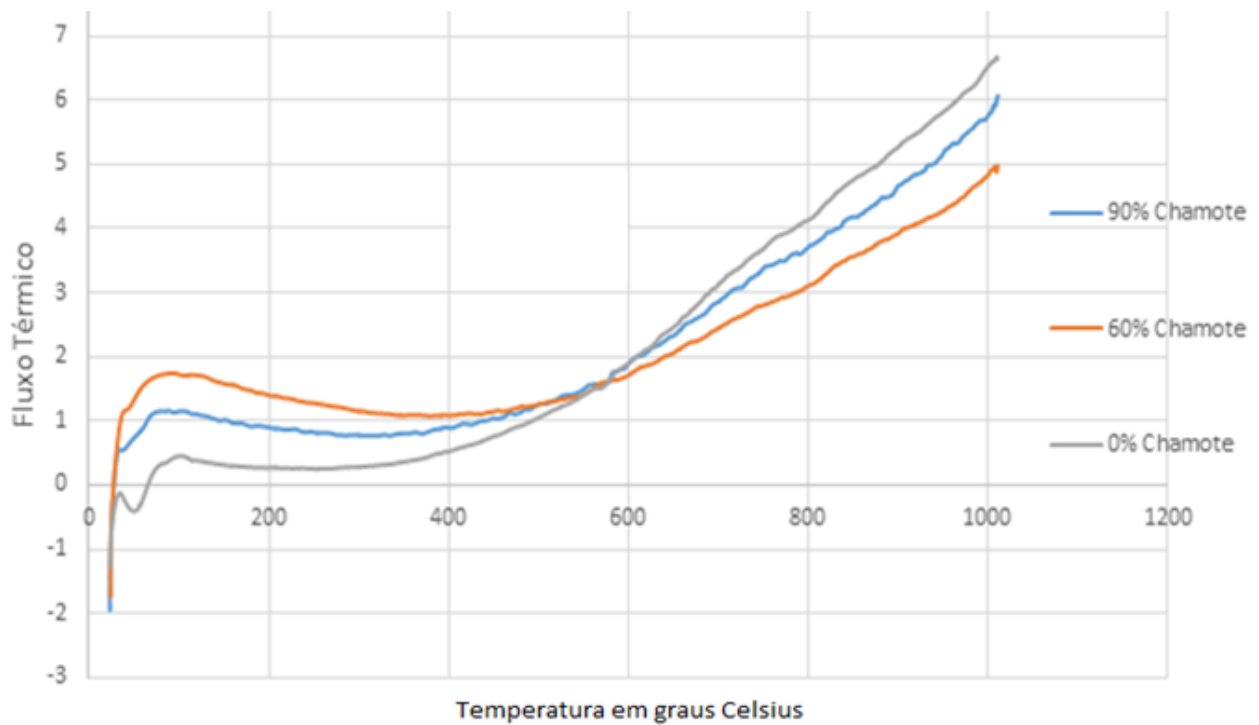


Figura 32. DSC das amostras queimadas com teores variados de chamote.

Podemos observar, na imagem acima (figura 32), que não houve uma mudança significativa entre os teores de chamote adicionados uma vez que essas amostras estão queimadas, contudo existe um pico endotérmico na temperatura entre 30°C e 100°C, mais evidente em 0% de chamote, que mostra a perda de água e umidade absorvida pela amostra.

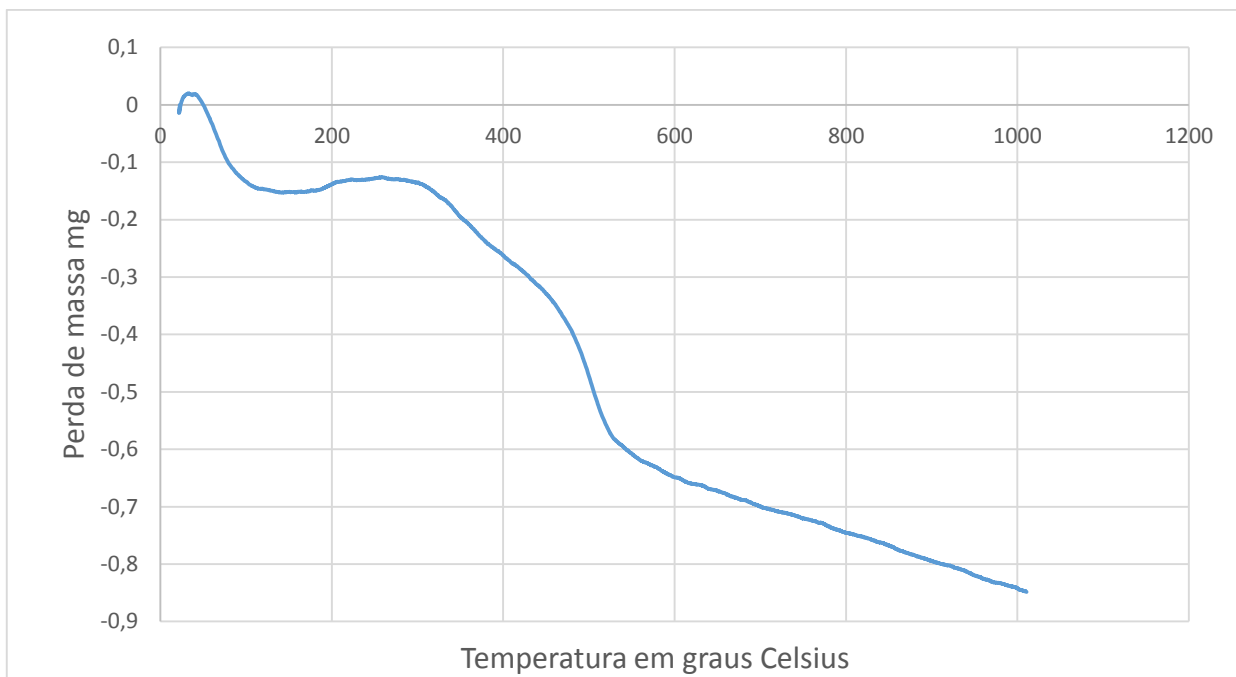


Figura 33. Gráfico referente a perda de massa das amostras secas.

Esta análise, como mostra a figura 33, apresenta a perda de massa da amostra pura referente a perda de água estrutural no primeiro pico endotérmico, entre 30°C a 100°C, e o gráfico apresenta outro pico do mesmo tipo em aproximadamente 500°C, devido a perda de hidroxilas (OH^-), que foram transformadas em vapor d'água. Vide figura 33.

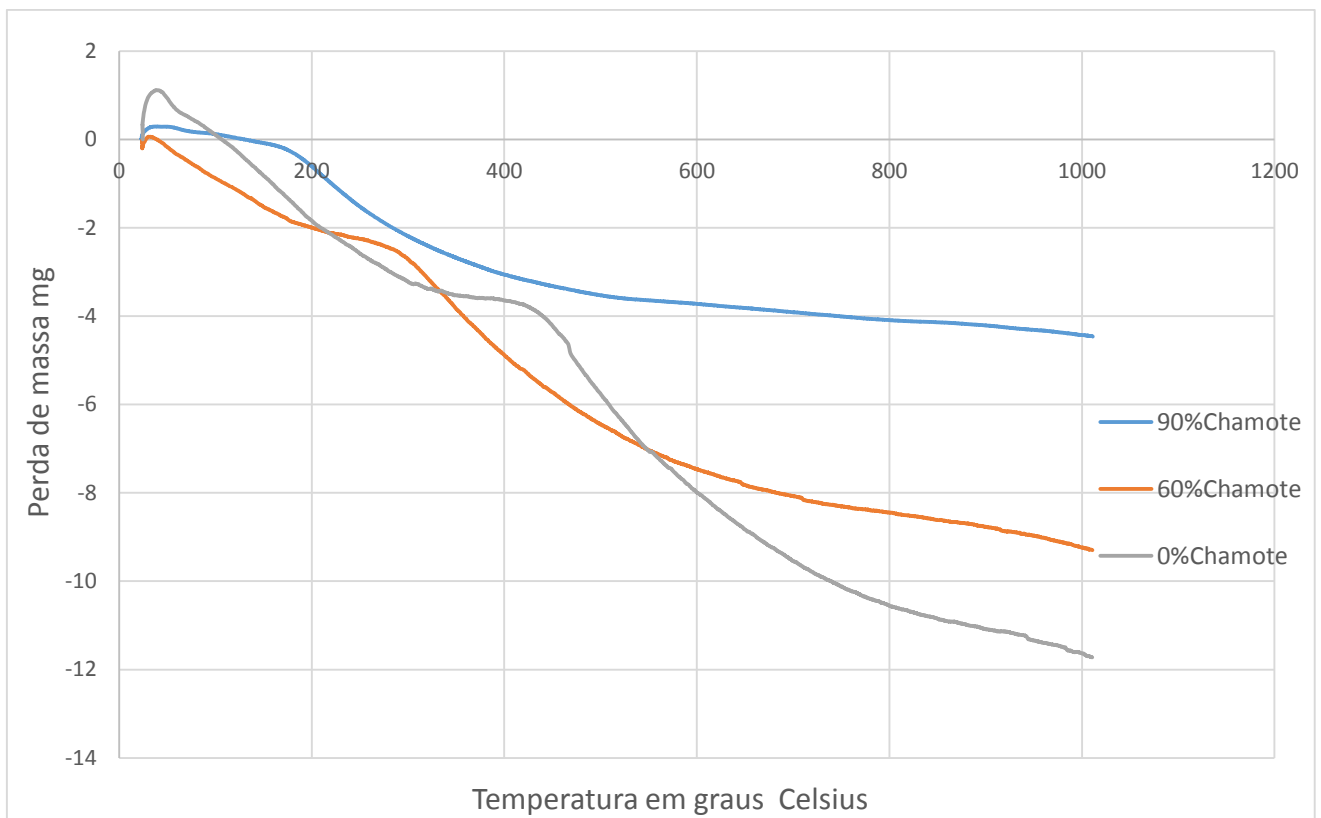


Figura 34. Gráfico referente a perda de massa das amostras queimadas.

Neste gráfico, figura 34, é avaliado o efeito da adição de chamote nas amostras, uma vez que quanto maior essa porcentagem menor é sua perda de massa, devido ao fato de não haver uma boa plasticidade, ou seja, não possui elementos argilosos, pois já foram eliminados.

6.3) Caracterização mecânica

Os seguintes resultados tem como objetivo avaliar o efeito da adição de chamote, quanto maior essa porcentagem maior a sua fragilidade, entretanto isso não é válido para o contrário, veremos como o chamote pode ser benéfico mais adiante. A figura 35 está de acordo com a tabela 4 que mostra a resistência à compressão nas amostras secas, enquanto a figura 36 está relacionada a tabela 5 se referindo a resistência à compressão nas amostras queimadas.

Tabela 4. Média da compressão das amostras secas

Média dos Resultados das amostras secas em 110°C	
Porcentagem de Resíduo	Tensão (N)
0%	497,831
1%	413,675
5%	544,239
10%	412,398
20%	413,453
30%	362,712
40%	347,050
50%	323,801
60%	236,259
70%	156,584
80%	125,514
90%	88,277

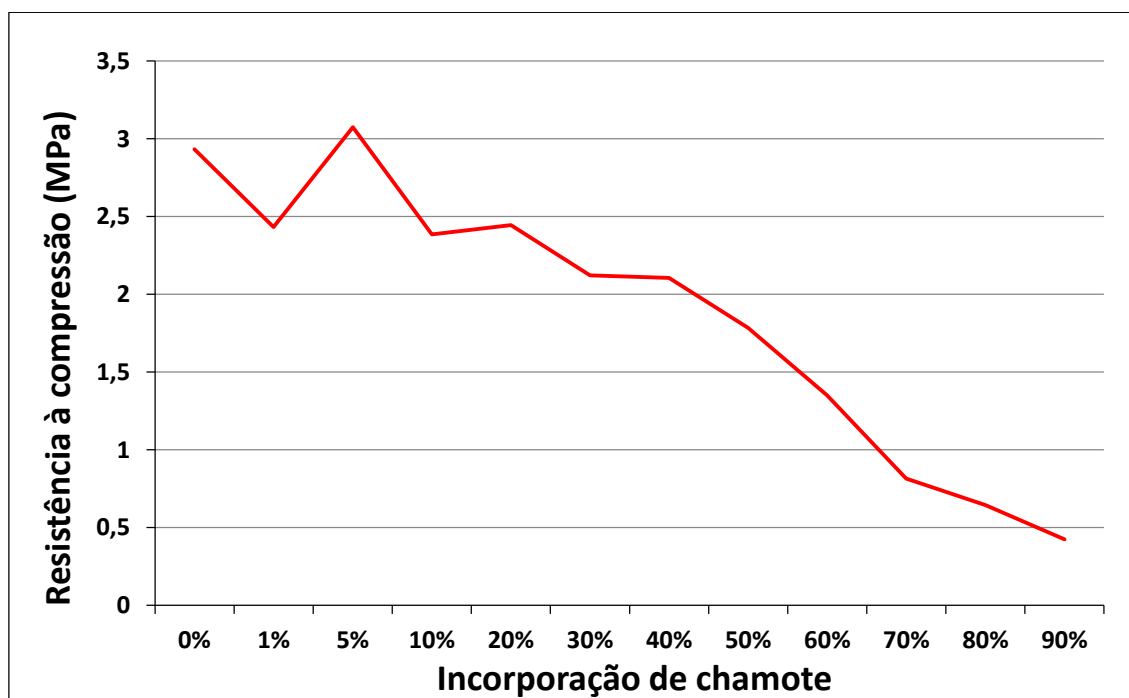


Figura 35. Ensaio de compressão das amostras secas.

Tabela 5. Média da compressão das amostras queimadas

Média dos Resultados das amostras queimadas em 905°C	
Porcentagem de Resíduo	Tensão (kN)
0%	1018,867
1%	1149,653
5%	1139,106
10%	1130,051
20%	867,774
30%	628,617
40%	544,239
50%	482,010
60%	396,577
70%	299,174
80%	273,174
90%	116,284

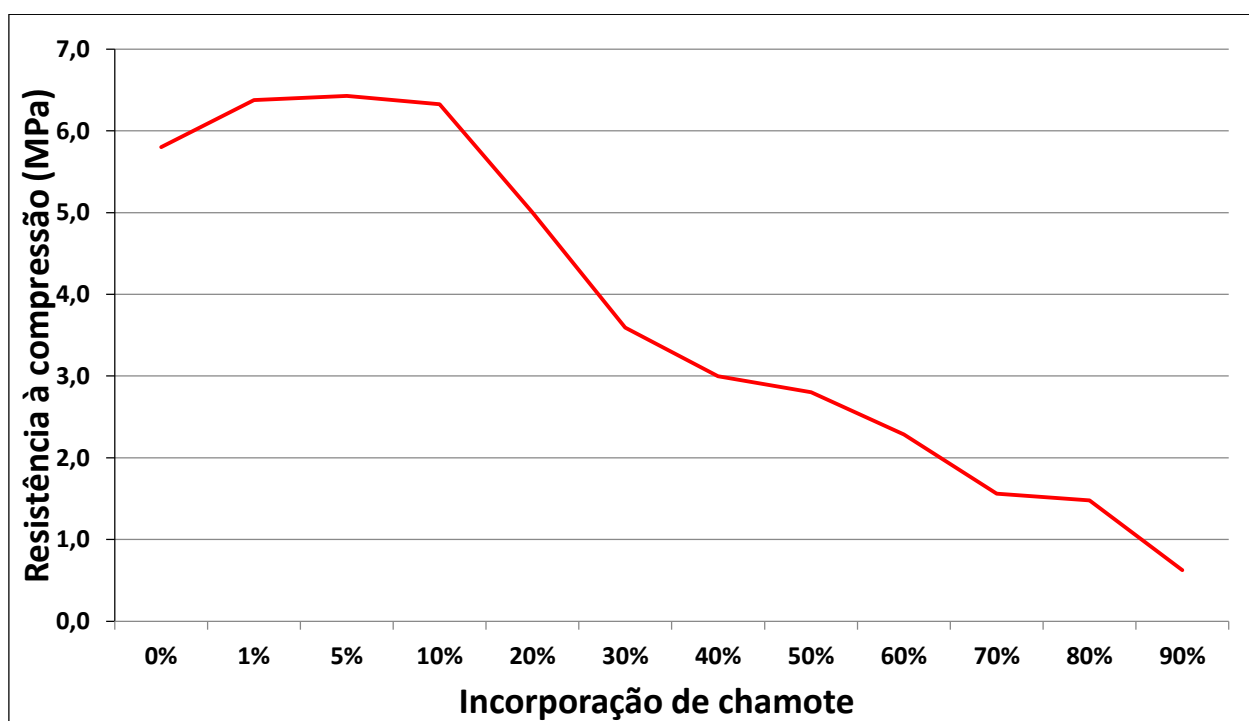


Figura 36. Ensaio de compressão nas amostras queimadas.

A partir destes gráficos 35 e 36 é possível determinar que a adição de chamote à matéria-prima traz efeitos benéficos, caso esta incorporação esteja com teores dentre 5 a 10%. Este fenômeno pode ser explicado pelo aumento do grau de empacotamento que o chamote gera, uma vez que a união de partículas grandes gera espaços vazios, e esta porosidade pode ser muito bem preenchida pela argila natural que tem tamanhos de partículas menores em relação ao chamote, aumentando a sua densidade. Enquanto altos valores de chamote, mostra uma elevada fragilidade do material, uma vez que apresenta um alto índice de porosidade, levando a baixa resistência a compressão. A figura 37 é capaz de mostrar como estão dispostas as partículas.

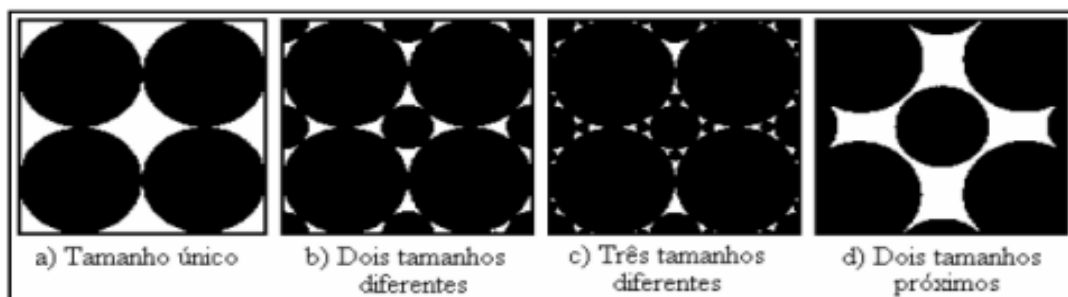


Figura 37. Representação do empacotamento das partículas.

7) CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise e a interpretação dos resultados dos ensaios, das diferentes misturas estudadas neste trabalho, possibilitam destacar as seguintes conclusões:

Caracterização mineralógica:

Possui em maior quantidade o Quartzo, por ser uma argila extremamente arenosa, com característica de alta fragilidade.

Resistência Mecânica:

A resistência mecânica se intensificou com o aumento da temperatura para fazer o tratamento térmico do material, e também a adição de chamote teve fator significativo para melhorar a sua densidade.

Absorção de água, Porosidade Aparente e Densidade Aparente:

A absorção de água apresentou valores pequenos entre 5 à 10% em relação a adição de chamote com isso a densidade aparente foi elevada, fato que justifica a melhoria da resistência mecânica nesses valores.

Teor de chamote:

Dentre as proporções estudadas, a adição de chamote que mais pareceu satisfatória esta na faixa de 3 à 10%, pelo fato de apresentar as melhores propriedades mecânicas, e menor absorção de água nas amostras queimadas.

8) SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, sugere-se, acerca da utilização de chamote para a produção de blocos cerâmicos, as seguintes pesquisas futuras:

- Estudo da incorporação de chamote com teores entre 3 a 10%.
- Estudo da viabilidade econômica da incorporação de chamote em massas cerâmicas.
- Estudo da granulometria ideal de chamote, em termos de tamanho de partículas, incorporando-as como um pó fino.

9) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SANTOS, P. de S. Tecnologias de Argilas Aplicadas às Argilas Brasileiras. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1975. v.1.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS CERÂMICAS – ANICER. Disponível em <http://www.anicer.com.br>. Acesso em 16/11/2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABC. Disponível em <http://www.abcceram.org.br>. Acesso em 08/10/2013.

VIEIRA, C. M. F.; SOUZA, E. T. A.; MONTEIRO, S. N. Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha. 2004.

Matos, Jivaldo do Rosário, Análise térmica aplicada. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, São Paulo, vol. 43, n. 3, jul/2007.

“Ciência e Engenharia de Materiais – uma Introdução”, W. D. Callister Jr., 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. Fundamentos de Física. Vol. 4: Ótica e Física Moderna. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (2013).