

DESENVOLVIMENTO DE ARGILA EXPANDIDA A PARTIR DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA

Karina Farias de Oliveira¹

Morgana Nuernberg Sartor Faraco²

Resumo: A indústria cerâmica gera considerável quantidade de resíduo praticamente em todas as etapas do processo de fabricação. Os resíduos que mais são gerados no processo é o pó de retífica, lodo da estação de tratamento de efluente (ETE) e o lodo do polimento de porcelanato (RPP). Por isso, sugere-se identificar as suas características para prever a possibilidade de usar esses resíduos como matéria-prima em outros processos. Um setor que consegue absorver esses resíduos é o da construção civil, na fabricação de agregado leve como a argila expandida. Nesse sentido, esta pesquisa tem como objetivo principal, desenvolver argila expandida a partir de resíduos da indústria cerâmica. Para isso, foram coletados o lodo da ETE, o pó de retífica e o RPP. Em seguida os resíduos foram caracterizados com ensaios físicos e químicos. Posteriormente foram desenvolvidas dez formulações com os parâmetros de 0% a 20% para o pó de retífica, 20% a 40% para o lodo da estação de tratamento de efluentes e de 60% a 80% para o lodo do polimento de porcelanato. O tratamento térmico foi realizado nas temperaturas de 1160 °C e 1190 °C. Foi constatado o potencial de fabricação de argila expandida na formulação 5 (10% pó de retífica, 20% lodo da ETE e 70% de RPP) a 1190 °C. Os corpos de prova dessa formulação obtiveram expansão à queimado de 15%, absorção de água de 1,49% e densidade aparente à queimado de 0,64 g/cm³. A análise morfológica apontou camada externa vitrificada e cama interna porosa, características típicas de argila expandida. Essa formulação foi escolhida para a fabricação da argila expandida em escala laboratorial. Em uma visão geral dos resultados, nas condições realizadas nessa pesquisa, o lodo da ETE, o pó de retífica e o RPP substituíram toda a argila in natura do processo sem alterar as características da argila expandida final.

Palavras-Chave: Cerâmica. Reaproveitamento. Resíduos. Argila expandida.

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, o aumento dos grandes centros urbanos e da população acarretou o desaparecimento de alguns recursos naturais e outros

¹ Graduando em Engenharia Química – UniSATC. E-mail: karinafariasoliveira@gmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: morgana.sartor@satc.edu.br

ficaram à beira de serem extintos. Com isso, percebeu-se a necessidade e a importância de reaproveitar os resíduos do processo fabril como forma alternativa dos recursos extraídos da natureza.

A indústria cerâmica gera considerável quantidade de resíduo praticamente em todas as etapas do processo de fabricação. Contudo, as maiores quantidades são geradas nos setores de preparação de esmalte, preparação de massa, na linha de esmaltação e no polimento. Todo esse efluente líquido gerado na fábrica é encaminhado para a estação de tratamento de efluentes, onde o mesmo passa por um processo de filtro-prensagem dando origem ao resíduo sólido conhecido como lodo cerâmico. Outros resíduos são produzidos como as cinzas provenientes da queima do carvão nas fornalhas e o pó da retífica a seco.

Segundo ABNT (2004) o lodo cerâmico é principalmente constituído de sílica, alumina e alguns metais pesados e, por esta razão, sendo classificado como perigoso segundo a Norma ABNT-NBR 10004. A alta produção de resíduos, faz com que a indústria tenha um gasto significativo com transporte e locação de aterros para depositar e tratar esses tipos de resíduos.

A argila expandida é um agregado leve com diversas aplicações, como enchimento leve de lajes e telhados, substituição de agregados na produção de concreto, paisagismo e sistemas de isolamento térmico (ROSSIGNOLO, 2009). Alguns estudos, já viabilizam a produção de argila expandida a partir do reaproveitamento dos resíduos industriais, em contra partida há a diminuição da extração da matéria prima da natureza e a criação de um produto com diferentes propriedades do produto já existente no mercado.

A indústria e a construção civil contribuem para o desenvolvimento econômico e social de uma região, porém em seus processos de fabricação se vê alta dependência dos recursos naturais e alta geração de resíduos. O ciclo sustentável para os dois setores em âmbitos sociais, econômicos e ambientais é um grande desafio, porém se vê oportunidades de pesquisas e estudos. Diante dessa problemática, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver argila expandida a partir de resíduos cerâmicos a fim de eliminar a utilização de argila in natura do processo.

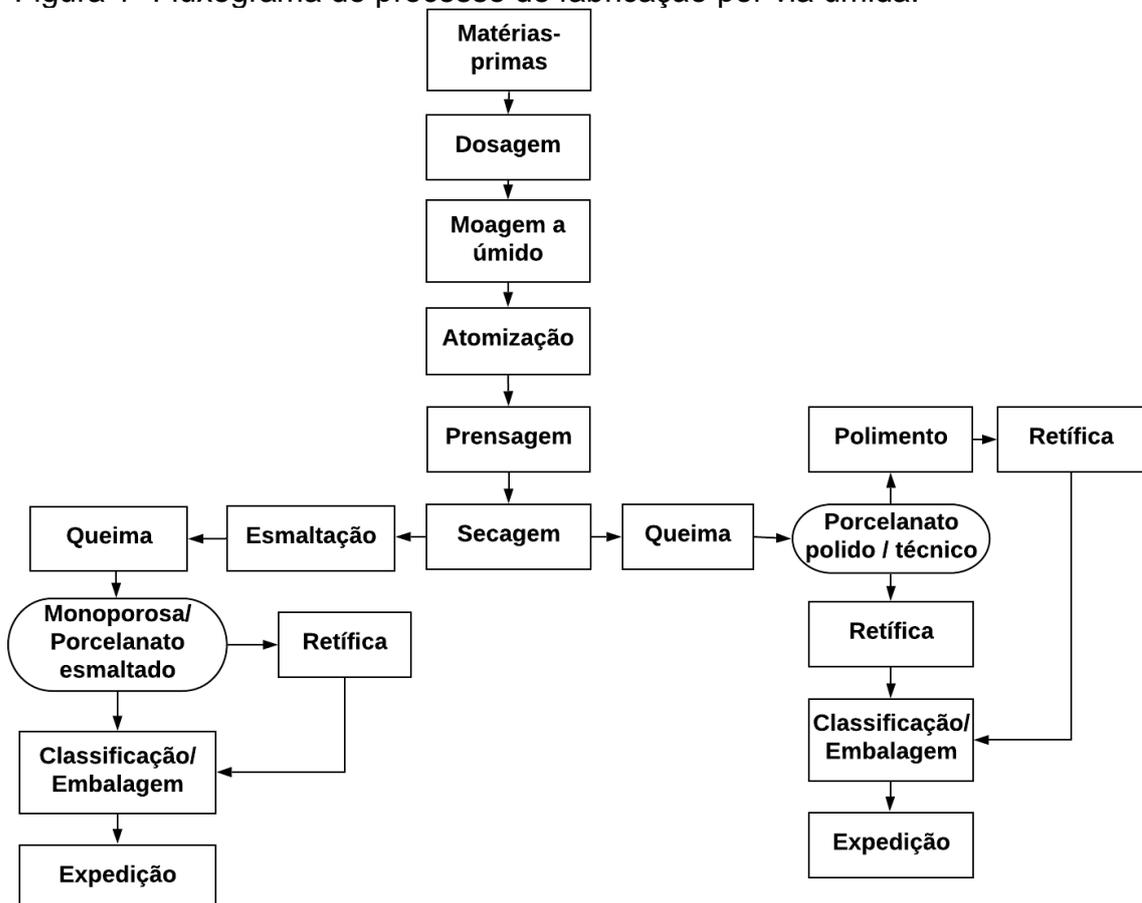
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as revisões de literatura necessárias para o embasamento do tema desta pesquisa.

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

A Fig. 1 apresenta o processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, da monoporosa e do porcelanato.

Figura 1- Fluxograma do processo de fabricação por via úmida.



Fonte: Do autor (2020)

Na etapa de dosagem é determinado as quantidades relativas das matérias-primas e aditivos que farão parte da composição de uma massa formulada. A moagem tem por objetivo a cominuição e a homogeneização das matérias-primas. A suspensão que se forma logo após a moagem, com adição da água, é chamada de barbotina. A atomização corresponde à evaporação parcial da água contida na

barbotina simultaneamente com a formação de aglomerados esféricos chamado de “pó atomizado”.

A prensagem é a etapa em que a peça cerâmica ganha o seu formato. Na secagem, ocorre a evaporação de umidade residual da massa, da ordem de 4 a 7% e simultaneamente, verifica-se um aumento de resistência mecânica da peça cerâmica. A esmaltação é dividida na aplicação de duas suspensões o engobe e o esmalte. O engobe é a primeira camada, que tem como objetivo principal impermeabilizar a peça e tentar amenizar qualquer irregularidade que tenha no suporte do revestimento. O esmalte é a segunda camada, que tem como objetivo o acabamento e agregar características superficiais ao produto acabado. A decoração hoje é feita a partir de uma impressora digital que funciona com a tecnologia por impressão a jato de tinta.

A queima é a etapa onde os produtos adquirem suas propriedades finais. O tratamento térmico ocorre entre as temperaturas de 1050 °C a 1250 °C em fornos contínuos. O polimento é uma etapa que acontece quando a tipologia do material for um porcelanato polido. Essa etapa ocorre em um equipamento composto por várias cabeças polidoras formada por material abrasivo, geralmente carbeto de silício, que em contato com a peça em alta rotação com velocidade controlada e juntamente com água para limpar a peça em polimento e refrigerar a mesma.

O processo de retífica acontece quando o produto for retificado, isso significa que a placa cerâmica perde em média, 5 mm de cada lado da placa. O processo de retificação ocorre depois da queima e é descrito pela interação de grãos abrasivos na superfície de um rebolo com o material da placa cerâmica a ser retificada.

3.2 RESÍDUO SÓLIDO INDUSTRIAL

Segundo a RESOLUÇÃO CONAMA nº 313, (2002, p. 659):

Todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso, quando contido, e líquido, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento

de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

A partir de agosto de 2010, baseado no conceito de responsabilidade compartilhada, o setor privado ficou responsável pelo gerenciamento ambientalmente correto dos resíduos sólidos, pela sua reincorporação na cadeia produtiva e pelas inovações nos produtos que tragam benefícios socioambientais, sempre que possível. Se manejados adequadamente, os resíduos sólidos adquirem valor comercial e podem ser utilizados em forma de novas matérias-primas ou novos insumos.

Os resíduos sólidos analisados e utilizados neste estudo são:

- Resíduo de polimento de porcelanato (RPP);
- Lodo de tratamento de efluentes;
- Pó de retífica;

3.2.1 Resíduo do Polimento de Porcelanato (RPP)

O resíduo do polimento de porcelanato (RPP) é constituído por uma mistura do material cerâmico oriundo do polimento do porcelanato, juntamente do material abrasivo desprendido durante o processo de polimento e uma fração pequena de resíduo de massa de porcelanato. Este efluente líquido será disposto em canaletas e posteriormente levados a estação de tratamento de efluentes, com o auxílio de produtos químicos e do filtro prensa, o resíduo líquido torna-se resíduo sólido conhecido como torta ou lodo.

O material abrasivo utilizado durante o polimento é geralmente composto por partículas de carbeto de silício (SiC) aglomerados por cimentos à base de cloretos magnesianos de coloração branca, este é o motivo da coloração mais esbranquiçada do resíduo de polimento em relação ao resíduo da estação de tratamento da matriz. O RPP não pode ser utilizado no processo de fabricação, pois o carbeto de silício presente no mesmo decompõe-se em atmosfera oxidante gerando CO₂ e uma fina camada de SiO₂, provocando assim poros o que não é desejado no porcelanato por conta da sua baixa absorção.

Estima-se que a média de geração de resíduo de polimento na fábrica da Eliane Porcelanato em Criciúma, Santa Catarina, seja de 950 toneladas ao mês. O

RPP gerado é destinado ao mercado cimentício para a fabricação de cimentos, porém nem todos os meses do ano esse resíduo é recolhido na empresa pois, depende muito do seu consumo na empresa de cimentícios. A empresa Eliane fica responsável por arcar com os custos do transporte do RPP até a indústria cimentícia. Uma possível destinação efetiva para as sobras de polimento de porcelanato é a reutilização em produção de cerâmicas celulares, as cerâmicas expandidas.

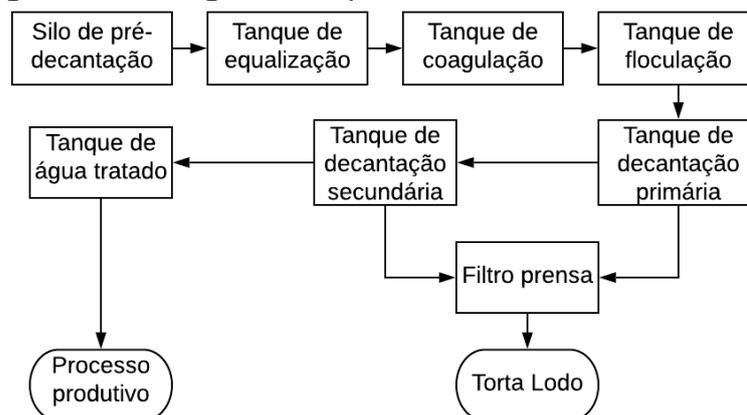
3.2.2 Lodo do tratamento de efluentes

A geração dos resíduos deve-se à limpeza de equipamentos, sobras de produção e, no caso a maior parte é resíduos provenientes da central de massa. Esses efluentes são depositados em canaletas nas fábricas e posteriormente vão para o tratamento por meio de tubulações.

Os efluentes são tratados em ETE (Estação de Tratamento de Efluentes), de onde resulta o lodo que, após prensado em filtro-prensa, é compactado em blocos chamados comumente de lodo ou apenas torta. Estima-se que a média de geração deste resíduo em 2019 na Eliane Matriz em Cocal do Sul, Santa Catarina foi de 815 toneladas ao mês. Esse resíduo é destinado para a produção de cerâmica vermelha e a empresa Eliane fica responsável de arcar com os custos de transporte do lodo até as indústrias.

A Fig.3 apresenta o fluxograma do processo da estação de tratamento de efluentes da empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos.

Figura 3 - Fluxograma do processo da ETE.



Fonte: Do autor (2020).

O processo se inicia com a decantação parcial dos sólidos do efluente no primeiro tanque. Na etapa de coagulação e floculação, são adicionados Cal, Sulfato e polímero que são produtos químicos utilizados para a decantação dos sólidos que ainda não decantaram na primeira etapa. O tanque de decantação primária e secundária servem para retirar todo o material sólido que decantou depois da adição dos produtos químicos. O material sólido decantado segue para o filtro prensa, tornando-se assim a torta conhecido como lodo. A água tratada retorna para o processo produtivo onde é preparado a barbotina e o pó atomizado.

O lodo da ETE não pode ser reutilizado no processo, pelo fato que os efluentes que saem dos lavadores de gases que contém enxofre são destinados a mesma estação de tratamento dos outros resíduos e com isso se junta ao lodo final. O enxofre pode causar defeitos no processo de fabricação como problemas na floculação da barbotina como também pode causar furos no esmalte das placas de revestimentos cerâmicos de monoroposa.

3.2.3 Pó de retífica

O equipamento de retífica a seco surgiu com o intuito de agregar valor comercial e estético nas placas cerâmicas. Depois da queima, as placas cerâmicas são encaminhadas para a retífica onde são retirados, em média, 5 mm de cada lado do mesmo. Essa tecnologia permite que as placas, encontradas em cerâmica ou porcelanato, tenham tamanho igual.

O processo de retificação é descrito pela interação de grãos abrasivos na superfície de um rebolo com o material da placa cerâmica a ser retificada. O desgaste das laterais da placa cerâmica, acaba gerando um resíduo muito fino chamado de pó de retífica. Este resíduo é basicamente constituído pela massa cerâmica, engobe e esmalte depois de queimados. O resíduo é separado pelo filtro manga e depois depositado em caçambas no exterior da fábrica. Estima-se que a média de geração deste resíduo em 2019 na Eliane II em Cocal do Sul, Santa Catarina foi de 650 a 800 toneladas ao mês.

O pó de retífica é reutilizado no composto que contém mais as quebras cruas e queimadas. Esse composto retorna para o processo de fabricação na etapa da dosagem de matérias-primas. O percentual utilizado de pó de retífica é baixo pelo

fato da fórmula desse composto já está saturada dos outros resíduos e em função de limitações técnicas no uso deste composto na formulação de massa.

3.3 ARGILA EXPANDIDA

A argila expandida destaca-se por ser um agregado leve que pode ser utilizado na construção civil como agregado leve para concretos e enchimentos leves. Na Europa, este material se destaca por conseguir absorver resíduos em sua produção e assim contribuir com o meio ambiente. A Fig. 4 apresenta o fluxograma de processo de fabricação da argila expandida.

Figura 4 - Fluxograma do processo de fabricação da argila expandida.



Fonte: Adaptada de Melo (2000, p.64).

A argila expandida é obtida a partir do aquecimento de alguns tipos de argilas com a temperatura próxima a 1200 °C. No processo de forno rotativo, a massa de argila se funde formando uma massa viscosa e a outra parte se decompõe liberando gases, derivando um agregado com uma camada de proteção externa e o interior poroso.

Porém não são todos os tipos de argilas que podem ser utilizadas no processo de forno rotativo. A argila precisa ter um teor de fundentes adequado para formar uma camada de proteção externa para que os gases não escapem e assim ocorra o inchamento da argila. Os agregados fabricados por esse método costumam apresentar granulometria variada, formato arredondado e interior formado por uma massa esponjosa microcelular.

A Fig. 5 mostra a argila expandida utilizada em jardinagem e para isolamento térmico.

Figura 5- Argila expandida



Fonte: Cinexpan (2020).

A argila expandida é utilizada em indústrias têxteis, jardinagem e paisagismo. Nos últimos anos por se tratar de um agregado leve tem ganhado espaço na construção civil, já que possui uma massa específica baixa sendo possível utilizar em concretos leves, reduzindo assim o esforço físico dos trabalhadores e ajudando na parte de isolamento acústico e térmico. Entretanto para a utilização em concretos estruturais, a absorção de água pelo agregado influencia no produto final.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste item são apresentados os materiais e métodos utilizados para a execução do procedimento experimental deste trabalho.

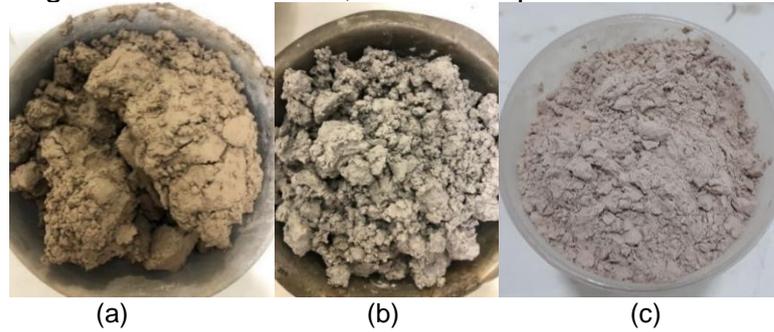
3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho estão descritos a seguir.

3.1.1 Resíduos

O lodo da ETE (a) e o RPP (b) são armazenados em box após passar pelo processo de prensagem no filtro prensa. O pó da retífica (c) é armazenado no pátio da empresa depois de ser descartados em caçamba pela captação de pó. A Fig. 6 representa os resíduos.

Figura 6- Lodo da ETE, o RPP e o pó de retífica.

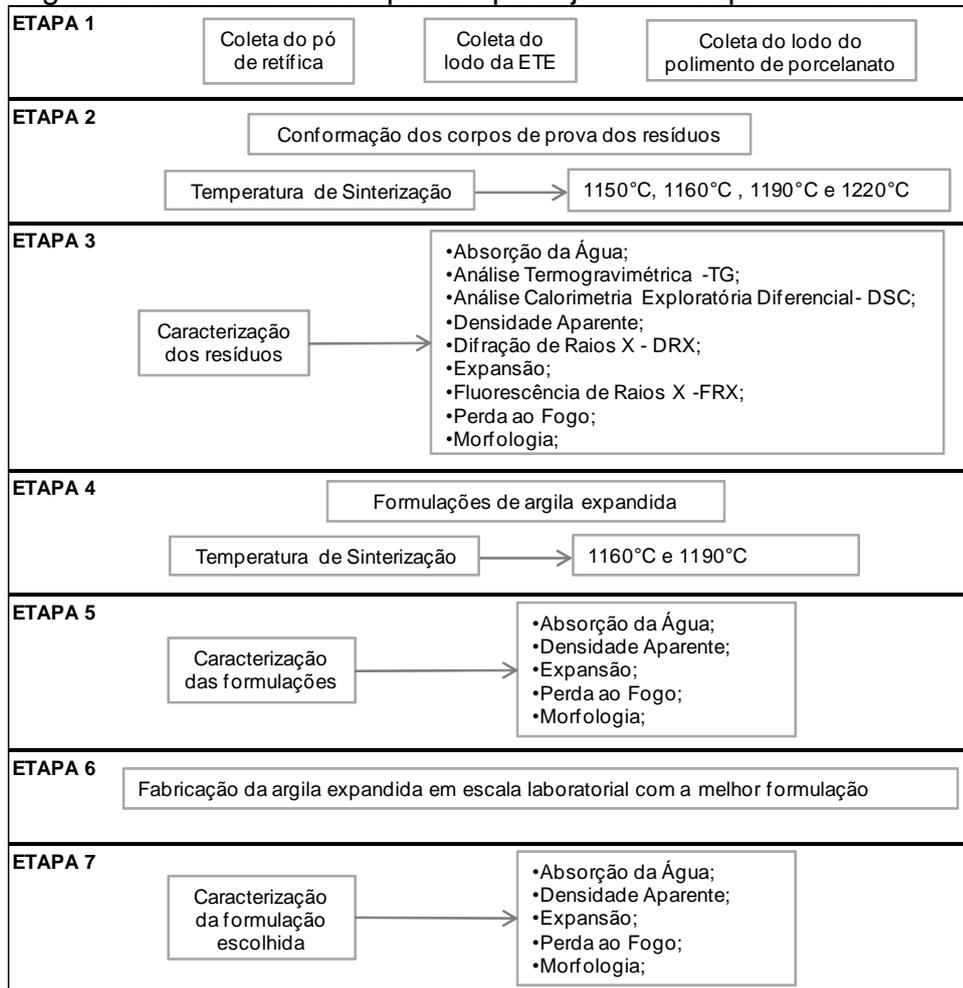


Fonte: Do autor (2020)

3.2 MÉTODOS

Na Fig. 7 segue o resumo de todo o planejamento experimental proposto para esta pesquisa.

Figura 7- Resumo das etapas do planejamento experimental.



Fonte: Do Autor. (2020)

3.2.1 Etapa 1: Amostragem dos materiais

Os lodos foram coletados nos boxes de matéria-prima onde são armazenados depois de sair da ETE. O pó da retífica que não passa por nenhum processo de tratamento, foi coletado da caçamba onde é armazenado depois de ser filtrado pelo filtro manga. Todos os resíduos foram coletados em março de 2020.

3.2.2 Etapa 2: Preparo dos corpos de prova e sinterização dos resíduos

Esta etapa tem como objetivo delimitar os máximos e mínimos do planejamento de mistura. Para a caracterização dos resíduos foi necessário secar cada resíduo na estufa a 120 °C por 24 horas, destorroar, moer em um britador e armazenar os mesmos em sacos plásticos para ser utilizados em todo o projeto. Com os resíduos já preparados, foi pesado com auxílio da balança marca PIZZOLO, modelo AD 5002 9 amostras de cada resíduo com 25 gramas cada. Os corpos de provas foram prensados a uma pressão específica de 150 kgf/cm² em uma prensa hidráulica marca SERVITECH, modelo MIGNON-SSN/EA, com 7% de umidade. O pó de retífica por não ser um material plástico precisou utilizar um aditivo à base de polímero de acetato de vinila (PVA) diluído 10% em água para dar liga e conseguir a compactação do mesmo.

Os corpos de provas foram secos na estufa de laboratório marca SHAMMATHERM, modelo SH-2 por 48 horas a 120 °C e queimados no forno à rolo de laboratório marca SERVITECH, modelo CT-094 em quatro temperaturas: 1150 °C, 1160 °C, 1190 °C e 1220 °C com o ciclo de 30 minutos.

3.2.3 Etapa 3: Ensaio de Caracterização dos Resíduos

A etapa 3 consiste na caracterização dos resíduos em ensaios físicos, químicos e térmicos. No Qd. 1 segue o descritivo de cada ensaio.

Os ensaios de perda ao fogo, densidade aparente, expansão e absorção da água foram feitos conforme os procedimentos internos da empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos.

Quadro 1- Ensaio de caracterização dos resíduos.

Ensaio	Aplicação	Lodo da ETE	RPP	Pó de retífica
Fluorescência de Raios - FRX	Identificação dos elementos químicos presentes	x	x	x
Perda ao Fogo	Avaliação do comportamento térmico	x	x	x
Densidade Aparente à Queimado	Determinação da relação entre massa e volume	x	x	x
Difração de Raios X- DRX	Identificação das fases cristalinas	x	x	x
Análise Termogravimétrica -TG e Análise Calorimetria Exploratória Diferencial- DSC	Avaliação do comportamento térmico como perdas de massa e reações que ocorrem	x	x	x
Expansão de Queima	Avaliação do tamanho antes e depois da queima	x	x	x
Absorção de água	Avaliar a quantidade de poros	x	x	x
Morfologia da estrutura	Avaliar as características externas e interna	x	x	x

Fonte: Do autor (2020)

3.2.3.1 Fluorescência de Raios X- FRX

Através do FRX foi possível identificar os elementos presentes através dos óxidos de forma quantitativa das amostras de resíduos. Os resíduos foram preparados e umidificados com 7% na etapa 2. Foram prensados na prensa hidráulica marca Marconi, modelo MA 098/CPEL um corpo de prova de cada resíduo com 25 gramas cada com pressão específica de 800 kgf/cm² e deixados secar na estufa marca SHAMMATHERM, modelo SH-2 por 48 horas.

Essas amostras foram analisadas no espectrômetro marca OXFORD INSTRUMENTS X-SUPREME, modelo X800 localizado no DETEC- Departamento de Engenharia e Tecnologia Cerâmica da empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos Ltda.

3.2.3.2 Perda ao fogo

Na análise de perda ao fogo foi possível identificar a perda de massa do lodo da ETE, do RPP e do pó de retífica quando submetidos ao tratamento térmico. Os corpos de prova foram pesados antes e após a queima utilizando a balança marca PIZZOLO, modelo AD 5002.

Os cálculos foram realizados conforme a Eq. (1):

$$PF(\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

PF = Perda ao fogo (%)

P_i = Peso inicial do corpo de prova (g)

P_f = Peso final do corpo de prova (g)

3.2.3.3 Densidade Aparente à Queimado

O ensaio de densidade aparente (Dap) à queimado foi realizado com o método que utiliza água e um equipamento chamado de empuxímetro marca SERVITECH, modelo CT-12444/M. Este equipamento funciona com um recipiente contendo água assentado sobre uma balança de precisão, onde a amostra é submersa com o auxílio de uma haste de profundidade padronizada. A leitura da massa relativa à força de empuxo foi realizada sobre temperatura controlada por um termômetro. Esse ensaio foi realizado logo após ser feito a absorção de água.

A Dap à queimado foi calculada pela seguinte Eq. (2):

$$Dap = \frac{P_1}{(P_1 - P_2)} \cdot dL \quad (2)$$

Onde:

Dap = Densidade aparente (g/cm³)

P₁ = Massa da peça antes da absorção de água (g)

P₂ = Massa da peça submersa (g)

dL = Densidade da água a 25°C (0,9972 g/cm³)

Como o resíduo RPP e todas as formulações ficaram com a densidade menor que da água, foi preciso fazer o cálculo da densidade teórica. Os cálculos foram realizados utilizando as equações Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5):

$$V_{cilindro} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3)$$

Onde:

$V_{cilindro}$ = Volume do corpo de prova (cm³)

r = Raio do corpo de prova (cm)

h = Altura do corpo de prova (cm)

$$V_{esfera} = 4 \cdot \pi \cdot r^3 / 3 \quad (4)$$

Onde:

V_{esfera} = Volume da esfera (cm³)

r = Raio da esfera (cm)

$$d = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Onde:

d = Densidade aparente (g/cm³)

V = Volume do corpo de prova (cm³)

m = Massa do corpo de prova (g)

3.2.3.4 Difração de Raios X-DRX

O ensaio de DRX foi realizado para identificar os compostos cristalinos nas matérias-primas dos três resíduos utilizados no trabalho. O preparo das amostras foi por moagem em gral de ágata até todo o material ser passante em malha 200 mesh. Foi preparado 100 gramas de cada resíduo.

As amostras foram analisadas no laboratório LACAMI- Laboratório de Caracterização Microestrutural da SATC. O equipamento utilizado foi o difratômetro da marca SHIMADZU, modelo XRD 610 com os parâmetros de radiação incidente $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), aceleração de 40 kV e 30 mA, intervalo 2θ de 4 a 70° e velocidade de $2^\circ/\text{min}$.

3.2.3.5 Análise Termogravimétrica- TG e Análise Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC

A análise termogravimétrica permite avaliar a mudança de massa de um material em função da variação de temperatura em regime controlado (atmosfera e pressão). A calorimetria exploratória diferencial permite avaliar a diferença de energia (entalpias) fornecida à substância e um material referência, em função da temperatura enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura.

O preparo das amostras foi por moagem em gral de ágata até todo o material ser passante em malha 200 mesh. Foi preparado 10 gramas de cada resíduo. As amostras foram analisadas no laboratório LabValora- Laboratório de Valoração de Resíduos situado no IPARQUE. Os equipamentos utilizados foram a balança analítica marca SHIMADZU, modelo AUY 220 unibloc precisão de 0,1 mg e o analisador térmico simultâneo marca NETZSCH, modelo STA 449 F3 Júpiter. As amostras foram submetidas a um tratamento térmico sob uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até a temperatura de 1200°C , sob atmosfera de Ar Sintético ($40 \text{ mL}/\text{min}$).

3.2.3.6 Expansão de Queima

Na cerâmica é normal ocorrer uma diminuição no tamanho da placa após a queima, porém o objetivo do trabalho é fazer com que o corpo de prova tenha aumento de volume e conseqüentemente aumento no seu tamanho. Os corpos de prova foram medidos com auxílio de um paquímetro digital marca KINGTOOLS, modelo KINGTOOLS-502-150BL, antes e após a queima dos mesmos.

Os cálculos foram realizados conforme a Eq. (6):

$$EP (\%) = \frac{\phi_f - \phi_i}{\phi_i} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

EP (%) = Percentual de expansão de queima (%)

ϕ_i = Diâmetro inicial (mm)

ϕ_f = Diâmetro final (mm)

3.2.3.7 Absorção de água

A análise foi realizada conforme a norma ABNT NBR ISO 10545-3.

3.2.3.8 Morfologia da estrutura

Este ensaio se baseia na análise de imagem (fotos) da estrutura interna do corpo de prova de cada formulação para verificar a formação de poros. Neste ensaio foi utilizado microscópio digital marca HARDLINE, modelo 1000X.

3.2.4 Etapa 4: Formulações, preparo dos corpos de prova e sinterização

As formulações foram estabelecidas através do software Statistica usando o planejamento de misturas, em que o mesmo mapeia a área das combinações dos três resíduos, com limites pré-estabelecidos. As restrições escolhidas estão descritas na Tab. 1

Tabela 1- Restrições utilizados no software Statistica.

Resíduos	Limite mínimo (%)	Limite máximo (%)
Pó de retífica	0	20
Lodo da ETE	20	40
RPP	60	80

Fonte: Do autor (2020)

Esses valores foram estabelecidos conforme o resultado da caracterização de cada resíduo com o objetivo de alcançar as características desejáveis para o produto final. Na Tab. 2 segue as formulações em estudo.

Tabela 2- Formulações de argila expandida.

Formulação	Pó de retífica (%)	Lodo ETE (%)	RPP (%)
1	20,00%	20,00%	60,00%
2	0,00%	40,00%	60,00%
3	0,00%	20,00%	80,00%
4	10,00%	30,00%	60,00%
5	10,00%	20,00%	70,00%
6	0,00%	30,00%	70,00%
7	6,66%	26,66%	66,66%
8	13,33%	23,33%	63,33%
9	3,33%	33,33%	63,33%
10	3,33%	23,33%	73,33%

Fonte: Do autor (2020)

Com as formulações estabelecidas, foram preparados 8 corpos de prova de cada formulação com 25 gramas cada, prensados a uma pressão específica de 150 kgf/cm² em uma prensa hidráulica marca SERVITECH, modelo MIGNON-SSN/EA, com 7% de umidade. A Fig.8 mostra o fluxograma de processo da fabricação dos corpos de prova.

Figura 8- Fluxograma de processo de fabricação dos corpos de prova.



Fonte: Do autor (2020)

Os corpos de provas foram secos na estufa marca SHAMMATHERM, modelo SH-2 por 48 horas a 120 °C queimados no forno à rolo marca SERVITECH, modelo CT-094, em duas temperaturas: 1160 °C e 1190 °C com ciclo de 30. Foi eliminado a temperatura de 1220 °C pelo fato do RPP expandir muito os corpos de prova a 1190 °C e com isso podendo ocorrer algum trancamento no forno do laboratório utilizado nesse estudo.

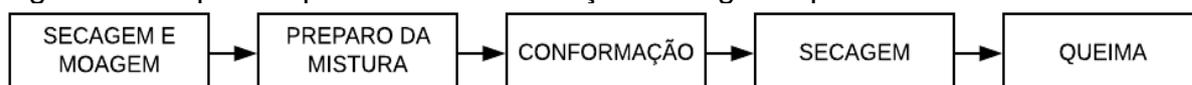
3.2.5 Etapa 5: Ensaios de caracterização das formulações

Os ensaios realizados nesta etapa foram perda ao fogo, densidade aparente à queimado, expansão de queima, absorção de água e morfologia da estrutura. Todos estes ensaios estão descritos na etapa 3.

3.2.6 Etapa 6: Fabricação da argila expandida

Com a análise dos resultados da etapa 5, foi possível identificar a melhor formulação para produzir a argila expandida. A produção em escala laboratorial consistiu nas seguintes etapas apresentadas na Fig. 9.

Figura 9 - Etapas do processo de fabricação de argila expandida em laboratório.



Fonte: Do autor (2020)

No preparo da mistura foi adicionado 25% do aditivo à base de polímero de acetato de vinila (PVA) diluído 10% em água para obter plasticidade suficiente para conformar manualmente as esferas de argila expandida. As esferas com o peso médio de 5 gramas cada, foram secas na estufa marca SHAMMATHERM, modelo SH-2 nos três primeiros dias a 70 °C e quarto dia a 120 °C por conta da alta umidade das mesmas. Foram queimadas a 1190 °C no forno mufla marca NOBERTHERM, modelo N 20/HR.

3.2.7 Etapa 7: Ensaios de caracterização da formulação escolhida

Os ensaios realizados nesta etapa foram perda ao fogo, densidade aparente à queimado, expansão de queima, absorção de água e morfologia da estrutura. Todos estes ensaios estão descritos na etapa 3.

A argila comercial CINEXPAN 2215 também foi caracterizada nos ensaios de densidade aparente à queimado e absorção de água.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na etapa de procedimento experimental.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Esse item da pesquisa apresenta os resultados obtidos da caracterização dos resíduos utilizados para a fabricação de argila expandida.

4.1.1 Ensaio Químico

A Tab. 3 apresenta os resultados obtidos da caracterização química obtida por Fluorescência de Raios X para o RPP, o lodo da ETE e o pó de retífica.

Tabela 3– Resultados de FRX dos resíduos.

Elemento	RPP (%)	Lodo ETE (%)	Pó de retífica (%)	Argila CINEXPAN (%)
Na₂O	2.103	1.787	1.514	0.61
MgO	5.472	1.817	1.253	3.26
Al₂O₃	21.775	29.207	22.753	18.02
SiO₂	66.197	54.918	66.119	63.19
P₂O₅	0.577	1.764	0.213	0.20
SO₃	0.212	1.270	0.129	-
Cl	0.472	0.131	<0.1	-
K₂O	0.996	1.292	2.294	4.91
CaO	0.956	3.988	2.247	0.64
TiO₂	0.289	0.828	0.563	0.92
Cr₂O₃	<0.1	<0.1	<0.1	-
Mn₂O₃	<0.1	<0.1	<0.1	-
Fe₂O₃	0.775	1.850	2.739	7.63
ZnO	<0.1	1.031	<0.1	-
SrO	<0.1	<0.1	<0.1	-

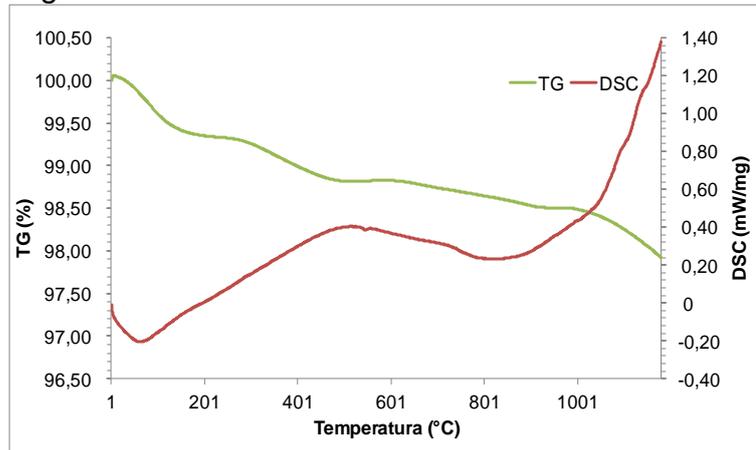
Fonte: Do autor (2020)

Conforme apresentado na Tab. 3 pode-se observar que em todos os resíduos, existem alta concentração de sílica (SiO₂), valores próximos a 60% para o Lodo ETE e valores próximos a 67% para o RPP e o pó de retífica. Outro composto que se destaca pela sua alta concentração é a alumina (Al₂O₃) com valores em torno de 20% para o RPP e o pó de retífica e em torno de 30% para o lodo ETE. Os demais constituintes ficaram abaixo de 6%. Comparando com a argila comercial os dois itens que tem maior percentual no mesmo são SiO₂ e Al₂O₃ e esses elementos se repetem em todos os três resíduos e apresentam valores bem próximos. A diferença que se nota é no elemento óxido de ferro (Fe₂O₃) que apresenta valores menores nos resíduos (RPP = 0,775%, lodo ETE = 1,850%, pó de retífica 2,739%)

em comparação a argila comercial (CINEXPAN = 7,63%).

A Fig. 10, Fig. 11 e Fig. 12 apresentam os resultados de análise térmica simultânea (DSC-TG) do RPP, lodo da ETE e do pó de retífica, respectivamente.

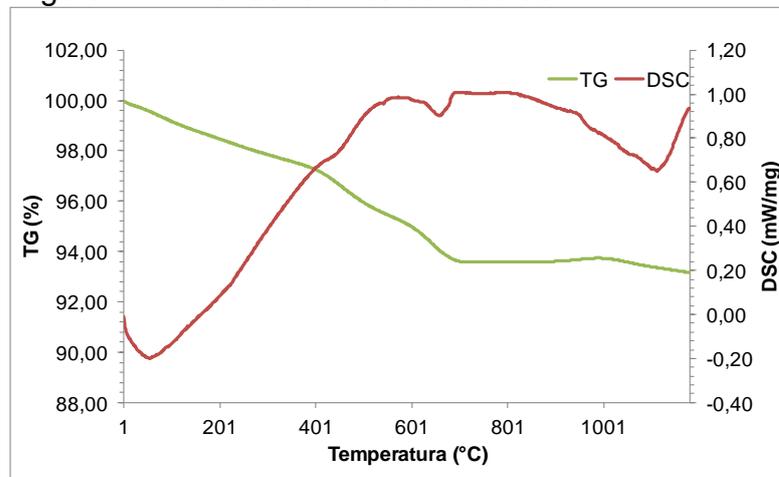
Figura 10– Análise térmica do RPP.



Fonte: Do autor (2020)

É possível identificar na Fig. 10 a análise calorimetria exploratória diferencial do RPP, representada pela linha em vermelho, com uma faixa exotérmica, aproximadamente de 200 a 500 °C. A perda de massa total foi de aproximadamente 1,5% a temperatura de 1000 °C, obtido na análise termogravimétrica, representada pela linha verde.

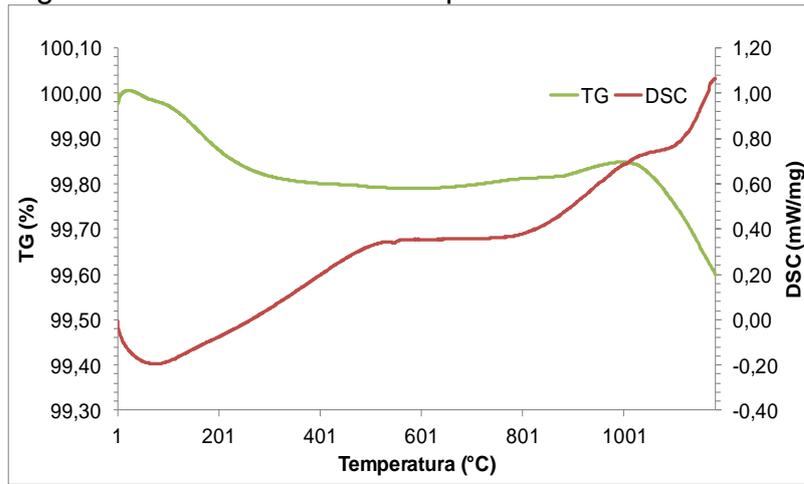
Figura 11– Análise térmica do lodo da ETE.



Fonte: Do autor (2020)

É possível identificar na Fig. 11 a análise calorimetria exploratória diferencial do lodo da ETE, representada pela linha em vermelho, com uma faixa exotérmica, aproximadamente de 200 a 600 °C. A perda de massa total foi de aproximadamente 6% a temperatura de 1000 °C, obtido na análise termogravimétrica, representada pela linha verde.

Figura 12– Análise térmica do pó de retífica.



Fonte: Do autor (2020)

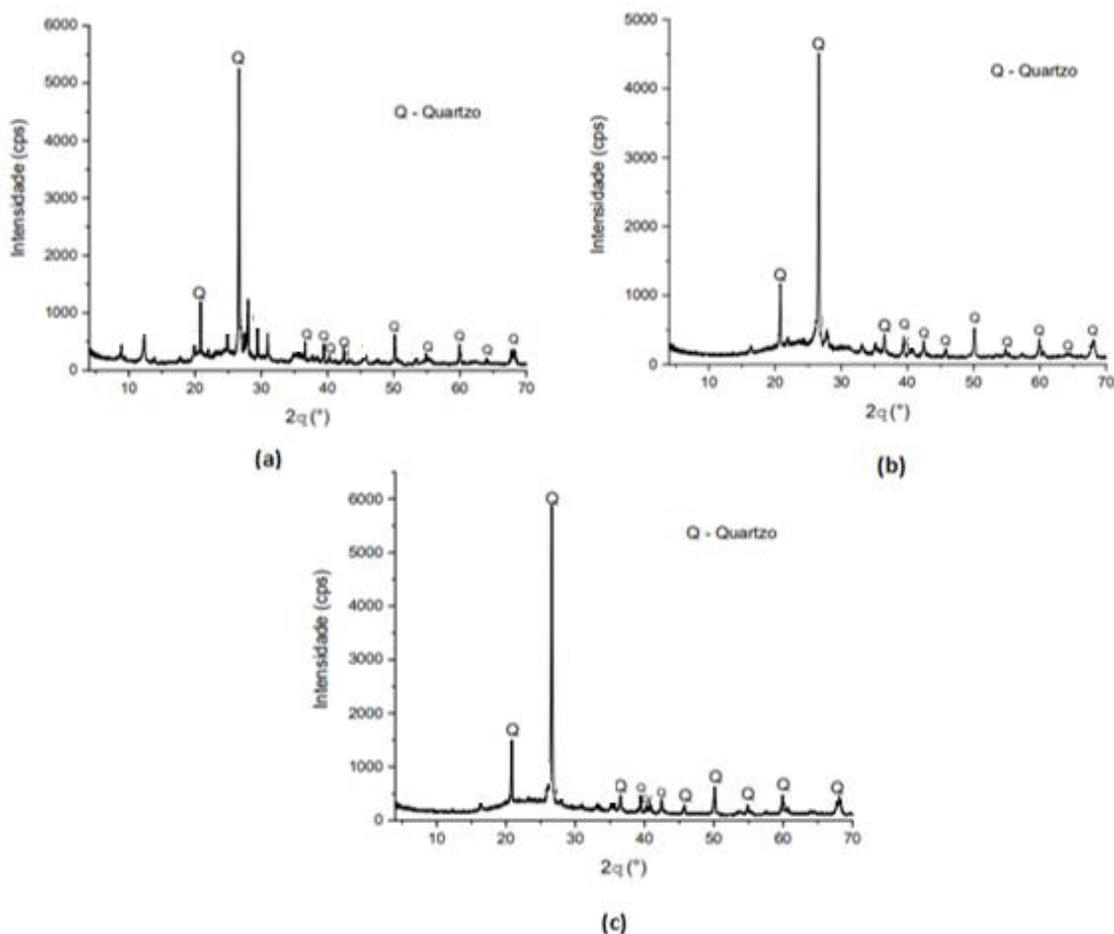
É possível identificar na Fig. 12 a análise calorimetria exploratória diferencial do pó de retífica, representada pela linha em vermelho, com duas faixas exotérmicas, aproximadamente de 200 a 500 °C e a outra de 800 a 1000 °C. A perda de massa total foi de aproximadamente 0,15% a temperatura de 1000 °C, obtido na análise termogravimétrica, representada pela linha verde.

A Fig. 13 apresenta os resultados do DRX do lodo da ETE (a), pó de retífica (b) e o RPP (c).

Pode-se observar na Fig. 13 em todos os resíduos a fase predominante é o quartzo. Essa predominância se explica porque o quartzo está presente como contaminante nas matérias-primas utilizadas no processo de fabricação das placas cerâmicas.

Para Pereira (2006), o quartzo é característico das formações cristalinas das argilas e assume comportamento inerte no processo de expansão, ou seja, não sofre decomposição, por isso, torna-se necessário avaliar as demais fases.

Figura 13– DRX dos resíduos.



Fonte: Do autor (2020)

4.1.2 Ensaio Físicos

Na Tab. 4 segue os resultados do ensaio de expansão, perda ao fogo, densidade aparente queimado e absorção de água dos resíduos estudados.

Tabela 4– Caracterização do RPP (R), lodo da ETE (M) e pó de retífica (P).

Temperatura (°C)	Identificação	Expansão de queima (%)	Perda ao fogo (%)	Densidade Aparente à Queimado (g/cm ³)	Absorção (%)
1150	Média de R	8,98	2,79	0,76	2,90
1160	Média de M	-12,34	6,56	2,28	7,20
	Média de P	-17,14	1,15	2,39	1,49
1190	Média de M	-14,47	6,61	2,32	0,17
	Média de P	-17,64	1,17	2,44	0,09
1220	Média de M	-7,87	6,57	1,67	1,3
	Média de P	-16,43	1,33	2,26	0,06

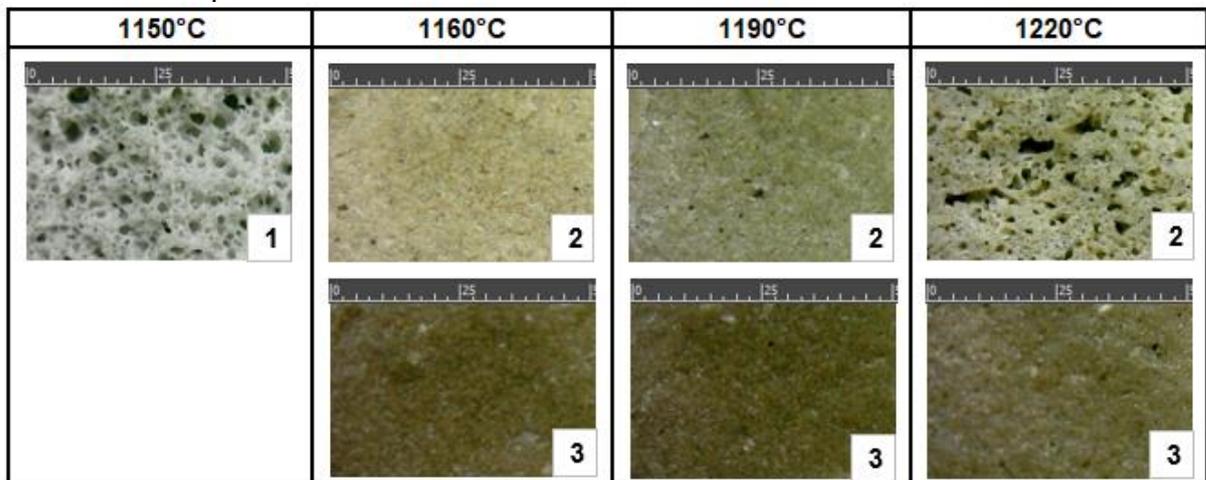
Fonte: Do autor (2020)

Conforme apresentado na Tab. 4, pode-se observar que no ensaio de expansão somente o RPP queimado a 1150 °C expandiu em torno de 9%, o que fez com que esse resíduo fosse queimado somente nessa temperatura para evitar acidentes no forno laboratorial. Os demais resíduos em todas as condições de queima retraíram. Em relação a perda ao fogo o lodo da ETE foi o que apresentou maior perda de massa em torno de 6,5%, seguida pelo RPP 2,79% e por último o pó de retífica em torno de 1%. Isso acontece, pois, o pó de retífica é um resíduo proveniente do desgaste das peças já queimadas, significa que perderam um percentual de massa na primeira queima.

Conforme a CINEXPAN, fabricante de argila expandida, a densidade aparente da argila 2215 é em torno de 0,5 g/cm³. Analisando os resultados da Tab. 4 pode-se observar que o RPP ficou com densidade de 0,67 g/cm³, bem próxima da desejada neste trabalho. Já os demais resíduos ficaram com valores em torno de 2 g/cm³. A absorção de água é outro fator bem relevante neste trabalho, já que para ser utilizado em concreto leve a argila expandida precisa ter baixa absorção de água. Levando isto em consideração o resíduo que apresentou menos absorção foi o pó de retífica que teve sua absorção diminuindo conforme foi aumentando a temperatura chegando a 0,06% a 1190 °C.

A Fig. 14 apresenta as imagens da estrutura interna dos corpos de prova dos resíduos queimados com a régua na escala de milímetros.

Figura 14– Morfologia do RPP (1), lodo ETE (2) e pó de retífica (3) queimados em diferentes temperaturas.

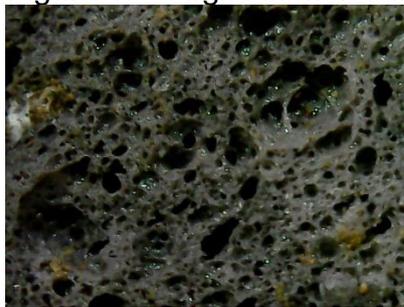


Fonte: Do autor (2020)

Pode-se observar na Fig. 14 que o RPP (1) apresentou uma estrutura porosa a uma temperatura relativamente baixa (1150 °C). O lodo da ETE (2) apresentou mudança em sua estrutura interna somente a 1220 °C, pois nas outras temperaturas não apresentou mudança. O pó de retífica (3) foi o único resíduo que não apresentou mudança na sua estrutura interna.

A Fig. 15 mostra a estrutura interna da argila comercial tipo 2215 marca CINEXPAN. Pode-se observar que existe semelhança entre a Fig. 15 e a Fig. 14 na imagem 1 (RPP) a 1150 °C. Com essas imagens e com os resultados dos demais ensaios, foi possível chegar aos parâmetros da Tab. 1 utilizados no software Statistica para realizar as combinações das formulações.

Figura 15– Argila comercial.

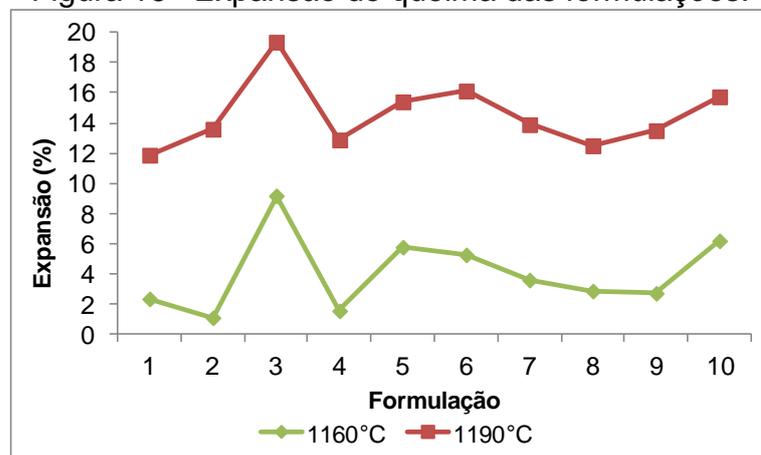


Fonte: Do autor (2020)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

A Fig. 16 apresenta a expansão de queima das formulações nas duas condições de queima.

Figura 16– Expansão de queima das formulações.

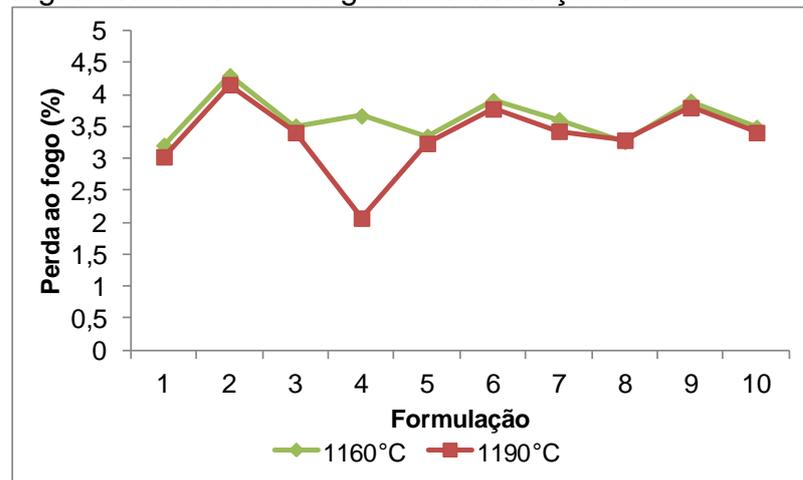


Fonte: Do autor (2020)

Pode-se observar que a temperatura interfere indiretamente na expansão dos poros da estrutura interna dos corpos de prova. Todas as formulações queimadas a 1190 °C apresentaram uma maior expansão e porosidade. A formulação que apresentou a maior expansão foi a 3, justamente a formulação que possui um maior percentual de RPP. Como já se sabe o RPP apresenta na sua composição carbeto de silício que quando queimado a uma temperatura próxima a 1200 °C forma os poros na sua estrutura.

A Fig. 17 apresenta a perda ao fogo das formulações nas duas condições de queima.

Figura 17– Perda ao fogo das formulações.



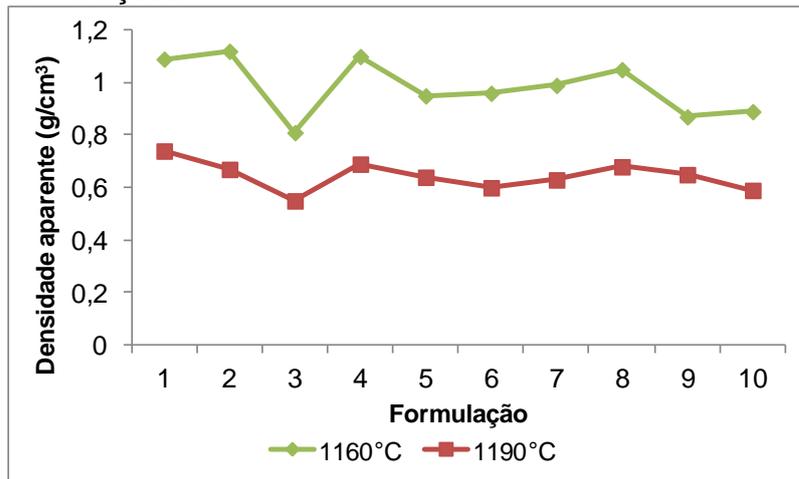
Fonte: Do autor (2020)

A perda ao fogo ficou bem semelhante nas duas temperaturas. Podemos observar que somente a formulação 4 a 1190 °C ficou com valor de 2,07%, menor em relação as outras formulações. Os valores estão muito próximos pois os ranges de cada resíduo, escolhidos para definir as formulações foi relativamente pequeno, por isso, as formulações ficaram com valores próximos nas duas condições de queima.

A Fig. 18 apresenta a densidade aparente à queimado das formulações nas duas condições de queima. Observa-se que o gráfico da Fig. 18 tem relação com os resultados do gráfico da Fig. 16, pois quanto maior a expansão do corpo de prova menor será a sua densidade. Com a temperatura de 1190 °C, o corpo de prova tem mais poros e com diâmetros maiores deixando mais espaços vazios na estrutura interna, o que faz com que a densidade fique menor. Isso pode ser

observado na Fig. 20. Para este trabalho, o objetivo de densidade é de $0,5 \text{ g/cm}^3$ (densidade da argila comercial), por isso a formulação que mais se aproximou desse valor foi a formulação 3 a $1190 \text{ }^\circ\text{C}$ que obteve $0,55 \text{ g/cm}^3$ de densidade aparente.

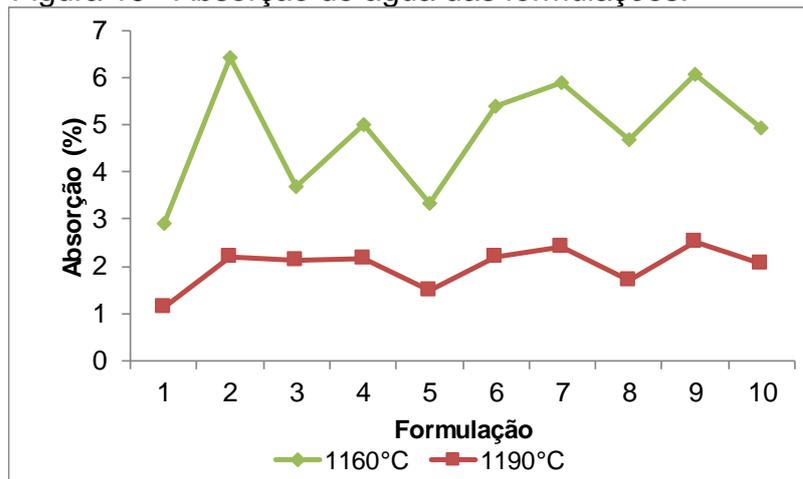
Figura 18– Densidade aparente à queimado das formulações.



Fonte: Do autor (2020)

A Fig. 19 apresenta a absorção de água das formulações nas duas condições de queima.

Figura 19– Absorção de água das formulações.



Fonte: Do autor (2020)

Observa-se no gráfico da Fig. 19 que quanto maior a temperatura, menor a absorção de água. A absorção na temperatura de $1190 \text{ }^\circ\text{C}$ ficou entre 1,12% a 2,53%. Comparando com outras literaturas pode-se observar que os valores variam

de 1,06% (Li et al., 2016) a 19% (TAKAHASHI, 2006; HWANG ET AL., 2012). Com os resultados relativamente baixo de absorção pode-se dizer que é uma boa mistura de resíduo para ser utilizada em concreto leve.

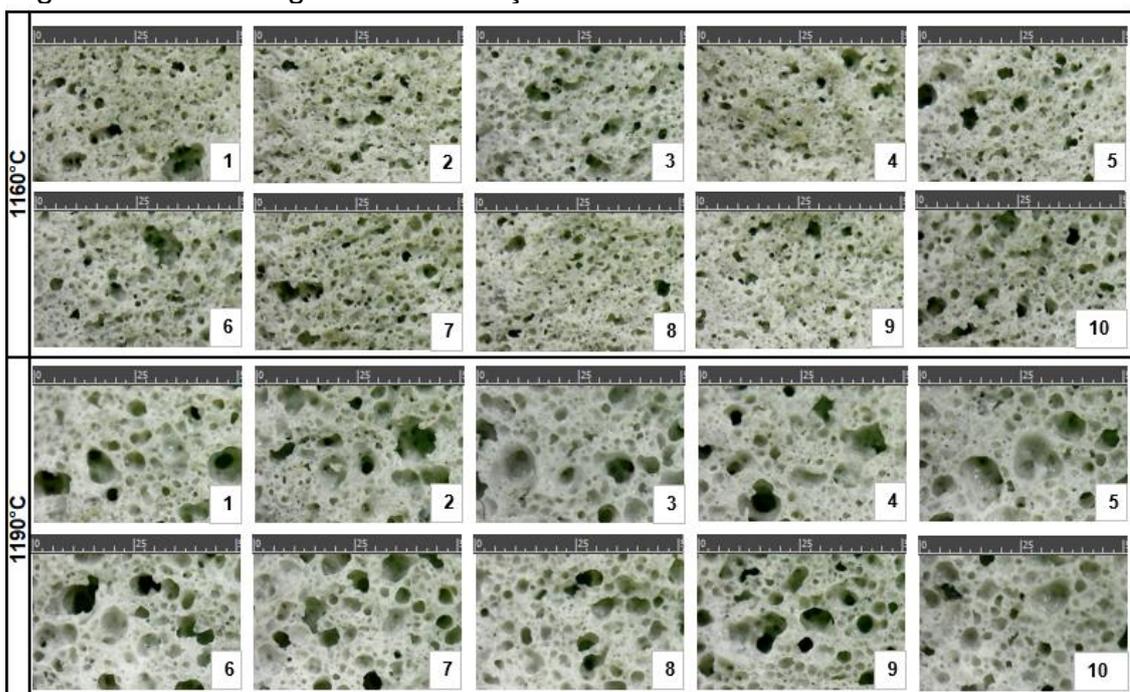
Segundo ROSSIGNOLO (2009), á medida que o corpo de prova sofre maior processo de expansão, é gerado no interior maior número de vazios e conseqüentemente, uma maior absorção de água. Porém neste trabalho aconteceu o contrário, pois mesmo tendo uma expansão de quase 16%, a absorção de água não passou de 2,53%. Isso deve-se ao fato do corpo de prova desenvolver uma camada vítrea observado na Fig. 20, ao redor da esfera de argila expandida assim impedindo a passagem da água para o interior da argila.

Figura 20– Camada vítrea.



Fonte: Do autor (2020)

Figura 21– Morfologia das formulações.



Fonte: Do autor (2020)

A Fig. 21 mostra a estrutura interna de cada formulação desenvolvida nesse trabalho com a régua na escala em milímetros. Pode-se observar que quanto maior a temperatura de queima, maior será o diâmetro dos poros e menor será a densidade final da argila expandida conforme a Fig. 18. Isso acontece pois quanto maior for a área de espaços vazios dentro da argila expandida menor será a sua massa e conseqüentemente menor será a sua densidade.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA EXPANDIDA E COMPARAÇÃO COM A ARGILA COMERCIAL

A Tab. 5 apresenta os resultados obtidos da caracterização da argila expandida fabricada em laboratório (pelotização), comparando com os resultados obtidos na caracterização da formulação 5 (prensado) e com os resultados da argila expandida comercial.

Tabela 5- Comparação da argila expandida produzida com a argila comercial.

Identificação	Expansão de queima (%)	Perda ao fogo (%)	Absorção (%)	Densidade aparente à queimado (g/cm ³)
Formulação 5 (Pelotização)	28,88	6,50	1,82	0,60
Formulação 5 (Prensado)	15,41	3,24	1,49	0,64
Argila comercial	-	-	16,61	0,50*

*Dado retirado da ficha técnica do produto
Fonte: Do autor (2020)

Pode-se observar na Tab. 5 que os resultados obtidos na caracterização da formulação 5 (pelotização x prensado) não são similares. Essa diferença nos resultados da mesma formulação pode ser explicado por dois fatores. O primeiro foi o método de conformação, na primeira caracterização os corpos de prova foram prensados e na segunda foram conformados de forma manual com isso modificando a pressão utilizada. O segundo foi o forno utilizado para queimar os corpos de prova, no caso dos corpos de prova prensados foi utilizado o forno à rolo de laboratório e para a fabricação da argila expandida (pelotização) foi utilizado o forno mufla. Isso significa que não conseguimos reproduzir a curva de queima igual do forno à rolo no forno mufla justificando a diferença nos resultados.

Contudo, pode-se observar que os valores das formulações tanto

prensado, como da pelotização ficou menor em termo de densidade aparente à queimado e absorção de água comparado a argila comercial. A argila expandida para ser utilizada no setor cimentício como agregado leve, necessitando ter densidade e absorção de água baixa.

A Fig. 22 e a Fig. 23 apresentam a estrutura interna e externa da argila expandida comercial e a produzida em laboratório. Pode-se observar nessas figuras que tanto a estrutura interna e externa ficaram bem semelhantes. Porém a coloração da argila comercial é mais escura por conta da presença do óxido de ferro presente nas argilas utilizada para a produção. A estrutura interna da argila expandida produzida a partir da formulação 5 apresentou poros maiores, isso pode ser explicado pela presença do carbetto de sílicio.

Figura 22– Estrutura externa da argila expandida: a esquerda a comercial e a direita a produzida com a formulação 5.



Fonte: Do autor (2020)

Figura 23– Estrutura interna da argila expandida: a esquerda a produzida com a formulação 5 e a direita a argila comercial.



Fonte: Do autor (2020)

5 CONCLUSÕES

O projeto de pesquisa e desenvolvimento tinha como propósito desenvolver argila expandida a partir de três resíduos o RPP, pó de retífica e lodo da ETE todos da indústria cerâmica. Os resultados desse trabalho foram comparados com os da argila expandida comercial. O objetivo do trabalho foi alcançado com êxito, pois foi possível verificar na formulação 5 a temperatura de 1190 °C características adequadas como a densidade aparente à queimado e absorção de água. Com isso transformando os resíduos em argila expandida com resultados melhores que os resultados da própria argila expandida comercial.

O tema foi de grande importância, pois a economia circular, onde todo o resíduo gerado em um empresa deve voltar como matéria prima em outro processo, vem se tornando cada dia mais necessário e obrigatório. Ainda mais se tratando da indústria cerâmica que a cada ano desenvolve uma nova tecnologia que pode gerar mais resíduos e por isso, a grande necessidade de sempre gerar um destino correto para estes resíduos. Sugere-se para os próximos trabalhos realizar os testes para verificar se a argila expandida produzida pode ser utilizada como isolante acústico, térmico e ser empregado na indústria cimentícia como agregado leve.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- CINEPAX (Paraná). **Argila Expandida**. Disponível em: <<https://www.cinexpan.com.br/>>. Acesso em: 29 mar. 2020.
- MACHADO JÚNIOR, Antônio Célio. **Avaliação da adição do lodo gerado no tratamento de efluentes de frigoríficos (LF) como matéria-prima na fabricação de argila expandida**. 2019. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/7794>>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução Conama nº 313. Brasília, 2002.
- OLIVEIRA, Antonio Pedro de Novaes de; Hotza, Dachamir. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2 ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2011. p.64-109.

PEREIRA, F.R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias.**2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro.Universidade de Aveiro, 2006.

PIRES, Natália Mariano. **Estudo da reutilização do resíduo de polimento de porcelanato para obtenção de cerâmica de revestimento.**2014. Disponível em: <http://www.demat.cefetmg.br/wpcontent/uploads/sites/25/2018/06/TCCII_1%C2%BA_2014_Natalia-Mariano-Pires-_Prof-Ivete-Peixoto.pdf> Acesso em: 24 de março de 2020.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações.** São Paulo: Pini, 2009.

SCOBAR, Renan Luna. **Concreto leve estrutural: substituição do agregado gráúdo convencional por argila expandida.** 2016. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6892/1/CM_COECI_2016_1_29.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2020.

SOLANA, Vicente Sanz. **Tecnologia de impressão por Jato de Tinta para Decoração de Placas Cerâmicas.** 2015. Disponível em: <<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876575c7f8c9d6e028b4824/pdf/ci-20-3-5876575c7f8c9d6e028b4824.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se a empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos LTDA por disponibilizar a estrutura e materiais para o desenvolvimento deste projeto, em especial aos colaboradores Hermes Mariot e Aline Ribeiro que prestaram auxílio em todo o planejamento do projeto e a todos os envolvidos para a realização do estudo.