

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**HENRIQUE CARVALHO DA SILVA COELHO**

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO COM  
A MASSA COMERCIAL PARA OBTENÇÃO DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO**

**BELO HORIZONTE**

**2014**

**HENRIQUE CARVALHO DA SILVA COELHO**

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO COM  
A MASSA COMERCIAL PARA OBTENÇÃO DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no  
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais  
do Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais como requisito parcial para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

**Orientadora: Dr. Claudinei Rezende Calado**

**Coorientador: Dr<sup>a</sup>. Ivete Peixoto Pinheiro Silva**

**BELO HORIZONTE**

**2014**

**HENRIQUE CARVALHO DA SILVA COELHO**

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO COM  
A MASSA COMERCIAL PARA OBTENÇÃO DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no  
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais  
do Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais como requisito parcial para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

**Aprovado em: 28 de agosto de 2014**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof: Dr. Claudinei Rezende Calado – Orientadora**

---

**Prof<sup>a</sup>:Dr<sup>a</sup> Ivete Peixoto Pinheiro Silva – Coorientador**

---

**Prof: Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva**

Dedico este Trabalho de Conclusão de curso ao meu professor orientador: Claudinei Rezende Calado e à professora coorientadora: Ivete Peixoto Pinheiro Silva, que me incentivaram a estudar o tema proposto, bem como me apoiaram em todos os momentos em que precisei.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Romildo de Oliveira Coelho e Angélica Maria Carvalho da Silva Coelho e à minha avó e avô pelo apoio e incentivo de todos os dias.

Aos meus amigos Natália Mariano Pires, Samanta Coelho e Érika Virginia pela convivência maravilhosa que temos e pelo interesse em sempre ajudar.

À indústria CECRISA por ter nos concedido a amostra do resíduo de polimento de porcelanato e as visitas técnicas que foram necessárias para a realização deste trabalho.

Aos professores Claudinei Calado e Ivete Pinheiro, orientadora e coorientador deste trabalho, respectivamente, por tudo que me proporcionaram, pelas orientações e ensinamentos.

Ao Bruno Cordeiro Silva que sempre foi muito paciente nos momentos que precisava faltar.

*Augusto* Cesar da Silva Bezerra por sempre deixar usar o laboratório e pela sua grande hospitalidade.

Meu muito Obrigado!

*“Ever tried. Ever failed.*

*No matter.*

*Try again. Fail again.*

*Fail better.”*

**-Samuel Beckett**

## RESUMO

A indústria de porcelanatos polidos gera grande quantidade de resíduos derivados do seu processo de polimento. A destinação dessas perdas de processo, geralmente, é feita em aterros industriais. O descarte desse resíduo é necessário devido à presença de carbeto de silício (SiC), proveniente do abrasivo do agente polidor. Em elevadas temperaturas, o SiC se decompõe formando SiO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, este impede que o rejeito retorne à linha de produção por agir como agente de expansão dentro do material cerâmico. O trabalho é conduzido partindo-se da caracterização do rejeito e pretende-se testar a viabilidade do reaproveitamento de percentagens do resíduo (15%, 30%, 45%) adicionada à massa comercial na fabricação de um novo produto cerâmico, utilizando uma temperatura de sinterização de 1100°C, temperatura na qual impossibilita a expansão do SiC.

Palavras chave: Porcelanato, resíduos de polimento, cerâmicas de acabamento, SiC.

## ABSTRACT

The polished porcelain industry generates large amounts of waste derived from the process of polishing. The allocation of these losses process is typically done in landfills. In the composition of the residue discarded, and the presence of silicon carbide (SiC), which is derived from the abrasive used in the polishing agent. At elevated temperatures, SiC is decomposed to form a solid compound, silicon oxide (SiO<sub>2</sub>), and a gaseous carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). The formation that prevents the waste gas directly back to the production line, because it acts as a blowing agent within the ceramic material. The work was carried out starting from the characterization of the waste with the intention of testing the feasibility of reusing the waste in the manufacture of a new ceramic product. Some waste percentage are used in porcelain mass (15%, 30%, 45%) to create a new product, using firing temperature at 1100°C which will allow SiC to expand.

Keywords: porcelain, waste polishing, finishing ceramics, SiC.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Produção de revestimentos cerâmicos no Brasil. ....   | 13 |
| Figura 2 – Produção de porcelanato no Brasil. ....   | 13 |
| Figura 3 – Modelo de disposição inicial dos poros intragranulares e intergranulares após preenchimento do molde..... | 17 |
| Figura 4 – Surgimento de irregularidades na superfície após a etapa de polimento.....                                | 19 |
| Figura 5 – Fluxograma do processo de fabricação do grês porcelanato .....  | 20 |
| Figura 6 – Amostras de RPP expandidas na Cocrisa após serem inseridas no processo produtivo de porcelanato.....      | 21 |
| Figura 7 – Fluxograma da metodologia experimental adotada.....   | 23 |
| Figura 8 – Molde utilizado para a fabricação dos corpos de prova .....   | 25 |
| Figura 9 – Máquina utilizada para prensar os corpos de prova (EMIC DL-30000) .....                                   | 25 |
| Figura 10 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada .....   | 26 |
| Figura 11 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada com 15% de resíduo .....                          | 26 |
| Figura 12 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada com 30% de resíduo .....                          | 27 |
| Figura 13 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada com 45% de resíduo .....                          | 27 |
| Figura 14 – Rampas de aquecimento para as temperaturas de sinterização de 1.100°C .....                              | 28 |
| Figura 15 – Máquina utilizada para ensaio de flexão (EMIC DL-30000) .....  | 29 |
| Figura 16 – Amostras em água fervendo para medir o teor de absorção de água.....                                     | 30 |
| Figura 17 – Aparelho para medir a densidade aparente das amostras .....  | 32 |
| Figura 18 – Difratoograma da torta (resíduo do polimento de porcelanato) .....                                       | 33 |
| Figura 19 - Curva termogravimétrica do resíduo de polimento do porcelanato .....                                     | 35 |
| Figura 20 – Distribuição granulométrica do RPP .....   | 35 |
| Figura 21 – Distribuição granulométrica da massa comercial atomizada.....  | 36 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Codificação dos grupos de absorção de água em função dos métodos de fabricação.....   | 12 |
| Tabela 2 – Composição química em termos de seus óxidos constituintes da torta (resíduo do polimento do porcelanato), massa atomizada (porcelanato) e do polidor..... | 34 |
| Tabela 3 - Retração volumétrica e densidade absoluta das amostras após a etapa de sinterização .....   | 36 |
| Tabela 4 – Módulo de resistência à flexão (MRF) das amostras .....   | 37 |
| Tabela 5 – Absorção de água (%) das amostras .....   | 38 |
| Tabela 6 – Porosidade aparente e densidade aparente das amostras.....  | 38 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>2 OBJETIVO</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>11</b> |
| 3.1 Definição de Cerâmica.....   | 11        |
| 3.2 Histórico da cerâmica para revestimento .....  | 11        |
| 3.3 Características do porcelanato .....   | 12        |
| 3.4 Matéria-prima para fabricação do porcelanato e desenvolvimento da microestrutura ..... | 14        |
| 3.5 Processamento do porcelanato .....   | 15        |
| 3.5.1 Moagem.....  | 15        |
| 3.5.2 Atomização.....  | 16        |
| 3.5.3 Prensagem.....   | 16        |
| 3.5.4 Secagem .....  | 17        |
| 3.5.5 Sinterização.....  | 18        |
| 3.5.6 Polimento .....  | 18        |
| 3.6 Resíduo do Polimento de Porcelanato (RPP).....   | 20        |
| <b>4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....  | <b>22</b> |
| 4.1 Visita Técnica.....  | 22        |
| 4.2 Preparação das amostras .....  | 23        |
| 4.3 Caracterização do Resíduo de Porcelanato (RPP) .....                                   | 24        |
| 4.4 Montagem dos corpos de prova .....   | 24        |
| 4.5 Sinterizações dos Corpos de Prova .....  | 28        |
| 4.6 Retração Volumétrica .....   | 28        |
| 4.7 Ensaio de Flexão – Resistência Mecânica.....   | 29        |
| 4.8 Absorção de Água dos Corpos de Prova.....  | 30        |
| 4.9 Densidade Aparente .....   | 31        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | <b>33</b> |
| 5.1 Caracterização do Resíduo de Porcelanato (RPP) .....                                   | 33        |
| 5.2 Retração Volumétrica e Densidade Absoluta .....  | 36        |
| 5.3 Resistência mecânica a flexão.....   | 37        |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>6 CONCLUSÃO</b> .....              | <b>39</b> |
| <b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b> ..... | <b>40</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Entre as diversas definições para cerâmica, pode-se destacar a seguinte: Cerâmica é a arte, a ciência e a tecnologia de fabricar e usar materiais e peças sólidas, constituídas essencialmente por materiais e/ou compostos naturais, inorgânicos e não-metálicos. Um dos produtos de maior valor agregado no segmento de revestimentos cerâmicos é o porcelanato (SILVA, 2010).

O porcelanato é um produto cerâmico que se destaca por sua baixa absorção de água e elevada resistência mecânica. No geral, as propriedades do produto é um resultado da sua baixa porosidade devido às condições de processamento pelo processo de queima rápida do caulim, quartzo e misturas feldspáticas (XIUAN, 2014). O processamento do porcelanato é caracterizado pelos pequenos grãos da partícula em pó, elevada força de compactação e alta temperatura de sinterização, e o potencial dos materiais cru em formar fases líquidas durante a sinterização (alta densificação) (ALVES, 2009).

Poros selados são resultados da densificação incompleta do material durante a sinterização, e depende basicamente da microestrutura do corpo verde e do ciclo térmico adotado. No que diz respeito ao material verde, as variáveis principais que podem interferir nas características da microestrutura porosa são: distribuição da partícula e do tamanho de grão, morfologia, umidade e pressão de compactação (ALVES, 2009).

Para realçar a estética do porcelanato, a sua superfície pode ser polida. Entretanto, o polimento pode prejudicar algumas de suas propriedades, tais como a resistência a manchas, além de causar um impacto ambiental pela deposição do resíduo do polimento de porcelanato (RPP) na forma de lama (ALVES, 2009). A lama é composta por água e finos debris, provenientes do porcelanato e das ferramentas de polimento que são constituídas de magnesita e partículas abrasivas de carbeto de silício (SiC) (RAMBALDI, 2007). O RPP precisa ser descartado em aterros, entretanto esse acondicionamento gera custos de transporte e armazenagem (BERNARDIN, 2006). O estudo da reciclagem é uma opção lógica para o intuito de reduzir o problema ambiental causado pela etapa de polimento e pela importância da prática do conceito de desenvolvimento sustentável que se tornou um desafio para a sociedade global.

Sem a reciclagem o processo não é circular, tornando-se uma sequência de eventos. Materiais com potencial para uso se tornam um risco em vez de um recurso. O uso dos materiais secundários, ou seja, reciclados resulta em uma grande redução do uso de energia, pois irá economizar na produção dos materiais primários (BERNARDIN, 2006).

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo estudar o reaproveitamento do resíduo de polimento de porcelanato adicionada à massa comercial na fabricação de um novo produto cerâmico para, assim, viabilizar a sua utilização, tornando o ciclo de produção do porcelanato polido, completo. Para isso as matérias-primas, assim como a cerâmica sinterizada, foram caracterizadas física e quimicamente.

### 3 Revisão Bibliográfica

#### 3.1 Definição de Cerâmica

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos e não metálicos. A maioria das cerâmicas consiste em compostos que são formados por elementos metálicos e não metálicos, para os quais as ligações interatômicas são totalmente iônicas ou predominantemente iônicas com alguma natureza covalente (SILVA, 2010). O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”, indicando que as propriedades desejáveis desses materiais são normalmente atingidas através de um processo térmico a alta temperatura conhecido por queima (CALLISTER, 1994).

A maior parte das fases cerâmicas, da mesma forma que as metálicas, são cristalinas. Entretanto ao contrário dos metais, suas estruturas cristalinas não contêm um grande número de elétrons livres. Os elétrons estão sendo compartilhados por covalência ou são transferidos de um átomo para outro, formando uma ligação iônica, neste último caso, os átomos se tornam ionizados e transportam carga elétrica quando dissolvidos ou fundidos (MORAES, 2007).

As ligações iônicas conferem aos materiais cerâmicos uma estabilidade relativamente alta. Em geral, também são mais duros e mais resistentes a alteração química. Além disso os materiais cerâmicos sólidos são, usualmente, isolantes. Em temperaturas elevadas, em virtude da maior energia térmica, conduzem eletricidade, porém de forma muito menos intensa que os metais. Devido à ausência de elétrons livres, a maior parte dos materiais cerâmicos é transparente, ao menos em seções delgadas, e conduzem mal o calor (MORAES, 2007).

#### 3.2 Histórico da cerâmica para revestimento

De acordo com a norma ABNT NBR 15463:2007 as placas cerâmicas para revestimento são materiais compostos de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo conformados por extrusão, ou por prensagem, podendo também ser conformados por outros processos.

Para uma melhor performance da placa cerâmica é preciso escolher o material certo para cada ambiente e aplicação. As propriedades do material, o clima e o local de uso são alguns dos fatores

essenciais para a escolha certa do produto. Apenas o uso desses aspectos em conjunto irão possibilitar uma melhor escolha (SILVA, 2010).

As especificações, segundo a ABNT NBR 13818:1997, determina que as placas cerâmicas para revestimento tenham resistência a abrasão, carga de ruptura, módulo de resistência a flexão, manchamento, resistência a ataque químico, dentre outras. Uma das principais classificações para os revestimentos cerâmicos é a absorção de água apresentada pelas placas. A Tabela 1 mostra essa classificação de acordo com o modo de processamento.

**Tabela 1 – Codificação dos grupos de absorção de água em função dos métodos de fabricação.**

| Absorção de água (%) | Métodos de fabricação |              |            |
|----------------------|-----------------------|--------------|------------|
|                      | Extrudado (A)         | Prensado (B) | Outros (C) |
| $Abs \leq 0,5$       | AI                    | BIa          | CI         |
| $0,5 < Abs \leq 3$   |                       | BIb          |            |
| $3 < Abs \leq 6$     | AIIa                  | BIIa         | CIIa       |
| $6 < Abs \leq 10$    | AIIb                  | BIIb         | CIIb       |
| $Abs > 10$           | AIII                  | BIII         | CIII       |

Fonte: ABNT NBR 13817:1997

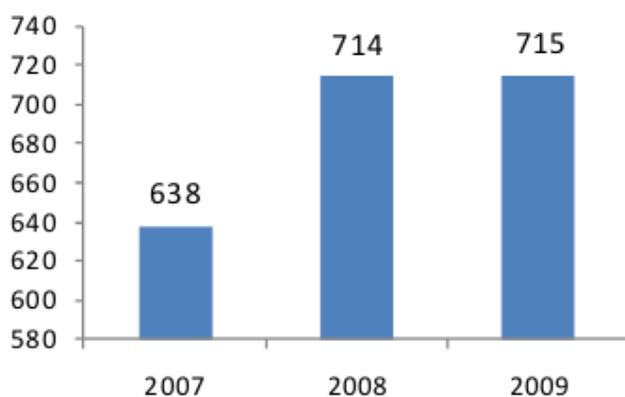
O processamento cerâmico começa, normalmente, com uma ou mais matérias-primas, um ou mais líquidos e um ou mais aditivos de processamento. Os materiais iniciais, ou sistema formulado, podem ser beneficiados física e/ou quimicamente, através de operações como moagem, lavagem, dissolução química, sedimentação, flotação, separação magnética, dispersão, mistura, classificação, desaeração, filtragem ou filtroprensagem. A técnica de conformação usada depende da consistência do sistema (por exemplo: barbotina, pasta plástica ou material granulado) e produzirá uma forma particular com determinada composição e microestrutura. A operação de secagem remove algum ou todos os líquidos residuais de processamento e as operações adicionais podem incluir maquinação a verde, desbaste superficial, polimento superficial e limpeza, bem como aplicação de recobrimentos superficiais com materiais com propriedades elétricas ou vidrados. O produto sofre, então, um tratamento térmico final, para produzir uma microestrutura sinterizada (FONSECA, 2000).

### 3.3 Características do porcelanato

Desenvolvido no final dos anos setenta, como um produto destinado a ambientes e aplicações específicas, o porcelanato manteve-se a margem do vertiginoso crescimento da indústria italiana, até os anos noventa. A partir de então o porcelanato, devido aos constantes avanços e inovações nos processos e equipamentos incorporados, expandiu-se para além da Itália (SILVA, 2010).

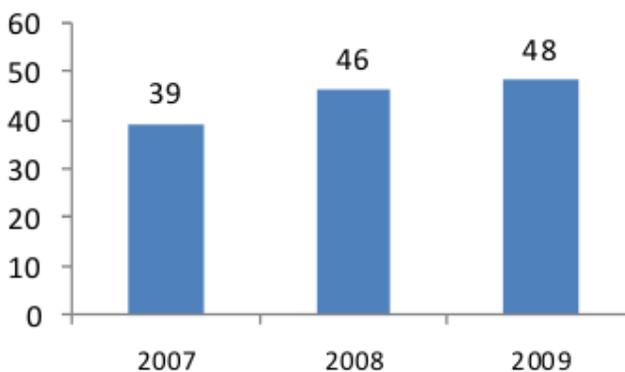
No Brasil, em 2009, a produção de porcelanato representou aproximadamente 7% da produção de revestimentos cerâmicos no Brasil (SILVA, 2010). Nas figuras 01 e 02 são apresentados os números da produção de revestimentos cerâmicos e de porcelanato nos anos de 2007 a 2009, segundo dados da ANFACER - Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento.

**Figura 1 – Produção de revestimentos cerâmicos no Brasil.**



Fonte: ANFACER

**Figura 2 – Produção de porcelanato no Brasil.**



Fonte: ANFACER

O porcelanato é um produto cerâmico prescrito na norma ABNT NBR 13818:1997 com especificação BIa. Esse possui elevada resistência mecânica, ao risco e ao ataque químico, podendo ser ou não decorado superficialmente, através do processo de esmaltação. Essas características aliadas com o apelo estético do porcelanato o torna adequado a áreas de alto tráfego, tais como: escolas hospitalares, shopping centers, supermercados, indústrias e câmaras frigoríficas, dentre outros (SILVA, 2010).

No mercado atual, o porcelanato é classificado como esmaltado ou técnico (polido ou não), sendo que para o esmaltado admite-se uma absorção de água até 0,5%. Porém, para o porcelanato técnico esta absorção deve ser menor ou igual a 0,1% (ROSSO, 2005). O produto não esmaltado pode passar por etapas de polimento, que conferem a superfície do produto alto brilho, assemelhando-se aos mármore e granitos comercializados, em relação aos quais tem preços de venda mais baixos, mesmo sendo dotados de características técnicas superiores. Já a versão esmaltada alia a variedade de cores e efeitos estéticos, com as vantagens da superfície esmaltada relacionadas à facilidade de limpeza com as elevadas propriedades mecânicas do porcelanato (SILVA, 2010).

### 3.4 Matéria-prima para fabricação do porcelanato e desenvolvimento da microestrutura

Segundo a norma ABNT NBR 15463:2007 porcelanatos são placas cerâmicas para revestimento constituídas por argilas, feldspatos e outras matérias-primas inorgânicas.

Os feldspatos desempenham nas massas de porcelanato uma função de fundentes, já que proporcionam as primeiras fases líquidas que aparecem durante a queima. Estas fases líquidas contornam as partículas mais refratárias, aproximando-as por meio das forças de tensão superficial que são geradas nos poros mais finos, fato que gera contração da peça, dessa forma, os feldspatos são os responsáveis iniciais do processo de densificação, o qual contribui majoritariamente para a densificação das peças e, conseqüentemente, para as propriedades desejadas do porcelanato (ROSSO, 2005). Além disso, os minerais feldspáticos possibilitam atingir a gresificação mesmo em temperaturas inferiores a 1200°C (SILVA, 2010).

O caulim além de conferir brancura a massa é um importante fornecedor de alumina ( $Al_2O_3$ ) (SILVA, 2010), essa durante a queima, pode fazer parte da reação de vitrificação formando vidros silico-aluminosos, ou formar mulita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) com formato de agulhas, as quais atuam como esqueleto do corpo contribuindo para o aumento da resistência mecânica (ROSSO, 2005).

A argila possui partículas pequenas de poucos micrômetros que apresentam comportamento

plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água. Esta plasticidade pode ser expressa em um consistente aumento de resistência mecânica nas amostras após a secagem. As argilas são uma matéria-prima básica para todas as massas cerâmicas. Nas massas cerâmicas para porcelanato desenvolvem uma série de funções, dentre as quais: aportar uma coloração clara na queima; conferir características ligantes e plasticidade à massa cerâmica; aportar propriedades reológicas, facilitando a fluidez; conferir com as características fundentes uma boa densidade; aportar características mecânicas ótimas nos sinterizados (SILVA, 2010).

Para o porcelanato são utilizadas, freqüentemente misturadas entre si, tanto argilas relativamente pouco plásticas, ricas em caulinita, como argilas particularmente plásticas, mais ricas em minerais argilosos como illita e montmorilonita (SILVA, 2010).

### 3.5 Processamento do porcelanato

#### 3.5.1 *Moagem*

O processo de fabricação é iniciado com a dosagem das matérias-primas, mediante uma formulação pré-determinada. Antes desta etapa do processo é necessário um controle rigoroso na pré-liberação das matérias-primas e também da umidade de consumo das mesmas, para que a formulação tenha peso real, conforme determinada (ROSSO, 2005).

A moagem de porcelanatos deve proporcionar elevada finura da massa e, conseqüentemente, elevada gresificação e valor de absorção de água praticamente nulo. Uma moagem não eficiente poderá comprometer a reatividade da massa durante a queima, podendo ocasionar arrancamento de partículas durante a etapa de polimento, além do afloramento de poros fechados à superfície. Além disso, a resistência mecânica após queima está relacionada com o tamanho dos microporos gerados no interior da peça, que depende, entre outros fatores, do tamanho de partículas da massa e da quantidade de viscosidade da fase vítrea presente (ROSSO, 2005).

A moagem via úmida apresenta melhor resultado e, dessa forma, é a utilizada na produção do porcelanato. Esse processo consiste na moagem da matéria-prima a úmido e secagem da barbotina em atomizador. O maior benefício conseguido por esse processo é conseguir a homogeneização de um amplo espectro de matérias-primas, deixando-as extremamente finas e conseqüentemente obtendo-se pós muito fluidos que asseguram o enchimento ideal da forma (MORAES, 2007).

Caso a moagem da barbotina seja excessiva, pode haver o comprometimento da etapa de prensagem, resultando em peças com baixa densidade aparente e resistência mecânica a seco, além da excessiva retração linear das placas durante a queima (ROSSO, 2005).

O controle granulométrico é realizado através da avaliação dos retidos em peneira, esses devem estar entre 0,5 a 1% quando passa em malha de 44  $\mu\text{m}$  (MORAES, 2007).

### 3.5.2 *Atomização*

Consiste em uma operação de desumidificação da barbotina obtida no final do processo de moagem. O controle do conteúdo de água é feito através do atomizador, também conhecido por “spray-dryer”. O processo consiste na injeção da barbotina a alta pressão (22 atm) e convenientemente nebulizada dentro de uma câmara de secagem, onde entra em contato com ar a uma temperatura que varia entre 500 e 600°C. Com essa mudança brusca de temperatura, consegue-se a evaporação quase que instantânea da água, devido ao elevado coeficiente de troca térmica causado pelo movimento acelerado das partículas, pela elevada superfície específica das gotas e pelo alto gradiente de temperatura entre o ar e a barbotina. Ao final desse processo, é possível obter grãos arredondados com umidade e distribuição granulométrica adequadas à prensagem. Para garantir uma homogeneidade da umidade é necessário que o tempo de repouso seja no mínimo 36 h (MORAES, 2007).

O formato, umidade e tamanho dos grânulos obtidos através do processo de atomização podem afetar a fluidez do pó e, conseqüentemente, o preenchimento do molde na prensa, que por sua vez pode alterar a resistência mecânica a verde das peças, gerar problemas dimensionais e trincas durante a queima (ROSSO, 2005).

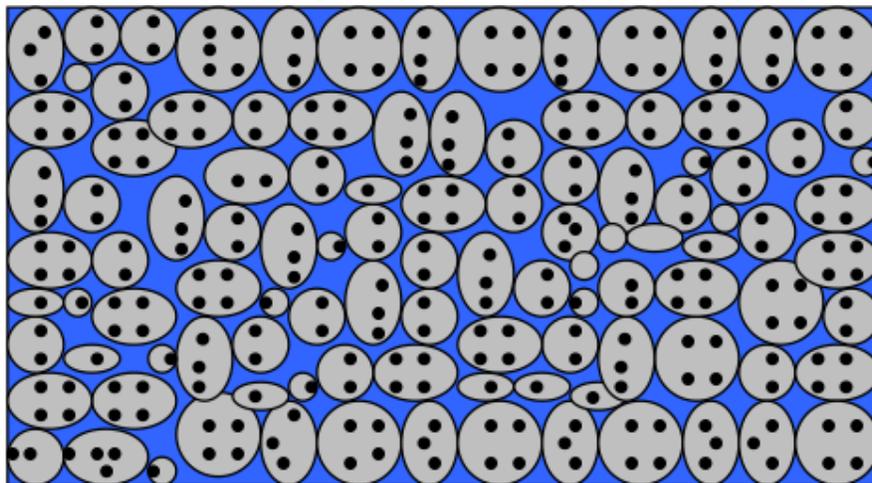
### 3.5.3 *Prensagem*

A estrutura dos poros do compacto cerâmico pode ser definida a partir das características dos grânulos que compõe a massa cerâmica para prensagem. Esses grânulos são aglomerados de partículas primárias unidas entre si por ligações secundárias, espera-se que tenham uma certa quantidade de poros em seu volume, que é a denominada de porosidade intragranular. Sabe-se ainda que, quando os grânulos preenchem as cavidades do molde, sempre ocorrerá a formação de vazios entre os mesmos, por mais eficiente que seja o empacotamento. A este segundo conjunto de interstícios formado durante

o empacotamento dos grânulos, dá-se o nome de porosidade intergranular. O conjunto formado pelos poros intragranulares e intergranulares, durante o preenchimento das cavidades do molde, define a disposição inicial de poros no compacto cerâmico, como visto na figura 3 (MORAES, 2007).

É fato e importante ressaltar que existe uma diferença de tamanho entre os poros de natureza intragranular e intergranular, sendo os poros intergranulares com tamanhos consideravelmente maiores que os poros intragranulares. Com relação ao volume total destes poros intragranulares, este depende, principalmente, da forma e da distribuição das partículas que compõe o grânulo. Uma distribuição de tamanho de partículas adequada promove um empacotamento de partículas de elevada densidade relativa, minimizando o volume destes poros no compacto (ALBERO, 2000).

**Figura 3 – Modelo de disposição inicial dos poros intragranulares e intergranulares após preenchimento do molde.**



Fonte: MORAES (2007).

Na prensagem a seco, a umidade da mistura varia em 0 e 10%. A massa final do objeto conformado é aproximadamente igual à massa de pó ou granulado inicial e as retrações associadas à secagem são reduzidas (FONSECA, 2000). Em geral, a pressão de prensagem é da ordem de 40-50 MPa, ou 400 a 500 kgf/cm<sup>2</sup> (SILVA, 2010).

#### 3.5.4 *Secagem*

A fase de secagem tem como função reduzir a quantidade de água que foi utilizada para a moldagem, de maneira que a sinterização do material seja realizada em tempos industrialmente aceitáveis (MORAES, 2007).

Nessa fase, um cuidado especial deve ser tomado a fim de evitar o aparecimento de trincas provocadas pela rápida evaporação de água, assim, o gradiente de temperatura da placa cerâmica com o secador não pode ser grande.

### 3.5.5 Sinterização

É na etapa de sinterização que o processo de densificação via fase líquida ocorre reduzindo ao máximo a porosidade das peças. O controle da quantidade e viscosidade da fase líquida é fundamental para se manter as condições de contração linear e porosidade. A temperatura de queima deve ser aquela que proporcione a máxima densificação da massa. Em caso de produtos que contenham agentes colorantes pretos, que favorecem a fundência, a queima pode ser feita em temperaturas inferiores às das massas sem estes corantes (RUSSO, 2005).

O processo de densificação do porcelanato ocorre através de sinterização via fase líquida, devido à grande quantidade de fundentes presentes na composição. A sinterização via fase líquida envolve um sistema onde a fase sólida apresenta solubilidade limitada no líquido durante a queima. Durante o processo ocorre a solubilização e re-precipitação de sólidos, proporcionando aumento do tamanho do grão e da densificação (RUSSO, 2005).

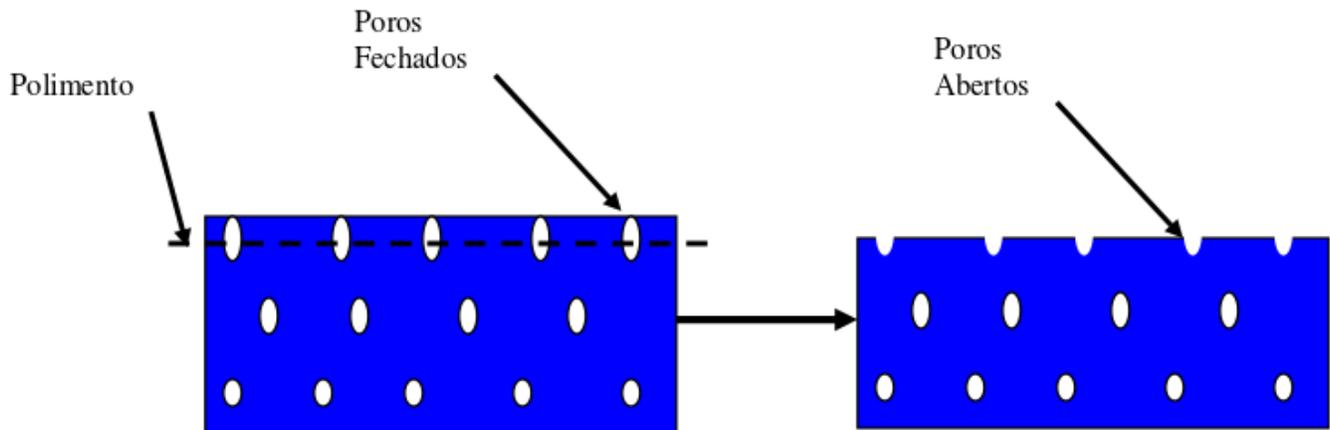
É importante ressaltar que durante o ciclo térmico a água e gases provenientes da queima de compostos orgânicos devem ser eliminados e a medida que a temperatura aumenta, a fase vítrea é formada, envolvendo todos os poros, entretanto, os gases ainda existentes no interior do corpo, são isolados do meio externo, dado origem à porosidade fechada do produto (ARANTES, 2001).

### 3.5.6 Polimento

O processo de polimento consiste em um equipamento dotado de várias cabeças polidoras compostas de materiais abrasivos, tais como carbetos de silício e diamante, que em contato com as peças em rotação alta, velocidade controlada em presença de água executam o polimento (Figura 4). A medida em que a peça passa pela máquina, os abrasivos usados apresentam gradativamente uma granulometria mais fina, até conseguir-se o resultado desejado, ou seja, brilho (RUSSO, 2005).

A primeira parte da politriz é responsável pelo desgaste acentuado da peça, ou seja, onde se dá o nivelamento da superfície da peça, com abrasivos diamantados e magnesianos de granas grossas, 254

$\mu\text{m}$  a  $127 \mu\text{m}$  (RUSSO, 2005).



**Figura 4 – Surgimento de irregularidades na superfície após a etapa de polimento.**

Fonte: MORAES (2007)

A segunda etapa é responsável em realizar a preparação para o polimento. Cada cabeça tem a finalidade de apagar os riscos (ranhuras) deixados pelas cabeças anteriores e deixar a peça totalmente uniforme (lisa). As granas utilizadas são de  $106 \mu\text{m}$  a  $36 \mu\text{m}$  (RUSSO, 2005).

A terceira etapa é o polimento propriamente dito. Na peça não existem mais riscos e a mesma começa a receber o brilho. Utiliza-se normalmente granas de  $32 \mu\text{m}$  a  $8 \mu\text{m}$  (RUSSO, 2005).

A etapa de polimento gera grande quantidade de resíduo (RPP), particularmente com o aumento da produção que vem ocorrendo nos últimos anos. O que origina um novo custo aos produtores do setor, que necessitam gerenciar e descartar adequadamente esse resíduo. O processamento do porcelanato pode ser resumido no fluxograma abaixo, figura 5.

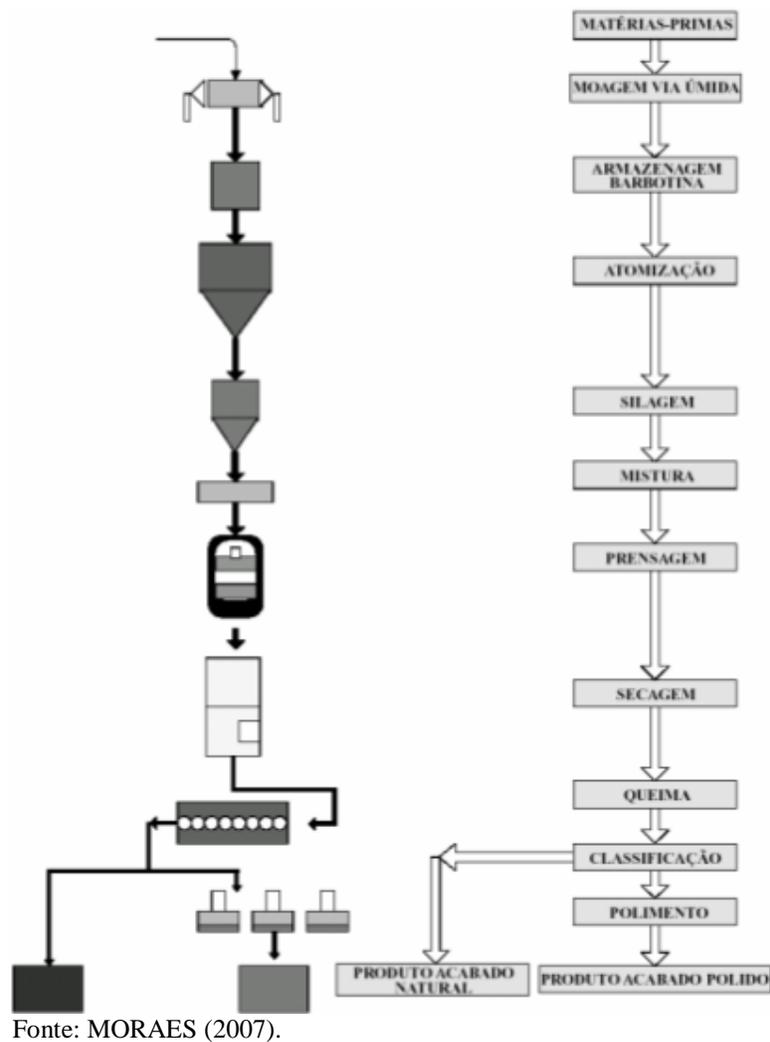
### 3.6 Resíduo do Polimento de Porcelanato (RPP)

O resíduo do polimento de porcelanato é uma mistura que contém água e fragmentos muito finos, vindos das placas cerâmicas e dos polidores, predominantemente magnésiano, e partículas abrasivas, carbeto de silício, oriundas das ferramentas (RAMBALDI, 2007). Quando o RPP é reinserido no processo produtivo de porcelanato, o carbeto de silício decompõe-se em atmosfera oxidante gerando  $\text{CO}_2$  e uma fina camada de  $\text{SiO}_2$ . O produto resultante sofrerá uma expansão

volumétrica devido à decomposição do SiC (Figura 6).

Na indústria cerâmica esse tipo de resíduo é coletado e temporariamente armazenado em uma estação de efluentes, removendo a água residual, produzindo a lama. Após isso é, geralmente, depositado em aterros.

Figura 5 – Fluxograma do processo de fabricação do grês porcelanato.



Entretanto esse tipo de depósito gera custo e impactos ambientais, assim, a reutilização e a reciclagem desse resíduo são as soluções mais indicadas para o manejo dessa grande quantidade de resíduo, que na Itália é de 20.000 t/ano (RAMBALDI, 2007).

**Figura 6 – Amostras de RPP expandidas na Cecrisa após serem inseridas no processo produtivo de porcelanato.**



Fonte: Próprio autor.

Uma possível solução para o resíduo do polimento do porcelanato testado por Marques (2007) seria a inserção desse resíduo à massa cerâmica comercial. Os estudos verificaram a viabilidade de se utilizar o resíduo como matéria-prima somada a outros componentes para a produção de massa cerâmica comercial. Três corpos de prova foram preparados com a adição do resíduo à massa de cerâmica comercial (MC) em percentagens mássicas de 1% (R1), 3% (R3) e 5% (R5) em formato padrão de 50 x 20 x 5 mm. Os corpos de prova foram prensados a 30 MPa e depois queimados em fornos com ciclos de queima rápido, de até 35 min, com a temperatura variando de 33 a 40°C/min.

Após queima a 1.150°C foi observado que os corpos de prova identificados como R5 apresentam absorção inferior a 0,5%, o que já os caracteriza como porcelanatos, entretanto, os corpos da massa comercial ainda apresentam uma absorção superior a 2%. Com o aumento da temperatura de queima, verifica-se que os corpos com 3% de resíduo (R3) atingem absorção inferior a 0,5% após queima a 1.175°C e que os corpos com 1% de resíduo (R1) só atingem absorção de porcelanato após queima a 1.200°C. A massa comercial atingiu absorção inferior a 0,5% após queima a 1.200°C. Esses resultados evidenciam que adições de resíduo superiores a 1% possibilitam a redução da temperatura de queima necessária para se atingir a absorção inferior a 0,5%, chegando-se a reduzi-la em 50°C quando da adição de 5% de resíduo na formação (MARQUES, 2007).

RAMBALDI (2007), avaliou a possibilidade de reciclar o RPP, na preparação da massa cerâmica para a produção de placas de porcelanato, substituindo em diferentes quantidades um dos componentes naturais do material. Essa reciclagem envolve pelo menos dois aspectos ambientais: (I) ele parcialmente resolve o problema da deposição em aterros, e reduz o consumo de materiais naturais.

A redução nos custos para a indústria cerâmica é também um dos principais fatores. Usando o RPP, a indústria tem acesso a um material cru secundário que está prontamente disponível, evitando tanto o custo do transporte como o do aterro. Além disso, a presença de magnesita, em pequenas quantidades, e feldspato poderia promover a sinterização do corpo cerâmico, permitindo ainda uma melhora no processo de queima.

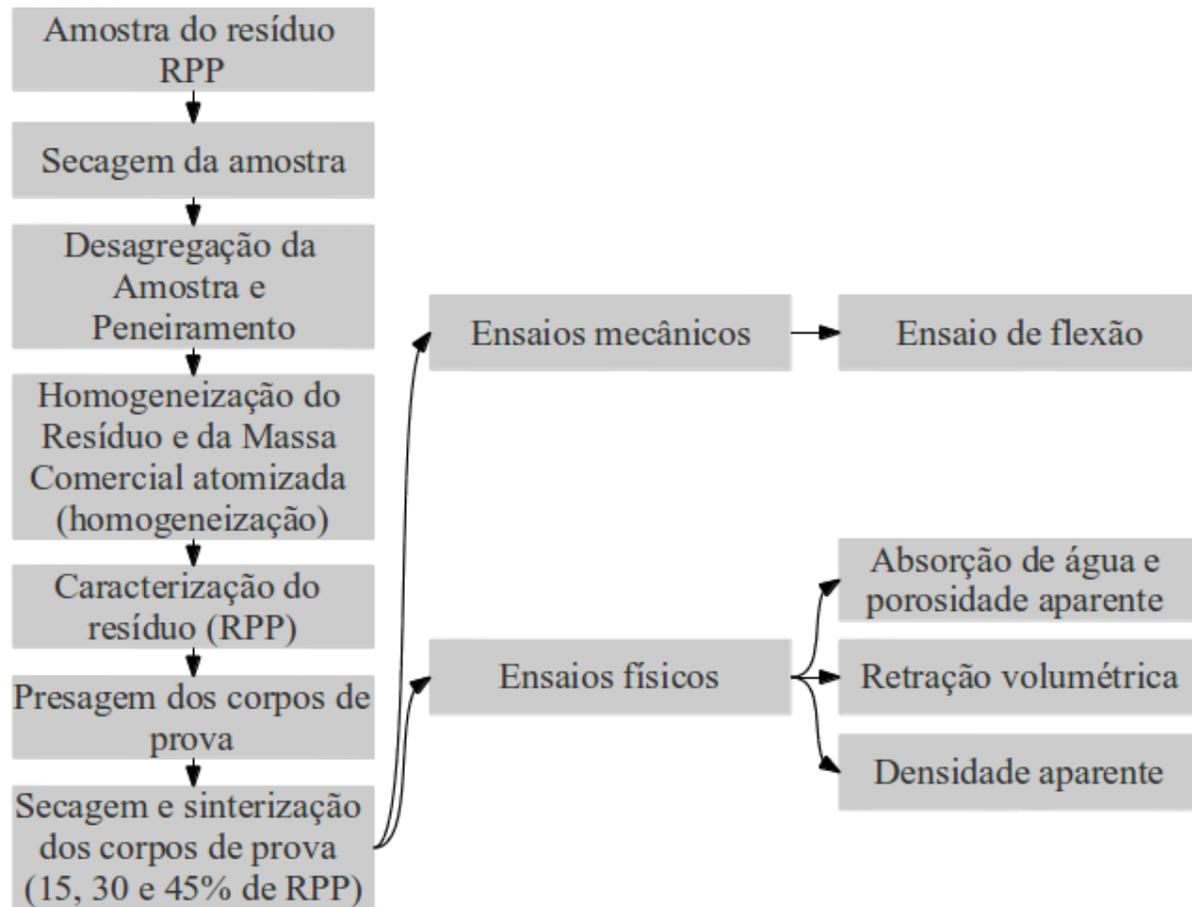
## **4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

O fluxograma abaixo apresenta as etapas de trabalho utilizadas na metodologia experimental (Figura 7).

### **4.1 Visita Técnica**

Uma visita técnica foi realizada na unidade da empresa CECRISA, em Santa Luzia, MG. O objetivo da visita foi o acompanhamento de todo o processo de produção de porcelanato e, sobretudo, o recolhimento de amostras necessárias para esse trabalho. A empresa concedeu a massa comercial atomizada do porcelanato Cristal Polido e o resíduo gerado pelo polimento deste mesmo modelo de porcelanato.

Figura 7 – Fluxograma da metodologia experimental adotada.



Fonte: Proprio autor.

#### 4.2 Preparação das amostras

Para a realização deste trabalho, utilizou-se o resíduo obtido na etapa de polimento do porcelanato Cristal Polido coletado na CECRISA, conhecido como torta. A amostra do RPP foi secada por 24 horas na estufa (Med Clave modelo 3) a 180°C, desaglomerada e homogeneizada manualmente. Após esta etapa, o RPP homogeneizado foi peneirado utilizando as peneiras de 30 e 50 mesh, sendo que apenas os grãos que passaram na peneira de 50mesh foram aproveitados para a pesquisa, visto que apresentaram maior quantidade a ser aproveitada em relação à quantidade de grãos que passaram na peneira de 30 mesh.

A determinação do teor de umidade consistiu em pesar aproximadamente 2 g das amostras (balança - BEL Engineering) e secá-las em uma estufa (Med Clave modelo 3) a 115°C durante uma hora, pesar a amostra e repetir o procedimento acima até não se observar variações na massa.

### 4.3 Caracterização do Resíduo de Porcelanato (RPP)

A determinação da composição química do resíduo obtido na etapa de polimento do porcelanato, da massa atomizada e do polidor foi realizada empregando-se a técnica de fluorescência de raios X (Shimadzu, EDX-720) e a determinação das fases presentes no RPP e sua estrutura cristalina foi realizada pela técnica de difração de raios X (Shimadzu, XRD - 7000). Estas análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização, do CEFET-MG.

A estabilidade térmica do RPP foi determinada empregando-se a técnica termogravimétrica (TGA) (Shimadzu, DTG-60H), medida realizada no laboratório TECMAT do CEFET-MG na qual também foi possível determinar a temperatura inicial de decomposição de carbetos de silício (SiC).

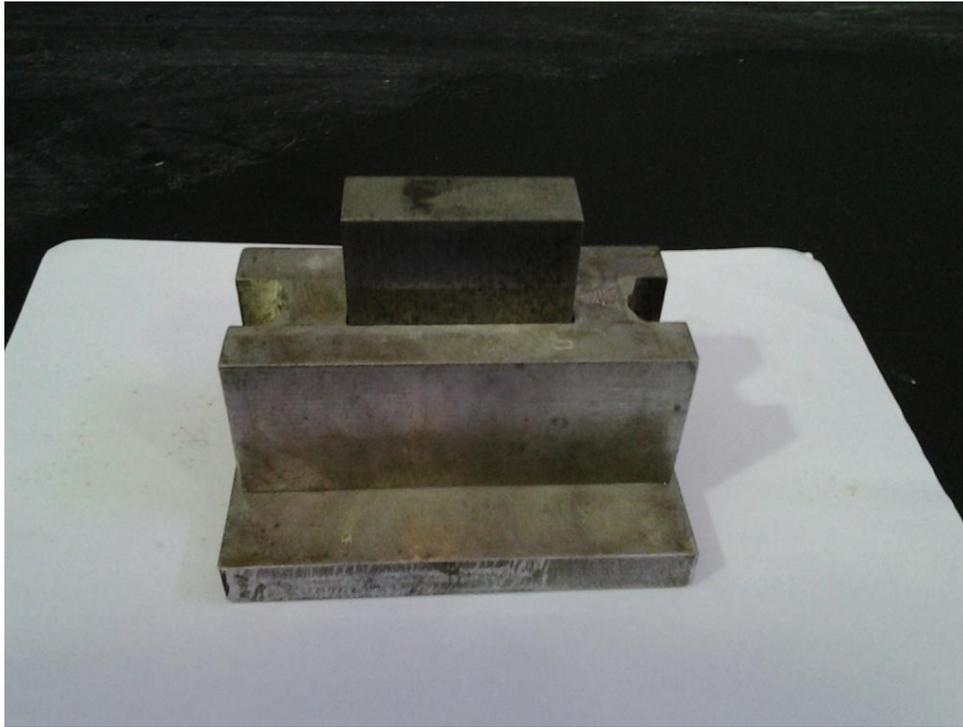
A análise granulométrica do RPP após o peneiramento foi realizada no aparelho de granulometria a laser Cilas 1090. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização, do CEFET-MG.

### 4.4 Montagem dos corpos de prova

Para as moldagens dos corpos de prova, as amostras do resíduo e da massa atomizada foram umedificadas e homogeneizadas manualmente com a finalidade de obter um teor de umidade de 8% para a conformação na prensagem.

O molde utilizado para fabricação dos corpos de prova na prensa possui dimensão de 58,80 x 19,90 mm (Figura 8). A carga da máquina de prensagem (EMIC DL-30000), figura 9, utilizada para a prensagem foi de 3,4 T (30 MPa) e a velocidade foi de 1 MPa/s. Para a pesquisa foram conformados 10 corpos de provas da massa atomizada (Figura 10) e 30 corpos de provas de resíduo com massa comercial todos sinterizados a uma temperatura de 1100°C, desses cada grupo de 10 corpos de prova foram preparados com 15%, 30% e 45% de resíduo, figuras 11, 12 e 13, respectivamente. Todos os corpos de prova foram dimensionados (Paquímetro Mitutoyo 0,05 mm) e pesados (BEL Engineering 0,0001 g) para posterior análise de retração volumétrica após a sinterização.

**Figura 8 – Molde utilizado para a fabricação dos corpos de prova.**



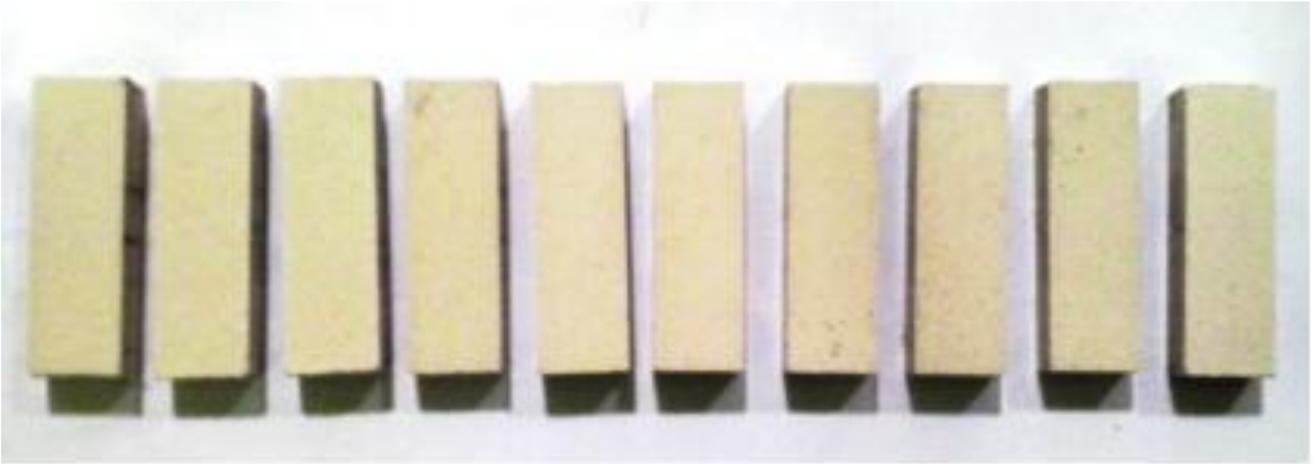
Fonte: Próprio autor.

**Figura 9 – Máquina utilizada para prensar os corpos de prova (EMIC DL-30000).**



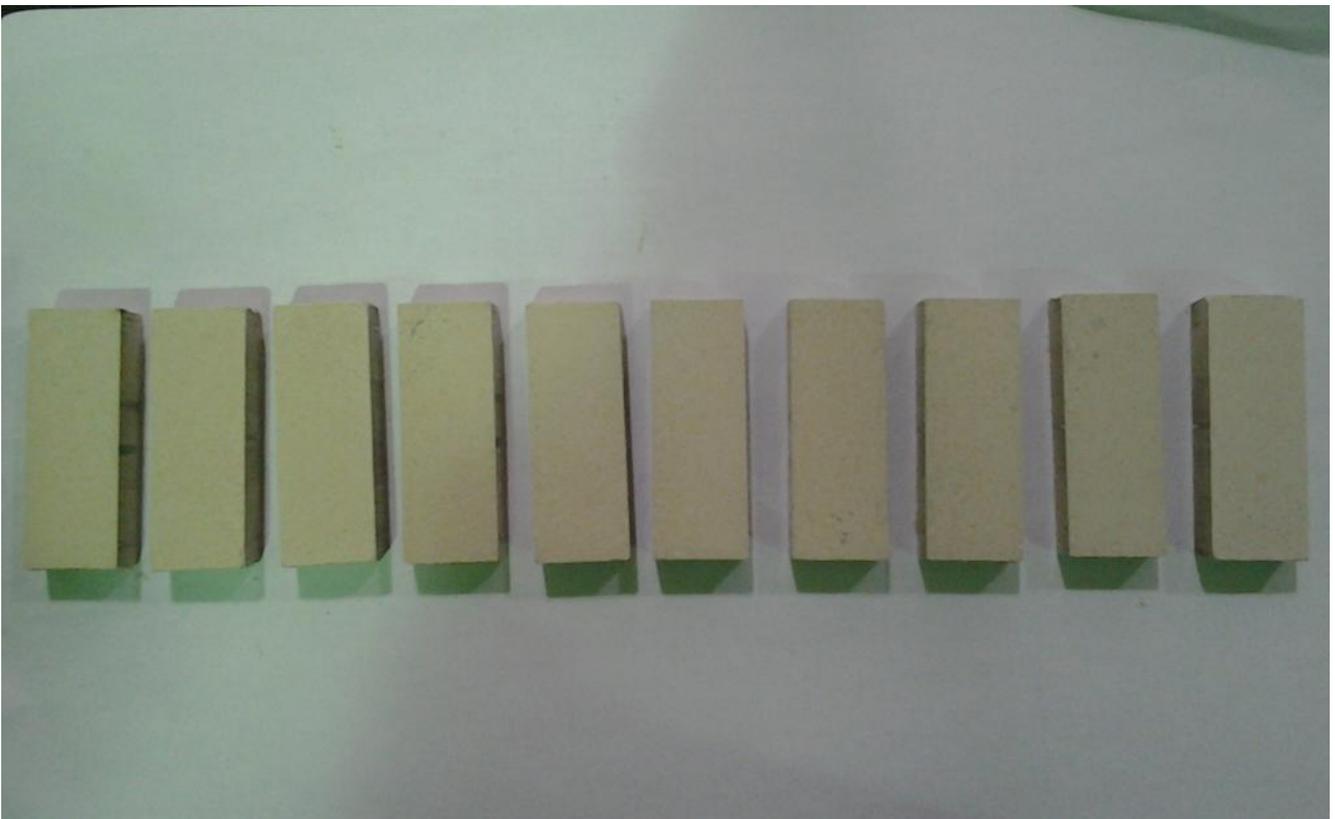
Fonte: Próprio autor.

**Figura 10 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada.**

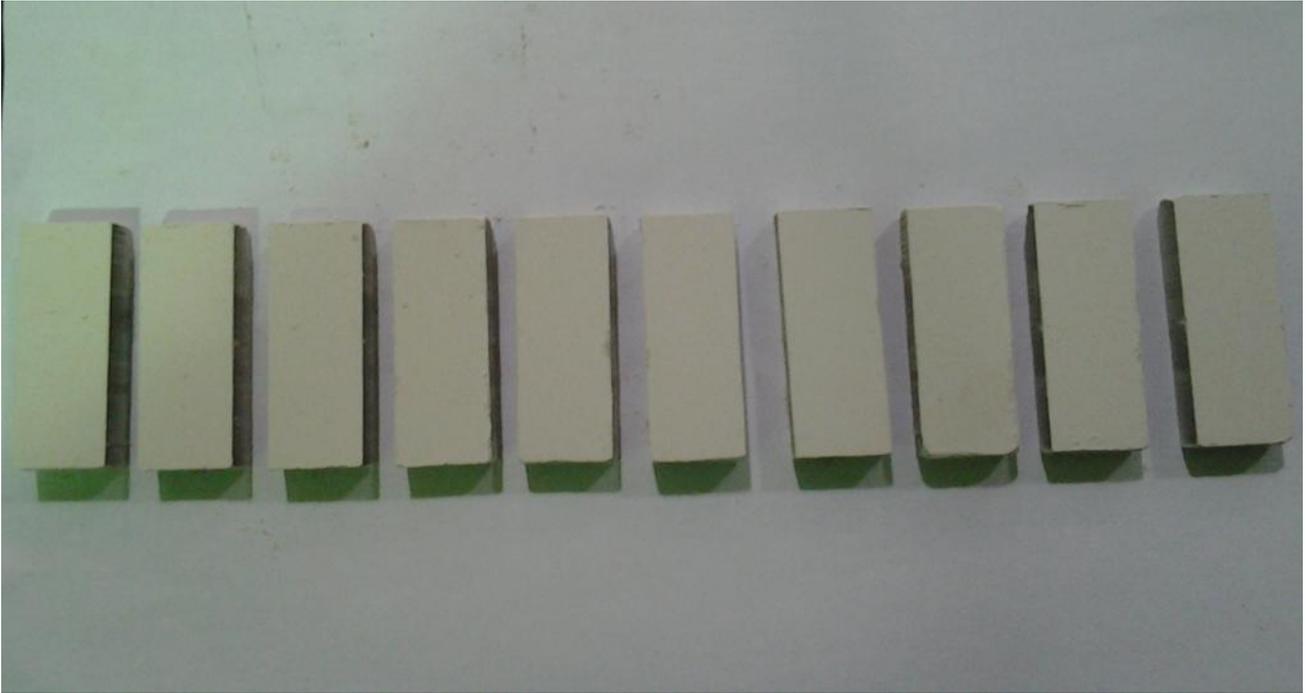


Fonte: Próprio autor.

**Figura 11 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada com 15% de resíduo.**



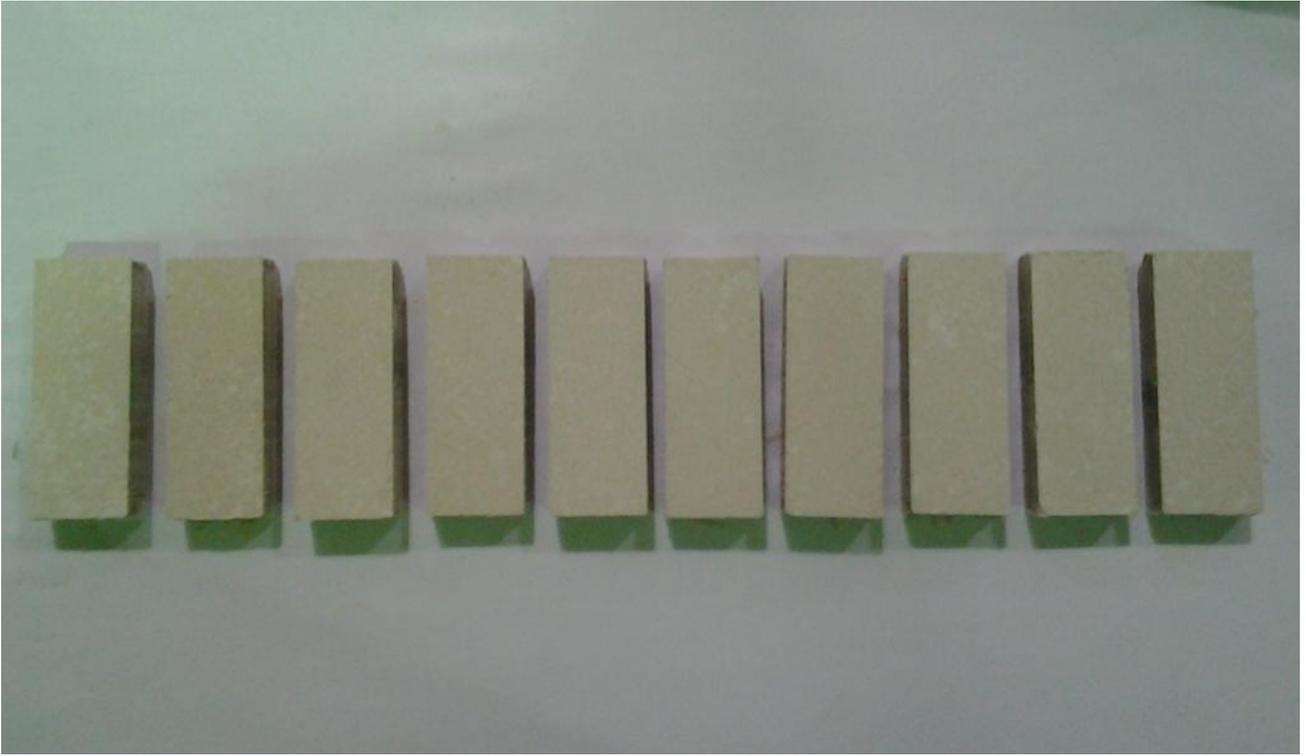
Fonte: Próprio autor.



**Figura 12 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada com 30% de resíduo.**

Fonte: Próprio autor.

**Figura 13 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada com 45% de resíduo.**

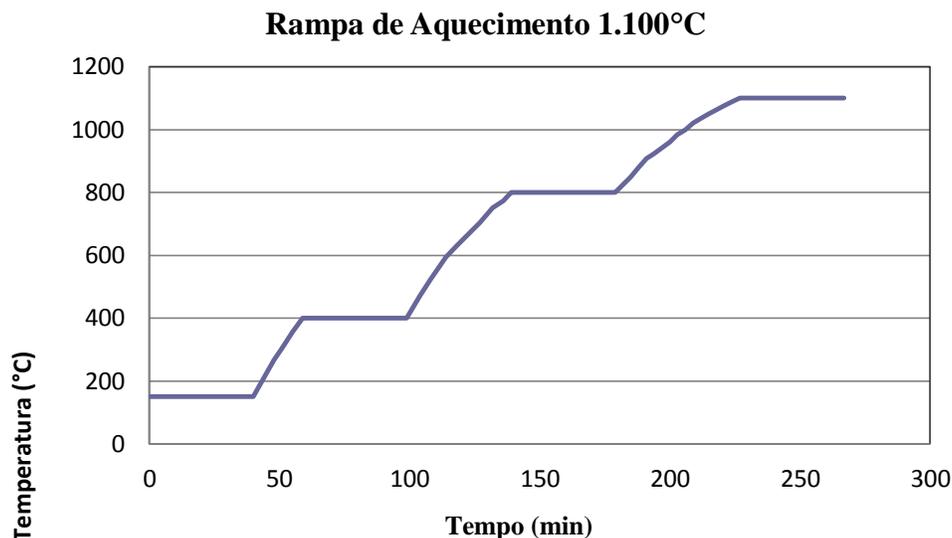


Fonte: Próprio autor.

#### 4.5 Sinterizações dos Corpos de Prova

Os corpos de prova prensados foram sinterizados em uma mufla, modelo NOVUS N1040 e com rampa de aquecimento conforme apresentado na figura 14. A rampa de aquecimento começou em 150°C permanecendo por 40 min, após esse tempo foi alterada a temperatura do forno para 400°C e estabilizando nessa temperatura por 40 min. Em seguida, a temperatura do forno foi aumentada para 800°C e mantida por 40 min nessa temperatura. O último patamar foi de 40 min na máxima temperatura estabelecida para os corpos de prova de 1.100°C. Depois de passados os 40 min em temperatura máxima, a mufla foi desligada e os corpos de prova foram resfriados por convecção dentro da mesma. Após o término da sinterização, todas as amostras foram pesadas (BEL Engineering 0,0001 g) e dimensionadas (Paquímetro Mitutoyo 0,05mm).

**Figura 14 – Rampas de aquecimento para as temperaturas de sinterização de 1.100°C.**



Fonte: Próprio autor.

#### 4.6 Retração Volumétrica

A retração volumétrica ocorre devido a uma densificação do material, em decorrência do coalescimento das partículas e formação de fase líquida durante a sinterização. A fase líquida formada durante a sinterização diminui a viscosidade enquanto a temperatura aumenta, preenchendo os vazios entre as partículas, permitindo uma diminuição da porosidade e uma maior densificação da peça.

(1) Para o cálculo da retração volumétrica (RV), as amostras foram dimensionadas antes e depois da sinterização e o cálculo do percentual de retração volumétrica foi obtido através da equação 1:

$$\% = \frac{(V1-V2)}{V1} \times 100$$

%RV = percentual de retração volumétrica (%);

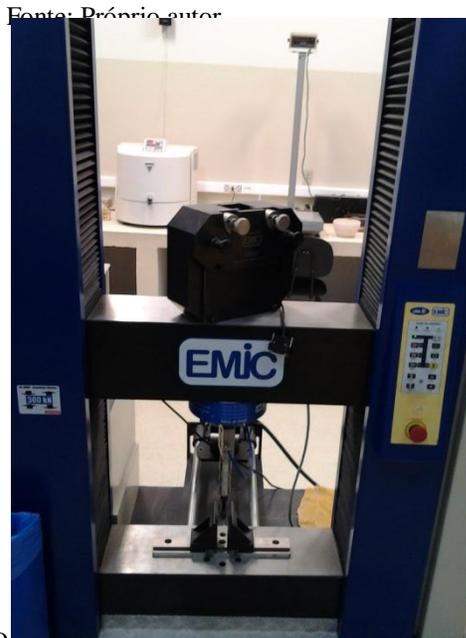
V1 = volume da peça antes da queima (cm<sup>3</sup>);

V2 = volume da peça após a queima (cm<sup>3</sup>).

#### 4.7 Ensaios de Flexão – Resistência Mecânica

O ensaio de flexão das amostras seguiu a norma NBR 13818:1997. Nela as dimensões de larguras dos corpos de prova devem ser entre 16 e 48 mm e com número mínimo de 10 corpos de prova. A máquina utilizada no ensaio de flexão foi a EMIC DL-30000 (Figura 15). A velocidade de aumento de carga foi de  $1 \pm 0,2$  MPa/s e a distância entre apoios foi de 44mm, considerando a saliência fora do apoio de 5mm.

**Figura 15 – Máquina utilizada para ensaio de flexão (EMIC DL-30000).**



A resistência do material como um todo, está relacionada com a espessura da peça, distância entre os apoios, largura da peça e a força de ruptura, conforme equação 2:

(2)

$$MRF = \frac{3FxL}{2Be^2}$$

F = força de ruptura, em Newton;

L = distância entre as barras de apoio, em milímetros;

B = largura do corpo de prova, em milímetros;

MRF = módulo de resistência à flexão, em MPa;

e = mínima espessura do corpo de prova, em milímetros.

#### 4.8 Absorção de Água dos Corpos de Prova

A absorção de água de um material cerâmico queimado é um parâmetro utilizado para medir a porosidade aberta e avaliar a fundência do material. Em geral, quanto menor a absorção de água de uma peça, maior a sua retração de queima, maior a sua densidade aparente após queima, maior a sua resistência mecânica à flexão e a carga de ruptura. Define-se como parâmetro de absorção de água o ganho em peso, expresso em porcentagem, que a peça apresenta quando introduzida em água em ebulição durante um período determinado.



**Figura 16 – Amostras em água fervendo para medir o teor de absorção de água.**

Fonte: Próprio autor.

As amostras foram submetidas ao ensaio de absorção de água baseado na norma ISO 10545-3:1995. As metades dos corpos de prova após o ensaio de flexão foram pesadas e numeradas para identificação das mesmas e deixadas em banho de água fervente (100°C) por duas horas (Figura 16). Ao

término do tempo de duas horas em água fervendo, o aquecimento foi interrompido e as mesmas  
 (4) foram resfriando por 4 horas. As amostras foram então retiradas uma a uma, secadas superficialmente e pesadas novamente. O cálculo para os valores de absorção de água foi feito pela equação 3:

$$(3) \quad \% = \frac{M_{final} - M_{inicial}}{M_{inicial}} \times 100$$

% A.A = absorção de água (%);

M final = massa das amostras úmidas (g);

M inicial = massa das amostras secas (g).

#### 4.9 Densidade Aparente

A densidade aparente corresponde ao volume ocupado por uma determinada massa de sólido, incluindo a porosidade. Para a determinação da densidade aparente das peças cerâmicas foi utilizado um equipamento cujo método de medida se baseia no empuxo que a peça experimenta quando imersa em água, utilizando o princípio de Arquimedes. O aparelho consiste em um recipiente contendo água, uma balança digital com incremento de 0,0001 g, uma haste e um elástico com a função de imergir a peça (Figura 17).

Primeiramente as amostras foram pesadas e os dados foram devidamente anotados. A seguir, o recipiente contendo água foi colocado sobre a balança, descontando seu peso (tara). Então, os corpos-de-prova foram imersos, o que gerou um peso, que também foi anotado.

Utilizando a equação 4 abaixo se pode calcular a densidade aparente de cada peça:

$$D_{ap} = \frac{MS}{MU - MI} \times \text{Densidade da água}$$

Dap = densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>);

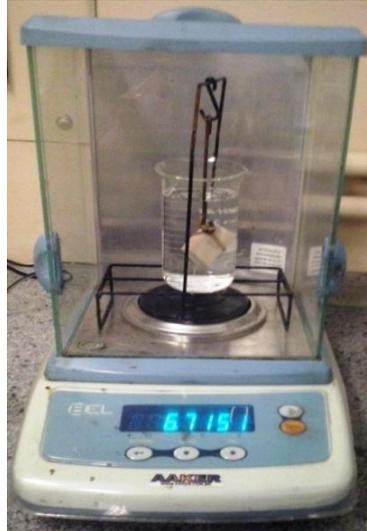
MS = massa da amostra seca (g);

MU = massa da amostra úmida (g)

MI = massa da amostra sob imersão (g);

Densidade da água é de  $1 \text{ g/cm}^3$ .

**Figura 17 – Aparelho para medir a densidade aparente das amostras.**



Fonte: Próprio autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

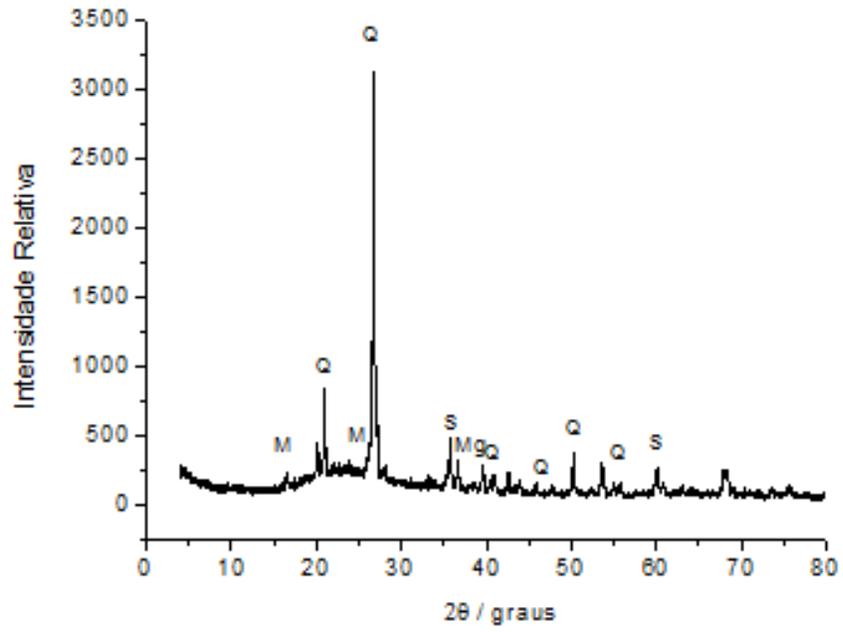
### 5.1 Caracterização do Resíduo de Porcelanato (RPP)

Foi determinado o teor de umidade do resíduo de 1,89% e de 5,17% para a massa comercial. A composição química do porcelanato, do polidor e do resíduo de polimento (RPP) obtidos pela técnica de fluorescência de raios X são apresentadas pela tabela 3.

Comparando os valores obtidos da composição química do resíduo com o porcelanato e o polidor, foi possível verificar que a alumina tem como origem o porcelanato, o óxido de magnésio está associado à base magnésiana presente no polidor e a sílica é oriunda do porcelanato e do polidor. Dessa forma, pode-se afirmar que o resíduo é composto principalmente pela própria massa do porcelanato e pelo resíduo gerado pelo polidor, ambos na etapa de polimento. Esse resultado é justificado pelo fato que durante o processo de polimento tem-se, devido à dureza do abrasivo empregado, uma perda mássica maior do porcelanato em relação à do polidor. A composição química da torta indica também uma quantidade maior de óxidos fundentes em relação ao porcelanato.

Na figura 18 está ilustrado o difratograma do resíduo obtido pelo polimento do porcelanato.

**Figura 18 – Difratograma da torta (resíduo do polimento de porcelanato).**



Fonte: Autor próprio.

**Tabela 2 – Composição química em termos de seus óxidos constituintes da torta (resíduo do polimento do porcelanato), massa atomizada (porcelanato) e do polidor.**

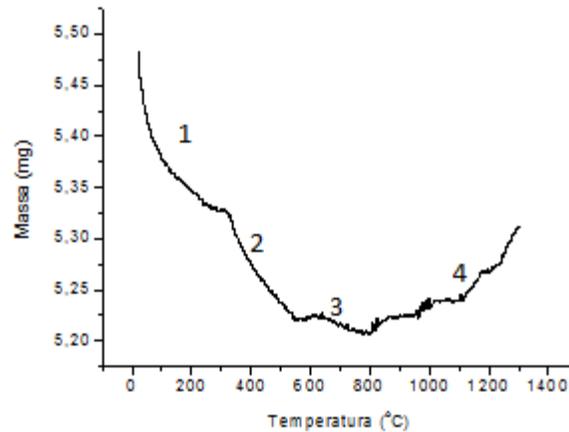
| Composto                       | Torta  |        | Porcelanato |        | Polidor |        |
|--------------------------------|--------|--------|-------------|--------|---------|--------|
|                                | %m/m   | Desvio | %m/m        | Desvio | %m/m    | Desvio |
| SiO <sub>2</sub>               | 66,120 | 0,233  | 68,179      | 0,186  | 22,130  | 0,091  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18,606 | 0,321  | 25,435      | 0,267  | -       | -      |
| ZrO <sub>2</sub>               | 1,273  | 0,007  | 0,039       | 0,001  | -       | -      |
| CaO                            | 2,286  | 0,008  | 1,530       | 0,003  | 2,308   | 0,019  |
| MgO                            | 3,819  | 0,008  | -           | -      | 44,710  | 0,002  |
| K <sub>2</sub> O               | 3,401  | 0,010  | 2,296       | 0,007  | 0,176   | 0,012  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,408  | 0,008  | 1,021       | 0,004  | 4,925   | 0,015  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,694  | 0,015  | 0,775       | 0,008  | -       | -      |
| MnO                            | 0,102  | 0,004  | 0,028       | 0,002  | 1,708   | 0,010  |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0,070  | 0,001  | 0,053       | 0,000  | -       | -      |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,041  | 0,001  | 0,008       | 0,000  | -       | -      |
| SrO                            | 0,037  | 0,001  | 0,027       | 0,000  | -       | -      |
| Cl                             | -      | -      | -           | -      | 22,834  | 0,070  |

Fonte: Próprio autor.

Pela análise da curva TG (Figura 19) observa-se que o processo de decomposição do resíduo ocorre em quatro etapas distintas, identificadas por 1, 2, 3 e 4, sendo que as três primeiras etapas, 1, 2 e 3, foram relacionadas à decomposição do resíduo, e a etapa 4, foi relacionada à decomposição do carbetto de silício em óxido de silício.

Na curva termogravimétrica a decomposição inicia-se à temperatura ambiente e termina à temperatura de 300,3°C, etapa 1. Neste processo a amostra perde 2,74% m/m de sua massa, considerando que a massa inicial é de aproximadamente de 5,475 mg e a massa ao final da etapa 1 é de 5,325 mg. A etapa 2 inicia-se à temperatura de 300,3°C e termina à temperatura de 600,0°C, nesta faixa de temperatura foi observado uma perda de massa de aproximadamente 1,92% m/m. A terceira etapa, ocorre na faixa de 600,0°C a 800,9°C, a amostra perde 0,28% m/m em massa. A decomposição do carbetto de silício em óxido de silício começa na etapa 4, sendo observado um ganho de massa ao final dessa etapa. O resíduo final representa 95,06% m/m do composto inicial e 1,93% m/m de ganho de massa é devido ao oxigênio acrescentado durante a queima.

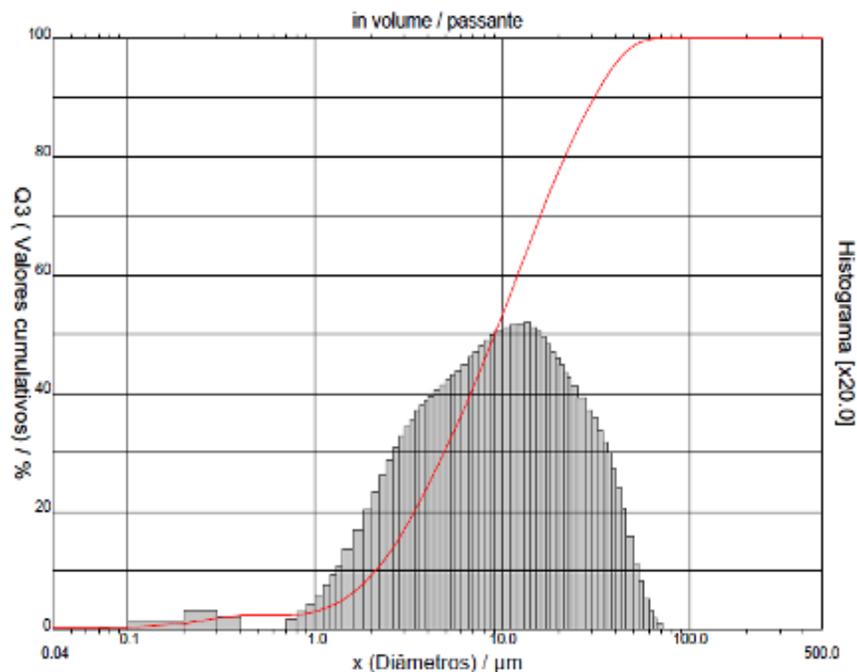
**Figura 19 - Curva termogravimétrica do resíduo de polimento do porcelanato.**



Fonte: Próprio autor.

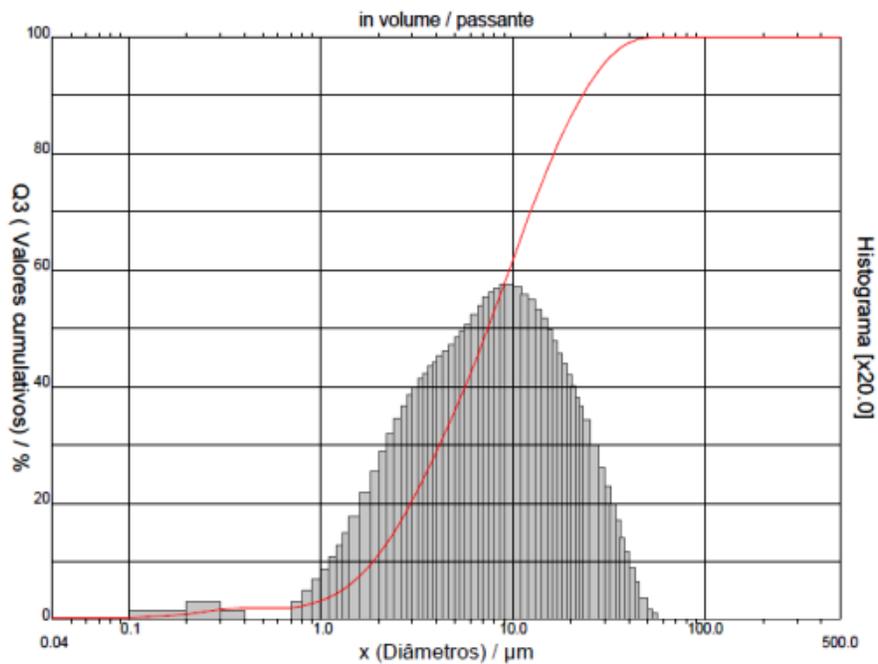
Na análise granulométrica do RPP após o peneiramento (Figura 20), é possível identificar que 90% das partículas possui um diâmetro menor que 31,54  $\mu\text{m}$  e uma média de 13,31  $\mu\text{m}$ . Já na análise granulométrica da massa comercial atomizada, 90% das partículas estão abaixo de 23,09  $\mu\text{m}$  e apresenta um diâmetro médio de 10,41  $\mu\text{m}$  (Figura 21).

**Figura 20 – Distribuição granulométrica do RPP.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 21 – Distribuição granulométrica da massa comercial atomizada.**



Fonte: Próprio autor.

## 5.2 Retração Volumétrica e Densidade Absoluta

Após a etapa de sinterização, todas as amostras foram dimensionadas e pesadas para análise das médias de densidade absoluta e retração volumétrica (Tabela 3). As amostras com 15% de resíduo apresentaram maior densidade e menor retração volumétrica, inicialmente isso parece ser estranho, pois quanto maior a retração volumétrica é de se esperar uma maior densificação, entretanto, as amostras verdes do resíduo 15% apresentaram valores superiores de densidade do que as do resíduo 45%.

**Tabela 3 - Retração volumétrica e densidade absoluta das amostras após a etapa de sinterização.**

| Amostras        | Retração Volumétrica (%) | Desvio padrão | Densidade Absoluta (g/cm <sup>3</sup> ) | Desvio padrão |
|-----------------|--------------------------|---------------|---|---------------|
| Massa Comercial | 16,97                    | 3,41          | 1,95                                    | 0,08          |
| Resíduo 15%     | 11,91                    | 3,86          | 2,05                                    | 0,05          |
| Resíduo 30%     | 18,86                    | 3,58          | 2,00                                    | 0,06          |
| Resíduo 45%     | 20,06                    | 3,43          | 2,02                                    | 0,08          |

Fonte: Próprio autor.

### 5.3 Resistência mecânica a flexão

Foram realizados os ensaios de flexão com 10 corpos de prova de todas as amostras (Figura 22). Com base nos resultados, foi possível calcular a média dos valores de módulo de resistência à flexão (MRF) (Tabela 4). Em dois corpos de prova da amostra de resíduo 15% foi possível verificar visualmente trincas provenientes do processo de prensagem que possivelmente resultaram em um ponto de fragilização, o que se pode confirmar com o valor individual mínimo de módulo de resistência à flexão para esses corpos de prova, o que prejudicou a média dos ensaios.

**Tabela 4 – Módulo de resistência à flexão (MRF) das amostras.**

| Amostras        | MRF (MPa) | Desvio padrão | Individual (mín.) | Individual (max.) |
|-----------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|
| Massa Comercial | 26,19     | 4,18          | 19,01             | 33,50             |
| Resíduo 15%     | 18,90     | 5,15          | 8,78              | 25,07             |
| Resíduo 30%     | 20,41     | 4,48          | 12,79             | 26,21             |
| Resíduo 45%     | 20,69     | 4,71          | 15,04             | 26,84             |

Fonte: Próprio autor.

Ao comparar os resultados da tabela 4, observa-se que das amostras com resíduo, a resíduo 45% obteve o melhor resultado de resistência mecânica à flexão e, portanto, indicando a melhor porcentagem de uso para o reaproveitamento do resíduo de polimento de porcelanato. E segundo a norma NBR 13818:1997, é possível classificar essa cerâmica na classe BIII (prensado) como um poroso que requer uma média mínima de 15MPa e requer um valor mínimo de módulo de flexão.

### 5.4 Absorção de Água, Porosidade Aparente e Densidade Aparente.

Para comparação dos resultados de absorção de água (A.A) (Tabela 5), porosidade aparente ( $P_a$ ) e densidade aparente ( $D_{ap}$ ) (Tabela 6), foi utilizado a média de dez corpos de prova, resíduo 15%, resíduo 30% e resíduo 45%.

**Tabela 5 – Absorção de água (%) das amostras.**

| Amostras        | A.A(%)  | Desvio padrão | Individual (máx) |
|-----------------|---------|---------------|------------------|
| Massa Comercial | 10,3035 | 2,0984        | 12,1383          |
| Resíduo 15%     | 0,7233  | 0,2325        | 1,2348           |
| Resíduo 30%     | 1,2924  | 0,2156        | 1,9671           |
| Resíduo 45%     | 1,3458  | 0,4406        | 2,0916           |

Fonte: Próprio autor.

**Tabela 6 – Porosidade aparente e densidade aparente das amostras.**

| Amostras        | $P_a$ (%) | Desvio padrão | $D_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Desvio padrão |
|-----------------|-----------|---------------|-------------------------------|---------------|
| Massa Comercial | 20,8330   | 3,8815        | 2,0328                        | 0,0558        |
| Resíduo 15%     | 1,5511    | 0,5148        | 2,1405                        | 0,0861        |
| Resíduo 30%     | 2,7856    | 0,4338        | 2,1588                        | 0,0470        |
| Resíduo 45%     | 2,8832    | 0,8775        | 2,1595                        | 0,0603        |

Fonte: Próprio autor.

Com a análise dos resultado pode-se afirmar que o resíduo 15% é o que apresenta o melhor resultado, tendo uma menor porosidade e a densidade aparente muito parecido com as outras amostras.

Os valores obtidos na absorção de água para essa temperatura classificam as amostras, segundo a norma NBR 13818:1997, em classe BIb (prensado), um grês que requer uma média de absorção de água entre 0,5 e 3% e um valor máximo individual de 3,3%.

O resultado de porosidade aparente possui também valores menores para a amostra com 15% de resíduo, indicando que durante a sinterização ocorreu um melhor preenchimento dos espaços vazios com os materiais fundentes presente em sua composição. E para a densidade aparente, a amostra de com 15% de resíduo obteve bons resultados e bem próximos ao das outras amostras.

## 6 CONCLUSÃO

Os corpos de prova com 15% de resíduo obtiveram os piores resultados nos ensaios de resistência à flexão, devido a falta de homogeneização que facilitou a formação de trincas devido a maior expansão do resíduo em relação a massa comercial, entretanto os absorção de água e porosidade aparente obteve ótimos resultados, podendo classificá-los segundo a norma NBR 13818:1997, como um poroso (classe BIII prensado). Esses resultados indicam possivelmente uma forma viável de reutilização do resíduo para obtenção de cerâmica de revestimento de paredes e pisos internos e externos e fachadas, acrescentando um maior valor agregado ao rejeito e diminuindo o impacto ambiental causado pela deposição desses em aterros industriais.

Ao contrário do esperado, as amostras da massa atomizada não indicaram os melhores resultados, fato que pode ser explicado pela temperatura de sinterização utilizada ser inferior ao necessário para uma boa densificação devido à limitação de temperatura da mufla. As amostras de resíduo em decorrência de já terem passado pelo processo de sinterização, conseqüentemente já possuem fases formadas, como a Mulita que confere resistência ao material. O fato de o resíduo apresentar maiores teores de óxidos fundentes, conforme observado na técnica de fluorescência de raios X (Tabela 3), faz com que necessitem de uma menor temperatura para atingirem uma boa densificação e resistência mecânica.

## Referências

- Albero, J.L.A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte I: O preenchimento das cavidades do molde. *Revista Cerâmica Industrial*, v.5, n.5, p. 23-28, 2000.
- Arantes, F. J. S.; Galesi, D. F.; Quinteiro, E.; Boschi, A. O. Manchamento do grês porcelanato. ***Cerâmica Industrial***, v. 6 n. 3, p. 19, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13817:1997**: placas cerâmicas para revestimento – classificação. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818:1997**: placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO (ANFACER). Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/>>. Acesso em: 5 maio 2014.
- BERNARDIN, A. M. et al. Reaproveitamento de resíduos de polimento e de esmaltação para obtenção de cerâmica celular. ***Cerâmica Industrial***, Criciúma, v. 11, n. 5/6, p. 31-34, set/dez, 2006.
- CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 3.ed. New York: Wiley& Sons, Inc., 1994.
- FONSECA, A. T. Técnicas de processamento cerâmico. Lisboa: Universidade Aberta, p. 554, 2000.
- MARQUES, L. N. et al. Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. ***Revista Eletrônica de Materiais e Processos***, v.2.2, p.34-42, jul/ago, 2007.
- MORAES, M. L. V. N. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- ROSSO, J.; CUNHA, E.; ROJAS-RAMIREZ, R. Características técnicas e polimento de porcelanatos. ***Cerâmica Industrial***, Florianópolis, v.10, n. 4, p. 11–14, jul/ago. 2005.
- RAMBALDI, E. et al, Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. ***Jornal of the European Ceramic Society***. v.27, abr, 2007.
- SILVA, J. E. **Desenvolvimento de composição de massa cerâmica para produção de porcelanato técnico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.