

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

**NATÁLIA MARIANO PIRES**

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE  
PORCELANATO PARA OBTENÇÃO DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO**

**BELO HORIZONTE**

**2014**

**NATÁLIA MARIANO PIRES**

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE  
PORCELANATO 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<sup>a</sup>. Ivete Peixoto Pinheiro**

**Coorientador: Dr. Claudinei Rezende Calado**

**BELO HORIZONTE**

**2014**

**NATÁLIA MARIANO PIRES**

**ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE  
PORCELANATO 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: 25 de agosto de 2014**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>a</sup>: Dr<sup>a</sup>. Ivete Peixoto Pinheiro – Orientadora**

---

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

---

**Prof<sup>a</sup>: Me. Jacyara Maria Alves Vieira**

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso à minha professora orientadora: Ivete Peixoto Pinheiro e ao professor coorientador: Claudinei Rezende Calado, que me incentivaram a estudar o tema proposto, bem como me apoiaram em todos os momentos em que precisei.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela minha vida.

Aos meus pais Valério Pires e Ellen Mariano, ao meu irmão Filipe Pires, ao meu marido Wagner Magno e a minha avó Cirene Mariano pelo apoio e incentivo de todos os dias.

Aos meus amigos Henrique Carvalho da Silva Coelho, 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 Ivete Peixoto Pinheiro e Claudinei Rezende Calado, orientadora e coorientador deste trabalho, respectivamente, por tudo que me proporcionaram, pelas orientações e ensinamentos.

Meu muito Obrigada!

“Todo trabalho tem seus problemas. Uma consideração essencial na escolha de uma carreira é determinar que tipo de problema você gosta de resolver.”

Steve Elledge, EUA

## 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. Na composição do resíduo descartado é observado a presença de carbeto de silício (SiC), que é proveniente do abrasivo empregado no agente polidor. Em elevadas temperaturas, o SiC se decompõe formando um composto sólido, o óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), e um gasoso, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A formação desse gás impede que o rejeito retorne diretamente à linha de produção, pois o mesmo atua como agente de expansão ficando retido dentro do material cerâmico. O trabalho foi conduzido partindo-se da caracterização do rejeito com a pretensão de testar a viabilidade do reaproveitamento do resíduo na fabricação de um novo produto cerâmico. Espera-se que o material cerâmico resultante apresente características para aplicação em ambientes que requerem menores valores de resistência mecânica e que permitam maiores valores de porosidade aparente e absorção de água. As temperaturas empregadas no processo de sinterização dos produtos cerâmicos (1.000°C, 1.050°C e 1.100°C) foram menores do que a utilizada industrialmente (1.248°C) na densificação de porcelanatos. As temperaturas escolhidas estão próximas ao início da decomposição do carbeto de silício, evitando assim um excesso da formação do gás carbônico e a expansão do corpo cerâmico. Verificou-se que as amostras de resíduo sinterizadas à temperatura de 1.100°C obtiveram os melhores resultados de módulo de resistência mecânica à flexão (37,14MPa), absorção de água (0,495%) e porosidade aparente (1,018 %), portanto, indicando a melhor temperatura de uso para o reaproveitamento do resíduo de polimento de porcelanato. E segundo a norma NBR 13818:1997, é possível classificar essa cerâmica obtida como um grês (classe BIb).

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

## ABSTRACT

The polished porcelain industry generates large amounts of waste from the process of polishing. The waste is typically dumped in landfills. The discarded residue is composed of silicon carbide (SiC), which is derived from the abrasive used in the polishing agent. At high temperatures, SiC is decomposed to form a solid compound, silicon oxide (SiO<sub>2</sub>), and a gas compound, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). The gas prevents that the waste is reused in the production, because it acts as a blowing agent within the ceramic material and remain trapped. This 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. It is expected that the resulting ceramic material characteristics enable its use in environments requiring low values of mechanical strength and permission higher values of porosity and water absorption. The sintering temperatures employed in the process of ceramic products (1000°C, 1050°C and 1100°C) were lower than that used in the densification of porcelain (1.248°C). The selected temperatures were near the beginning of decomposition of silicon carbide, thereby preventing the formation of excessive carbon dioxide and the expansion of the ceramic body. As a result it was found that the samples of waste sintered at a temperature of 1100°C achieved the best results of mechanical flexural strength (37,14MPa), water absorption (0,495%) and apparent porosity (1,018 %), thus indicating the best use temperature for reusing the polished porcelain waste. According to NBR 13818: 1997, it can be classified as stoneware ceramic (BIb class).

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

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Porcelanatos produzidos na Cecrisa. ....	17
Figura 2- Moinho de bolas.....	21
Figura 3- Esferas cerâmicas.....	21
Figura 4- Moagem úmida e atomização. ....	22
Figura 5- Esteira na empresa Cecrisa, onde a peça já é prensada no formato estabelecido. ....	23
Figura 6- Representação esquemática do empacotamento de esferas de diferentes tamanhos.	24
Figura 7- Forno da empresa Cecrisa onde o porcelanato é queimado.....	25
Figura 8- Surgimento de irregularidade na superfície após etapa de polimento. ....	26
Figura 9- Fluxograma do processamento do porcelanato.....	26
Figura 10- Amostras de RPP expandidas na Cecrisa após serem inseridas no processo produtivo de porcelanato. ....	27
Figura 11- Resíduo de RPP em depósito na Cecrisa. ....	28
Figura 12- Fluxograma da metodologia experimental adotada. ....	30
Figura 13- Molde utilizado para a fabricação dos corpos de prova.....	32
Figura 14- Máquina utilizada para prensar os corpos de prova (EMIC DL-30000). ....	33
Figura 15- Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada. ....	33
Figura 16- Corpos de prova do RPP prensados para a temperatura de sinterização de 1.000°C. ....	33
Figura 17- Corpos de prova do RPP prensados para a temperatura de sinterização de 1.050°C. ....	34
Figura 18- Corpos de prova do RPP prensados para a temperatura de sinterização de 1.100°C. ....	34
Figura 19- Rampas de aquecimento para as temperaturas de sinterização de 1.000°C, 1.050°C e 1.000°C.....	35
Figura 20- Máquina utilizada para ensaio de flexão (EMIC DL-30000). ....	36
Figura 21- Amostras em água fervendo para medir o teor de absorção de água.....	38
Figura 22- Aparelho para medir a densidade aparente das amostras. ....	38
Figura 23- Difrátograma da torta (resíduo do polimento de porcelanato).....	41
Figura 24- Curva termogravimétrica do resíduo de polimento do porcelanato.....	42
Figura 25- Distribuição Granulométrica do RPP. ....	43
Figura 26- Distribuição Granulométrica da massa comercial atomizada.....	43

Figura 27- Amostras de resíduo à temperatura de sinterização de 1.000°C, 1.050°C e 1.100 °C e da massa comercial atomizada, respectivamente, fraturadas após ensaio de flexão. ....45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação de revestimentos em função da absorção de água segundo ISO 13006/NBR 13818:1997.....	17
Tabela 2- A evolução das composições para porcelanato. ....	20
Tabela 3- Composição química em termos de seus óxidos constituintes da torta (resíduo do polimento do porcelanato), massa atomizada (porcelanato) e do polidor. ....	40
Tabela 4- Retração volumétrica e densidade absoluta das amostras após a etapa de sinterização. ....	44
Tabela 5- Módulo de resistência à flexão (MRF) das amostras. ....	45
Tabela 6- Absorção de água (%) das amostras.....	46
Tabela 7- Porosidade aparente e densidade aparente das amostras.....	46

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 OBJETIVO</b> .....	15
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
3.1 Definição de Cerâmica .....	16
3.2 Histórico da Cerâmica para Revestimento .....	16
3.3 Características do Porcelanato.....	17
3.4 Matéria-prima para Fabricação do Porcelanato e Desenvolvimento da Microestrutura. ...	18
3.5 Processamento do Porcelanato .....	20
3.5.1 <i>Etapa de Preparações da Massa</i> .....	20
3.5.2 Moagem.....	21
3.5.3 <i>Atomização</i> .....	22
3.5.4 <i>Prensagem</i> .....	23
3.5.5 <i>Secagem</i> .....	24
3.5.6 <i>Sinterização</i> .....	24
3.5.7 <i>Polimento</i> .....	25
3.6 Resíduo do Polimento de Porcelanato (RPP) .....	27
<b>4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	30
4.1 Visita Técnica.....	31
4.2 Preparação das Amostras.....	31
4.3 Caracterização do Resíduo de Porcelanato (RPP).....	31
4.4 Moldagens dos Corpos de Prova .....	32
4.5 Sinterizações dos Corpos de Prova.....	34
4.6 Retração Volumétrica.....	35
4.7 Ensaio de Flexão – Resistência Mecânica .....	36
4.8 Absorção de Água dos Corpos de Prova .....	37
4.9 Densidade Aparente.....	38

4.10 Porosidade Aparente.....	39
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>40</b>
5.1 Caracterização do Resíduo de Porcelanato (RPP).....	40
5.2 Retração Volumétrica e Densidade Absoluta.....	44
5.3 Resistência Mecânica à Flexão.....	44
5.4 Absorção de Água, Porosidade Aparente e Densidade Aparente.....	46
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de revestimentos cerâmicos vem tendo um grande aumento na produção. O Brasil é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a segunda posição em produção e consumo (ANFACER, 2014). No constante processo de modernização, as indústrias de revestimento cerâmico desenvolveram o porcelanato, que de acordo com a norma NBR 13817-1997 é um produto que apresenta baixa absorção de água e excelentes propriedades técnicas. Este material é proveniente de uma produção em linha que utiliza prensas hidráulicas de altíssima pressão e alta temperatura de queima, superior a 1200C°, o que possibilita a obtenção de uma densa cerâmica com elevadas características químicas, físicas e mecânicas.

Todo revestimento cerâmico tem certa porosidade, isto é, tem espaços vazios em sua base. Quanto menor a quantidade de poros de um revestimento, menor a quantidade de água que ele pode absorver e melhores serão as suas características técnicas. Para realçar a estética do material, a superfície do porcelanato pode ser polida. Durante o polimento, uma camada, cerca de 0,5mm a 1,0mm, da peça é removida fazendo com que uma fração dos poros fechados passe a fazer parte da nova superfície. Por isso, para reduzir ao máximo a incidência de poros trabalha-se com a temperatura de densificação mais elevada possível, a partir de 1200°C (ROSSO, 2005).

Com o acelerado avanço na produção de porcelanato, já se percebe um aumento considerável no volume de resíduos provenientes das indústrias cerâmicas de revestimento. O processo industrial de polimento, apesar de aumentar fortemente a aparência estética do produto, provoca um grande impacto ambiental causado pela disposição do resíduo do polimento de porcelanato (RPP). O RPP é uma lama que não pode ser descartada em aterros domésticos sendo composta por água, partículas provenientes do material cerâmico oriundo do polimento do porcelanato e do material abrasivo desprendido durante o processo, contendo partículas abrasivas de carbeto de silício (SiC).

A análise química desse resíduo possibilitou a sua classificação como Classe II-A – não –inerte. Segundo a NBR 10.004:2004, os resíduos Classe II – não perigosos são divididos em classe II-A – não inertes e II-B – inertes, na primeira classificação se enquadram os que têm propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. O RPP não possui substâncias com características que o poderiam enquadrar na Classe I (Perigosos). Entretanto, apresentam riscos ao meio ambiente como um todo quando em níveis

elevados, o que possibilita a sua deposição apenas em aterros industriais, que são preparados para receber esses resíduos (RIBEIRO, 2010).

O aumento de resíduos nas indústrias gera custos de acondicionamento adequado dos resíduos, gastos com a armazenagem, transporte e aterros industriais. Assim, visando soluções alternativas por meio da reciclagem e/ou reaproveitamento dos resíduos industriais, agregando a este valor comercial e pleno atendimento à legislação ambiental, foram realizados estudos com resíduos da indústria de porcelanato.

## 2 OBJETIVO

Nas últimas décadas as considerações ambientais começaram a ter um papel prioritário na maioria dos países, havendo maior preocupação em tratar, reduzir ou reaproveitar os resíduos gerados. É imprescindível, também, o desejo de reduzir custos em um pensamento capitalista. Nessa linha de raciocínio, este trabalho tem como objetivo:

- Caracterizar o resíduo do polimento de porcelanato.
- Estudar a viabilidade de sua reutilização na fabricação de um produto de revestimento cerâmico de pisos.
- Obter um produto com maior valor agregado.
- Reduzir a quantidade de resíduo acumulado nas indústrias cerâmicas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Definição de Cerâmica

Cerâmica, segundo a Associação Brasileira de Cerâmica, é todo material inorgânico, não metálico, obtido geralmente por tratamento térmico a temperaturas elevadas. O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”, indicando que as propriedades desejáveis desses materiais são normalmente atingidas por meio de um processo térmico a alta temperatura conhecido por queima (CALLISTER, 1994). O setor cerâmico é amplo, o que induz a dividi-lo em subsetores ou segmentos que levam em conta, sobretudo, o tipo de utilização final. Os Materiais de Revestimento (MR) pertencem ao segmento de materiais usados na construção civil para revestimento de paredes, pisos de ambientes internos e externos.

#### 3.2 Histórico da Cerâmica para Revestimento

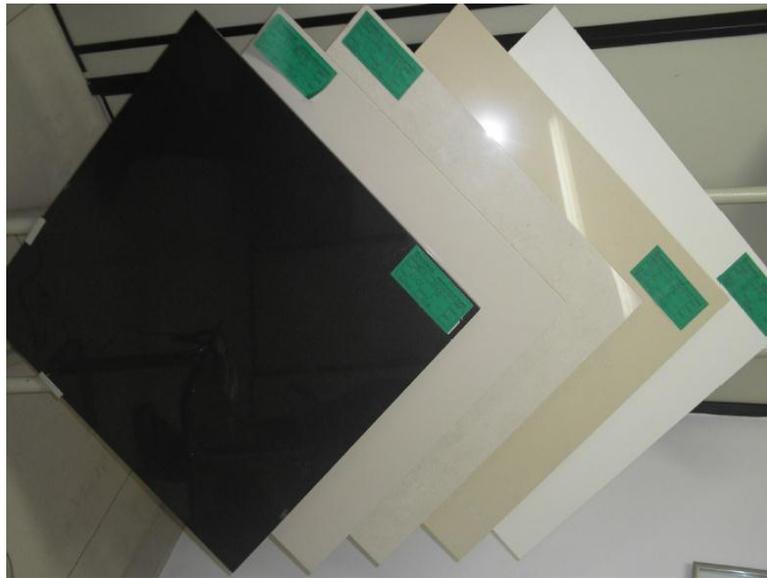
A cerâmica para revestimento vem sendo produzida há séculos, destinada às mais variadas aplicações, como para fins utilitários e fins estéticos. Sua aplicação à arquitetura, com o uso dos revestimentos cerâmicos, tem início com as civilizações árabes. A origem do nome “azulejo” provém dos árabes, sendo derivado do termo “*azuleicha*”, que significa “pedra polida”. Os árabes a levaram para a Espanha e, de lá, se difundiu por toda a Europa. Portugal foi o país europeu que, a partir do século XVI, mais utilizou o revestimento cerâmico em seus prédios, apesar de não ser o grande produtor (ANFACER, 2014).

No século XIX devido ao avanço industrial no Brasil, decorrente da Revolução Industrial, o azulejo sai do interior dos edifícios para revestir o seu exterior. O Brasil, hoje, é um grande produtor de revestimento cerâmico. A cada dia a qualidade e variedade desse material aumentam, cresce a utilização da cerâmica no Brasil para revestir pisos e paredes de todos os espaços internos da casa, assim como espaços externos. A indústria de revestimentos cerâmicos vem passando por um grande aumento na produção de porcelanatos e grês polidos nos últimos anos, devido ao elevado valor agregado desses materiais (ANFACER, 2014).

### 3.3 Características do Porcelanato

Um dos produtos de maior valor agregado no segmento de revestimentos cerâmicos é o porcelanato (Figura 1). Segundo a ISO 13006/NBR 13818:1997, o porcelanato é um produto cerâmico com especificação BIa significando material prensado com absorção de água menor ou igual a 0,5% (Tabela 1).

**Figura 1 - Porcelanatos produzidos na Cecrisa.**



Fonte: Próprio autor.

**Tabela 1 – Classificação de revestimentos em função da absorção de água segundo ISO 13006/NBR 13818:1997.**

Tipologia de Produto	Absorção de Água - AA(%)	Grupo de Absorção	Aplicação
Porcelanato	Até 0,5	BIa	Paredes e pisos internos e externos e fachadas <sup>**</sup> .
Grês	0,5 a 3,0	BIb	Paredes e pisos internos e externos e fachadas <sup>**</sup> .
Semi-Grês	3,0 a 6,0	BIIa	Paredes e pisos internos e externos <sup>*</sup> .
Semi-porosa	6,0 a 10,0	BIIb	Paredes internas e pisos internos <sup>*</sup> .
Poroso	Acima de 10,0	BIII	Paredes internas <sup>*</sup> .

\*Ambientes acima de zero grau

\*\*Ambientes sujeitos a todas as temperaturas

Fonte: Rosso (2005).

O porcelanato destaca-se por algumas características segundo Pinheiro (2006):

- Resistência à abrasão: recomendado para áreas de altíssimo tráfego. A resistência à abrasão representa a oposição ao desgaste superficial do esmalte das placas cerâmicas causado pelo movimento de pessoas ou objetos.
- Resistência ao gelo: devido à ausência quase total de porosidade, a água não consegue penetrar no interior e então não se estabelece o mecanismo de expansão devido à transformação da água em gelo.
- Resistência química e ao manchamento: essa resistência refere-se à capacidade que a superfície da placa cerâmica tem de não alterar sua aparência quando em contato com determinados produtos químicos ou agentes manchantes.
- Uniformidade de cores: efeito estético agradável aos olhos.
- Impermeabilidade: oferece maior resistência às manchas e maior facilidade de limpeza.
- Resistência à flexão: o porcelanato possui um dos maiores níveis de resistência à flexão devido à sua extrema compactação.

#### 3.4 Matéria-prima para Fabricação do Porcelanato e Desenvolvimento da Microestrutura.

A concepção de uma massa cerâmica, no que tange a formulação, considera vários fatores, tais como: cor, qualidade, características técnicas e estabilidade química das matérias-primas. Assim, a sua seleção para uso como componentes da massa cerâmica deve ter como critérios básicos às propriedades requeridas do produto e as características inerentes ao processo de fabricação (PINHEIRO, 2006). As matérias-primas básicas do porcelanato são compostas por uma mistura de argilas, feldspatos, areias feldspáticas, caulins e podendo-se utilizar filitos e aditivos quando necessários (MORAES, 2007).

As matérias-primas cerâmicas podem ser classificadas como plásticas e não-plásticas. As principais funções dos materiais plásticos são de atuar como agente suspensor, facilitar a conformação, proporcionar resistência mecânica e ser portador de óxidos formadores de fases vítreas e cristalinas. As principais funções dos materiais não plásticos são de melhorar a permeabilidade, a compacidade, portador de óxidos formadores de fases vítreas e cristalinas, por ser inerte reduz as retrações de secagem e de queima (SILVA, 2010). As principais matérias-primas plásticas utilizadas no preparo das massas de revestimentos são argilas plásticas, caulim e argilas fundentes. Dentre as matérias não-plásticas, destacam-se os filitos, fundentes feldspáticos, o quartzo, o talco e os carbonatos, sendo que o filito e o talco

apresentam também características plásticas. A presença de quartzo nas massas de cerâmica branca e de materiais de revestimento é de fundamental importância, já que este é um dos componentes responsáveis para o controle da dilatação e para ajuste da viscosidade da fase líquida formada durante a sinterização da massa cerâmica, além de facilitar secagem e liberação de gases durante a queima e ser um importante regulador da correta relação entre  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para a formação de mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) (MORAES, 2007).

Os feldspatos desempenham nas massas de porcelanato uma função de fundentes, já que proporcionam a formação das 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. Desta maneira, os feldspatos são os responsáveis iniciais do processo de densificação, que contribui majoritariamente para a densificação das peças e, conseqüentemente, para as propriedades desejadas do porcelanato (ROSSO, 2005).

A caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) além de conferir brancura à massa, é uma portadora fundamental do óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que durante a fase de vitrificação da massa cerâmica torna-se um regulador do equilíbrio das reações. De fato, a alumina participa na formação de uma fase vítrea do tipo sílico-aluminosa em associação com elementos alcalinos fundentes, ou também é encontrada, predominantemente no final da queima, como mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) que, pela sua estrutura em forma de agulhas, atua como um “esqueleto” aos produtos obtidos, contribuindo para o aumento da resistência mecânica (SILVA, 2010).

As argilas, por sua vez, contribuem para uma série de funções, dentre as quais: conferir características ligantes e plasticidade à massa cerâmica, ou seja, a capacidade de conformação das peças; aportar propriedades reológicas, facilitando a fluidez; conferir como fundentes uma boa densificação; desenvolver ótimas características mecânicas nos corpos sinterizados (SILVA, 2010).

O porcelanato é uma cerâmica que apresenta uma microestrutura densa, constituída por fases cristalinas, mulita e quartzo, em quantidade minoritária, imersas em uma fase vítrea majoritária, em virtude do elevado teor de fundentes utilizado em sua produção e do rápido ciclo de queima (MARQUES, 2007). Durante a sinterização, as matérias-primas que contêm minerais alcalinos altamente fundentes a altas temperaturas (ilita, feldspato, etc.) produzem grande quantidade de fase líquida, cuja viscosidade diminui com a elevação da temperatura, fazendo com que, por forças de capilaridade, penetre nos poros existentes reduzindo-os gradativamente. O quartzo se dissolve parcialmente na fase líquida e uma nova fase cristalina, a mulita, se forma. O produto queimado é constituído de uma matriz vítrea, na qual partículas

de mulita e as partículas de quartzo que não se dissolveram totalmente estão dispersas (MORAES, 2007).

As composições das formulações empregadas na obtenção do porcelanato sofreram grandes mudanças ao longo dos últimos anos, esta mudança deve-se ao desenvolvimento tecnológico ocorrido na área de maquinarias utilizadas no setor cerâmico. Antes se levava de 40 a 50 horas a temperaturas de 1200°C para a obtenção do porcelanato. Hoje, com essas melhorias, conseguem-se ciclos de 50 a 70 minutos, a temperaturas que variam entre 1200°C e 1250°C. No ciclo de queima rápida, os componentes da massa geralmente se mantêm no sinterizado sem a formação de novas fases, o que se observa é a formação da fase mulita, ao contrário da queima lenta, onde os componentes participam das muitas reações, o que leva à formação de novas fases, com a formação de novos compostos (Tabela 2) (MORAES, 2007).

**Tabela 2 - A evolução das composições para porcelanato.**

<b>Matérias-Primas</b>	<b>1985-1990 (%)</b>	<b>A partir de 1990 (%)</b>
Argilas plásticas	15 a 30	5 a 15
Argilas semi-plásticas	--	10 a 25
Caulins	10 a 30	5 a 10
Feldspato	20 a 30	25 a 40
Areias feldspáticas	5 a 15	10 a 20
Areias quartzosas	5 a 10	5 a 10
Talco	0 a 5	0 a 3

Fonte: Moraes (2007)

### 3.5 Processamento do Porcelanato

#### 3.5.1 Etapa de Preparações da Massa

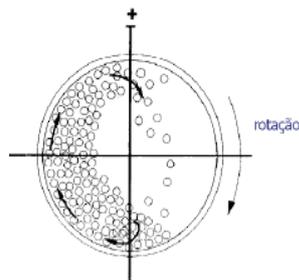
O processo de fabricação é iniciado com a dosagem das matérias-primas, mediante uma formulação pré-determinada. Antes desta etapa do processo é necessário um controle rigoroso na pré-liberação das matérias-primas e também da umidade de consumo das mesmas, para que a formulação tenha peso real, conforme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

### 3.5.2 Moagem

A moagem de porcelanatos deve proporcionar principalmente elevada finura da matéria-prima, homogeneização e valor de absorção de água praticamente nulo (ROSSO, 2005). Os resíduos da moagem das massas para a produção de porcelanato devem estar entre 0,5 e 1 % quando passa em malha de 44 $\mu$ m (MORAES, 2007). A operação de redução de tamanho efetua-se para aumentar a reatividade entre os materiais e diminuir a incidência das impurezas presentes nas matérias-primas. A esta operação sempre vem associada à de peneiramento posterior para a separação das partículas de maior tamanho. A descarga da barbotina, suspensão aquosa de partículas sólidas, é feita por meio do peneiramento da mesma em tanques aéreos, térreos ou subterrâneos. Nesta etapa é realizada a coloração da barbotina. Após adição do corante, a mesma deve permanecer em agitação, no mínimo, 24 horas para homogeneização da cor. 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 viscosidade da fase vítrea presente (KUMMER, 2007).

Na moagem a seco, as matérias-primas com alto teor de umidade são secas e levadas a um moinho (Figura 2), onde são reduzidas a tamanhos de partículas apropriados devido ao atrito das esferas cerâmicas (Figura 3). Posteriormente, o pó é umidificado e granulado. Na moagem via úmida, as matérias-primas são moídas junto com uma quantidade de água suficiente para transformá-las em uma suspensão cerâmica bastante homogênea (Figura 4) (SILVA, 2010).

**Figura 2 – Moinho de bolas**



Fonte: Barros (2005)

**Figura 3 - Esferas cerâmicas.**



Fonte: Barros (2005)

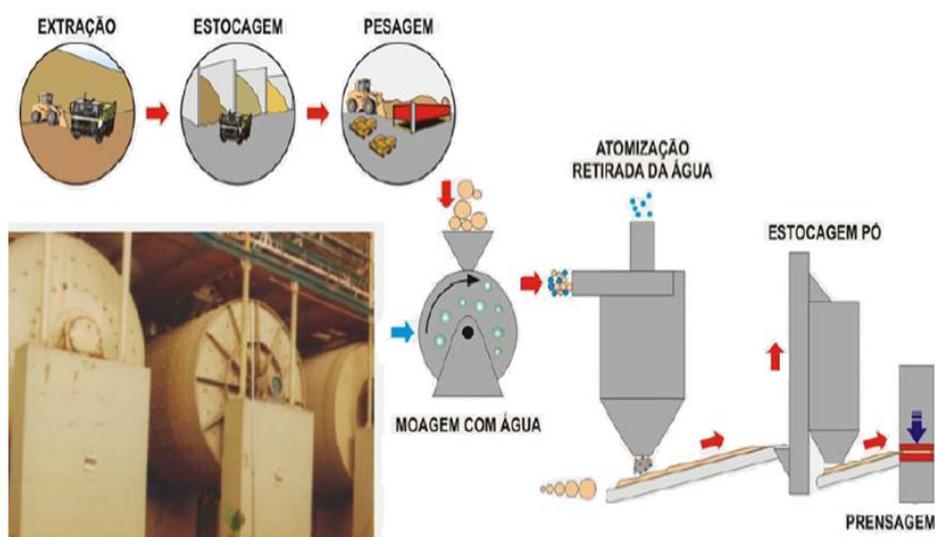
### 3.5.3 Atomização

O processo de atomização (Figura 4), também conhecido como “spray-dryer”, consiste na transformação de uma suspensão aquosa de partículas sólidas, denominada barbotina, em partículas secas, a partir da pulverização da suspensão no interior de uma câmara aquecida (500 a 600°C) (RIBEIRO, 2001).

A operação de atomização consiste em três etapas: formação das gotículas, secagem das gotículas sob fluxo de ar quente, transporte e separação do pó seco (SANCHEZ, 1998). A barbotina é bombeada para um sistema dispersor, localizado no interior de uma câmara de secagem ventilada com ar previamente aquecido e, finamente dividida em elevado número de pequenas gotículas. Essas gotículas pulverizadas, que rapidamente adquirem uma forma esférica, por ação da forte pressurização exercida e pela tensão superficial, sofrem rápida evaporação de água. Os granulados secos resultantes são separados do ar quente e úmido para posterior utilização. A operação de atomização permite a remoção de 30 a 45% de água da suspensão. Com isso, obtêm-se grânulos com teor de umidade entre 5 e 7%, com características e propriedades adequadas para as operações subsequentes (RIBEIRO, 2001).

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).

**Figura 4 - Moagem úmida e atomização.**



Fonte: Barros (2005).

### 3.5.4 Prensagem

Na etapa da prensagem (Figura 5) busca-se, além da conformação das placas de porcelanato, reduzir a porosidade interna da peça. Os pós são comprimidos entre duas superfícies, uma móvel e outra fixa (estampo). A pressão impressa provoca redução do volume tanto da porosidade intergranular quanto da porosidade intragranular, resultando em um forte adensamento do pó através do rearranjo e uma parcial deformação dos grânulos, permitindo uma elevada densidade a verde do corpo cerâmico (MORAES, 2007).

No caso da estampagem do porcelanato, a pressão específica de compactação para massas de revestimento é da ordem de 35-45MPa, o que permite obter uma densidade de 1,95-2,00g/cm<sup>3</sup>. Não deve haver gradiente de densidade no material para evitar deformações e desvios de ortogonalidade (PINHEIRO, 2006).

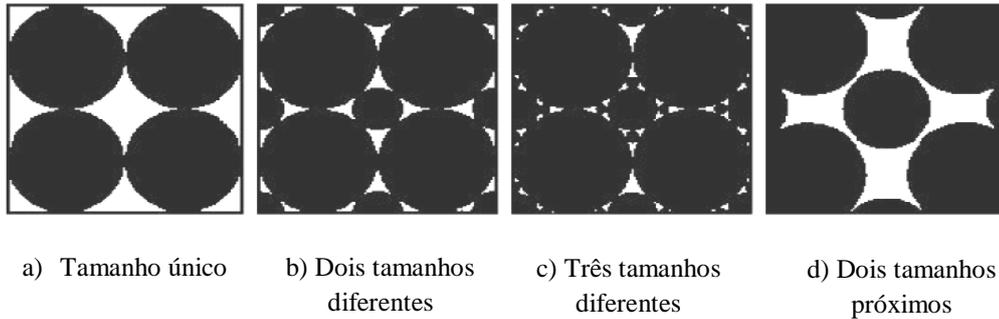
**Figura 5 - Esteira na empresa Cecrisa, onde a peça já é prensada no formato estabelecido.**



Fonte: Fotografia do próprio autor retirada na empresa Cecrisa.

A partir de modificações na distribuição de tamanhos de partículas de uma determinada matéria-prima é possível obter diferentes compactações nas peças conformadas (Figura 6) (PUREZA, 2004). Uma distribuição de tamanho de partículas adequada promove um empacotamento de partículas de elevada densidade relativa, minimizando o volume dos poros no compacto. A condição de máximo empacotamento é obtida com grânulos de formato esférico, isento de crateras ou ocos, de superfícies lisas e com uma distribuição de três tamanhos diferentes (Figura 6 – c) (MORAES, 2007).

**Figura 6 - Representação esquemática do empacotamento de esferas de diferentes tamanhos.**



Fonte: Pureza (2004).

### 3.5.5 Secagem

A etapa de secagem tem como função reduzir a quantidade de água que foi utilizada para a moldagem. Nessa fase, verifica-se um aumento de resistência mecânica da peça cerâmica, atribuída a uma densificação causada pelo empacotamento e atração de partículas que aumenta as forças de ligação entre as mesmas. Os valores de resistência à flexão deverão ser superiores a  $25 \text{ Kgf/cm}^2$  ( $2,45\text{MPa}$ ) (OLIVEIRA, 2000). Nessa fase do processo, deve-se ter um cuidado rigoroso com a velocidade de secagem das peças, pois uma secagem superficial muito rápida pode levar ao aparecimento de fissuras quando a água interna tentar migrar para fora da peça (MORAES, 2007). A temperatura média de secagem é em torno de  $170^\circ\text{C}$  e ao final do processo, o revestimento seco sai com o conteúdo de água usualmente inferior a 1% do peso da massa (HANSEN, 2010).

### 3.5.6 Sinterização

A sinterização compreende a etapa final do processo de produção do porcelanato. Nela, o revestimento cerâmico adquire suas características mecânicas e estabilidade química. A sinterização do porcelanato, a monoqueima (Figura 7), tem por objetivo a vitrificação da massa cerâmica ao ponto de se chegar a valores de absorção de água nulos ou quase nulos, além de se atingir a estabilidade dimensional dentro do ciclo considerado. Durante as temperaturas mais elevadas do ciclo de queima, a fase vítrea de elevada viscosidade, formada pelas matérias-primas fundentes, escorre e ocupa os espaços vazios entre as partículas mais refratárias e dessa forma reduz a porosidade e, devido às forças de capilaridade, ocorre a aproximação das partículas, e conseqüentemente a retração e a densificação do corpo. Durante

o resfriamento, esse material líquido se transforma em um “vidro” que liga as partículas mais refratárias aumentando a resistência mecânica (MORAES, 2007).

Duas das principais variações sofridas pelo corpo cerâmico durante a queima são: a diminuição da porosidade, que pode ser caracterizada pela absorção de água (AA), e a retração, que é geralmente caracterizada através da retração volumétrica (RV) (PINHEIRO, 2006). A sinterização é feita em fornos, com ciclos de queima de 60 a 70 minutos e temperaturas entre 1200°C e 1250°C (HECK, 1996).

**Figura 7 – Forno da empresa Cecrisa onde o porcelanato é queimado.**

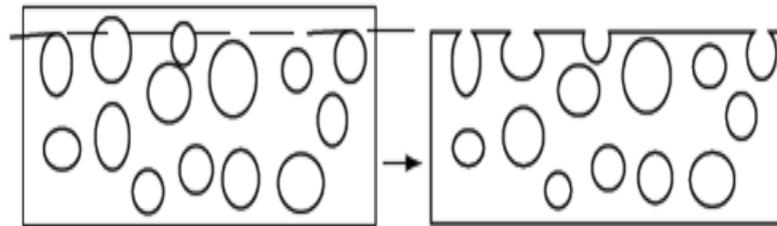


Fonte: Fotografia do próprio autor retirada na empresa Cecrisa.

### *3.5.7 Polimento*

A etapa de polimento do porcelanato ocorre em um equipamento composto por várias cabeças polidoras formada de materiais abrasivos, que em contato com as peças em alta rotação com velocidade controlada e na presença de água, fluído responsável pela limpeza da peça em polimento e sua refrigeração, executam o polimento, utilizando a cada etapa uma granulometria mais fina do agente abrasivo, até conseguir-se o resultado desejado (KUMMER, 2007). A intenção do polimento é obter placas com aparência extremamente brilhosas, o que é uma característica bastante procurada pelos consumidores de revestimento, devido ao efeito estético e a facilidade na limpeza (MORAES, 2007). Durante a etapa de polimento, alguns poros fechados que se encontram distribuídos no interior da peça são abertos para superfície, podendo haver a diminuição da resistência ao manchamento, levando a deterioração da superfície com o uso. Para evitar as manchas, ao final do processo de polimento, as peças podem receber também uma camada de impermeabilizante que dificulta a penetração de agentes manchantes na superfície da peça (Figura 8) (PINHEIRO, 2006).

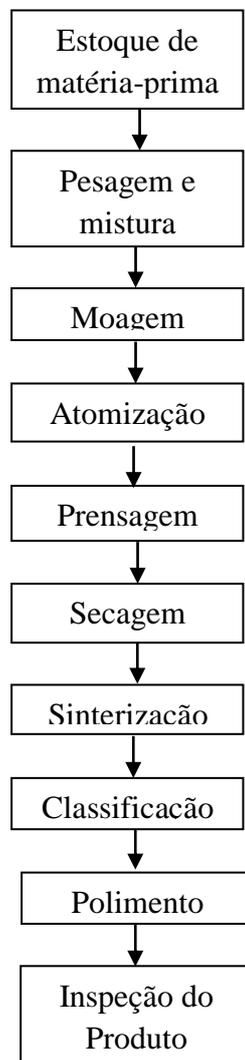
**Figura 8 – Surgimento de irregularidade na superfície após etapa de polimento.**



Fonte: Rosso (2005)

Essa etapa de polimento gera grande quantidade de resíduo (RPP), particularmente devido ao aumento da produção que vem ocorrendo nos últimos anos. Este resíduo gera um novo custo aos produtores do setor, que necessitam gerenciá-lo e descartá-lo adequadamente. O processamento do porcelanato pode ser resumido no fluxograma abaixo (Figura 9):

**Figura 9 – Fluxograma do processamento do porcelanato.**



Fonte: Produzido pelo autor.

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

O resíduo do polimento de porcelanato é constituído por uma mistura do material cerâmico oriundo do polimento do porcelanato e do material abrasivo desprendido durante o processo. 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 à massa atomizada. Quando o RPP é novamente inserido no processo produtivo de porcelanato, o carbeto de silício decompõe-se em atmosfera oxidante gerando  $\text{CO}_2$  e uma fina camada de  $\text{SiO}_2$ . A cerâmica obtida sofrerá uma expansão volumétrica devido à decomposição do SiC (Figura 10).

**Figura 10 - Amostras de RPP expandidas na Cecrisa após serem inseridas no processo produtivo de porcelanato.**



Fonte: Próprio autor.

A deposição de resíduo industrial em aterros além dos elevados custos econômicos pode trazer inúmeros problemas ambientais, como contaminação do solo, do lençol freático e agressão à vegetação presente no local. Nesse sentido a reutilização e a reciclagem são as soluções mais indicadas para o manejo da grande maioria dos resíduos industriais (MARQUES, 2007).

O volume total do resíduo de polimento de porcelanato (úmido) produzido gira em torno de  $8\text{m}^3$  por dia ( $\pm 20$  toneladas) na fábrica da Cecrisa em Santa Luzia, Minas Gerais (Figura 11). Este material é depositado em caçambas e posteriormente, transportado e lançado em aterros sanitários (SILVA, 2005).

**Figura 11 - Resíduo de RPP em depósito na Cecrisa.**



Fonte: Próprio autor.

O reaproveitamento destes materiais, motivado pela eliminação de resíduos, conservação dos recursos naturais e diminuição de gastos de armazenagem e transporte, incentivam pesquisas que buscam formas de reaproveitamento do RPP. A inserção dos resíduos em um ciclo produtivo representa uma opção de recuperação alternativa desses materiais, que é interessante tanto no aspecto ambiental, quanto no econômico. O que está em acordo com a abordagem ambiental mais recente, que objetiva o desenvolvimento sustentável e enfatiza que o gerenciamento dos resíduos é uma das questões mais importantes tanto para a saúde pública como para o desenvolvimento industrial no século 21 (MARQUES, 2007).

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 50x20x5mm. Os corpos de prova foram prensados a 30MPa e depois queimados em fornos com ciclos de queima rápido, de até 35min, 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 1175°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).

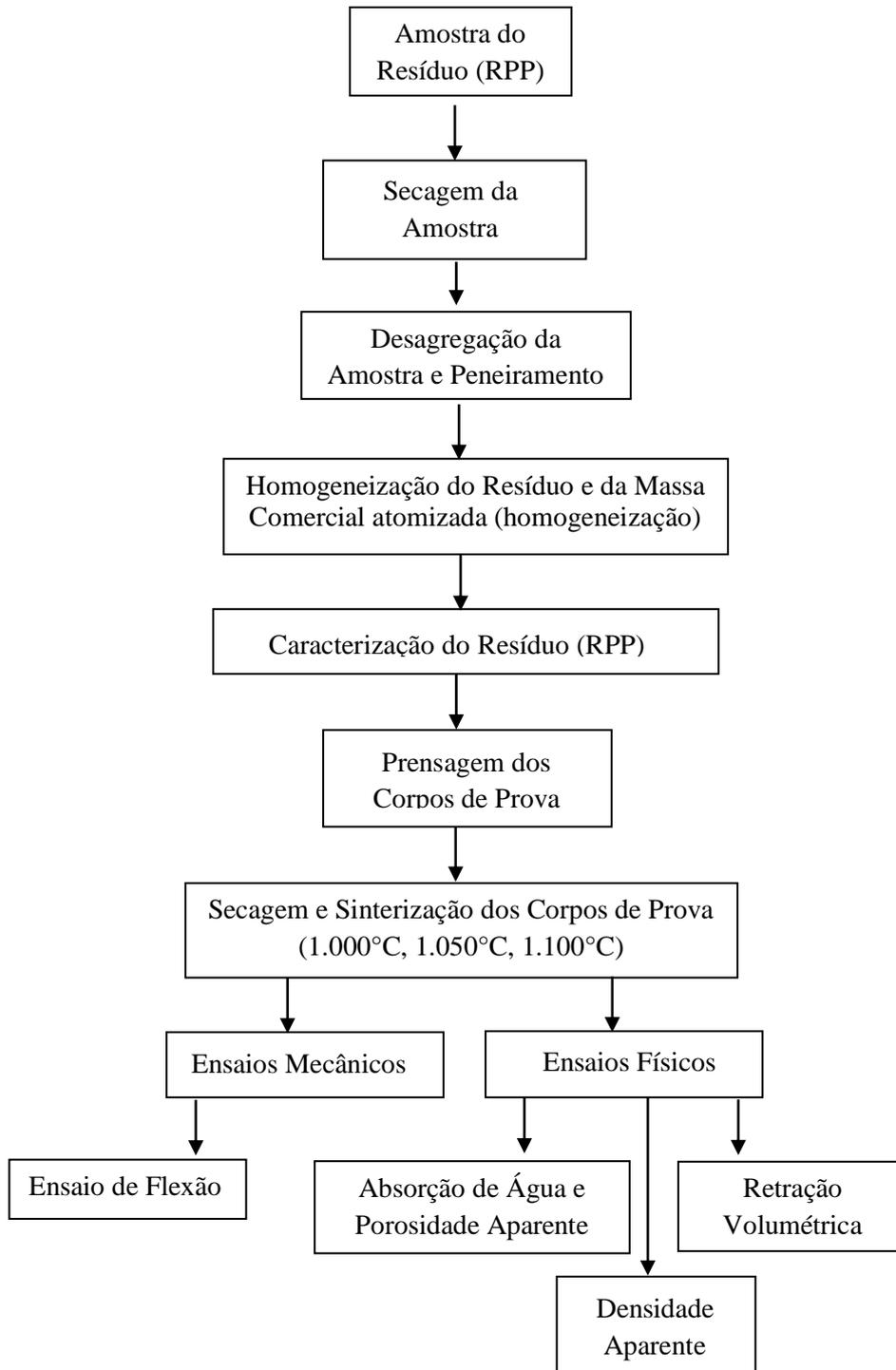
Ao se analisar a densidade da cerâmica comercial após queima a 1.200°C e da R5 após queima a 1.150°C (temperaturas que apresentaram absorções semelhantes – R5 levemente inferior), observa-se que a MC apresentou densidade de 2,26g/cm<sup>3</sup> contra 2,24g/cm<sup>3</sup> da R5. O que representa uma diferença muito pequena. Segundo Marques (2007), existem dois fenômenos interagindo durante a sinterização dos corpos de prova contendo o resíduo (RPP), um relacionado à presença de fase vítrea e fundentes que favorecem a densificação em menores temperaturas e outro relacionado à queima do carbetto de silício com formação de CO<sub>2</sub>, que favorece o aumento da porosidade do sistema. Os resultados apresentados nesse trabalho evidenciam que a utilização de um ciclo de queima rápida é fundamental para a reciclagem do resíduo na própria massa de porcelanato, já que o rápido aquecimento possibilita que haja a formação do CO<sub>2</sub> sem a presença de elevada quantidade de fase vítrea, portanto o CO<sub>2</sub> produzido é capaz de “escapar” sem causar expansão da peça (MARQUES, 2007).

Bernardin et al. demonstra que há outra possível destinação efetiva para as sobras de polimento de porcelanato: a reutilização em produção de cerâmicas celulares, as cerâmicas expandidas. Estas são materiais de baixa densidade que apresentam células fechadas ou abertas. O crescente interesse em cerâmicas celulares tem sido associado principalmente a suas propriedades específicas, como alta área superficial, alta permeabilidade, baixa densidade, baixa condutividade térmica, combinando-se processamento e materiais cerâmicos adequados às cerâmicas porosas, também apresentam resistência mecânica relativamente elevada, resistência ao ataque químico, resistência mecânica em alta temperatura e grande uniformidade estrutural. O carbetto de silício a partir de 1000°C decompõe-se em atmosfera oxidante, gerando CO<sub>2</sub> e SiO<sub>2</sub>. Se adicionado a um resíduo cerâmico, o produto resultante sofrerá uma expansão volumétrica devido à formação do CO<sub>2</sub> juntamente com o início de amolecimento do material cerâmico, cuja superfície será impermeável à passagem do gás resultante para o exterior da peça. O produto resultante será um material cerâmico expandido, formando uma excelente espuma cerâmica que pode ser utilizada como componente para preenchimento de lajes nas construções, fabricação de divisórias, produtos com boa isolamento térmica para fornos (BERNARDIN et.al., 2006).

#### 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O fluxograma abaixo apresenta as etapas de trabalho utilizadas na metodologia experimental (Figura 12):

**Figura 12 – Fluxograma da metodologia experimental adotada.**



Fonte: Produzido pelo autor.

#### 4.1 Visita Técnica

Foi realizada uma visita técnica a uma unidade da empresa CECRISA na cidade de Santa Luzia. A visita técnica teve como objetivo 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.

#### 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  $180 \pm 10^\circ\text{C}$ , desaglomerada e homogeneizada manualmente.

Após esta etapa, o RPP homogeneizado foi peneirado utilizando a peneira de 50mesh, sendo que apenas os grãos que passaram na peneira de 50mesh foram aproveitados para a pesquisa.

A determinação do teor de umidade consistiu em pesar aproximadamente 2g das amostras (balança - BEL Engineering) e secá-las em uma estufa (Med Clave modelo3) a  $115^\circ\text{C}$  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 Análises de Engenharia de Materiais, do CEFET-MG.

A estabilidade térmica do RPP foi determinada empregando-se a técnica termogravimétrica (TG) (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 Análises de Engenharia de Materiais, do CEFET-MG.

#### 4.4 Moldagens 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.

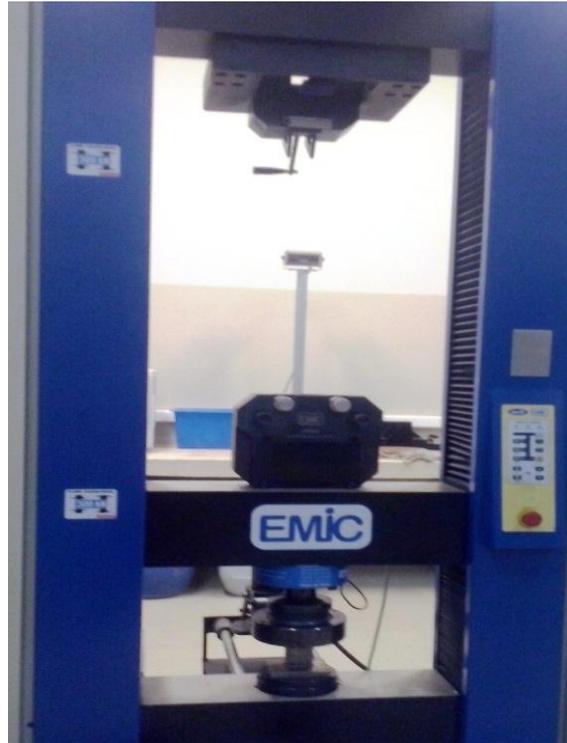
O molde utilizado para fabricação dos corpos de prova na prensa possui dimensão de 58,80 x 19,90mm (Figura 13). A carga da máquina de prensagem (EMIC DL-30000), figura 14, utilizada para a prensagem foi de 3,4 T (30MPa) e a velocidade foi de 1MPa/s. Para a pesquisa foram conformados 10 corpos de provas da massa atomizada (Figura 15) e 30 corpos de provas do resíduo, sendo que 10 foram preparados para a temperatura de sinterização de 1.000°C (Figura 16), 10 corpos de prova para sinterização a 1.050°C (Figura 17) e os 10 corpos de prova restante foram sinterizados a 1.100°C (Figura 18). Todos os corpos de prova foram dimensionados (Paquímetro Mitutoyo 0,05mm) e pesados (BEL Engineering 0,0001g) para posterior análise de retração volumétrica após a sinterização.

**Figura 13 - Molde utilizado para a fabricação dos corpos de prova.**



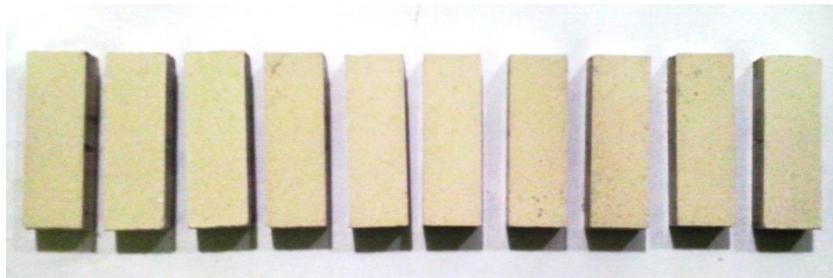
Fonte: Próprio autor.

**Figura 14 – Máquina utilizada para prensar os corpos de prova (EMIC DL-30000).**



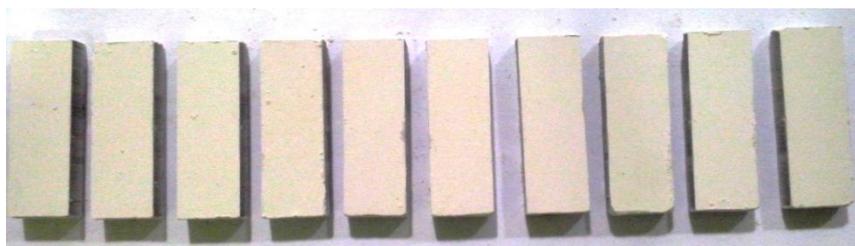
Fonte: Próprio autor.

**Figura 15 – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 16 – Corpos de prova do RPP prensados para a temperatura de sinterização de 1.000°C.**



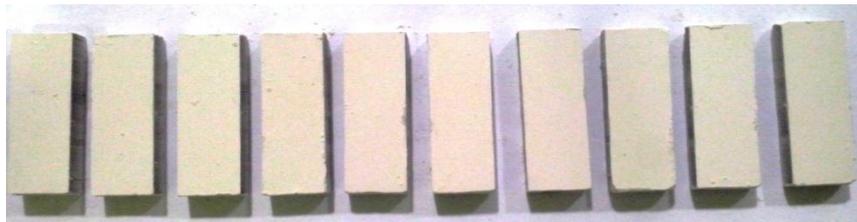
Fonte: Próprio autor.

**Figura 17 – Corpos de prova do RPP prensados para a temperatura de sinterização de 1.050°C.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 18 – Corpos de prova do RPP prensados para a temperatura de sinterização de 1.100°C.**

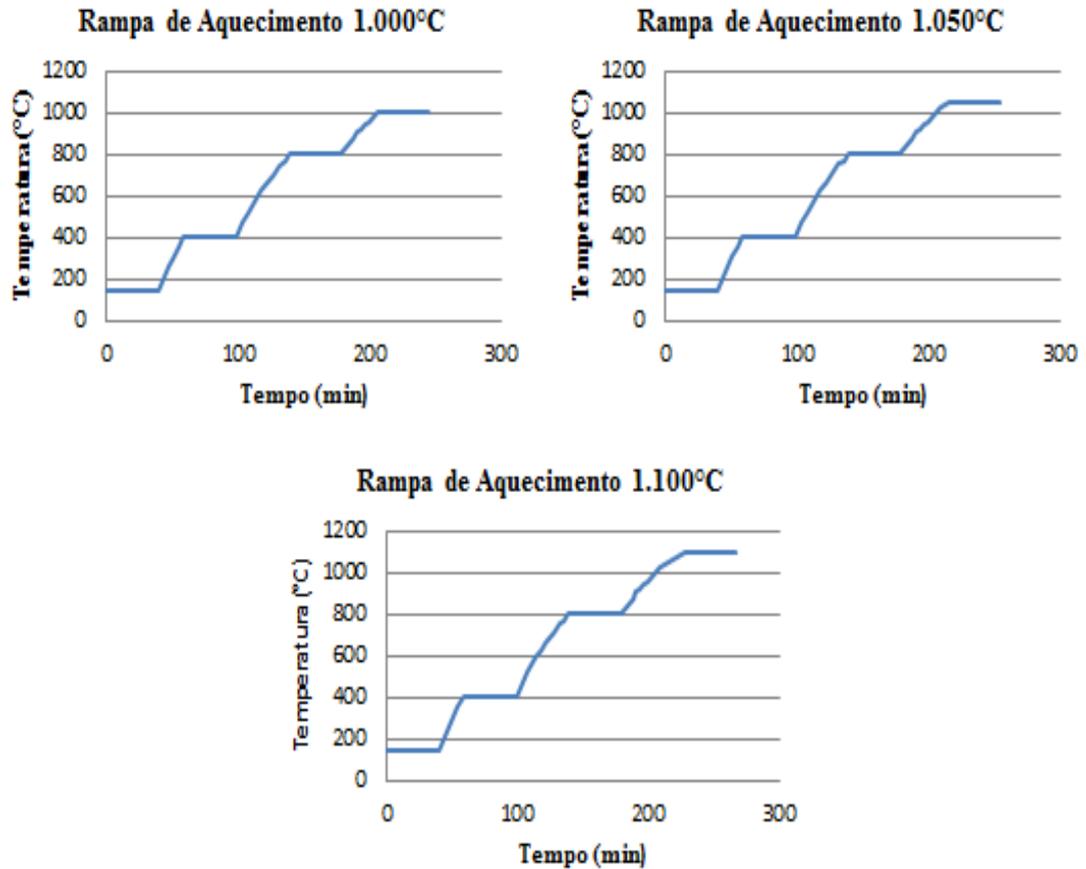


Fonte: Próprio autor.

#### 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 19. 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 1.000°C, 1.050°C e 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 0,0001g) e dimensionadas (Paquímetro Mitutoyo 0,05mm).

Figura 19 – Rampas de aquecimento para as temperaturas de sinterização de 1.000°C, 1.050°C e 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 pelos óxidos fundentes 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.

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:

$$\%RV = \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

%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 20). 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 20 – Máquina utilizada para ensaio de flexão (EMIC DL-30000).**



Fonte: Próprio autor.

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:

$$MRF = \frac{3F \times L}{2B e^2} \quad (2)$$

- 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.

As amostras foram submetidas ao ensaio de absorção de água baseado na norma ISO 10545-3:1995. Foram selecionadas três amostras dos corpos de prova de resíduo da temperatura de sinterização de 1.000°C, 1.050°C e da massa atomizada que tiveram melhor desempenho no ensaio de flexão e dez amostras da temperatura de sinterização de 1.100°C, temperatura na qual foram obtidos os melhores resultados no ensaio de flexão. 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 21).

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

$$\%A.A = \frac{MU-MS}{MS} \times 100 \quad (3)$$

- % A.A = absorção de água (%);  
 MU = massa das amostras úmidas (g);  
 MS = massa das amostras secas (g).

**Figura 21 – Amostras em água fervendo para medir o teor de absorção de água.**

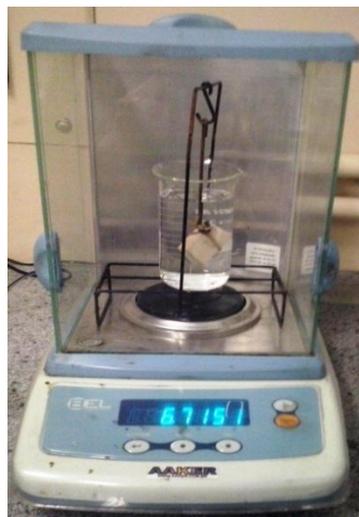


Fonte: Próprio autor.

#### 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 0,0001g, uma haste e um elástico com a função de imergir a peça (Figura 22).

**Figura 22 – Aparelho para medir a densidade aparente das amostras.**



Fonte: Próprio autor.

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:

$$D_{ap} = \frac{MS}{MU-MI} \times \text{Densidade da água} \quad (4)$$

$D_{ap}$  = densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

MS = massa da amostra seca (g);

MU= massa da amostra úmida (g)

MI = massa da amostra sob imersão (g);

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

#### 4.10 Porosidade Aparente

A porosidade Aparente é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. O cálculo da porosidade aparente é feito através da equação:

$$Pa = \frac{MU-MS}{MU-MI} \times 100$$

Pa = porosidade aparente (%);

MS = massa da amostra seca (g);

MU= massa da amostra úmida (g)

MI = massa da amostra sob imersão (g);

## 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.

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

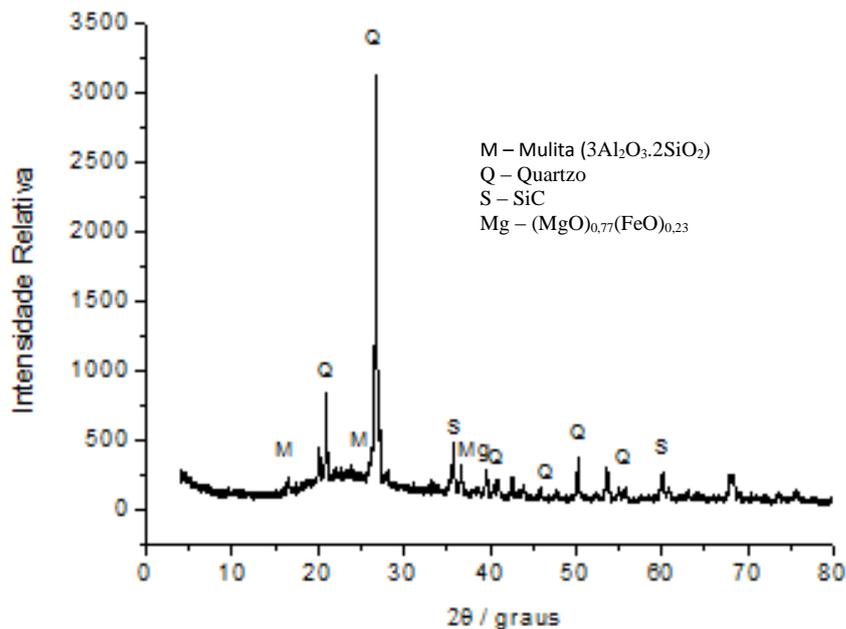
Fonte: Produzido pelo autor.

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.

A semelhança química indica a possibilidade de realizar o reaproveitamento do resíduo gerado no processo de produção do porcelanato dentro da própria indústria. Os óxidos constituintes são típicos de corpos cerâmicos utilizados na fabricação de peças cerâmicas para piso.

Na Figura 23 está ilustrado o difratograma do resíduo obtido pelo polimento do porcelanato.

**Figura 23 - Difratograma da torta (resíduo do polimento de porcelanato).**



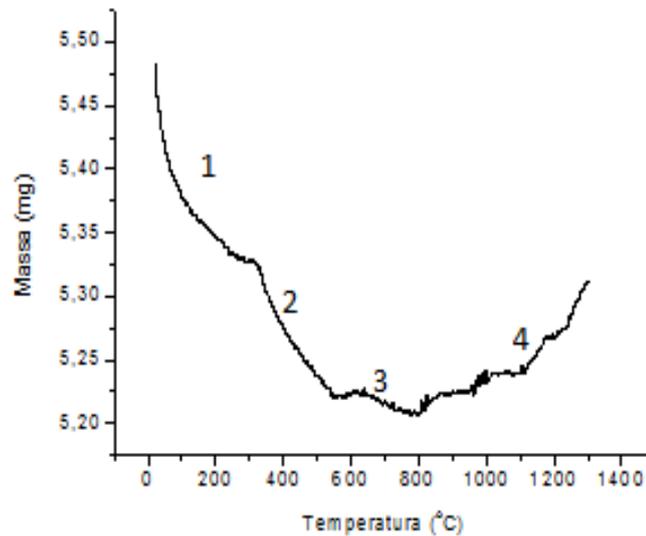
Fonte: Produzido pelo autor.

De acordo com Marques, o porcelanato é um material constituído por uma grande quantidade de fase vítrea e fases cristalinas que podem ser detectadas por meio da técnica de difração de raios X. Analisando o difratograma acima, observa-se que o resíduo é formado por uma fase vítrea (amorfa), evidenciada pela existência de um alargamento na linha base entre os ângulos 15° e 35° e fases cristalinas que foram identificadas como sendo a mulita, quartzo, carbeto de silício e uma mistura entre os óxidos de magnésio e ferro. Quando o porcelanato é queimado a partir de 1200 °C forma-se a fase mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) no material e a fase vítrea conterá os óxidos fundentes presentes no porcelanato ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ).

Pela análise da curva TG (Figura 24) 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 carbeto de silício em óxido de silício.

**Figura 24 - Curva termogravimétrica do resíduo de polimento do porcelanato.**

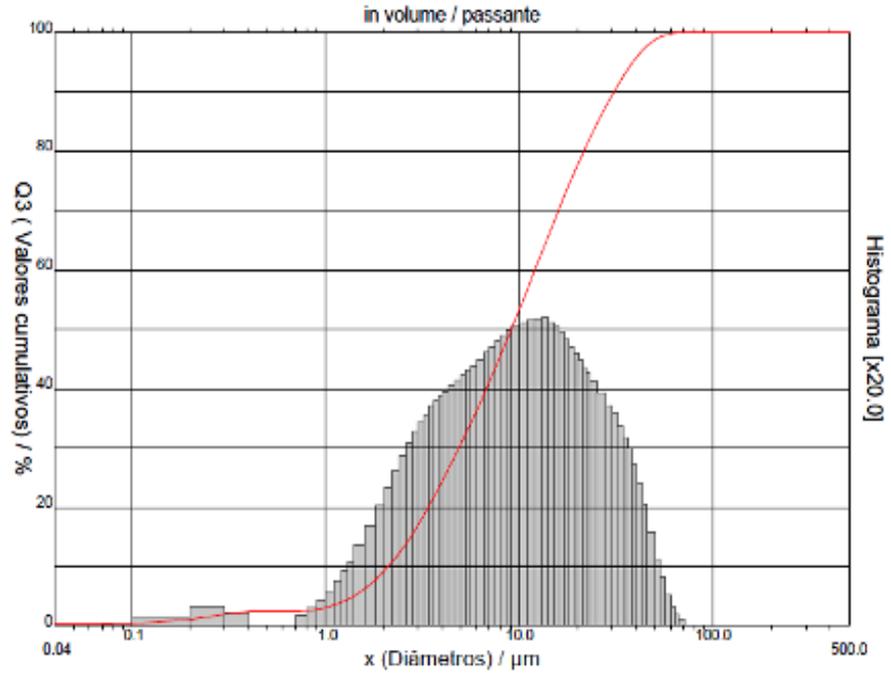


Fonte: Produzido pelo autor.

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 5,475mg e a massa ao final da etapa 1 é de 5,325mg. 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 carbeto 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.

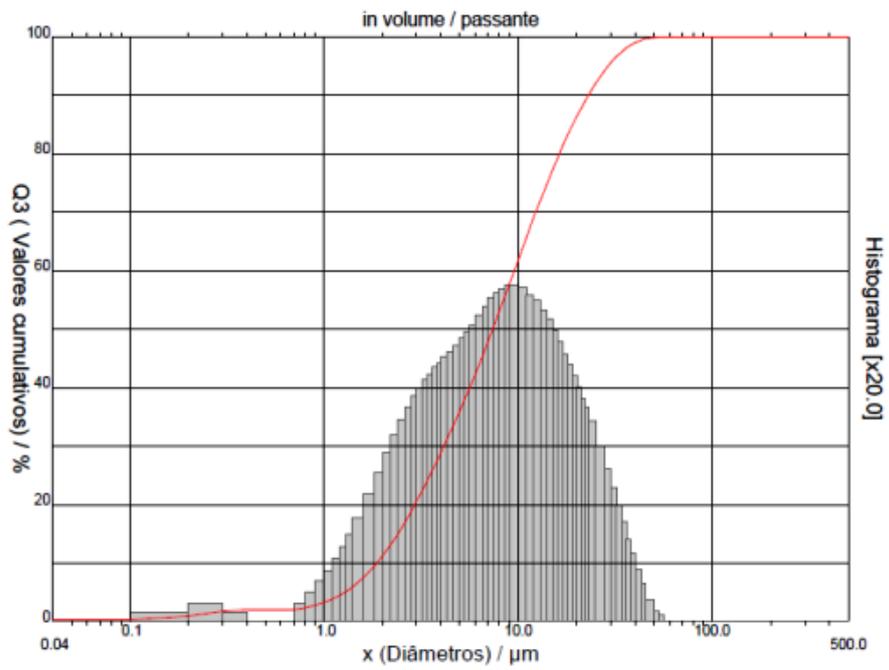
Na análise granulométrica do RPP após o peneiramento (Figura 25), é possível identificar que 90% das partículas possui um diâmetro menor que 31,54µm e uma média de 13,31µm. Já na análise granulométrica da massa comercial atomizada, 90% das partículas estão abaixo de 23,09µm e apresenta um diâmetro médio de 10,41µm (Figura 26).

**Figura 25 - Distribuição Granulométrica do RPP.**



Fonte: Produzido pelo autor.

**Figura 26 - Distribuição Granulométrica da massa comercial atomizada.**



Fonte: Produzido pelo 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 4). As amostras de resíduo sinterizadas a 1.050°C e 1.100°C apresentaram maior retração volumétrica, indicando possivelmente melhores densificações. E a massa comercial possui a maior densidade absoluta.

**Tabela 4 - Retração volumétrica e densidade absoluta das amostras após a etapa de sinterização.**

<b>Amostras</b>	<b>Retração Volumétrica (%)</b>	<b>Desvio</b>	<b>Densidade Absoluta (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio</b>
<b>Massa Comercial</b>	16,9682	3,4094	1,9453	0,0770
<b>Resíduo 1.000°C</b>	20,0395	1,6557	1,6424	0,0295
<b>Resíduo 1.050°C</b>	31,3238	3,6019	1,9277	0,1069
<b>Resíduo 1.100°C</b>	31,1614	3,6865	1,9100	0,1137

Fonte: Produzido pelo autor.

## 5.3 Resistência Mecânica à Flexão

Foram realizados os ensaios de flexão com 10 corpos de prova de todas as amostras (Figura 27), exceto para a amostra de resíduo à temperatura de 1.000°C que foi utilizado somente 9 corpos de prova por falha de registro da máquina no processo. Com base nos resultados, foi possível calcular a média dos valores de módulo de resistência à flexão (MRF) (Tabela 5). Em dois corpos de prova da amostra de resíduo de 1.050°C e em um corpo de prova da amostra de resíduo a 1.100°C foi possível verificar visualmente trincas provenientes do processo de moldagem que possivelmente resultou em um ponto de fragilização, o que se pode confirmar com os valores individuais mínimos de módulo de resistência à flexão para esses corpos de prova, o que prejudicou a média dos ensaios.

**Figura 27 - Amostras de resíduo à temperatura de sinterização de 1.000°C, 1.050°C e 1.100 °C e da massa comercial atomizada, respectivamente, fraturadas após ensaio de flexão.**



Fonte: Produzido pelo autor.

**Tabela 5 - Módulo de resistência à flexão (MRF) das amostras.**

<b>Amostras</b>	<b>MRF (MPa)</b>	<b>Desvio</b>	<b>Individual (mín.)</b>	<b>Individual (max)</b>
<b>Massa Comercial</b>	26,19	4,179	19,01	33,50
<b>Resíduo 1.000°C</b>	19,46	3,089	14,47	24,10
<b>Resíduo 1.050°C</b>	24,28	11,36	6,180	38,9
<b>Resíduo 1.100°C</b>	37,14	8,237	27,00	49,69

Fonte: Produzido pelo autor.

Ao comparar os resultados da tabela 5, observa-se que as amostras de resíduo sinterizadas a 1.100°C obtiveram os melhores resultados de resistência mecânica à flexão e, portanto, indicando a melhor temperatura 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 BIb (prensado) como um grês que requer uma média mínima de 30MPa e um valor individual mínimo de 27MPa no módulo de resistência à flexão.

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

Para comparação dos resultados de absorção de água (A.A) (Tabela 6), porosidade aparente ( $P_a$ ) e densidade aparente ( $D_{ap}$ ) (Tabela 7), foi utilizado a média de três corpos de prova das amostras de resíduo da temperatura de sinterização de 1.000°C, 1.050°C e da massa comercial atomizada que tiveram melhor desempenho no ensaio de flexão e dez corpos de prova da amostra do resíduo com temperatura de sinterização de 1.100°C, temperatura na qual foram obtidos os melhores resultados no ensaio de flexão.

**Tabela 6 - Absorção de água (%) das amostras.**

<b>Amostras</b>	<b>A.A(%)</b>	<b>Desvio</b>	<b>Individual (máx)</b>
<b>Massa Comercial</b>	10,3035	2,0984	12,1383
<b>Resíduo 1.000°C</b>	17,9298	0,5839	18,9103
<b>Resíduo 1.050°C</b>	8,9832	1,3483	10,9713
<b>Resíduo 1.100°C</b>	0,4957	0,2560	1,2394

Fonte: Produzido pelo autor.

**Tabela 7 - Porosidade aparente e densidade aparente das amostras.**

<b>Amostras</b>	<b><math>P_a</math> (%)</b>	<b>Desvio</b>	<b><math>D_{ap}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio</b>
<b>Massa Comercial</b>	20,8330	3,8815	2,0328	0,0558
<b>Resíduo 1.000°C</b>	31,4236	0,7660	1,7531	0,0154
<b>Resíduo 1.050°C</b>	18,5228	2,4293	2,0680	0,0417
<b>Resíduo 1.100°C</b>	1,0184	0,5851	2,0391	0,1176

Fonte: Produzido pelo autor.

Com a análise dos resultados, pode-se afirmar que novamente as amostras do resíduo sinterizados à temperatura de 1.100°C apresentaram melhores resultados. 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 de resíduo sinterizado a 1.100°C, 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 sinterização a 1.100°C obteve bons resultados e bem próximos a da amostra de sinterização a 1.050°C que registrou um maior valor.

## 6 CONCLUSÃO

Corpos de prova com 100% de resíduo de polimento de porcelanato foram moldados e sinterizados a temperaturas de 1.000°C, 1.050°C e 1.100°C. Amostras da massa comercial atomizada também foram moldadas e sinterizadas a 1.100°C para efeito de comparação.

Os corpos de prova sinterizados a 1.100°C obtiveram os melhores resultados nos ensaios de resistência à flexão, absorção de água e porosidade aparente, podendo classificá-los segundo a norma NBR 13818:1997, como um grês (classe BIb 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.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para próximos trabalhos, propõe-se:

- Estudo da etapa de sinterização com um patamar de tempo maior na temperatura máxima, com o intuito de verificar um melhor desempenho na homogeneização da densificação da peça.
- Estudo da interferência do parâmetro da granulometria na compactação dos grãos e moldagem dos corpos de prova.
- Estudo do efeito da modificação do parâmetro da pressão utilizada na moldagem dos corpos de prova.
- Estudo da etapa de sinterização do resíduo de polimento de porcelanato a uma temperatura de 1.150°C.
- Estudo da resistência à abrasão do resíduo de polimento de porcelanato sinterizado à temperatura de 1.100°C.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/>>. Acesso em: 04 dez. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004:2004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- 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.
- BARROS, R. M. F. **Cerâmicas**. Apostila Faculdade INAP, 2005.
- 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.
- HANSEN, A. P. Identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental em processo de produção de materiais cerâmicos via aplicação da técnica de avaliação de ciclo de vida (ACV). **Revista Produção Online**, v.10, n.4, dez. 2010.
- HECK, C. Grês Porcelanato. **Cerâmica Industrial**, v.1, n.21-24,ago./dez. 1996.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.**ISO 10545-3: 1995**: ceramic tiles - part 3: determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density, 1995.
- KUMMER, E. et al. Reutilização dos resíduos de polimento de porcelanato e feldspato na fabricação de novo produto cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 3, p.34-38, maio/jun. 2007.
- 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.

MOTTA, J. F. M.; CABRAL JUNIOR, M.; TANNOM L. C.; ZANARDO, A. As matérias-primas cerâmicas: os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional (parte II). **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 33-40, set. 2002.

OLIVEIRA, A. P. N. de. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 5, n.6, p. 37-48, dez. 2000.

PINHEIRO, A. S. **Produção de grês porcelanato a partir de matérias-primas do Rio Grande do Norte e queima a gás natural**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, fev. 2006.

PUREZA, J. C. C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RIBEIRO, A. P. **Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos**. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RIBEIRO, M. J. ; VENTURA, J. M.; LABRINCHA, J.A. A atomização como processo de obtenção de pós para a indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**, v.6, n.5,set./out. 2001.

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.

SANCHEZ, E.; ORTS, M. J.; GARCÍA-TEN, J.; CANTAVELLA, V. Efeito da composição das matérias-primas empregadas na fabricação de grês de porcelanato sobre as fases formadas durante a queima e as propriedades do produto final. **Cerâmica Industrial**, v.5, n.15-22,set./out. 2001.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. Dissertação (Mestrado), - Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

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.