

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

ÉRIKA VIRGÍNIA ALVES MACHADO

REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO NA
FABRICAÇÃO DE CERÂMICA

BELO HORIZONTE

2015

ÉRIKA VIRGÍNIA ALVES MACHADO

**REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO NA
FABRICAÇÃO DE CERÂMICA**

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^a. Ivete Peixoto Pinheiro

Coorientador: Dr. Claudinei Rezende Calado

BELO HORIZONTE

2015

ÉRIKA VIRGÍNIA ALVES MACHADO

**REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO NA
FABRICAÇÃO DE CERÂMICA**

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:

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª: Dr^ª. Ivete Peixoto Pinheiro – Orientadora

Prof: Dr. Claudinei Rezende Calado – Coorientador

Prof^ª: Me. Jacyara Maria Alves Vieira

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus professores que dele também participaram, Ivete Peixoto Pinheiro, como minha orientadora, e Claudinei Rezende Calado, como meu coorientador, e que me apresentaram este tema tão importante e me auxiliaram sempre que necessário.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria Aparecida Alves Machado e Marcílio Machado, e à minha irmã, Nathália Ádila Alves Machado, por sempre me apoiarem em tudo que faço.

Aos meus amigos Natália Mariano, Samanta Coelho e Henrique da Silva Coelho pelas muitas vezes que me acompanharam e auxiliaram neste trabalho, à Bárbara Hellen, Camila Reis, Fernanda Magalli, Erika Alcântara, Lucas Medeiros, Lorena Arantes e Bárbara Rodrigues pela grande amizade de sempre.

À indústria CECRISA por ter fornecido as amostras do resíduo de polimento de porcelanato e possibilitado as visitas técnicas que ajudaram a esclarecer as dúvidas que surgiam.

Aos professores Ivete Peixoto Pinheiro e Claudinei Rezende Calado, orientadora e coorientador deste trabalho, respectivamente, por todo o auxílio e aprendizado que me proporcionaram.

Meus sinceros agradecimentos a todos!

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 ou indústrias cimenteiras. O resíduo descartado apresenta carbeto de silício (SiC), proveniente do abrasivo do agente polidor. Em elevadas temperaturas, o SiC se decompõe formando SiO_2 e CO_2 , esta decomposição impede que o rejeito retorne à linha de produção uma vez que o gás produzido age como um agente de expansão no interior do material cerâmico.

O trabalho partiu da caracterização das matérias primas, resíduo de polimento de porcelanato e massa atomizada, para avaliar a viabilidade da fabricação de um novo material cerâmico. Os corpos de prova foram sinterizados a 1240°C e após a queima, as amostras apresentaram absorção de água na faixa que classifica o material como grês (classe BIb), baixa porosidade aparente e elevada resistência mecânica, mostrando uma resistência média na flexão de $46,91\text{MPa}$ para a amostra de 12% de RPP. Os resultados sugerem que na concentração de 1% a 12%, o RPP pode ser reutilizado para a fabricação de material cerâmico para revestimento de pisos e paredes e, a partir de 12% de RPP se torna viável para obtenção de cerâmicas expandidas.

Palavras chave: Porcelanato, resíduos de polimento, cerâmica expandida, cerâmica celular, SiC.

ABSTRACT

The polished porcelain tile industry generates large amounts of waste that came from polishing process. The allocation of these process losses is typically done in a landfill or cement industries. The residue discarded presents silicon carbide (SiC), from the abrasive polishing agent. At high temperatures, the SiC decomposes forming CO₂ and SiO₂; it prevents the waste return to production line due to its action as a blowing agent within the ceramic material.

This work is conducted starting from the raw materials characterization and it is intended to test the feasibility of manufacturing a new ceramic type. The samples were sintered at 1240°C and after sintering, the samples showed water absorption in the range which classifies the material as stoneware class BIb, low porosity and high mechanical strength, showing an average flexural strength of 46.91 MPa for the sample of 12% RPP. The results suggest that for the concentration of 1% to 12% the RPP can be reused for manufacturing of ceramic tiles for floors and walls, and from 12% RPP becomes suitable to obtain expanded ceramics.

Keywords: porcelain tile, polishing waste, expanded ceramic, cellular ceramic, SiC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de revestimentos cerâmicos no Brasil.....	11
Figura 2 – Processo convencional para obtenção de porcelanato natural ou polido.	14
Figura 3 – Representação esquemática da evolução da atomização de um grão cerâmico.	16
Figura 4 – Mecanismo de compactação.	17
Figura 5 - Forno utilizado na sinterização dos porcelanatos na empresa Cecrisa.	18
Figura 6 – Abertura de poros na superfície após processo de polimento.	19
Figura 7- Alguns componentes estruturais de uma unidade de célula em espumas a) abertas e b) fechadas.....	29
Figura 8– Fluxograma do procedimento experimental.....	34
Figura 9 - Molde para conformação dos corpos de prova.	36
Figura 10 - Rampa de aquecimento do forno.	37
Figura 11 - Corpos de prova com 1%, 3%, 6% e 12% de RPP após sinterização.....	38
Figura 12 - Dispositivo para medir a densidade aparente das amostras.....	39
Figura 13 - Amostras em água fervendo para medir o teor de absorção de água.....	41
Figura 14 - Máquina utilizada para ensaio de flexão.....	42
Figura 15 - Difratoograma do resíduo de polimento de porcelanato (RPP).....	44
Figura 16 - Curva termogravimétrica do resíduo de polimento de porcelanato (RPP).	45
Figura 17 - Distribuição granulométrica da amostra de massa atomizada.	46
Figura 18 - Distribuição granulométrica da amostra de resíduo de polimento de porcelanato (RPP).	46
Figura 19 - Distribuição granulométrica da amostra de resíduo de polimento de porcelanato (RPP) após passar pelo moinho de bolas.....	47
Figura 20 - Amostras após ensaio de flexão.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação do porcelanato em função da absorção de água.	20
Tabela 2 - Características técnicas do porcelanato.	20
Tabela 3 – Propriedades cerâmicas dos caulins dos depósitos Balsa Nova e Paraná (PR) utilizados na produção de porcelanato.	22
Tabela 4 - Composição química do RPP e da massa atomizada.	43
Tabela 5 - Temperatura inicial e final e perda de massa na decomposição do RPP.	45
Tabela 6 - Densidade absoluta e retração volumétrica dos corpos cerâmicos sinterizados.	48
Tabela 7 - Densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente das amostras.	49
Tabela 8 - Força na ruptura e resistência a flexão.	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivo	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Grês porcelanato	13
2.1.1	<i>Etapas de Fabricação do Porcelanato</i>	14
2.1.2	<i>Propriedades e Características do Porcelanato</i>	20
2.1.3	<i>Matérias-primas do Porcelanato</i>	21
2.1.3.1	Argilominerais	21
2.1.3.2	Caulim.....	22
2.1.3.3	Feldspato.....	23
2.1.3.4	Quartzo	24
2.1.3.5	Talco	25
2.2	Resíduo de Polimento de Porcelanato	26
2.3	A partícula abrasiva: Carbetto de Silício	27
2.4	Cerâmica Celular	28
2.4.1	<i>Produção de cerâmica porosa através da evolução de gases in situ</i>	30
2.5	Reutilizações de RPP Sugeridas na Literatura	31
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
3.1	Caracterização do Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) e da Massa Atomizada	35
3.2	Preparação dos Corpos-de-prova	35
3.2.1	<i>Formulação</i>	36
3.2.2	<i>Conformação</i>	36
3.2.3	<i>Secagem e Sinterização</i>	36
3.2.4	<i>Caracterização após sinterização dos corpos-de-prova</i>	38

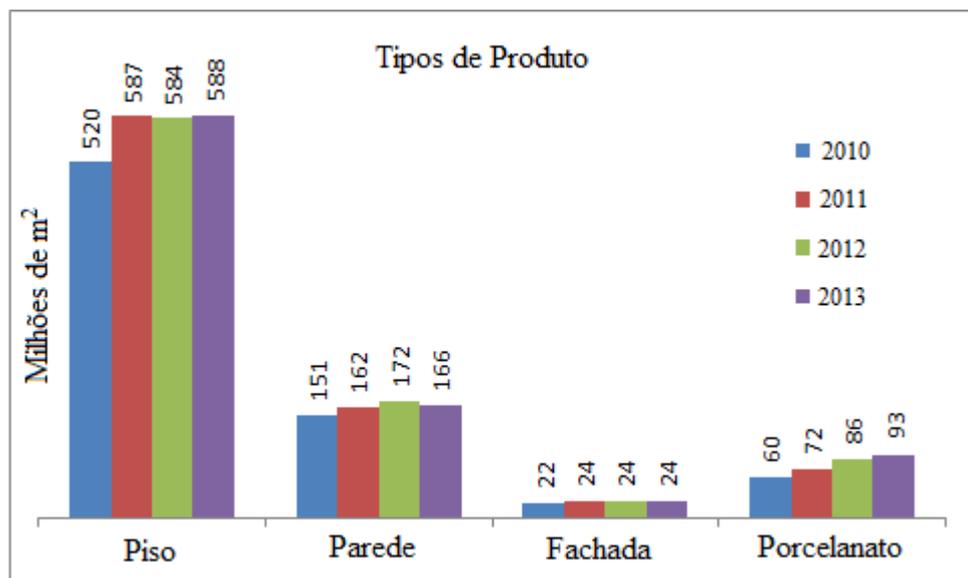
3.2.4.1 Densidade Aparente	38
3.2.4.2 Porosidade aparente	39
3.2.4.3 Retração Volumétrica	40
3.2.4.4 Absorção de água.....	40
3.2.4.5 Ensaio de flexão.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Caracterização do Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) e da Massa Atomizada	43
4.1.1.1 Densidade Absoluta e Retração Volumétrica	48
4.1.1.2 Densidade Aparente, Absorção de Água e Porosidade Aparente	48
4.1.1.3 Ensaio de Flexão.....	49
5 CONCLUSÃO	51
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

O Brasil vem apresentando um crescimento substancial no mercado de revestimentos cerâmicos, ocupando a segunda posição em produção e consumo, sendo desbancado apenas pelo mercado chinês. Em 2006, a produção era de 594,2 milhões de m², enquanto em 2012 sofreu um aumento de 50% atingindo a marca de 895 milhões de m² (ANFACER, 2013).

O mercado do revestimento cerâmico conhecido como grês porcelanato, ou apenas porcelanato, também segue a tendência geral, mostrando a importância que vem conquistando. No período entre 2010 e 2013 ocorreu um aumento de 55% na produção brasileira de porcelanato, como é mostrado na figura 1.

Figura 1 - Produção de revestimentos cerâmicos no Brasil.



Fonte: ANFACER (2014).

Associada a esta crescente produção está a geração de resíduos, um fator de relevância econômica e ambiental.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é uma política pública que regulamenta a destinação de resíduos com a finalidade de alcançar as normas ambientais vigentes no mundo e garantir o desenvolvimento sustentável.

Prevê o manejo adequado dos resíduos, que devem ser descartados em locais apropriados, como, por exemplo, áreas especializadas para o tratamento destes, o que torna o processo oneroso.

Diante destes fatos, observa-se a necessidade de minimizar o descarte de resíduo, retornando-o ao ciclo produtivo que o gerou ou redirecionando-o à outra aplicação.

O resíduo de polimento de porcelanato (RPP) apresenta propriedades características, que serão esclarecidas ao longo do trabalho, fazendo acreditar que seja uma matéria-prima em potencial para a fabricação de cerâmicas expandidas. Estas cerâmicas podem ser aplicadas na indústria de construção civil como isolante térmico e acústico (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005).

1.1 Justificativa

Diante da realidade de produção de resíduos no Brasil e no mundo, é primordial o desenvolvimento de tecnologias que busquem a sua redução ou que, ao menos, garantam uma destinação que minimizem os impactos que geram.

No âmbito das indústrias cerâmicas, mais especificamente na produção de resíduo de polimento de porcelanato (RPP), uma prática comum é o recolhimento do resíduo por indústrias cimenteiras, que o incorporam em sua produção. Porém, esta solução está aquém das expectativas das empresas e dos preceitos do desenvolvimento sustentável, devido ao insuficiente reaproveitamento, já que as cimenteiras não conseguem incorporar todo o volume de rejeito produzido, e ao baixo retorno econômico.

Portanto, uma destinação mais nobre e de maior valor agregado a partir de RPP, justifica-se no contexto econômico, industrial e ambiental da atualidade.

1.2 Objetivo

O desenvolvimento deste trabalho tem os seguintes objetivos:

- Caracterização do Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP);
- Fabricação de cerâmica celular ou outra cerâmica de revestimento a partir de Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) e
- Caracterização das cerâmicas obtidas, determinando as suas propriedades e analisando a viabilidade da sua fabricação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo desta seção é apresentado o grês porcelanato por meio da descrição de suas propriedades e principais características. Também é descrito o seu processo de fabricação e os produtos e resíduos gerados durante esta etapa. O enfoque é dado ao Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) e à reutilização do mesmo na produção de cerâmicas celulares e cerâmicas de revestimento.

2.1 Grês porcelanato

O grês porcelanato é um revestimento cerâmico também conhecido como grês fino porcelanato, granito cerâmico ou simplesmente porcelanato (LUCKMANN, 2007). Este último nome será o mais utilizado neste trabalho ao se referir a essa cerâmica de revestimento.

A denominação “grês” indica um material altamente compacto e, portanto, com microestrutura densa, sendo constituído por fases cristalinas, mulita e quartzo, em quantidade minoritária, imersas em uma fase vítrea majoritária (LUCKMANN, 2007; MARQUES, 2007). Já o termo “porcelanato” se refere às características técnicas do produto, que se assemelham à porcelana (LUCKMANN, 2007). As principais características do grês porcelanato são: elevada resistência à abrasão; resistência ao congelamento; resistência mecânica; resistência a ácidos e álcalis; uniformidade de cores; impermeabilidade e absorção de água inferior a 0,5% (LUCKMANN, 2007; MARQUES, 2007).

O porcelanato tem ganhado mercado devido à sua versatilidade e elevada qualidade, características que permitem que seja comparado às pedras naturais, que possuem resistência à abrasão mais elevada do que produtos cerâmicos esmaltados (GONZAGA, 2009). Em muitas propriedades, os porcelanatos se sobressaem em relação a pedras naturais como mármore e granito. Isto se deve ao fato deste revestimento cerâmico apresentar maior resistência ao ataque químico, sendo, então, adequado em ambientes em que os meios corrosivos estão presentes; e ser impermeável, tendo maior resistência às manchas e não as desenvolvendo em caso de infiltração de umidade (LUCKMANN, 2007; GONZAGA, 2009).

Devido aos seus aspectos técnicos e estéticos, seu uso tem se expandido para além das aplicações industriais, onde é recomendado devido ao altíssimo tráfego (GONZAGA, 2009). A invasão do porcelanato no setor comercial e residencial também se deve a sua versatilidade e efeito estético agradável. São mais leves, com menor espessura e maior resistência mecânica, facilitando o transporte e o manuseio (LUCKMANN, 2007). Além disso, apresentam uma grande variedade, podendo ser: monocores, decorados, rústicos, polidos,

esmaltados. A diferença entre eles está sempre nas cores dos pós-atomizados, na maneira de prensar, na aplicação de sais ou esmaltes ou no polimento (GONZAGA, 2009).

2.1.1 Etapas de Fabricação do Porcelanato

A seleção da matéria-prima é essencial para garantir propriedades adequadas ao material. Por isso, é fundamental manter a homogeneidade do lote e atender às especificações, a fim de evitar variações de tonalidade e variações na fusibilidade da composição (LUCKMANN, 2007).

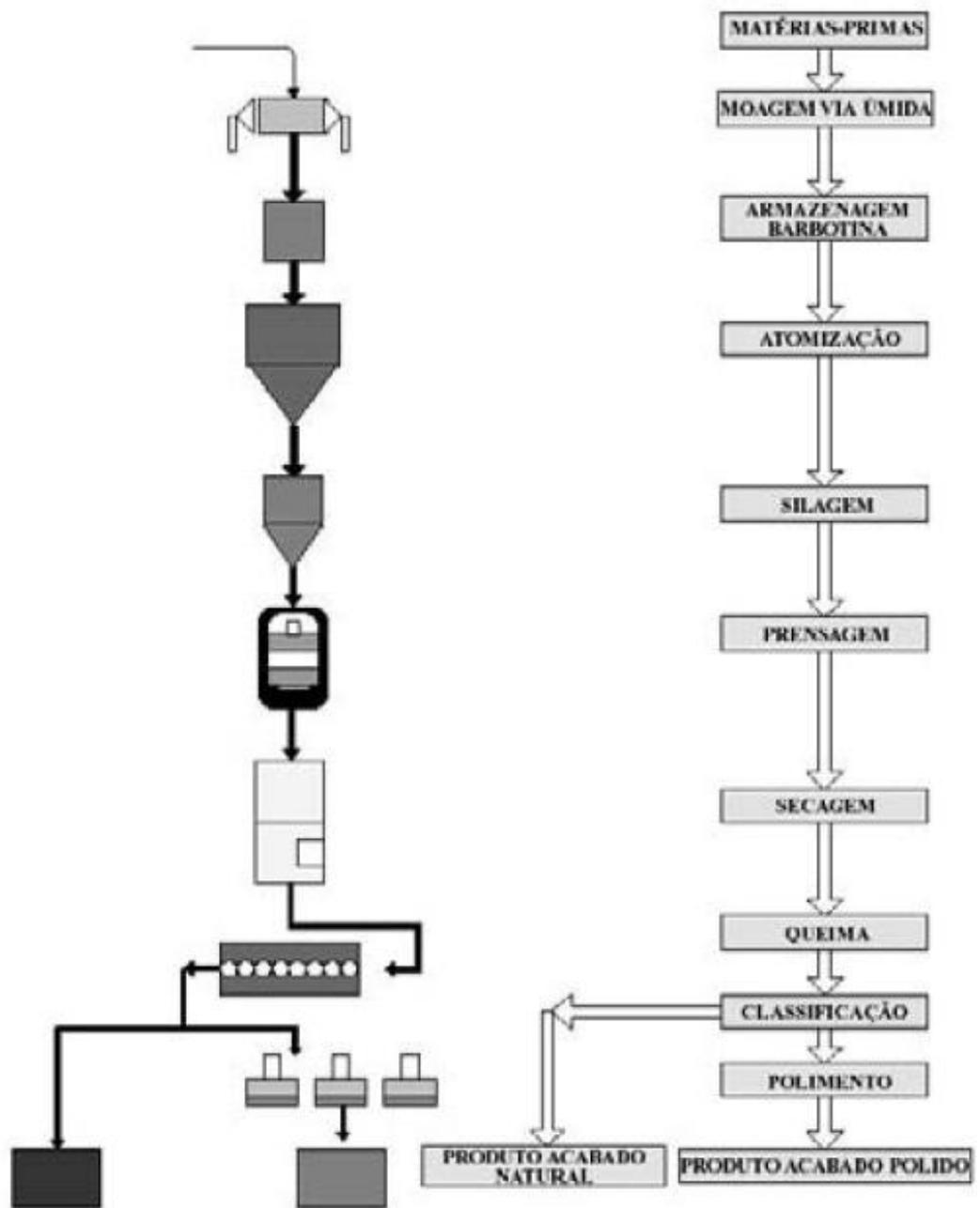
As misturas de matérias-primas utilizadas na fabricação do porcelanato são compostas, geralmente, por uma porcentagem variável (30-50% em peso) de caulim e/ou argilas ílítico-cauliníticas, e uma proporção similar à anterior de feldspatos sódico-potássicos. Essas matérias-primas devem apresentar baixo teor de óxido de ferro, já que a eficácia dos pigmentos que são adicionados à composição para colori-la depende da brancura do produto queimado (SANCHEZ et al, 2001).

As demais etapas são de igual importância para se obter um produto final de qualidade. A figura 2 mostra o processo simplificado da produção de porcelanato.

Na fase de cominuição (britagem e moagem por via úmida) controla-se o tamanho das partículas, por ser um fator que afeta as condições de compactação. A operação é realizada em moinhos de bolas resultando na redução granulométrica das partículas (GONZAGA, 2009).

Em seguida, passa-se pelo processo de atomização. A atomização é uma técnica de obtenção de pós que consiste na transformação de uma suspensão aquosa de partículas sólidas em partículas secas, a partir da pulverização da suspensão no interior de uma câmara aquecida (atomizador). A figura 3 apresenta a evolução da atomização de um grão cerâmico: 1- formação da gota ao sair do bico de pulverização, 2- evaporação de líquido e inchamento com movimentação de partículas sólidas, 3- explosão devido à elevada pressão interna da fase vapor e 4- formação da partícula sólida (RIBEIRO; VENTURA; LABRINCHA, 2001).

Figura 2 – Processo convencional para obtenção de porcelanato natural ou polido.



Fonte: GONZAGA (2009).

Figura 3 – Representação esquemática da evolução da atomização de um grão cerâmico.



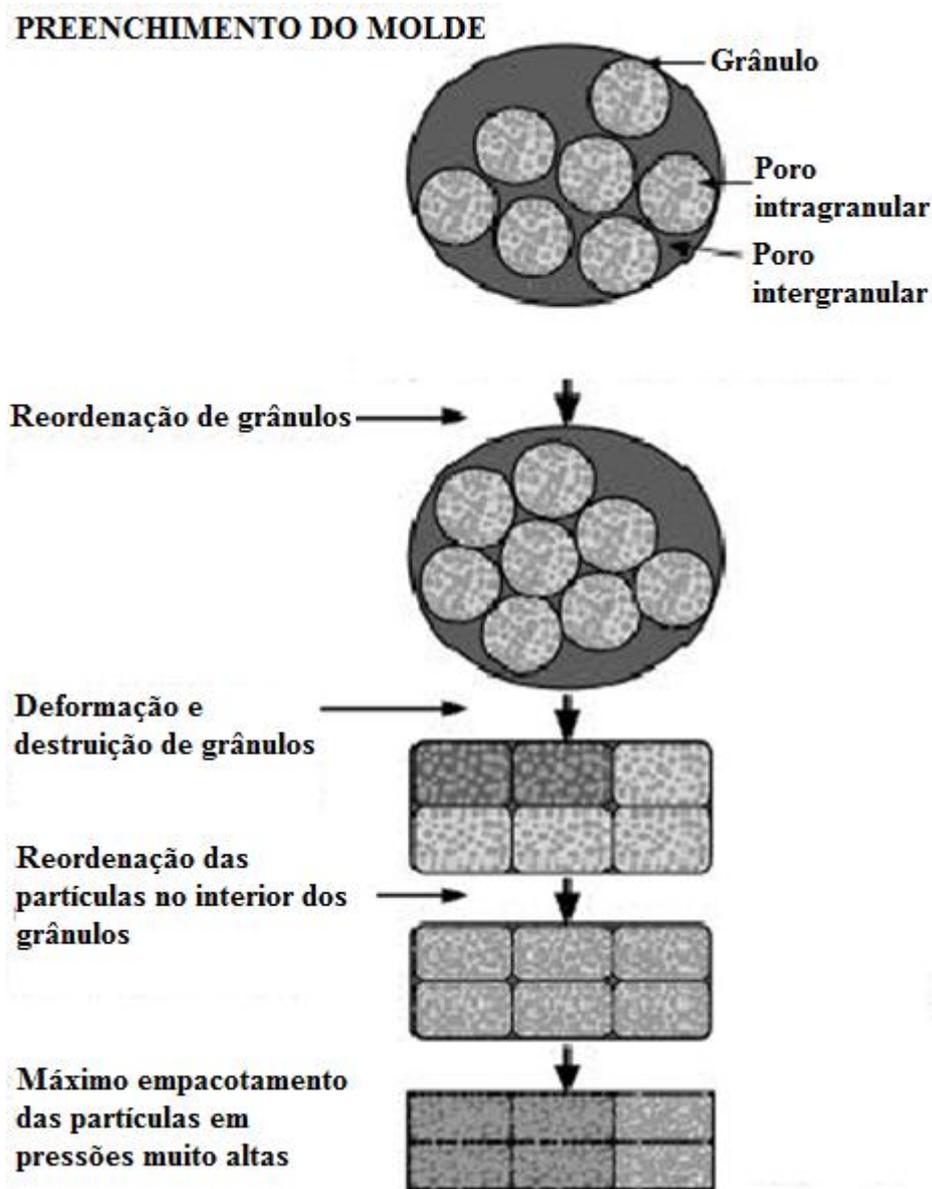
Fonte: RIBEIRO, VENTURA e LABRINCHA (2001).

Na etapa de atomização é necessário monitorar a viscosidade da suspensão cerâmica garantindo a qualidade do padrão do pó atomizado. Variações no tamanho de partícula resultam em variações na tonalidade do produto acabado. Para garantir a homogeneização da umidade, a massa atomizada deve ser mantida em repouso por no mínimo 36 h (LUCKMANN, 2007). O objetivo da atomização é a obtenção de um pó com características de fluidez e umidade adequadas ao preenchimento das cavidades da prensa. O pó atomizado sai com 6% de umidade (GONZAGA, 2009).

Na prensagem ocorre o deslocamento e reordenação dos grânulos, resultando em redução de volume e porosidade, conforme ilustrado pela figura 4 (ALBARO, 2000). A pressão específica de compactação varia de 400 Kgf/cm² a 500 Kgf/cm². E o uso de moldes

isostáticos é imprescindível para assegurar uma distribuição homogênea da pressão sobre a superfície do molde e evitar deformações (ALBARO, 2000; LUCKMANN, 2007).

Figura 4 – Mecanismo de compactação.



Fonte: ALBARO (2000).

A operação de secagem reduz a umidade da peça cerâmica para que o tempo na etapa de queima seja menor. No processo de monoqueima, a secagem também tem a função de proporcionar um aumento de resistência da peça crua que, então, será capaz de resistir aos choques durante o seu manuseio até o forno (GONZAGA, 2009).

Após a secagem ocorre a queima. Neste estágio é transferida a energia térmica necessária para promover uma série de reações químicas e físicas, como, por exemplo,

decomposições térmicas, eliminação de umidade, transformações alotrópicas, formação de fase líquida, sinterização entre outras (CARGNIN, 2011).

Durante a queima, as matérias-primas que contêm minerais alcalinos (ilita, feldspato, etc) produzem grande quantidade de fase líquida, cuja viscosidade diminui com o aumento da temperatura, fazendo com que penetre nos poros existentes e contribua para o processo de densificação. 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, no qual partículas de mulita e as partículas de quartzo que não se dissolveram totalmente estão dispersas (SANCHEZ et al, 2001). A variação da quantidade de fase vítrea e sua viscosidade devem ser graduais com a temperatura, para que as alterações de contração linear, absorção de água e deformação piropiástica – deformação do material pela ação da gravidade quando submetido a um determinado ciclo de queima (ROVERI, MELCHIADES, BOSCHI, 2000) – também o sejam.

No forno (figura 5), as peças permanecem por 60 min a uma temperatura de 1200°C (GONZAGA, 2009). À medida que se aumenta a temperatura há uma redução de poros, até que se alcance a máxima densificação (1200°C). A partir desta temperatura, a pressão dos gases fechados nos poros é superior à tensão superficial da fase líquida, o que faz com que os poros aumentem de tamanho, ocorrendo expansão (ROSSO, CUNHA, ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

Figura 5 - Forno utilizado na sinterização dos porcelanatos na empresa Cecrisa.



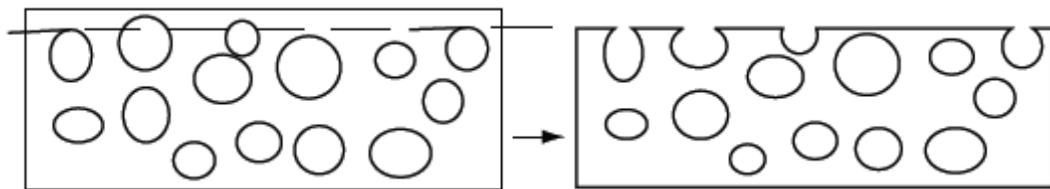
Fonte: Próprio autor.

O processo seguinte é o polimento da superfície da peça. Este é feito para melhorar suas características estéticas e sua posição competitiva em relação às pedras naturais. Ao longo do processo de polimento ocorrem três principais transformações: a perda de massa, o aumento do brilho e diminuição da rugosidade do porcelanato. A eliminação de material se dá pelos processos de fratura frágil que são provocados pelos esforços sofridos na superfície da peça, reduzindo em 10% a sua espessura (WIGGERS; SANTOS; HOTZA, 2007).

Esta etapa utiliza cabeçotes que rotacionam e transladam transversalmente à peça. Estes cabeçotes são constituídos de agentes abrasivos com tamanhos de partículas progressivamente decrescentes. O principal abrasivo empregado é o carbetto de silício (SiC) embutido em uma matriz magnesiana (PUREZA, 2004; WIGGERS; SANTOS; HOTZA, 2007). A velocidade do polimento é um fator que deve ser controlado, pois o brilho tende a diminuir com o aumento da velocidade. O mesmo ocorre com o aumento da pressão das cabeças polidoras sobre a peça (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

No polimento, a remoção de uma fina camada superficial, que normalmente varia de 0,5 a 1,5 mm de acordo com as características do polimento industrial adotado, exhibe uma nova superfície constituída por muitos poros que se encontravam fechados no interior do material (figura 6) (ALVES, 2010). Isto pode levar a uma diminuição de resistência às manchas e deterioração da superfície. É fundamental o controle do tamanho, forma e interligação dos poros, sendo que o produto ideal é aquele que apresenta uma microestrutura composta de poros isolados e de tamanho inferior a $15\mu\text{m}$ (LUCKMANN, 2007).

Figura 6 – Abertura de poros na superfície após processo de polimento.



Fonte: ROSSO, CUNHA, ROJAS-RAMÍREZ (2005).

Outro elemento indispensável durante o polimento é a água. Esta é distribuída na máquina em cada cabeça polidora e tem a função principal de diminuir o atrito entre os abrasivos e a peça, refrigerando o local, e retirar os resíduos gerados que poderiam ficar sobre as peças, causando riscos e arranhões (ROSSO, CUNHA, ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

Após o polimento, as placas devem passar por um processo de estabilização de tensões internas, feita por meio do seu resfriamento por um período mínimo de 12 horas (STEINER, 2011).

É importante lembrar que durante o polimento tanto o porcelanato quanto a ferramenta abrasiva são desgastadas e, portanto, o resíduo do polimento de porcelanato é composto pelas matérias-primas da peça e do polidor, contendo, portanto, uma pequena fração de SiC.

2.1.2 Propriedades e Características do Porcelanato

O porcelanato apresenta absorção de água abaixo de 0,5%, o que o classifica no grupo BIa segundo a Norma ISO 13006/NBR13818 (tabela 1).

Tabela 1- Classificação do porcelanato em função da absorção de água.

Tipologia do Produto	Aa (%)	Grupo de Absorção
Porcelanato	Até 0,5	BIa
Grês	0,5 a 3,0	BIb
Semi-grês	3,0 a 6,0	BIIa
Semi-porosa	6,0 a 10,0	BIIb
Poroso	Acima de 10,0	BIII

Fonte: Norma ISO 13006 (2006).

Suas principais propriedades são: elevada resistência mecânica, ao risco e ao ataque químico. A Norma Internacional ISO 13006 traz algumas especificações para o porcelanato (tabela 2).

Tabela 2 - Características técnicas do porcelanato.

Características técnicas	ISO 13006
Resistência a flexão (MPa)	≥ 35
Carga de ruptura (N)	≥ 1300

Fonte: Norma ISO 13006 (2006).

O porcelanato pode ser 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 abaixo de 0,1% (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

A composição básica do porcelanato engloba uma mistura de argilas, feldspatos, caulins e aditivos (ROSSO, CUNHA, ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

Este material cerâmico é altamente resistente à abrasão profunda e esta propriedade é influenciada pela porosidade do porcelanato. A grande quantidade de materiais de elevada dureza como, por exemplo, mulita, silicato de zircônio e quartzo também influenciam nesta característica (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

Outra propriedade importante é a resistência à flexão. O alto grau de sinterização permite obter densidades aparentes, após queima, entre $2,36 \text{ g/cm}^3$ e $2,46 \text{ g/cm}^3$ ao se trabalhar com a temperatura de máxima densificação da massa (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

2.1.3 *Matérias-primas do Porcelanato*

As principais matérias-primas do porcelanato são os argilominerais, o caulim, feldspatos e aditivos que serão detalhados a seguir.

2.1.3.1 Argilominerais

A função das argilas é proporcionar plasticidade e permitir a conformação das peças (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005). Quando em presença de água, os argilominerais apresentam propriedades como plasticidade, resistência mecânica no estado verde, retração linear de secagem e compactação. Os principais grupos de argilominerais são: caulinita, illita e esmectitas ou montmorilonita (GONZAGA, 2009).

As argilas constituídas essencialmente por caulinita são as mais refratárias, pois são constituídas de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), enquanto que outras argilas têm sua refratariedade reduzida devido à presença de potássio e ferro em maior concentração (GONZAGA, 2009).

As argilas para a produção de porcelanato são, geralmente, plásticas e compostas por caulinita ou illita e esmectita, além de fração de minerais como quartzo, feldspato mica e minerais opacos (LUCKMANN, 2007).

A massa cerâmica que dará forma ao porcelanato apresenta várias funções como dar coloração clara na queima, fornecer plasticidade e características ligantes à massa, aportar propriedades reológicas conferindo fluidez, além de atribuir boa densidade na queima e elevada resistência mecânica aos sinterizados. A cor clara se deve aos baixos teores de óxidos

de ferro. Estas argilas são escassas e, portanto, na produção de porcelanato, são utilizadas misturas de vários tipos de argilas, plásticas, não plásticas com alto teor de caulinita ou mais ricos em materiais argilosos como ilita e montmorilonita (GONZAGA, 2009).

2.1.3.2 Caulim

O caulim é um material de granulometria fina de cor branca e de boa inércia química, apresenta-se como uma massa compacta, terrosa e microcristalina (GONZAGA, 2009; LUCKMANN, 2007). O caulim pode apresentar impurezas coloridas, como, por exemplo, a hematita, que rebaixa seu valor comercial, se for destinado à produção de papel ou produtos cerâmicos de base clara. A fórmula da caulinita é $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (GONZAGA, 2009).

A proporção de caulinita na massa varia de 10 a 15% e é responsável por atribuir a cor branca à massa cerâmica. Além disso, é composta por óxido de alumínio (Al_2O_3), que durante a fase de vitrificação regula o equilíbrio das reações. A alumina toma parte na formação da fase vítrea do tipo silicoaluminosa ao se associar com elementos alcalinos fundentes. Ao final da sinterização é encontrada, principalmente, na forma de mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), que tem o formato de agulhas e, portanto, atua como o esqueleto do corpo cerâmico colaborando para o aumento da resistência mecânica (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005, GONZAGA, 2009; LUCKMANN, 2007).

Um caulim cerâmico de boa qualidade deve apresentar um teor de caulinita de 75% a 85% e não ter minerais que afetem a cor de queima, como a hematita (Fe_2O_3), cujo teor, para que não interfira na brancura do material, deve ser inferior a 0,9% (GONZAGA, 2009). Quanto maior for a refratariedade e menor for a retração linear, melhor será o caulim para a utilização no porcelanato (LUZ e LINS, 2005). A tabela 3 apresenta as propriedades cerâmicas de dois caulins utilizados na produção do porcelanato.

Tabela 3 – Propriedades cerâmicas dos caulins dos depósitos Balsa Nova e Paraná (PR) utilizados na produção de porcelanato.

Propriedades	Caulim	Caulim
	Balsa Nova	Paraná
Massa Específica Real (g/cm ³)	2,64	2,66
Módulo de Ruptura à Flexão a 110° C (MPa)	0,87	0,66
Módulo de Ruptura à Flexão a 1150° C (MPa)	19,59	10,00

Módulo de Ruptura à Flexão a 1200° C (MPa)	28,85	13,21
Módulo de Ruptura à Flexão a 1250° C (MPa)	25,62	15,58
Absorção de Água a 1150°C (%)	17,15	16,40
Absorção de Água a 1200°C (%)	14,09	14,39
Absorção de Água a 1250°C (%)	12,74	12,96
Retração Linear a 110°C (%)	0,06	0,05
Retração Linear a 1150°C (%)	3,00	1,59
Retração Linear a 1200°C (%)	4,39	2,54
Retração Linear a 1250°C (%)	4,68	3,90
Porosidade Aparente a 1150°C (%)	31,21	29,47
Porosidade Aparente a 1200°C (%)	26,17	26,26
Porosidade Aparente a 1250°C (%)	24,07	24,4
Granulometria (% < 2 µm)	12,00	14,00

Fonte: LUZ e LINS (2005).

2.1.3.3 Feldspato

Os feldspatos se constituem de silicatos de alumínio e bases alcalinas ou alcalino-terrosas, anidros e cristalinos (nos sistemas monoclinicos e triclinicos), formando elementos essenciais e abundantes nas rochas magmáticas (GONZAGA, 2009).

Os feldspatos exercem a função de fundentes proporcionando as primeiras fases líquidas que aparecem durante a queima. Estas fases contornam as partículas refratárias, aproximando-as por meio das forças de tensão superficial que são geradas nos poros mais finos, fato que gera contração da peça, densificando-as (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

Estes minerais conferem a elevada gresificação e alta resistência mecânica que registram os produtos no final da queima. O comportamento cerâmico mais característico dos minerais feldspáticos é a notável fusibilidade e a formação, com os outros elementos presentes, de eutéticos que possibilitam atingir a gresificação mesmo a temperaturas relativamente baixas (LUCKMANN, 2007).

Na indústria cerâmica, o feldspato é representado por dois minerais: albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), feldspato sódico, e o ortoclásio ou microclínio, feldspato potássico. A anortita, feldspato cálcico, é raramente usada, pois se trata de um mineral muito refratário. Na indústria cerâmica, os feldspatos sódicos e potássicos apresentam comportamento diferente, durante a queima. Os feldspatos sódicos são caracterizados por apresentar baixo ponto de fusão (cerca

de 1170°C) e por uma fusão abrupta, bem como retração e fusibilidade dependentes da temperatura. A massa fundida do feldspato sódico tem viscosidade mais baixa. Por isto, na indústria cerâmica, o feldspato sódico é mais propenso à formação de peças empenadas ou deformadas. Os limites térmicos de trabalho são mais estreitos. Por outro lado, os feldspatos potássicos têm um ponto de fusão mais elevado (aproximadamente 1500°C) e seu comportamento cerâmico se dá de forma mais progressiva. A massa fundida proveniente do feldspato potássico apresenta maior viscosidade e desta forma os limites térmicos são relativamente mais amplos (LUZ; LINS, 2005). Desta forma, os principais materiais de interesse comercial são feldspatos potássicos (ortoclásio ou microclínio), $K(AlSi_3)O_8$ (KINGERY, BOWEN, UHLMANN, 1975).

Outro elemento básico para as propriedades fundentes é o teor de álcalis no mineral. O valor teórico de K_2O e de Na_2O nos feldspatos potássico e sódico é de 16,9% e de 11,8%, respectivamente. Quanto mais o teor de álcalis se aproxima do valor teórico, mais aumenta o valor comercial do feldspato. As quantidades em que é adicionado às massas cerâmicas dependem muito do caráter fundente do feldspato, ou seja, da quantidade de álcalis presente no mineral (LUCKMANN, 2007).

A indústria cerâmica para porcelana e azulejo branco exige feldspatos com pequenas quantidades de ferro (menos de 0,2%), pouco quartzo (menos de 10%) e ponto de fusão próximo de 1200°C (GONZAGA, 2009).

Os feldspatos usados industrialmente têm geralmente a seguinte composição: SiO_2 (65-70%), Al_2O_3 (15 -19%), Fe_2O_3 (0,05-0,10%), K_2O (0,2-12%), Na_2O (0,3-5%) e CaO (menos de 1 %). Os feldspatos encontrados no Brasil enquadram-se dentro dos limites acima com exceção do teor de ferro, que é frequentemente mais alto (GONZAGA, 2009).

2.1.3.4 Quartzo

O óxido de silício é encontrado na natureza sob as formas polimorfas: quartzo, tridimita e cristobalita. Com a variação de temperatura ocorrem as transformações de fase, recebendo cada uma, a sua denominação específica. O quartzo alfa é estável à temperatura ambiente, transformando-se na variedade beta a 573°C e em tridimita a 870°C. À temperatura de 1470°C ocorre a transformação para cristobalita, até atingir o ponto de fusão a 1713°C (LUZ; BRAZ, 2000).

A presença de quartzo nas massas de cerâmica branca e de materiais de revestimento é fundamental para conferir o controle de dilatação e para o ajuste da viscosidade da fase

líquida formada durante a sinterização da massa cerâmica, além de facilitar a secagem e a liberação dos gases durante a queima e ser um importante regulador da relação entre SiO_2 e Al_2O_3 para a formação de mulita ($3\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) (GONZAGA, 2009).

Quando moído, o quartzo pode ser misturado nas argilas que contêm calcário, pois acima de 900°C reage com o CaO formando silicato de cálcio e contribuindo para melhor resistência mecânica do produto (GONZAGA, 2009).

O quartzo, durante a sinterização do corpo cerâmico, em torno de 573°C , sofre alteração de tamanho com brusco aumento de volume, superior a 3%. Portanto, durante esta transformação a taxa de aquecimento deve ser lenta para evitar o surgimento das trincas provocadas pela brusca mudança de volume. O resfriamento, em torno de 1250°C e 1100°C , deve ser feito rápido para se evitar a cristalização da cristobalita. Sendo assim, também favorecerá o desenvolvimento de vidros transparentes, pois a estrutura se manterá amorfa, enquanto que o resfriamento lento favorece a formação de cristais com efeito opaco. Entre 573°C e 300°C ocorrem mudanças físicas na sílica o que torna recomendável um resfriamento lento em ambos os pontos (GONZAGA, 2009).

2.1.3.5 Talco

O mineral talco é um filossilicato de magnésio hidratado, apresentando fórmula química $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ onde seus constituintes assumem um arranjo espacial do tipo “t-o-t”, ou seja, uma estrutura do tipo “sanduíche” que exhibe duas folhas tetraédricas – t– formadas por átomos de silício e oxigênio (folha siloxana) que envolvem uma folha octaédrica – o– formada por magnésio e hidroxila (folha de brucita). As unidades funcionais do tipo t-o-t são ligadas entre si por ligações de van der Waals, a quebra preferencial destas ligações durante o processo de fragmentação confere às partículas uma superfície de caráter fortemente hidrofóbico (LUZ; BRAZ, 2000).

O talco puro apresenta uma composição química teórica de 31,7% em peso de MgO ; 63,5% de SiO_2 e 4,8% de H_2O . As principais propriedades que o tornam largamente utilizado na indústria são: inércia química, suavidade e untuosidade ao tato, alta área de superfície, boa retenção como carga, dureza baixa (valor de 1 na Escala de Mohs), brilho nacarado e gorduroso, densidade 2,7 a $2,8 \text{ g/cm}^3$, resistência ao choque, leveza e hidrofobicidade natural (LUZ; BRAZ, 2000).

Na indústria cerâmica, o talco é utilizado como fonte de magnésio, controlando a expansão térmica, aumentando a resistência ao choque térmico e evitando trincas no produto

final (CAMPOS, 2013; LUZ e BRAZ, 2000). A utilização de talco nas massas cerâmicas resulta em aumento na resistência às manchas (a partir de valores acima de 1,6% em massa); aumenta o módulo de ruptura à flexão em até 30%; parece favorecer as operações de polimento quando a microporosidade é mínima; reduz o coeficiente de dilatação térmica, favorece o aumento da brancura, quando em presença de zircônio (LUCKMANN, 2007). É usado na preparação da massa via úmida, no máximo até 5% (GONZAGA, 2009).

2.2 Resíduo de Polimento de Porcelanato

No processo de polimento sofrido pelo porcelanato são removidos alguns décimos de milímetros de material da superfície da peça cerâmica (SILVA, 2005).

O volume total do resíduo de polimento de porcelanato (úmido) produzido gira em torno de 8m³ por dia (cerca de 20 toneladas) na fábrica da Cecrisa em Santa Luzia, Minas Gerais (SILVA, 2005).

Estes resíduos sólidos contêm metais tóxicos provenientes de algumas matérias-primas sintéticas utilizadas no processo de decoração e acabamento. Eles são classificados segundo a NBR 10004:2004 como classe I e classe IIA, o que requer uma destinação específica tornando o processo oneroso (STEINER, 2011).

A NBR 10004:2004 “Resíduos Sólidos - Classificação” classifica os resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. Os resíduos são classificados em:

- Classe I: perigosos, aqueles que apresentam periculosidade, ou uma das características a seguir: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.
- Classe IIA: não-inertes, podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Classe IIB: inertes, resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com a água, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Durante o processo de polimento retira-se tanto material da superfície do porcelanato quanto fragmentos da ferramenta polidora, como já foi explicado em tópicos anteriores. Deste modo, a composição química do RPP não se mantém análoga à do próprio porcelanato.

De acordo com a literatura, além dos constituintes característicos do porcelanato, o resíduo apresenta SiC, proveniente do polidor. O SiC, em temperaturas próximas a 1000°C, sofre decomposição e reage com o oxigênio gerando SiO₂, CO_(g) e CO_{2(g)} (LUCKMANN, 2007). Se adicionado a um cerâmico com temperatura de transição vítrea (T_g) inferior à temperatura de decomposição do SiC, o produto resultante sofrerá uma expansão volumétrica, devido à reação do SiC com O₂, associada ao início do amolecimento do material cerâmico, cuja superfície será impermeável à passagem do gás resultante da decomposição para o exterior da peça. O produto resultante será o material expandido, denominado cerâmica celular. Pode ser aplicado na indústria de construção civil como componente para preenchimento de lajes, bem como na fabricação de divisórias com excelentes propriedades de isolamento termo-acústico (LUCKMANN, 2007).

2.3 A partícula abrasiva: Carbetto de Silício

O carbetto de silício (SiC) foi descoberto acidentalmente em 1890 por Edward G. Acheson, um assistente de Thomas Edison, quando ele estava fazendo um experimento da síntese de diamantes. Acheson pensou que o novo material era um composto de carbono e alumina presente na argila, levando-o a chamá-lo de *carborundum*, nome que ainda é usado em algumas ocasiões. O carbetto de silício ocorre naturalmente em meteoritos, apesar de muito raramente e em pequenas quantidades. Como o descobridor do SiC, Acheson foi o primeiro a sintetizá-lo através da passagem de uma corrente elétrica pela mistura de argila e carbono. Atualmente, o SiC ainda é produzido via reação no estado sólido entre areia (dióxido de silício) e coque de petróleo (carbono) a altas temperaturas em um forno a arco elétrico (RASHED, 2002).

Em geral, o SiC apresenta excelente resistência à oxidação em temperaturas até 1650°C. Mas, a resistência à oxidação depende largamente da fração de poros abertos e do tamanho de partícula, o qual determina a área superficial exposta ao oxigênio. Quanto maior a área superficial maior é a taxa de oxidação. Ceticamente, o SiC é estável em ar até 1000°C. Entre 1000°C e 1150°C, a oxidação superficial é termodinamicamente favorecida e resulta na formação rápida de um fino filme de sílica (SiO₂). Acima de 1150°C, o filme de SiO₂ se torna mais espesso e se densifica resultando em uma difusão de oxigênio mais lenta e,

consequentemente, menor taxa de oxidação, deste modo, um mecanismo de oxidação passiva prevalece (RASHED, 2002).

Os fatores que afetam a estabilidade e a integridade da camada de SiO_2 como um filme protetor incluem a presença de impurezas no material, que tendem a diminuir a viscosidade do filme de SiO_2 , assim, aumentam a mobilidade em massa dos agentes oxidantes. Acima de 1650°C , as reações interfaciais entre o filme de SiO_2 e o substrato de SiC se tornam aparentes, resultando na formação de SiO volátil e CO gasoso. Estes produtos voláteis tendem a romper o filme de SiO_2 , abrindo novos caminhos para mais oxigênio se difundir e a oxidação continua (RASHED, 2002).

Neste caso, o mecanismo de oxidação muda do modo passivo, no qual o filme de SiO_2 é denso e estável, para o modo ativo, no qual a camada de SiO_2 é porosa e frágil. A presença de vapor de água na atmosfera oxidante também causa o aumento da porosidade do filme de SiO_2 , consequentemente, aumenta a taxa de oxidação de materiais à base de SiC. Em geral, a taxa de oxidação do SiC é menor em ar seco e aumenta em elevadas pressões parciais dos gases O_2 , CO_2 e H_2O (RASHED, 2002).

Por ser um material muito duro e inerte quimicamente, o SiC é utilizado como abrasivo para corte ou polimento de materiais (LOPES, 2012).

2.4 Cerâmica Celular

As cerâmicas celulares são materiais de elevada porosidade formadas por arranjos de câmaras poligonais, as células, e podem ser classificadas em dois grandes grupos: as colmeias (*honeycombs*) e as espumas. Nas colmeias as células formam um arranjo bidimensional, enquanto as espumas são polígonos vazados tridimensionais (BERNARDIN et al, 2007).

Nos últimos anos, o interesse na produção e uso de materiais cerâmicos de elevada porosidade tem crescido significativamente. Isto está associado, principalmente, com as propriedades que tais materiais oferecem, tais como elevada área superficial, elevada permeabilidade, baixa densidade, baixo calor específico e boas propriedades de isolamento térmico e acústico. Estas características são essenciais para aplicações tecnológicas como suportes catalíticos, filtros para metais fundidos, sistemas de proteção térmica e trocadores de calor (SCHEFFLER; COLOMBO, 2005).

O tamanho da célula, morfologia e grau de interconectividade também são fatores importantes que influenciam estas aplicações. Predominantemente, para isolamento térmico são necessários materiais com células fechadas, enquanto materiais com células abertas

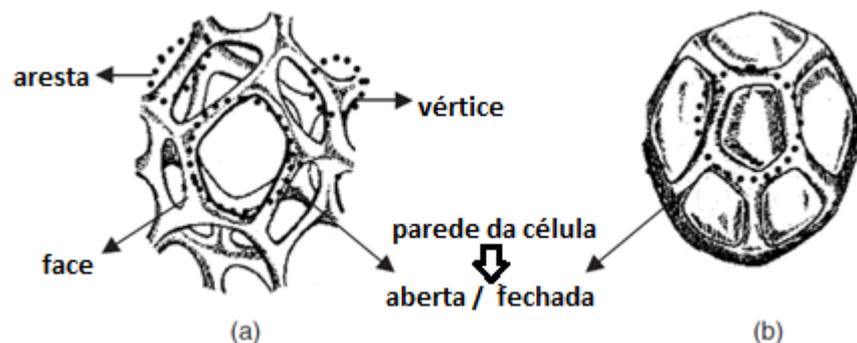
interconectadas são requeridos para usos envolvendo transporte de fluidos, como filtros e catalisadores (SCHEFFLER; COLOMBO, 2005).

As diferentes propriedades requeridas por elas evidenciam a necessidade de variadas rotas de processamento para que sejam fabricadas. Nenhuma rota é flexível o suficiente para produzir todas as estruturas necessárias. Isto tem levado a uma grande variedade de técnicas a serem desenvolvidas e patenteadas em muitos países ao redor do mundo. Elas podem ser grosseiramente divididas em três categorias (SCHEFFLER; COLOMBO, 2005).

A primeira é baseada na replicação de um pré-formato de espuma polimérica através da aplicação de uma pasta cerâmica fluida que seca antes do modelo polimérico ser queimado, logo após, a cerâmica é sinterizada e o polímero consumido, resultando em uma cerâmica reticulada (SCHEFFLER; COLOMBO, 2005).

A segunda abordagem consiste na incorporação de aditivos de sacrifício na forma de gotas ou materiais relacionados. Dependendo da quantidade adicionada, as espumas podem apresentar natureza predominantemente aberta ou fechada, como mostrado na figura 7.

Figura 7- Alguns componentes estruturais de uma unidade de célula em espumas a) abertas e b) fechadas.



Fonte: SCHEFFLER e COLOMBO (2005).

O último método se baseia na formação de espumas cerâmicas através da incorporação de um gás externo por processos mecânicos de injeção de fluxo de gás ou pela evolução de gases *in situ*. Estas técnicas permitem a obtenção de espumas de poros fechados de pequenas dimensões, o que não é possível pela rota de replicação de espuma polimérica. Utilizando esse método, podem-se obter cerâmicas celulares com densidades tão baixas quanto $0,2 \text{ g/cm}^3$ com facilidade. Portanto, é o mais adequado para o uso de resíduos industriais como matéria-prima para fabricação de espumas cerâmicas a partir da evolução de gases, por isso, esta técnica que será utilizada neste trabalho (LUCKMANN, 2007; SCHEFFLER; COLOMBO, 2005).

2.4.1 Produção de cerâmica porosa através da evolução de gases *in situ*

De maneira geral, a técnica de evolução de gases *in situ* consiste na formação de uma estrutura cerâmica porosa pela presença de um agente de expansão, principalmente composto de carbono ou substâncias carbonatadas, que se decompõe devido ao aquecimento ou reação química, gerando gás no interior do material cerâmico (BENTO, 2012; SCHEFFLER e COLOMBO, 2005).

A mistura de matéria-prima cerâmica, agente espumante e ocasionalmente outros agentes minerais é aquecida a uma temperatura na qual ocorre a evolução do gás do agente de expansão. O gás liberado leva a uma infinidade de pequenas bolhas esféricas inicialmente que sob o aumento da pressão do gás expandem-se formando uma estrutura porosa (BENTO, 2012).

Tanto mais expansiva será a amostra durante a síntese quanto menor for a taxa de aquecimento durante o processo de sinterização, todavia, uma taxa muito lenta pode levar à geração de gases de efeito precoce impedindo a expansão do material (BENTO, 2012).

Os diferentes tipos de cerâmicas porosas exibem uma única morfologia isotrópica, mas diferem no tamanho, na forma e na permeabilidade dos poros. Um modo de classificar a porosidade do material é de acordo com as dimensões dos poros. Denomina-se microporosidade quando o tamanho dos poros é < 2 nm, mesoporosidade quando está compreendido entre 2 e 50 nm e macroporosidade para o tamanho dos poros > 50 nm (BENTO, 2012).

Uma estrutura macroporosa pode oferecer estabilidade química e mecânica à cerâmica, além de uma alta taxa de transferência externa de massa devido às interconexões entre os macroporos. Deste modo, sua aplicação é mais indicada para filtros cerâmicos (BENTO, 2012).

2.4.2 Cerâmica expandida para isolamento térmico

O isolamento térmico consiste em utilizar materiais de baixa condutividade térmica (k) para minimizar a transferência de calor de uma região para outra. Na construção civil, um isolante térmico é um produto em que a relação resistência térmica/espessura é significativamente superior à que pode ser obtida com os materiais de construção correntes, como por exemplo: a pedra, o vidro e os materiais de revestimento tradicionais (LABRINCHA, 2006).

Pode-se dizer que um bom isolante térmico deve apresentar uma quantidade de matéria sólida (mais condutora) tão baixa quanto possível, portanto, deve ter elevada porosidade. Segundo Labrincha (2006 apud Davies, 2001), os materiais de isolamento, normalmente necessários em uma construção convencional e essenciais numa construção leve são porosos ou celulares, o que significa que uma grande parte do volume do material consiste em bolhas de ar ou gás.

Assim, os melhores resultados serão obtidos com um material celular com porosidade fechada, com células de dimensões reduzidas (redução dos fenômenos de convecção), preenchidas com um gás de baixa condutividade térmica (LABRINCHA, 2006).

2.5 Reutilizações de RPP Sugeridas na Literatura

Segundo Marques et al. (2007), o RPP pode ser incorporado à uma massa cerâmica comercial utilizada para produção de revestimento. Foram preparadas formulações com adição de resíduo na proporção de 1%, 3% e 5% na massa cerâmica comercial. Os corpos de prova (50x20x5mm) foram prensados a 30 MPa e, então, sinterizados em forno de queima rápida, com taxas de aquecimento de 33 a 40°C/min e patamar de 5 min, de forma que o ciclo de queima não ultrapassasse 35 min. A adição de 3 e 5% de resíduo reduziu a temperatura ótima de queima em 25 e 50°C, respectivamente, e provocou um leve aumento na densidade aparente dos corpos de prova.

Steiner (2011) estudou o RPP avaliando sua ação aglomerante para potencializar o efeito do cimento *Portland* para fabricação de blocos de concreto para vedação. Para estudo da mistura, foram utilizadas quatro composições de argamassa, de traço 1:3 adicionando 0, 5, 10 e 20% de rejeito em massa de cimento. Os resultados mostraram que o resíduo melhora as características de trabalhabilidade e consistência das argamassas e confere ganho de resistência à compressão, em média 50% para uma adição de 20% de rejeito de RPP.

Silva (2005) pesquisou o comportamento do concreto de cimento *Portland* produzido com a adição do RPP em quantidades de 10 e 20% em relação à massa de cimento. Foram avaliadas as propriedades do concreto fresco, do concreto endurecido, dentre outras, e constatou-se que a reutilização do RPP em concretos trouxe benefícios às propriedades mecânicas e aos aspectos de durabilidade, e que o teor de 10% é o que apresenta os melhores resultados.

Pureza (2004) avaliou o efeito da adição de diferentes resíduos de baixa granulometria, incluindo o resíduo de polimento de grês porcelanato. Após a caracterização das matérias-primas, foram formuladas massas cerâmicas na relação argila/resíduo de 5:1. As massas cerâmicas foram conformadas por prensagem e submetidas à queima em forno elétrico tipo mufla nas seguintes temperaturas: 800, 900, 950, 1000 e 1100°C. Observou-se que os corpos produzidos com resíduo do polimento de grês porcelanato sofreram expansão na temperatura de 1100°C apresentando bolhas e aspecto vitrificado, absorção de água muito baixa (0,0%), evidenciando que os silicatos ocuparam os poros até o momento em começa a formação de bolhas, além de uma porosidade fechada, provavelmente, muito elevada.

Luckmann (2007) utilizou o RPP na fabricação de cerâmicas celulares por monoqueima rápida. Os resíduos foram compactados por prensagem uniaxial (300 kgf/cm², 350 kgf/cm² e 400 kgf/cm²), secos e queimados em forno a rolos industrial (1150°C, 1170°C e 1190°C). Estas cerâmicas foram caracterizadas quanto à sua densidade aparente, expansão linear, absorção de água e resistência mecânica à compressão diametral. A quantidade de óxidos fundentes permitiu a obtenção, após a queima, de corpos vítreos que impermeabilizam a superfície das amostras quando tratadas acima de sua T_g (1100°C), pela formação de gases derivados da oxidação do SiC. Quanto à resistência mecânica à compressão, observou-se que o aumento da temperatura de sinterização causou diminuição desta propriedade (aumentando de 1150°C para 1170°C a resistência diminuiu de 11,9 MPa para 3,7 MPa). O máximo das resistências ocorreu para a pressão de conformação de 350kgf/cm². A expansão linear foi muito afetada pelo aumento de temperatura de tratamento: um aumento de 20°C causou um aumento médio de expansão de 650%, além disso, amostras muito compactadas diminuem a oxidação das partículas de SiC presentes no resíduo. A absorção de água aumenta à medida que a temperatura aumenta. Os produtos obtidos apresentaram boas características mecânicas, térmicas e acústicas e, portanto, poderiam ser utilizados como substituto ao poliestireno expandido na preparação de lajes e edifícios e para outros fins na área da construção civil.

Bernardin et al. (2006) reaproveitaram o resíduo de polimento e de esmaltação, por apresentarem SiC, para promoção de expansão em corpos cerâmicos. Os resíduos foram, inicialmente, desagregados, o abrasivo adicionado ao vidro (1, 3, 6 e 12% em massa) e as misturas moldadas em esferas com 3 cm de diâmetro. As amostras foram então sinterizadas a 1200°C por 15 min. Obtiveram produtos cerâmicos celulares com baixa densidade e boa resistência mecânica à compressão quando comparados aos materiais expandidos tradicionalmente utilizados na construção civil.

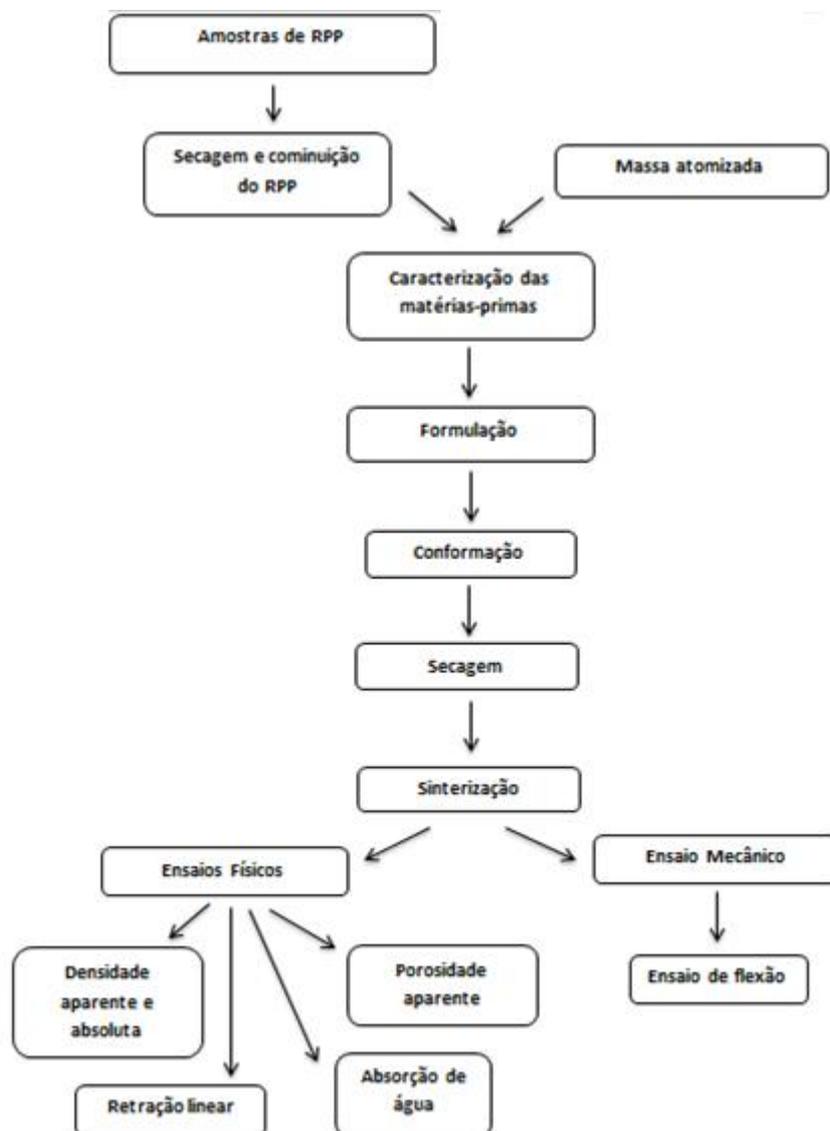
Bernardin et al. (2007) continuaram os estudos sobre a obtenção de cerâmicas celulares a partir de resíduos de polimento. Utilizou-se resíduos de polimento de produtos porcelânicos coletados em estações de tratamento de efluentes e resíduos de abrasivos de SiC. Após preparação, o resíduo de abrasivo foi adicionado ao resíduo de polimento em frações mássicas de 0,5% a 12% e as misturas foram granuladas e compactadas (30 MPa). Os compactos foram sinterizados a 1180°C por 20 min e então caracterizados. Foram obtidas cerâmicas celulares que podem ser utilizadas em substituição ao concreto celular, devido à sua baixa densidade. Aparentemente, as espumas apresentam boas propriedades de isolamento térmico e acústico, mas precisa-se de estudos mais aprofundados. O produto mostrou resistência mecânica satisfatória para utilização na construção civil (média de 18 MPa) e boa resistência mecânica devido à forma arredondada dos poros que evitam os concentradores de tensão.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram coletadas durante visita técnica à Cerâmica Cecrisa S.A. no município de Santa Luzia, região metropolitana de Belo Horizonte. A empresa forneceu amostras da massa atomizada do porcelanato Portinari Cinza Star e do resíduo gerado durante polimento do porcelanato (RPP).

O fluxograma a seguir apresenta esquematicamente as principais etapas desenvolvidas no procedimento experimental (figura 8):

Figura 8– Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Próprio autor.

3.1 Caracterização do Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) e da Massa Atomizada

As composições químicas do resíduo produzido durante a etapa de polimento e da massa atomizada, em termos de seus óxidos constituintes, foram determinadas empregando a técnica de fluorescência de raios X (Shimadzu, EDX-720). Para se definir as fases presentes no RPP e sua estrutura cristalina empregou-se a técnica de difração de raios X (Shimadzu, XRD - 7000). As análises foram feitas no Laboratório de Análises do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

A análise granulométrica, tanto do RPP quanto da massa atomizada, foi feita em um aparelho de granulometria por difração de laser (Cilas 1090). O ensaio ocorreu no Laboratório de Análises do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

A estabilidade térmica do RPP foi determinada pela Técnica de Termogravimetria (TG) (Shimadzu, DTG-60H), no laboratório TECMAT do CEFET-MG.

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°C durante uma hora, pesar a amostra e repetir o procedimento acima até não se observar variações na massa.

3.2 Preparação dos Corpos de prova

Os corpos-de-prova foram preparados a partir da massa atomizada do porcelanato Portinari Cinza Star e do resíduo gerado durante o seu polimento (RPP).

O RPP foi secado durante 72 horas em uma estufa (Med Clave modelo 3) à temperatura de 120°C. Então, foi feita a cominuição em moinho de bolas para que o tamanho das partículas de RPP se aproximasse ao da massa atomizada.

Após o preparo das matérias-primas, procederam-se as etapas de formulação, conformação, secagem, sinterização e caracterização dos corpos cerâmicos.

3.2.1 Formulação

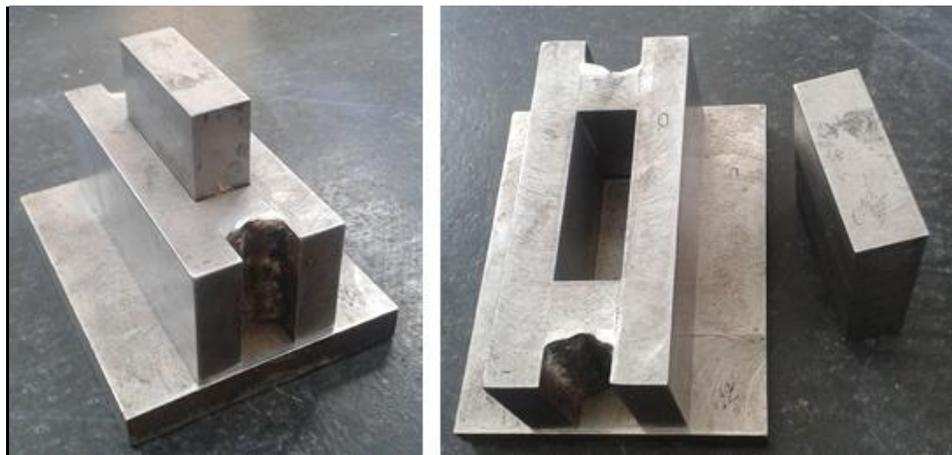
Com o intuito de avaliar a proporção de resíduo necessária para gerar um material poroso adequado, os corpos-de-prova tiveram sua composição preparada em termos do teor mássico de resíduo nas seguintes composições 1, 3, 6 e 12% em massa.

3.2.2 Conformação

Para as moldagens dos corpos de prova, as amostras do resíduo e da massa atomizada foram umidificadas 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 9). A carga de prensagem foi de 1,0 T (8,82MPa). Para a pesquisa foram conformados 10 corpos de provas para cada composição. Todos os corpos de prova foram dimensionados (Paquímetro Starrett 0,01mm) e pesados (BEL Engineering 0,0001g) para posterior análise de retração volumétrica após a sinterização.

Figura 9 - Molde para conformação dos corpos de prova.



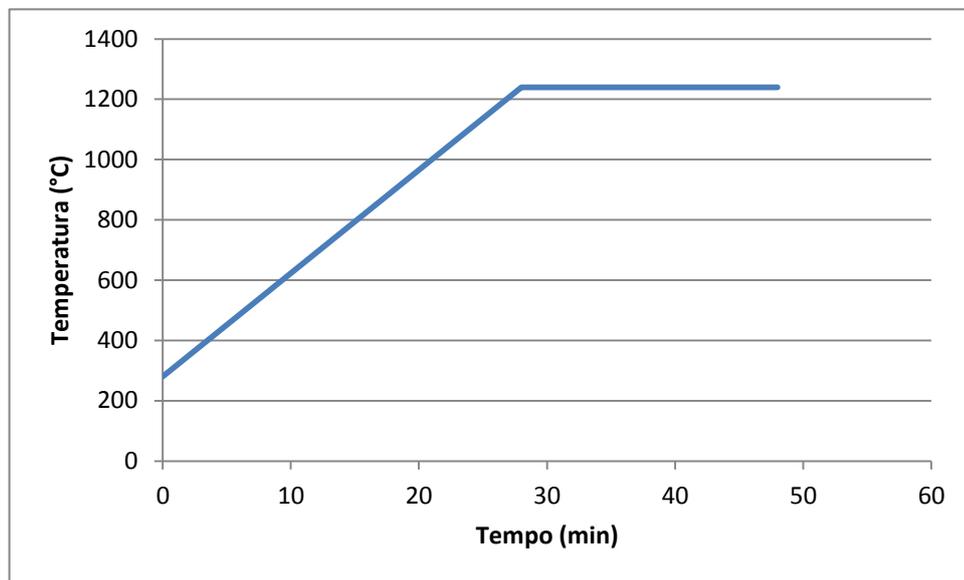
Fonte: Próprio autor.

3.2.3 Secagem e Sinterização

Na etapa de secagem e queima, visando a aproximação com o processo real, os corpos de prova foram inseridos à linha de produção de porcelanatos na CECRISA e passaram no próprio forno da empresa.

O tratamento térmico consiste em duas fases de aquecimento, sendo a primeira linear, com duração de 28 minutos, partindo de 280°C com incrementos gradativos até atingir a temperatura de 1240°C, nessa etapa ocorre a secagem do material. A fase seguinte é a zona de queima, quando o material cerâmico permanece no patamar de 1240°C por 20 minutos, totalizando 48 minutos de processo. A figura 10 representa a rampa de aquecimento utilizada.

Figura 10 - Rampa de aquecimento do forno.



Fonte: Próprio autor.

Após o resfriamento das amostras, feito por meio de sopradores de ar, elas foram pesadas (BEL Engineering 0,0001g), dimensionadas (Paquímetro Starrett 0,01mm) e numeradas (figura 11).

Figura 11 - Corpos de prova com 1%, 3%, 6% e 12% de RPP após sinterização.



Fonte: Próprio autor.

3.2.4 Caracterização após sinterização dos corpos-de-prova

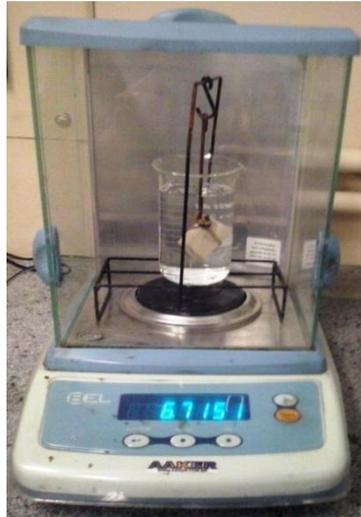
Após serem sinterizados, os corpos-de-prova passaram por ensaios físicos e mecânico.

3.2.4.1 Densidade Aparente

A densidade aparente é a relação da massa de uma amostra e o volume ocupado pela parte sólida e poros. Para as amostras de cerâmica produzidas calculou-se a densidade aparente utilizando o princípio de Arquimedes, por meio de um equipamento cujo método de medida se baseia no empuxo que a peça experimental quando imersa em água.

Para tal, utilizou-se um aparelho formado por uma balança digital com incremento de 0,0001g, um béquer contendo água e um elástico preso a uma haste, com o intuito de manter a peça submersa (figura12).

Figura 12 - Dispositivo para medir a densidade aparente das amostras.



Fonte: Próprio autor.

Então, mediu-se a massa das amostras individualmente e a massa quando elas estão submersas no béquer contendo água. Essa segunda medida foi feita descontando a massa do recipiente contendo água (tara).

Deste modo, pode-se utilizar a seguinte equação para calcular a densidade aparente:

$$\rho_{ap} = \left(\frac{M_s}{M_u - M_{ap}} \right) \times \rho_a$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente (g/cm³);

M_s = massa do corpo seco (g);

M_u = massa do corpo úmido (g);

M_{ap} = massa aparente do corpo (massa da amostra submersa) (g);

ρ_a = densidade da água ($\rho_a=1\text{g/cm}^3$).

3.2.4.2 Porosidade aparente

A porosidade aparente é definida como o percentual volumétrico da porosidade aberta existente na amostra. Sua medição é feita segundo a expressão:

$$Pa = \left(\frac{M_u - M_s}{M_u - M_{ap}} \right) \times 100$$

Pa= porosidade aparente (%);

Mu= massa da amostra úmida (g);

Ms= massa da amostra seca (g);

M_{ap}= massa aparente do corpo (massa da amostra submersa) (g).

3.2.4.3 Retração Volumétrica

Durante o processo de sinterização ocorrem dois fenômenos nos corpos de prova contendo resíduo. Um relacionado à presença da fase vítrea e fundentes no resíduo que favorecem a densificação em menores temperaturas e outro relacionado à queima do SiC com formação de CO₂, que favorece o aumento da porosidade do sistema ocorrendo uma expansão (MARQUES, 2007).

Durante a queima e secagem dos materiais cerâmicos, a retração ocorre em todas as dimensões do corpo de prova, portanto, existe o cálculo da expansão volumétrica que pode ser determinada segundo fórmula apresentada a seguir:

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

% RV = percentual de retração volumétrica (%);

V₁ = volume da peça antes da queima (cm³);

V₂ = volume da peça após a queima (cm³).

3.2.4.4 Absorção de água

A absorção de água é um parâmetro utilizado na classificação das placas cerâmicas e tem influência direta nas propriedades desses materiais. É utilizado para medir a porosidade aberta e avaliar a fundência do material. Em geral, quanto menor a absorção de água de uma peça, menor a sua porosidade, maior a sua retração no processo de sinterização, maior a sua densidade aparente após queima, maior a sua resistência mecânica à flexão e à carga de ruptura.

Segundo a ISO 10545-3:1995, a absorção de água é definida como o ganho em massa, expresso em porcentagem, que a peça apresenta quando permanece em água em ebulição (100°C) durante duas horas.

Todos os corpos de prova foram, então, numerados para identificação e deixados no banho de água fervente (Figura 13).

Ao término do período de duas horas, o aquecimento foi interrompido e as amostras ficaram resfriando por 4 horas. Em seguida, foram retiradas uma a uma, secadas superficialmente e pesadas novamente. O cálculo para os valores de absorção de água foi feito pela seguinte equação:

$$\%A.A = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100$$

% A.A = absorção de água (%);

M_u = massa das amostras úmidas (g);

M_s = massa das amostras secas (g).

Figura 13 - Amostras em água fervendo para medir o teor de absorção de água.



Fonte: Próprio autor.

3.2.4.5 Ensaio de flexão

De acordo com a NBR 13818:1997, para se efetuar o ensaio de flexão as amostras devem ter comprimento entre 16 e 48 mm e um número mínimo de 10 corpos de prova deve ser testado.

A máquina utilizada no ensaio de flexão foi a EMIC DL-30000 (Figura 14). O incremento de força foi de 50,00 N/s e a distância entre apoios foi de 44 mm.

Figura 14 - Máquina utilizada para ensaio de flexão.



Fonte: Próprio autor.

Para determinar o módulo de resistência à flexão, utiliza-se a seguinte equação:

$$MRF = \frac{3F \times L}{2b \times e^2}$$

Onde:

MRF= módulo de resistência à flexão (MPa);

F= força de ruptura (N);

L= distância entre as barras de apoio (mm);

b= largura do corpo-de-prova (mm);

e= mínima espessura do corpo-de-prova (mm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) e da Massa Atomizada

As composições químicas das matérias-primas foram determinadas através da fluorescência de raios X e são apresentadas na tabela 4:

Tabela 4 - Composição química do RPP e da massa atomizada.

Composto	RPP (%m/m)	Massa atomizada (%m/m)
SiO ₂	36,83	44,11
Al ₂ O ₃	6,43	10,43
ZrO ₂	39,2	22,95
CaO	3,05	3,58
K ₂ O	7,83	6,26
Fe ₂ O ₃	4,36	9,07
TiO ₂	2,3	3,6

Fonte: Próprio autor.

No RPP é observada uma grande quantidade de óxidos de cálcio e potássio demonstrando a boa vitrificação da amostra, além de sílica e alumina. A presença de dióxido de zircônia (ZrO₂) também deve ser ressaltada devido ao seu elevado teor. Esse óxido apresenta elevada resistência à propagação de trincas com tenacidade à fratura de 6,5 a 8MPa.m^{1/2}, além disso, é um excelente isolante térmico exibindo uma condutividade térmica baixa (2,5 a 3 W/m.K) (CERAMTEC, 2015).

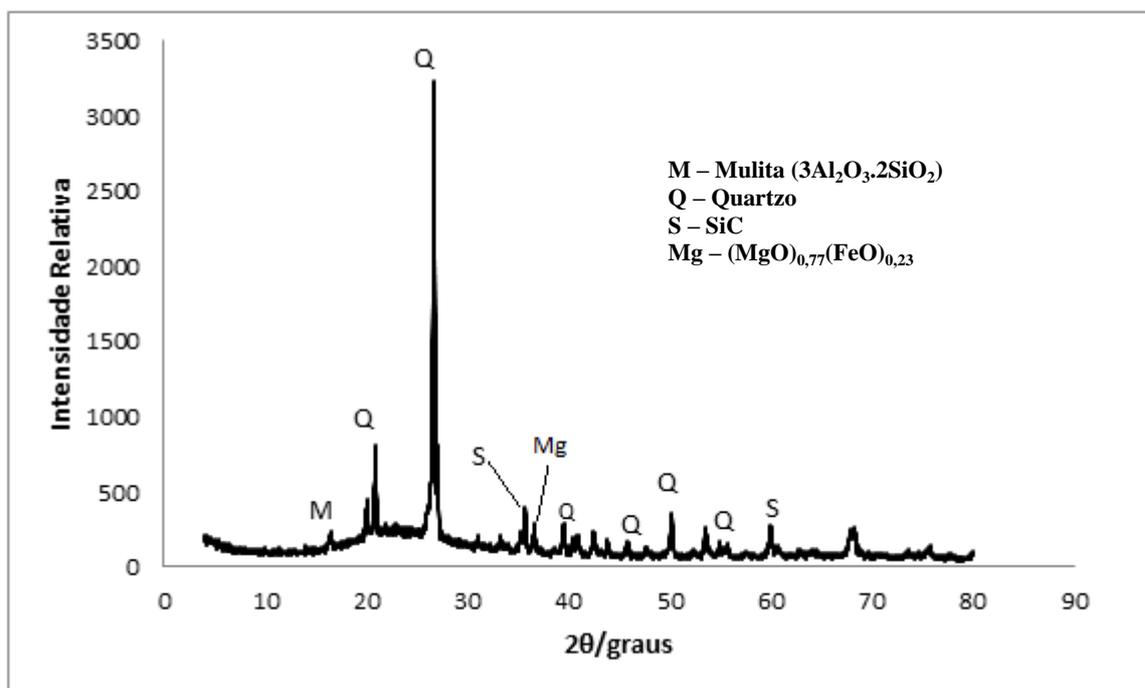
O difratograma (figura 15) do RPP destacou as fases cristalinas mulita, quartzo, carbeto de silício (SiC) e o periclásio (MgO). A fase mulita é proveniente do porcelanato, uma vez que sua formação é consequência direta da decomposição do caulim com o aumento de temperatura e também se cristaliza a partir do feldspato, sendo que estes dois minerais são matéria-prima constituinte do porcelanato. Os resultados encontrados estão de acordo com os trabalhos de Bergmann e Bragança (2004), Schuller, Bianchi e Aguiar (2008). Vale ressaltar que à medida que se aumenta a quantidade de mulita cristalizada, aumenta-se a tenacidade da peça (SCHULLER, BIANCHI, AGUIAR, 2008). Além disso, a formação de mulita é atribuída a ciclos rápidos de queima a partir de 1200°C (SANCHEZ et al, 2001). O quartzo

também é originado no porcelanato e sua presença auxilia na obtenção de placas celulares com melhor estabilidade dimensional (BERNARDIN et al, 2007; MARQUES, 2007).

Já o carbeta de silício e o periclásio (MgO) derivam da ferramenta polidora, devido à base magnésiana e às partículas abrasivas.

Observa-se também, a presença de fase amorfa (vítrea) evidenciada pelo espalhamento de fundo no difratograma entre os ângulos de 15° e 35°, conforme determinado por Sanchez et al (2001).

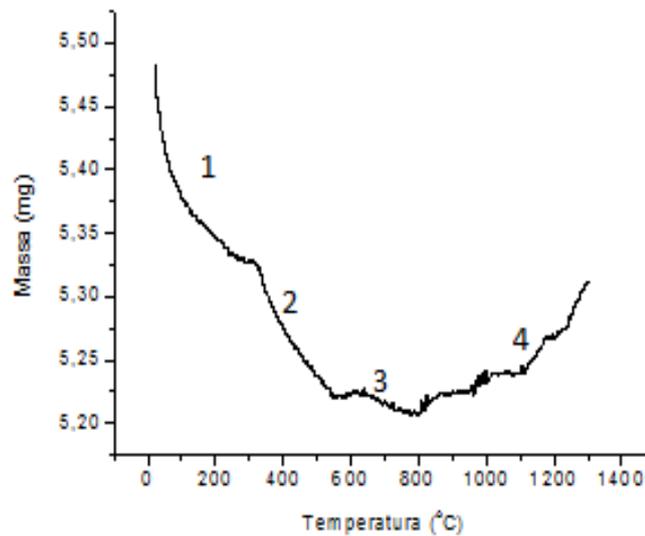
Figura 15 - Difratograma do resíduo de polimento de porcelanato (RPP).



Fonte: Próprio autor.

A análise térmica do resíduo (figura 16) apresenta as suas etapas de decomposição. As etapas iniciais, 1 a 3, são referentes à decomposição do RPP, enquanto a 4ª etapa indica a decomposição do carbeta de silício (SiC), formando óxido de silício (SiO₂) e dióxido de carbono (CO₂).

Figura 16 - Curva termogravimétrica do resíduo de polimento de porcelanato (RPP).



Fonte: Próprio autor.

As temperaturas de início e fim de cada etapa e a respectiva perda de massa estão dispostas na tabela 5.

Tabela 5 - Temperatura inicial e final e perda de massa na decomposição do RPP.

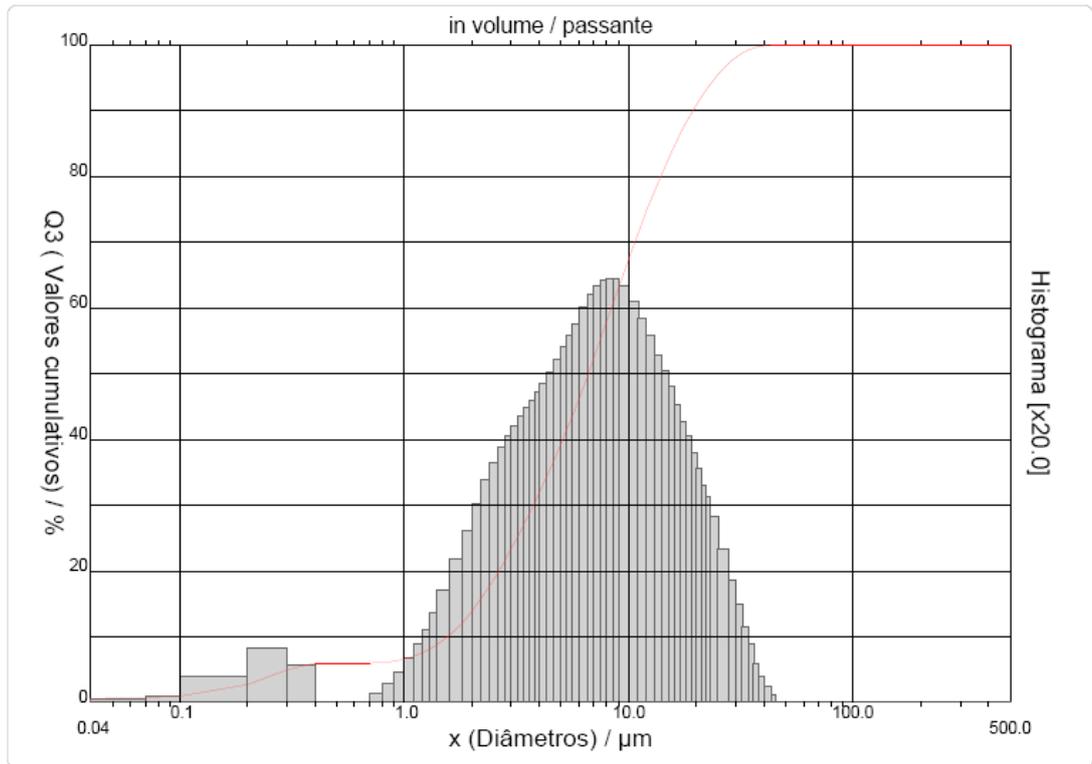
Etapa	Temperatura inicial (C°)	Temperatura final (C°)	Perda de massa (%m/m)
1	Temp. ambiente	300,3	2,74
2	300,3	600,0	1,92
3	600,0	800,9	0,28

Fonte: Próprio autor.

Ao final da etapa 4, referente a decomposição do carvão de silício, fica evidenciado um ganho de massa, devido ao oxigênio acrescentado durante a queima formando o óxido de silício.

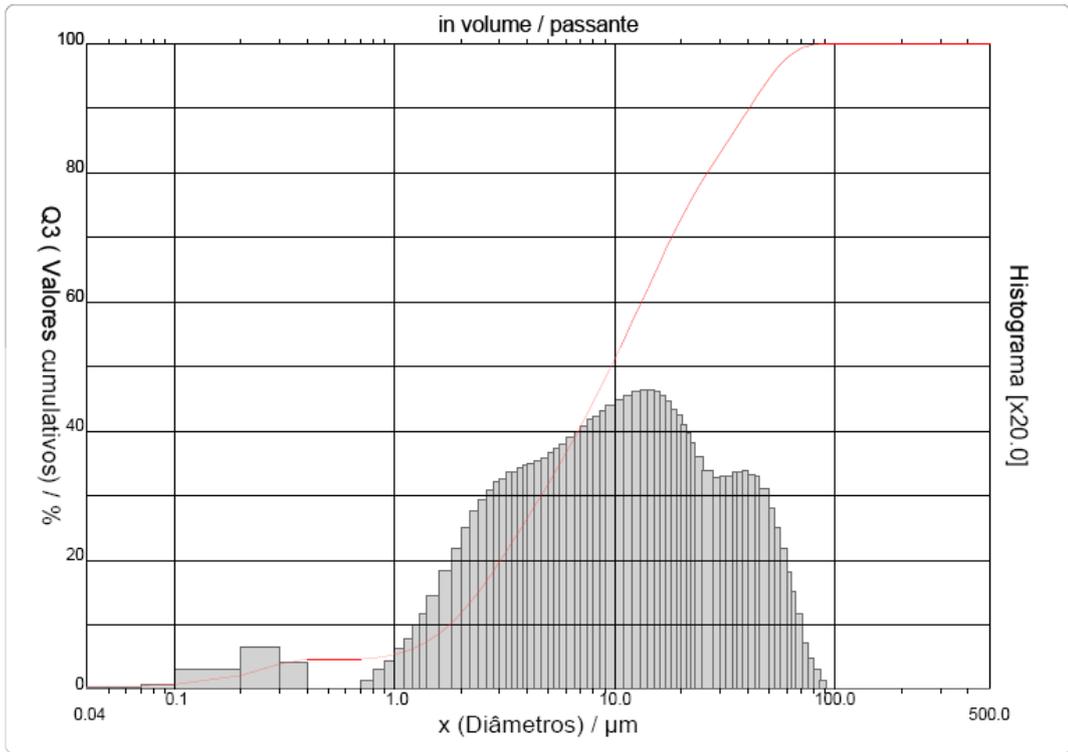
A análise granulométrica da massa atomizada (figura 17) expôs que 90% das partículas têm um diâmetro abaixo de 19,34 μm , sendo que o diâmetro médio é de 8,72 μm . Já a análise do RPP (figura 18) mostrou que 90% das partículas têm o diâmetro mantido abaixo de 40,65 μm e um diâmetro médio de 15,58 μm .

Devido a essa diferença de tamanho de partícula entre o RPP e a massa atomizada, foi feita a cominuição do RPP em moinho de bolas. Após esse processo, uma nova análise da granulometria foi feita e mostrou que o RPP apresenta 90% das partículas com diâmetro menor que 39,03 μm e atingiu um diâmetro médio de partícula de 14,66 μm (figura 19).

Figura 17 - Distribuição granulométrica da amostra de massa atomizada.

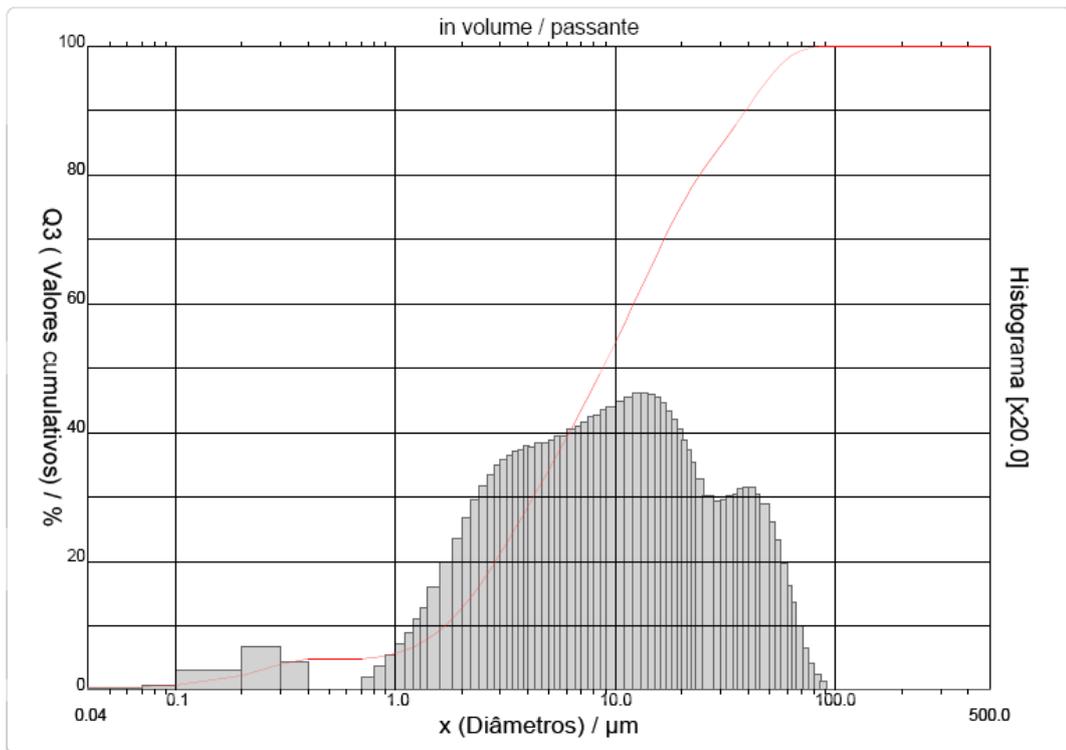
Fonte: Próprio autor.

Figura 18 - Distribuição granulométrica da amostra de resíduo de polimento de porcelanato (RPP).



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Distribuição granulométrica da amostra de resíduo de polimento de porcelanato (RPP) após passar pelo moinho de bolas.



Fonte: Próprio autor.

4.1.1.1 Densidade Absoluta e Retração Volumétrica

Os corpos-de-prova, logo após serem sinterizados, tiveram suas dimensões e massa medidas novamente, então, a densidade absoluta e a retração volumétrica foram calculadas e a média desses valores é apresentada na tabela 6.

Tabela 6 - Densidade absoluta e retração volumétrica dos corpos cerâmicos sinterizados.

Amostra	Densidade Absoluta (g/cm³)	Desvio	Retração Volumétrica (%)	Desvio
1% RPP	2,27	0,03	33,97	0,89
3% RPP	2,29	0,01	34,59	0,40
6% RPP	2,27	0,01	34,57	0,40
12% RPP	2,23	0,02	34,66	0,77

Fonte: Próprio autor.

A variação da densidade absoluta não foi muito expressiva nas amostras de 1%, 3% e 6% de RPP, sendo que, apenas a formulação de 12% de RPP mostrou uma densidade um pouco menor, possivelmente devido à expansão gerada pela formação de gases durante a decomposição do SiC. Esses valores se mostram inferiores ao apresentado por uma amostra de porcelanato coletada na Cecrisa, cuja densidade alcançou 2,39 g/cm³. A análise de retração volumétrica exibiu valores uniformes para todos os corpos de prova testados.

4.1.1.2 Densidade Aparente, Absorção de Água e Porosidade Aparente

Os resultados dos ensaios de densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente são exibidos na tabela 7.

A densidade aparente atingiu uma média de 2,335 g/cm³, sem variação significativa ao se aumentar a proporção de RPP.

A absorção de água se mostrou menor na amostra com 12% de RPP chegando a 0,51%, se aproximando do valor que caracteriza o material cerâmico do tipo porcelanato (<0,5% de absorção). Entretanto, todos os outros teores de RPP apresentaram porcentagem de absorção de água acima desse padrão, porém, na faixa que classifica o material como grês (classe B1b).

A amostra com 12% de RPP exibiu a menor porosidade aparente e com 1% a porosidade mais elevada dentre as quatro formulações, porém, esta última gerou um maior desvio entre os seus resultados.

Ao se comparar os três resultados juntos, observa-se que a amostra com 12% de RPP exhibe as menores porcentagens de absorção de água e porosidade aparente, além de densidade aparente compatível às demais amostras.

Tabela 7 - Densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente das amostras.

Amostra	Densidade Aparente (g/cm ³)	Desvio	Absorção de água (%)	Desvio	Porosidade Aparente (%)	Desvio
1% RPP	2,33	0,02	0,80	0,21	1,86	0,47
3% RPP	2,34	0,01	0,66	0,08	1,55	0,19
6% RPP	2,34	0,01	0,73	0,08	1,70	0,19
12% RPP	2,33	0,01	0,51	0,08	1,19	0,17

Fonte: Próprio autor.

4.1.1.3 Ensaio de Flexão

Na determinação da resistência à flexão, todos os corpos de prova foram ensaiados e os resultados de força na ruptura e resistência a flexão estão relacionados na tabela 8. Alguns corpos de prova apresentaram microtrincas, principalmente nas amostras com 12% de RPP, e, portanto, foram desconsiderados no cálculo das médias.

Tabela 8 - Força na ruptura e resistência a flexão.

Amostra	Força na ruptura (N)				Resistência a Flexão (MPa)			
	Média	Desvio	Mínimo	Máximo	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
1% RPP	2024,03	202,47	1833,79	2413,09	51,03	5,11	45,91	60,84
3% RPP	2081,22	380,01	1608,05	2617,07	52,30	9,55	40,41	65,77
6% RPP	1772,42	205,57	1645,45	1888,86	43,50	1,96	40,39	46,36
12% RPP	1976,12	206,51	1826,99	2212,00	46,91	4,90	43,37	52,50

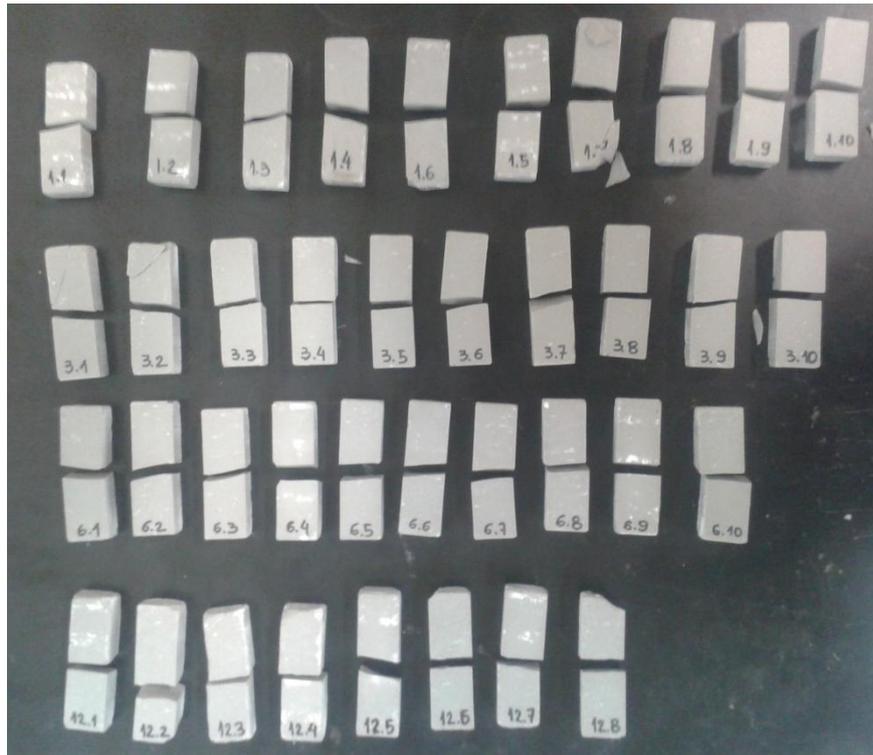
Fonte: Próprio autor.

Dentre os corpos de prova com diferentes porcentagens de RPP, a força média máxima atingida no momento da ruptura foi de 2081,22 N com uma respectiva resistência a flexão de 52,30 MPa, na amostra com 3% de RPP. Já a amostra com 12% de RPP, contrariando o esperado, não apresentou a menor resistência, mostrando uma resistência média na flexão de 46,91 MPa. Os menores valores foram mostrados pelos corpos de prova com 6% de RPP,

porém, todas as amostras, independentemente do teor de RPP adicionado, exibem características técnicas que superam as especificações para o porcelanato, que é de resistência a flexão ≥ 35 MPa e carga de ruptura ≥ 1300 N.

A figura 20 mostra os corpos de prova fraturados após o ensaio de flexão.

Figura 20 - Amostras após ensaio de flexão.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Corpos de prova com 1%, 3%, 6% e 12% de resíduo de polimento de porcelanato (RPP) foram conformados, utilizando uma pressão de 8,82 MPa, e sinterizados à temperatura de 1240°C.

No ensaio de flexão, a amostra com 3% de RPP apresentou a maior carga na ruptura, 2081,22 N, com respectiva resistência à flexão de 52,30 MPa. Esta mesma amostra exibiu uma porcentagem de absorção de água de 0,66%, sendo assim classificada como grês (classe BIb). Portanto, a incorporação de 3% de RPP à mistura é viável para a fabricação de cerâmicas de revestimento para pisos e paredes.

A amostra com 12% de RPP mostrou uma densidade absoluta de 2,23 g/cm³, absorção de água de 0,51% e atingiu uma resistência à flexão de 46,91 MPa. Estes resultados indicam a possibilidade de reaproveitamento do RPP em teores a partir de 12% para a produção de cerâmicas celulares.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Quanto a trabalhos futuros, sugere-se:

- Estudo da influência da pressão de compactação na moldagem dos corpos de prova.
- Estudo da variação do teor de umidade na moldagem dos corpos de prova, visando melhorar a qualidade das amostras produzidas.
- Análise das fases e da microestrutura do material após sinterização, por meio de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X e microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Aumentar o teor de SiC nas amostras para induzir uma maior expansão, por meio da adição de SiC puro ou pó resultante da trituração das ferramentas polidoras desgastadas.
- Estudo da influência do ZrO_2 nas propriedades do material cerâmico produzido, considerando-se que o RPP utilizado em pesquisas anteriores não apresentou elevado teor desse óxido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial/ parte I: o preenchimento das cavidades do molde. **Cerâmica Industrial**. Castellón, v. 5, n. 5, p. 23-28, 2000.

ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial/ parte II: a compactação. **Cerâmica Industrial**. Castellón, v. 5, n. 6, p. 14-20, 2000.

ALVES, H. J. et al. Polimento em peças de porcelanato: avaliação da porosidade final e da resistência ao manchamento. **Cerâmica Industrial**. São Carlos, v. 15, n. 2, p. 23-29, 2010.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES – ANFACER. **O mercado brasileiro**: a indústria brasileira de cerâmica para revestimento. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/site/default.aspx?idConteudo=159&n=Brasil>>. Acesso em: 20 de fev. de 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES – ANFACER. **O mercado mundial**. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/site/default.aspx?idConteudo=160&n=Mundo>>. Acesso em: 20 de fev. de 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES – ANFACER. **Perfil da produção**. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/site/default.aspx?idConteudo=162&n=Produ%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 18 de nov. de 2014.

BENTO, A. C. **Síntese e caracterização de espumas vítreas contendo TiO₂ e utilizando hidróxido de sódio como agente espumante**. 2012. 46 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2012.

BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P. Microestrutura e propriedades de porcelanas. **Cerâmica** [online], São Paulo, v.50, n.316, p. 291-299, 2004.

BERNARDIN, A. M. et al. Cerâmicas celulares obtidas a partir de resíduos de polimento. **Cerâmica Industrial**. Florianópolis, v. 12, n. 1/2, p. 31-35, 2007.

CAMPOS, L. E. G. **Talco e pirofilita**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/talco.pdf>>. Acesso em: 20 de fev. de 2013.

CARGNIN, M. et al. Determinação de parâmetros cinéticos da sinterização de revestimentos cerâmicos de monoqueima do tipo BIIa. **Cerâmica**, Florianópolis, v. 57, p. 461-466, 2011.

CERAMTEC. **Cerâmica de óxido de zircônio**. Disponível em: <<http://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/zirconio-oxido/>>. Acesso em: 24 jan. 2015.

GONZAGA, A. A. **Produção de grés porcelanato**. 2009. 110 f. Monografia (Engenheiro Químico) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2009.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN D. R. **Introduction to ceramics**. 2^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1975. 1032 p.

LOPES, L. D. **Cinética de oxidação do SiC e a interface SiO₂/SiC**. 2012. 55 f. Monografia (Bacharel em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LUCKMANN, G. **Obtenção de cerâmica celular por monoqueima rápida a partir de resíduos de polimento**. 2007. 46 f. Monografia (Tecnólogo em Cerâmica) – Centro Universitário de Brusque, Tijucas, 2007.

LUZ, A. B.; BRAZ, E. **Rochas e minerais industriais: quartzo**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000. 20 p.

LUZ, A. B.; LINS, F. F. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. 867 p.

MARQUES, L. N. et al. Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 34-42, 2007.

PUREZA J. C. C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RASHED, A. H. **Properties and characteristics of silicon carbide**. Decatur: Poco Graphite Inc., 2002. 22 p.

RIBEIRO, M. J.; VENTURA, J. M.; LABRINCHA, J. A. A atomização como processo de obtenção de pós para a indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**. Aveiro, v. 6, n. 5, p. 34-40, 2001.

ROSSO, J.; CUNHA, E. S.; ROJAS-RAMÍREZ, R. A. Características técnicas e polimento de porcelanatos. **Cerâmica Industrial**. Cerâmica Gyotoku, v. 10, n. 4, p. 11-14, 2005.

ROVERI, C.; MELCHIADES, F. B.; BOSCHI, A. O. Estudo da deformação piropoplástica em revestimentos cerâmicos gresificados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 44., 2000. São Pedro. **Anais...** São Pedro, 2000.

SANCHEZ, E. et al. Efeito da composição das matérias-primas empregadas na fabricação de grés porcelanato sobre as fases formadas durante a queima e as propriedades do produto final. **Cerâmica Industrial**, Castellón, v. 6, n. 5, p. 15-22, 2001.

SCHEFFLER, M.; COLOMBO, P. **Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications**. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co, 2005. 670 p.

SCHULLER, D.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas. **Cerâmica** [on line]. São Paulo, v.54, n.332, p. 435-442, 2008.

SILVA, A. G. P. **Porosidade e densidade de materiais cerâmicos**. Disponível em: <<http://aulas.e-agps.info/ceramicos1/CAPITULO%20VII%20VF.pdf>>. Acesso em: 16 de out. de 2014.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento de porcelanato**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

STEINER, L. R. **Efeito do rejeito de polimento de porcelanato na fabricação de blocos de concreto de cimento *portland***. 2011. 43 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.

WIGGERS, W. S.; SANTOS, R. A.; HOTZA, D. Evolução da superfície do porcelanato ao longo do processo de polimento. **Cerâmica Industrial**. Florianópolis, v. 12, n. ½, p. 27-30, 2007.