



AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE PORCELANATO PARA A OBTENÇÃO DE ECOMATERIAIS

Bruna Beck Simões

Projeto Final de Curso

Orientadores

Profa. Valéria Castro de Almeida, D. Sc.

Everton Grippa Marques, M.Sc.

Fevereiro de 2018

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NO
REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE PORCELANATO PARA A
OBTENÇÃO DE ECOMATERIAIS**

Bruna Beck Simões

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Química Industrial.

Aprovado por:

Armando Lucas Cherem da Cunha, D.Sc.

Felipe Souto da Silva, M.Sc.

Andrea Parente, M.Sc.

Orientado por:

Valéria Castro de Almeida, D.Sc.

Everton Grippa Marques, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2018

Simões, Bruna Beck.

Avaliação da influência da granulometria no reaproveitamento de resíduos de porcelanato para a obtenção de ecomateriais/ Bruna Beck Simões. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2018.

xi, 53 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2018.

Orientadores: Valéria Castro de Almeida e Everton Grippa Marques.

1. Porcelanato. 2. Reciclagem. 3. Material Cerâmico. 4. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Valéria Castro de Almeida. Everton Grippa I. Título.

*Para meus pais,
Por todo esforço e dedicação para alcançar esse objetivo.*

“In Omnia Paratus”

Logan Huntzberger

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Elizabeth e Leonardo, meu irmão Thiago e minha madrinha Valéria, que estiveram sempre presentes me apoiando e me dando forças para que eu alcançasse o diploma.

Agradeço especialmente a Professora Valéria Castro e ao Everton Gripa pela orientação não somente na produção deste trabalho, mas também por todos os conselhos e oportunidades durante essa difícil etapa que é o final da graduação.

Agradeço a todos do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química, técnicos e professores que contribuíram de forma direta e indireta neste trabalho.

Agradeço também aos meus amigos e colegas da Escola de Química que sempre torceram por mim e me apoiaram no decorrer da graduação.

Agradeço ao Yago por sempre ter paciência e oferecido apoio moral durante o desenvolvimento do trabalho.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Química Industrial.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE PORCELANATO PARA A OBTENÇÃO DE ECOMATERIAIS

Bruna Beck Simões

Fevereiro, 2018

Orientadores: Profa. Valéria Castro de Almeida, D.Sc.
Everton Grippa Marques, M.Sc.

Dos produtos cerâmicos comercializados, o porcelanato se destaca como um material de revestimento que apresenta as melhores características técnicas e estéticas. Mesmo com uma ótima evolução no processamento de cerâmica, ainda existe uma grande quantidade de resíduo produzido, que sem uma técnica de disposição final se torna um passivo ambiental. A eliminação inadequada de tais resíduos provoca a degradação do meio ambiente e a contaminação dos mananciais de água e do solo, gerando um alto custo para a sociedade na sua remoção e tratamento.

Uma alternativa a esse obstáculo seria minimizar a geração de resíduos destinados aos locais de despejo destes materiais. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da granulometria nas características físico-mecânicas dos corpos cerâmicos feitos a partir da reutilização de resíduos de porcelanato de diferentes tamanhos, queimados a 1200 °C. Os corpos de prova foram produzidos a partir de porcelanato polido e porcelanato esmaltado e submetidos a testes de retração linear, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão.

A influência da granulometria foi observada e apresentou comportamentos diferenciados para as duas matérias primas utilizadas. Na produção do material à base do resíduo de porcelanato polido, a granulometria é um parâmetro que deve ser levado em consideração, visto que só é possível realizar a conformação por prensagem utilizando-se o tamanhos de partículas menores ou igual a 200 mesh. Já no material à base de porcelanato esmaltado, a granulometria não se manifesta de modo incisivo. Os dados obtidos demonstraram a viabilidade de produzir um material de alta qualidade sem a necessidade de se trabalhar na faixa granulométrica abaixo de 115 mesh, diminuindo assim o custo de moagem.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
2.	Objetivo	4
2.1.	Objetivo geral	4
2.2.	Objetivos Específicos	4
3.	Revisão Bibliográfica	5
3.1.	A Indústria de Revestimento Cerâmico	5
3.1.1.	Panorama Mercadológico	5
3.2.	Grês Porcelanato	7
3.2.1.	Composição	8
3.2.2.	Processamento	9
3.2.3.	Parâmetros para Classificação dos Revestimentos Cerâmicos	12
3.3.	Resíduos Industriais e o Reaproveitamento	14
3.3.1.	Contexto Ambiental	14
3.3.2.	Resíduos do Processamento de Porcelanato	16
3.3.3.	Reciclagem e Reaproveitamento na Cerâmica	19
4.	Materiais e métodos	21
4.1.	Materiais utilizados	21
4.2.	Metodologia	21
4.3.	Tratamento das matérias-primas	23
4.3.1.	Cominuição e Homogeneização das Matérias-Primas	23
4.3.2.	Análise Granulométrica das Matérias-Primas	24
4.4.	Caracterização Elementar das Matérias-Primas	25
4.4.1.	Caracterização Mineralógica	25
4.4.1.1.	Análise por Fluorescência de Raios – X (FRX)	25
4.4.1.2.	Análise por Difração de Raios-X (DRX)	26
4.4.1.3.	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	26
4.4.2.	Caracterização Química	25
4.5.	Preparo dos Corpos de Prova e Ensaio de Queima	26
4.6.1.	Avaliação da retração linear (RL)	28
4.6.2.	Ensaio de absorção de água (AA)	29
4.6.3.	Ensaio de porosidade aparente (PA)	29
4.6.4.	Densidade (D)	30
4.6.5.	Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão (TRF)	30
5.	Resultados e discussão	32
5.1.	Caracterização das Matérias-Primas	32

5.1.1. Análise granulométrica	32
5.1.2. Caracterização mineralógica.....	34
5.1.2.1. Análise por fluorescência de Raios-X (FRX).....	34
5.1.2.2. Análise por Difração de Raios –X (DRX)	34
5.1.2.3. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	35
5.2. Avaliação dos corpos de prova após a queima.....	36
5.2.1. Porcelanato Polido.....	36
5.2.2. Porcelanato Esmaltado	37
5.3. Caracterização física e mecânica dos corpos de prova cerâmicos	38
5.3.1. Propriedades física e mecânica dos corpos de prova preparados com resíduo de porcelanato polido.....	38
5.3.1.1. Retração Linear (RL).....	39
5.3.1.2. Absorção de Água	40
5.3.1.3. Porosidade Aparente (PA)	41
5.3.1.4. Densidade (D)	41
5.3.1.5. Tensão de Ruptura à flexão (TRF)	42
5.3.2. Propriedades física e mecânica dos corpos de prova preparados com resíduo de porcelanato esmaltado.....	43
5.3.2.1. Retração Linear (RL).....	43
5.3.2.2. Absorção de Água (AA)	44
5.3.2.3. Porosidade Aparente (PA)	45
5.3.2.4. Densidade (D)	46
5.3.2.5. Tensão de Ruptura a flexão (TRF)	46
5.4. Caracterização mineralógica das massas cerâmicas após a queima	47
5.4.1. Análise por Difração de Raios – X (DRX)	47
5.4.1.1. Corpos produzidos a partir de porcelanato polido.....	47
5.4.1.2. Corpos produzidos a partir de porcelanato esmaltado	48
6. Conclusão.....	50
Referências Bibliográficas.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Composição dos resíduos obtidos nos processos de produção de revestimento.....	2
Figura 3.1 – Panorama do Mercado Interno de Revestimentos Cerâmicos.....	6
Figura 3.2 – Etapas da Sinterização	11
Figura 3.3 – Fluxograma do Processo de Produção de Revestimentos Cerâmicos	17
Figura 4.1 – Placas de Porcelanato Esmaltado (à esquerda) e Porcelanato Polido (à direita).....	21
Figura 4.2 – Fluxograma da metodologia adotada.....	22
Figura 4.3 – Britador de rolos (à esquerda) e pulverizador de disco (à direita).....	23
Figura 4.4 – Representação da metodologia de quarteamento por pilha cônica	24
Figura 4.5 – Ilustração do quarteamento realizado.....	24
Figura 4.6 – Agitador com série de peneiras.....	25
Figura 4.7 – Matriz retangular para compactação da massa cerâmica.....	27
Figura 4.8 – Prensa de pressão uniaxial.....	27
Figura 4.9 – Modelo para aferição das dimensões.....	28
Figura 4.10 – Balança hidrostática.....	30
Figura 4.11 – Equipamento para ensaio de tensão de ruptura à flexão.....	31
Figura 5.1 – Distribuição granulométrica do porcelanato polido.....	33
Figura 5.2 – Distribuição granulométrica do porcelanato esmaltado.....	33
Figura 5.3 – Difratoograma do porcelanato polido e do porcelanato esmaltado in natura.....	35
Figura 5.4 – Fotomicrografia do porcelanato polido cominuído in natura.....	35
Figura 5.5 – Fotomicrografia do porcelanato esmaltado cominuído in natura.....	36
Figura 5.6 – Corpos de prova de porcelanato polido de 115# (esquerda) a 270# (direita).....	37
Figura 5.7 – Corpos de prova de porcelanato esmaltado de 115# (esquerda) a 270# (direita).....	38
Figura 5.8 – Retração Linear das peças produzidas com porcelanato polido.....	40
Figura 5.9 – Absorção de água das peças produzidas com porcelanato polido.....	40
Figura 5.10 – Porosidade Aparente das peças produzidas com porcelanato polido.....	41
Figura 5.11 – Densidade das peças produzidas com porcelanato polido.....	42
Figura 5.12 – TRF das peças produzidas com porcelanato polido.....	42
Figura 5.13 – Retração Linear das peças produzidas com porcelanato esmaltado.....	44
Figura 5.14 – Absorção de água das peças produzidas com porcelanato esmaltado.....	45
Figura 5.15 – Porosidade Aparente das peças produzidas com porcelanato esmaltado.....	45
Figura 5.16 – Densidade das peças produzidas com porcelanato esmaltado.....	46
Figura 5.17 – TRF das peças produzidas com porcelanato esmaltado.....	46
Figura 5.18 – Difratoograma do porcelanato polido das frações retidas em 170# e 270#.....	47
Figura 5.19 – Difratoograma do porcelanato polido calcinado, frações retidas em 170# e 270#.....	48
Figura 5.20 – Difratoograma do porcelanato esmaltado das frações retidas em 170# e 270#.....	48
Figura 5.21 – Difratoograma do porcelanato esmaltado calcinado, frações retidas em 170# e 270#.....	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Codificação dos grupos de absorção de água	13
Tabela 3.2 – Classificação dos Revestimentos Cerâmicos	13
Tabela 3.3 – Propriedades de um porcelanato	14
Tabela 5.1 – Distribuição granulométrica das matérias-primas.....	32
Tabela 5.2 – Composição química elementar das sobras de porcelanato polido e esmaltado.	34
Tabela 5.3 – Valores médios dos corpos de prova de porcelanato polido.....	39
Tabela 5.4 – Valores médios dos corpos de prova de porcelanato esmaltado.....	43

ÍNDICE DE ABREVIATÓES

AA	→	Absorção de Água;
b	→	Distância entre os apoios do corpo de prova;
C_I	→	Comprimento da peça, antes da queima;
C_F	→	Comprimento da peça, depois da queima;
D	→	Densidade;
DRX	→	Difração por Raios – X;
E	→	Espessura do corpo de prova;
FRX	→	Fluorescência de Raios – X;
L	→	Largura do corpo de prova;
MEV	→	Microscopia Eletrônica de Varredura;
ONG	→	Organização não governamental;
PA	→	Porosidade Aparente;
P_U	→	Peso do corpo de prova úmido;
P_S	→	Peso do corpo de prova seco;
P_I	→	Peso do corpo de prova imerso;
P	→	Carga atingida no momento da ruptura;
RL	→	Retração Linear;
TRF	→	Tensão de Ruptura à Flexão;
U.A	→	Unidade Arbitrária.

1. Introdução

Os resíduos industriais e urbanos vêm se tornando um dos mais sérios problemas que a sociedade moderna enfrenta. Sua deposição de forma inadequada provoca a degradação do meio ambiente e a contaminação dos mananciais de água e do solo (MENEZES et al., 2002). A escassez de áreas de deposição de resíduos causada pela ocupação e valorização de áreas urbanas, os altos custos sociais no gerenciamento de resíduos e a contaminação ambiental são alguns dos obstáculos na administração de resíduos.

Um recurso para a solução dos problemas explicitados é a reciclagem dos resíduos, essencial para o desenvolvimento sustentável de qualquer país, uma vez que a geração desses é inevitável. As vantagens potenciais da reciclagem para a sociedade são: a preservação dos recursos naturais, a economia de energia, a geração de empregos, a redução da poluição, redução do número de aterros, entre outros.

Atualmente, o setor industrial da cerâmica apresenta uma grande variedade de produtos e processos produtivos, podendo ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, refratários, louças e porcelanas, cerâmica artística, cerâmica técnica, entre outros. (ANFACER, 2017)

A indústria cerâmica é uma das que mais se destacam na reciclagem de resíduos industriais e urbanos, em virtude de possuir elevado volume de produção que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos. O que, aliado às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e às particularidades do processamento cerâmico, faz dessa indústria uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos (MENEZES et al., 2002).

O porcelanato se destaca dos demais tipos de revestimentos cerâmicos devido ao seu processamento diferenciado, que envolve a queima em ciclos rápidos a temperaturas em torno de 1200 a 1250 °C. Em adição, há um alto nível de qualidade de matérias primas, elevado grau de moagem e alta força de compactação. Conjunto de características que resulta em um produto com baixa porosidade e elevada performance técnica (MENEGAZZO, 2000).

MONFORT (1996) afirma que os resíduos produzidos nos processos de fabricação de revestimentos representam aproximadamente 6% em peso das matérias-primas utilizadas no processo. Não obstante, observando a Figura 1.1, apenas 10% destes resíduos, as lamas do tratamento de água, podem ser tóxicos e perigosos. O restante são resíduos inertes.



Figura 1.1 - Composição em peso dos resíduos obtidos nos processos de produção de revestimento (Fonte: MONFORT, 1996)

Atualmente, grande parte dos resíduos provenientes do processamento cerâmico já são recirculados e reincorporados ao ciclo produtivo. Porém, os resíduos gerados após a queima, identificados como “chamote”, não podem ser retroalimentados diretamente no processo sem que haja um tratamento prévio. A dificuldade de incorporação decorre do fato deste material já ter sofrido transformação e apresentar-se sinterizado, conseqüentemente apresenta considerável dureza. Ademais, somente quantidades pequenas podem ser adicionadas para não haver perda na qualidade da peça produzida (CASAGRANDE, 2008).

O aumento populacional e a expansão das cidades refletem-se no crescimento intensificado do setor de construção civil. A questão dos Resíduos da Construção Civil (RCC) tem sido amplamente discutida no Brasil pela alta taxa de geração, representando de 50% a 70% dos resíduos sólidos urbanos coletados (CARDOSO, 2014).

A crescente geração de resíduos sólidos resultantes de construções civis, demolições e reformas vem exigindo soluções cada vez mais diversificadas, de forma a reduzir o descarte de materiais encaminhados para os aterros. Neste contexto, enquadram-se os resíduos dos produtos de revestimentos cerâmicos, como pisos, azulejos, ladrilhos e pastilhas (CARDOSO, 2014).

A reciclagem é um processo produtivo que de forma geral, contém matérias primas, operações unitárias e produto final. Não somente da natureza química e dos comportamentos físicos das matérias primas que os produtos dependem para atender suas características finais. Dependem também, das etapas desse processo produtivo e dos controles de suas variáveis, avaliando as interações entre os aspectos tecnológicos de origem físico-química e os parâmetros de processamento nas várias etapas do processo (OLIVEIRA, 2000). Entre os diversos parâmetros de um processo industrial, esse trabalho busca avaliar a influência da granulometria na produção de novos materiais cerâmicos.

A granulometria das matérias-primas é de grande importância na maioria dos processos industriais e está diretamente relacionada com o comportamento dos materiais nas diferentes operações unitárias. De acordo com Prado (2008), a estabilidade dimensional está relacionada com a distribuição granulométrica à medida que o formato, tamanho, rugosidade e homogeneização do pó são determinantes para o preenchimento do molde de prensagem.

O foco na busca de técnicas vantajosas para reciclagem de peças cerâmicas não é justificado somente pelo volume significativo gerado durante a produção na indústria, mas também deve ser considerado todo o resíduo proveniente da construção civil. Esta, também é responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos, seja pela perda e quebra de material durante a construção ou pelos processos de demolição.

O aproveitamento de resíduos provenientes tanto da produção fabril quanto da construção civil, motivou o desenvolvimento deste trabalho. A proposta visa avaliar a possibilidade de se obter um novo produto cerâmico com características próprias, semelhante aos que são confeccionados pelas indústrias cerâmicas que trabalham matérias primas naturais.

2. Objetivo

2.1. Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da granulometria nas características físicas e mecânicas de novos materiais cerâmicos produzidos a partir do reaproveitamento dos resíduos de porcelanato.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar as propriedades químicas e minerais dos resíduos de porcelanato;
- Avaliar através de ensaios físico-mecânicos as propriedades dos corpos cerâmicos obtidos com os resíduos de porcelanato.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. A Indústria de Revestimento Cerâmico

A cerâmica, que é praticamente tão antiga quanto à descoberta do fogo, mesmo utilizando os antigos métodos artesanais, pode produzir artigos de excelente qualidade. Nos últimos anos, acompanhando a evolução industrial, a indústria cerâmica adotou a produção em massa, garantida pela indústria de equipamentos, e a introdução de técnicas de gestão, incluindo o controle de matérias-primas, dos processos e dos produtos fabricados (ANFACER, 2017).

O segmento de revestimentos cerâmicos integra o ramo de produtos de minerais não-metálicos da indústria de transformação, fazendo parte, juntamente com outras indústrias como as de cerâmica vermelha, sanitários, indústria cimenteira e vidreira, do conjunto de cadeias produtivas que compõem o Complexo da Construção Civil. Engloba a produção de materiais no formato de placas usados na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas, em ambientes internos e externos, recebendo designações comerciais como pastilha, porcelanato, grês, lajota, piso, entre outros (JUNIOR, 2010).

3.1.1. Panorama Mercadológico

De acordo com a associação nacional dos fabricantes de cerâmica para revestimentos (ANFACER, 2017), a abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais fizeram com que as indústrias brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada.

A indústria cerâmica tem um papel importante para a economia do país. O Brasil é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a segunda posição em produção e consumo. Como observado na Figura 3.1, em 2016, foram produzidos 792 milhões de metros quadrados para uma capacidade instalada de 1.048 milhões de metros quadrados. As vendas totais atingiram 800,3 milhões de metros quadrados, dos quais 706 milhões de metros quadrados foram vendidos no mercado interno e 94,3 milhões de metros quadrados exportados (ANFACER, 2017).

O setor brasileiro de revestimentos cerâmicos é constituído por 92 empresas, concentradas nas regiões Sudeste e Sul, e com expansão para o Nordeste do país. Segmento produtivo de capital essencialmente nacional, é também um grande gerador de empregos, com cerca de 27.000 postos de trabalho diretos e em torno de 200.000 indiretos ao longo de sua cadeia produtiva (ANFACER, 2017).

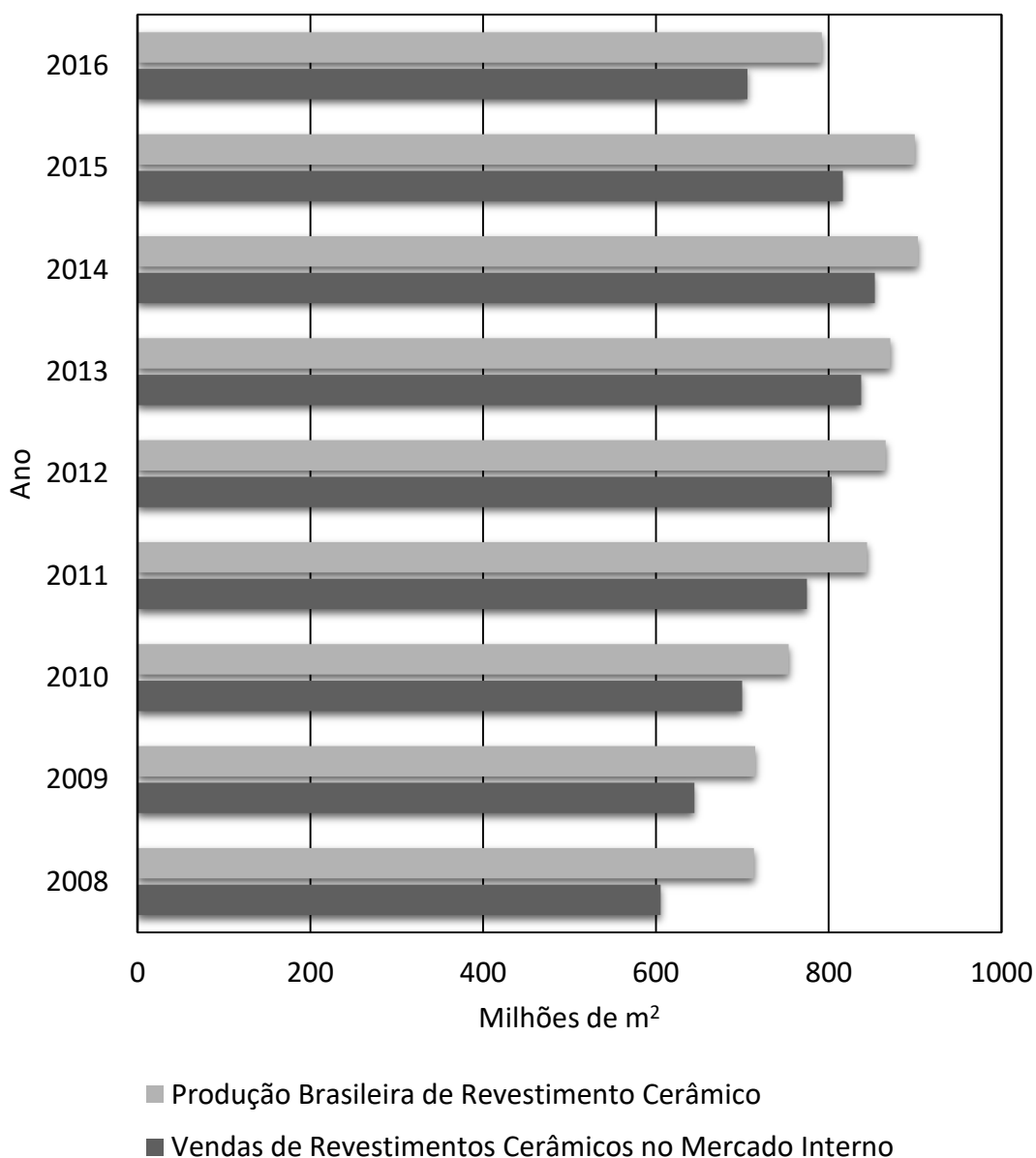


Figura 3.1 – Panorama do Mercado Interno de Revestimentos Cerâmicos. (Fonte: ANFACER, 2017)

O crescimento no período 2008 – 2014 foi positivamente influenciado pelos bons indicadores econômicos brasileiros, tais como o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB), a melhoria da distribuição de renda, a ampliação do acesso ao crédito, assim como por políticas públicas, particularmente o Minha Casa Minha Vida e o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), além de investimento em grandes obras para eventos como a Copa do Mundo e as Olimpíadas. A conjunção desses fatores estimulou o aquecimento da construção civil no país e elevou as vendas internas de revestimentos cerâmicos. A partir de 2015, não há mais expansão na produção; sendo que especificamente em 2016, observa-se uma retração da produção e das vendas internas. Tal situação ocorreu devido à crise econômica nacional e internacional.

3.2. Grês Porcelanato

Entre as cerâmicas de revestimento, encontra-se o grês (ou grés) porcelanato, ou apenas porcelanato. O nome grês porcelanato derivou das seguintes terminologias: "grês", que consiste em um material cerâmico com estrutura compacta, características de uma fase cristalina imersa em uma fase vítrea; "porcelanato", terminologia que se refere às características técnicas do produto, as quais se assemelham às da porcelana (MENEGAZZO, 2000).

O porcelanato é o produto cerâmico de revestimento que apresenta as melhores características técnicas e estéticas. Tal perfil se deve a um longo processo de desenvolvimento tecnológico, o qual permitiu a elaboração de um material constituído de fases cristalinas de elevada dureza e densidade (DE OLIVEIRA, 1998).

A segunda grande revolução no setor cerâmico, posterior ao desenvolvimento da monoqueima nos anos 80, deu-se com a concepção do grês porcelanato. O produto difere dos demais devido ao seu processo altamente tecnológico, que envolve uma queima em ciclos rápidos, a temperaturas em torno de 1220 e 1250 °C. Devido ainda ao alto nível na qualidade das matérias-primas selecionadas, elevado grau de moagem e força de compactação, o processo de fabricação resulta em produtos com baixa porosidade e elevada performance técnica (MENEGAZZO, 2000).

Devido à baixa porosidade, as placas de grês porcelanato podem ser definidas como sendo um revestimento cerâmico impermeável (de acordo com a norma NBR-13817, a absorção de água deve ser inferior a 0,5%), esmaltado ou não; cuja peça queimada é branca ou colorida por meio de adição de pigmentos na composição inicial, e feita a partir de uma mistura de caulim (ou argilas cauliníticas), quartzo e feldspato (SÁNCHEZ, 2003).

Desta forma, de acordo com HECK (1996), o porcelanato destaca-se nos seguintes aspectos:

- Altíssima resistência a abrasão;
- Resistência ao gelo;
- Resistência a ácidos e álcalis;
- Uniformidade de cores;
- Impermeabilidade;
- Facilidade de manutenção;
- Amplas possibilidades de composições.

O porcelanato pode ser enquadrado entre as categorias dos produtos com superfície esmaltada ou não esmaltada. O primeiro surgiu da necessidade de se ganhar mercado, onde a estética superficial prevalece sobre as características técnicas do produto. Quando sem esmalte, são ressaltadas as características de extrema resistência da superfície que, inatacável por ácidos, oferece uma completa impermeabilidade e resistência ao gelo. O grês porcelanato não esmaltado pode ser polido, apresentando superfícies que se aproximam mais dos mármore e dos granitos (ARAÚJO, 2009).

3.2.1. Composição

Não existe uma matéria-prima natural para produção de revestimentos cerâmicos que, sozinha, apresente todas as características necessárias para se ter uma boa formulação (por exemplo, boa fundência, estabilidade dimensional, cor de queima). Por isso é sempre necessário preparar uma mistura de vários componentes (PINHEIRO, 2009).

As matérias-primas cerâmicas podem ser classificadas como plásticas (materiais argilosos em geral) e não plásticas (fundentes, inertes, carbonatos e talcos). As plásticas são essenciais na fase de conformação, enquanto que as não plásticas atuam mais na fase do processamento térmico. A massa de porcelanato é composta basicamente por uma mistura de argilas, feldspatos, areias feldspáticas, quartzo, caulins, filitos e aditivos, quando necessários (RODRIGUEZ, 2004).

A argila tem como função fornecer plasticidade e características ligantes à massa, portanto, garantindo melhores propriedades durante a fase de compactação e resistência mecânica após secagem. As argilas para produção de porcelanato são geralmente compostas pelo argilomineral caulinita, constituído essencialmente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). O caulim é uma argila, geralmente de cor branca e de boa inércia química. O mineral do caulim mais comum e mais importante é a caulinita, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Por possuir grande quantidade de óxido de alumínio (Al_2O_3) funciona como regulador do equilíbrio das reações durante a fase de vitrificação da massa cerâmica. Ao final da queima a constituição predominante é como mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), que devido a sua estrutura funciona como “esqueleto”, contribuindo, dessa forma, para o aumento da resistência mecânica (ARAÚJO, 2009).

Os feldspatos desempenham o papel de fundentes. Por serem materiais com elevado teor de álcalis (K_2O e Na_2O), reduzem a temperatura de queima, proporcionando a formação das primeiras fases líquidas. Portanto, são os iniciadores do processo de densificação e os que mais contribuem para a diminuição da porosidade das peças de grês porcelanato, conferindo-lhes as propriedades desejadas. Para a indústria cerâmica, estas condições são importantes para os produtos, uma vez que, além de baixarem o custo, reduzem a absorção de água e aumentam a resistência mecânica (RODRIGUEZ, 2004).

A presença do quartzo é fundamental, visto que este é um dos componentes responsáveis pelo controle da 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 de ser um importante regulador da correta relação entre Si_2O e Al_2O_3 para a formação da mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) (ARAÚJO, 2009).

Podem, ainda, entrar na composição de uma massa de grês porcelanato outras matérias-primas que aumentam a fusibilidade na massa. Estes fundentes são utilizados quando se tem certa dificuldade em reduzir a absorção de água na massa para valores abaixo de 1% (BRAGANÇA et al., 2010).

3.2.2. Processamento

As composições das massas para a obtenção do porcelanato sofreram grandes mudanças ao longo dos últimos anos. Tais mudanças têm como justificativa básica o desenvolvimento tecnológico ocorrido na área de maquinarias do setor cerâmico, moinhos, fornos a rolo e prensas hidráulicas de elevada pressão, tudo isso associado ao processo de queima rápida. Antes se levava de 40 a 50 horas com 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 1230 °C. Os componentes das massas cerâmicas que eram submetidas a queima lenta, devido ao longo tempo de sinterização, tinham tempo de participar das muitas reações que levavam à modificação total da sua composição, com a formação de novos compostos. Na queima rápida isso não ocorre, visto que os componentes da massa geralmente se comportam, no sinterizado, com características próprias (SACMI, 1996).

O desafio na produção do porcelanato começa na seleção das matérias-primas. É fundamental manter a homogeneidade do lote e atender às especificações, a fim de evitar variações de tonalidade e variações na fundência da composição. As demais etapas do processo também precisam ser entendidas e controladas a fim de se poderem prever as características do produto final (HECK, 1996).

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. A etapa de preparação da massa é constituída normalmente por uma fase de cominuição das matérias-primas (ROSSO et al., 2005).

A conformação é realizada por prensagem ou extrusão, onde busca-se uma redução da porosidade interna, sendo o processo de moldagem por prensagem o mais usado na indústria cerâmica para a fabricação de placas cerâmicas e revestimento, devido à maior estabilidade dimensional que se consegue no produto final, além da sua elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas, sem contração de secagem e com baixa tolerância dimensional (ALBERO, 2000).

A etapa de preenchimento das cavidades da matriz é a etapa mais importante da operação de prensagem. Isto decorre do fato de que a homogeneidade e compactação da massa cerâmica irão depender, sobretudo, de um preenchimento eficiente e uniforme, obtido somente a partir de uma massa de boa fluidez. O preenchimento irregular da matriz leva a um acúmulo de tensões, que afetam as dimensões do corpo cerâmico, provocando inclusive sua quebra (PINHEIRO, 2009).

As partículas das matérias-primas (aglomerados) são comprimidas até o menor volume possível, por meio de uma pressão exercida, obtendo-se um empacotamento e agregação destas partículas através do deslocamento e reordenação dos grânulos, a deformação plástica

dos grânulos. Desta forma, pode-se obter uma baixa porosidade e uma alta densidade aparente a cru (antes da queima). (OLIVEIRA, 2000).

Segundo REED (1995), o processo de queima ocorre em três estágios:

- Reações preliminares a sinterização, que incluem a queima da matéria orgânica e a eliminação de produtos de decomposição e oxidação;
- Sinterização, que é a consolidação caracterizada pela contração (as partículas se unem em um agregado que possui resistência mecânica) e densificação do produto;
- Resfriamento.

Pode-se definir como sinterização o processo de tratamento térmico em temperaturas elevadas (variando de 1200 a 2000 °C), onde um sistema de partículas individuais ou um corpo poroso sofrem modificações em algumas de suas propriedades no sentido de chegar a um estado de máxima densificação possível, conseqüentemente, reduzindo a porosidade do material. Devido à densificação, o material sofre uma retração (que se pode chamar de retração de queima do material), influenciando a estabilidade dimensional e a resistência mecânica final do produto cerâmico (VAN-VLACK, 1973).

Quando as partículas se unem em um contato mais íntimo, o que reduz a porosidade, são iniciados os mecanismos de sinterização, que podem ser divididos em três estágios, conhecidos também como teoria da sinterização (RICHERSON, 1982):

- Etapa inicial ou formação da área de contato: as partículas começam a se unir entre si. Nesta etapa da sinterização, não há um crescimento visível das partículas e a retração macroscópica é praticamente imperceptível.
- Diminuição do volume dos poros: com o tempo de sinterização, os poros (fases vazias) diminuem, e se tem um sistema formado por um material maciço e poros. Os poros são na realidade um reservatório de vazios, os vazios se difundem dentro da matriz. Neste estágio a retração e a diminuição da porosidade apresentam uma velocidade maior que no estágio final.
- Formação da porosidade fechada: neste estágio, os poros tendem a conseguir uma forma esférica. A velocidade de sinterização diminui e o aumento da retração da peça cerâmica é muito menor do que na etapa anterior, sendo difícil determinar o término do processo de sinterização.

Na Figura 3.2 são ilustrados estes estágios de sinterização:

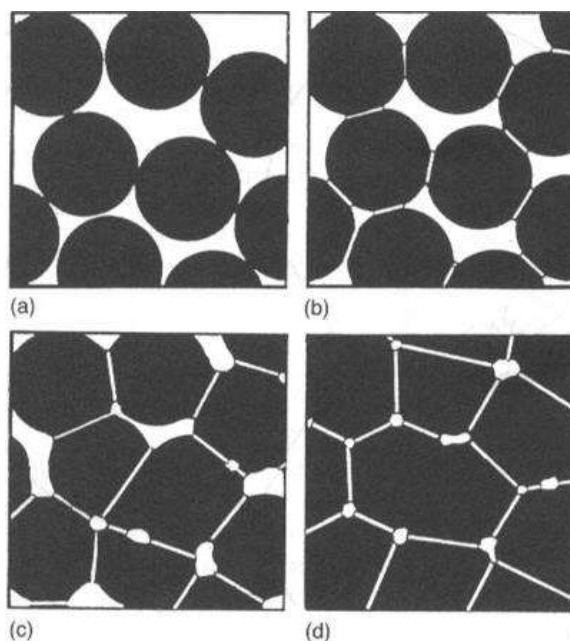


Figura 3.2 – Etapas da Sinterização: (a) Início da sinterização; (b) Formação da área de contato; (c) Diminuição do volume de poros; (d) Formação da porosidade fechada. (Fonte: Richerson, 1982)

Em temperaturas baixas, até 300°C, ocorrem as reações de pré-sinterização, como desidratação, desidroxilação dos argilominerais, decomposição da matéria orgânica e carbonatos, oxidação, etc., produzindo transformações que, posteriormente, em temperaturas mais altas, podem formar fases estáveis. Um exemplo é o caso da caulinita, que ao perder a água de constituição, assume a forma de metacaulinita (PINHEIRO, 2009).

A partir dos 900°C, inicia-se a sinterização, ou seja, as reações entre os elementos constituintes das matérias-primas, promovendo a formação de novas fases. Durante este aquecimento, ocorre a vitrificação das substâncias fundentes, com a formação de fase líquida que, além de penetrar por capilaridade nos poros, preenchendo-os ou isolando-os (levando a uma maior densificação), permite melhor reatividade dos elementos durante a sinterização (SANTOS, 1989).

A metacaulinita aquecida a 980 °C se decompõe em espinélio Si-Al e os silicatos de alumínio amorfos. Mantendo-se o aquecimento dois tipos de mulita se formam: a mulita primária (entre 1150°C e 1250°C) e a mulita secundária (que nucleia e cresce lentamente a partir da fase de silicato de alumínio amorfo) (RETRESPO & DINGER, 2003). A temperatura de sinterização máxima é de aproximadamente 1300 °C, onde todas as reações possíveis ocorrem durante a queima de placas cerâmicas de revestimento.

Essa etapa é o fechamento do processo de produção do porcelanato, onde é verificado se o grau de finura do pó, as características dos grânulos e a densidade a verde estavam dentro dos valores ideais para a sinterização. Os parâmetros tempo e temperatura devem estar sob controle rigoroso durante todo o ciclo, para que além de produtos finais de qualidade, não ocorra desperdício de energia e de matéria-prima.

Esmaltes ou vidrados são misturas de matérias-primas naturais e produtos químicos ou compostos vítreos que aplicados à superfície do corpo cerâmico e após a queima, formam

uma camada vítrea, delgada e contínua. Esta tem por finalidade aprimorar a estética, tornar o produto impermeável, melhorar a resistência mecânica e propriedades elétricas, entre outros fatores. As composições dos esmaltes (vidrados) são inúmeras e sua formulação depende das características do corpo cerâmico, das características finais do esmalte e da temperatura de queima (ABCERAM, 2017).

3.2.3. Parâmetros para Classificação dos Revestimentos Cerâmicos

As normas para revestimentos cerâmicos estão agrupadas em 3 conjuntos, conforme a seguir:

- NBR-13816 – Terminologia;
- NBR-13817 – Classificação;
- NBR-13818 – Especificação e Métodos de Ensaio.

As placas cerâmicas para revestimento são definidas pela NBR-13816:1997 como um material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, são conformadas por extrusão ou por prensagem, podendo também ser conformadas por outros processos. As placas são então secas e queimadas à temperatura de sinterização. Podem ser esmaltadas ou não esmaltadas. As placas são incombustíveis e não são afetadas pela luz.

A ABNT, em sua norma NBR-13817:1997, classifica as cerâmicas de revestimento segundo os seguintes critérios:

- Esmaltadas e não esmaltadas;
- Métodos de fabricação (prensado, extrudado e outros);
- Grupos de absorção de água, em número de 5;
- Classes de resistência à abrasão superficial, em número de 5;
- Classes de resistência ao manchamento, em número de 5;
- Classes de resistência ao ataque de reagentes químicos, segundo diferentes níveis de concentração;

Conforme se verifica na Tabela 3.1, as cerâmicas de revestimentos, no que tange a absorção de água, podem-se dividir em 5 grupos. Conforme a NBR-13818:1997, deve-se usar um código constituído pelo método de fabricação A, B ou C, acrescido do grupo de absorção, I, II, ou III, utilizando subgrupos, utilizando subgrupos a ou b.

Tabela 3.1 – Codificação dos grupos de absorção de água. (Fonte: Adaptado de NBR-13818:1997)

Absorção de água (AA) (%)	Métodos de fabricação		
	Extrudado (A)	Prensado (B)	Outros (C)
AA ≤ 0,5	AI	Bia	CI
0,5 < AA ≤ 3,0		BIb	
3,0 < AA ≤ 6,0	AIIa	BIIa	CIIa
6,0 < AA ≤ 10,0	AIIb	BIIb	CIIb
AA > 10,0	AIII	BIII	CIII

A classificação normativa das placas cerâmicas (ISO 13006:2012) tem como principal parâmetro a absorção de água. Segundo a ANFACER, a correta especificação não deve ser baseada em uma única propriedade, e sim, em um conjunto de características técnicas. Assim, o Centro Cerâmico do Brasil propõe uma classificação baseada na absorção de água e resistência mecânica à flexão, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Classificação dos Revestimentos Cerâmicos (Fonte: Adaptado de NBR-13818:1997)

Produto	ISO 13006	Absorção de água	Módulo de resistência a flexão (MPa)
Porcelanato	Bla	0 a 0,5	≥ 35
Grês	BIb	0,5 a 3	≥ 30
Semi-grês	BIIa	3,0 a 6,0	≥ 22
Semi-poroso	BIIb	6,0 a 10,0	≥ 18
Poroso	BIII	10,0 a 20,0	≥ 15

Em fevereiro de 2007, a ABNT publicou a NBR-15463, que, segundo a ANFACER, é a primeira norma específica para o porcelanato no mundo e visa elevar a qualidade dos produtos disponíveis e proteger o consumidor do uso indevido do termo “porcelanato” em produtos que não estejam de acordo com a nova norma brasileira.

A NBR-15463 estabelece as principais características técnicas para grês porcelanato e estas estão subdivididas em duas categorias: esmaltado e técnico (não-esmaltado). A Tabela 3.3 mostra uma representação simplificada das informações disponível nesta norma.

Tabela 3.3 – Propriedades de um porcelanato (Fonte: NBR-15463:2013)

Propriedades Físicas	Área do produto < 50 cm ²		Área do produto > 50 cm ²	
	Técnico	Esmaltado	Técnico	Esmaltado
Absorção de água (%)	≤ 0,1	≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,5
Modulo de Resistencia à flexão (MPa)	≥ 45		≥ 45	≥ 37
Carga de Ruptura (N)	≥ 1000		≥ 900	≥ 900
Resistencia a abrasão profunda (mm ³)	≤ 140	Não se aplica	≤ 140	Não se aplica

A norma NBR-15463:2013 determina, de forma a não deixar dúvidas, a classificação dos porcelanatos utilizando tanto parâmetros de propriedades físicas (absorção de água, resistência a flexão, a abrasão e carga de ruptura) quanto de propriedades químicas (resistência a manchamento e a agentes químicos) e de geometria das placas (retitude dos lados, ortogonalidade, curvatura central, lateral e empeno).

3.3. Resíduos Industriais e o Reaproveitamento

3.3.1. Contexto Ambiental

Ao longo de sua existência, o homem sempre utilizou os recursos naturais do planeta e gerou resíduos com pouca ou nenhuma preocupação, já que os recursos eram abundantes e a natureza aceitava passivamente os despejos realizados. A partir do século XVIII, o objetivo principal era o crescimento econômico em curto prazo, mediante a utilização de novos processos produtivos e a exploração intensiva de energia e matérias-primas. Este modelo gerou impressionantes excedentes de riqueza econômica, mas trouxe consigo grandes problemas sociais e ambientais, entre eles os resíduos (MODESTO, 2003).

De forma que quantidades significativas de resíduos foram geradas, causando, conseqüentemente, problemas ambientais ao longo do tempo como contaminação do solo, do lençol freático e agressão à vegetação presente no local. Toda a produção e transformação de materiais industriais, seja em pequena ou grande escala, geram resíduos que muitas vezes não têm disposição ecologicamente correta ou adequada reutilização (NANDI, 2012).

A estratégia das empresas em obter melhorias de desempenho ambiental está inserida na sua função social, pois além de atender à vontade de seus clientes, melhora os relacionamentos com órgãos ambientais de controle, com as ONG's e com a sociedade em geral. Seguir apenas os padrões mínimos expressos na legislação ambiental não é considerado suficiente para manter vantagens competitivas, sobretudo no mercado externo (MODESTO, 2003).

Normalmente, as soluções encontradas pelas empresas quanto ao descarte de tais resíduos são os aterros sanitários e os lixões, porém, na estrutura das grandes cidades, não há

espaços para essas obras devido à aglomeração de pessoas nos centros urbanos e à alta valorização dos terrenos em algumas áreas. Além de gerar entulho, o descarte industrial também leva ao desperdício de matéria-prima, pois à medida que se descarta um resíduo, perde-se material que poderia ser reciclado e reutilizado como bens de produção (PAIXÃO et al., 2011).

Os resíduos podem ser aproveitados como fonte energética, ou como matéria-prima. Neste último caso, os resíduos podem ser criteriosamente introduzidos no mesmo processo produtivo que os geraram ou inseridos em outro processo produtivo. Nesse sentido, a reutilização e a reciclagem são as soluções mais indicadas para o manejo da grande maioria dos resíduos industriais, reduzindo custos, preservando recursos naturais não renováveis, diminuindo a carga de poluentes lançados no meio ambiente e reduzindo os impactos ambientais e efeitos danosos à saúde humana causados pelo descarte indiscriminado de resíduos na natureza.

A reciclagem teve seu início juntamente com a revolução industrial, que trouxe consigo a geração de grande quantidade de resíduos e o aumento de materiais e produtos descartados com a intensificação das relações de consumo. Atualmente a reciclagem é uma grande e bem fundamentada indústria, com vários tipos de materiais sendo coletados, separados, processados e comercializados em todo o mundo. Entre esses materiais, destacam-se os resíduos sólidos, em virtude do enorme potencial ambiental e econômico em sua reciclagem (MARQUES, 2007).

A inserção dos resíduos num ciclo produtivo representa uma opção de recuperação alternativa desses materiais, que é interessante tanto no aspecto ambiental como no econômico. Nesse sentido, a indústria cerâmica vem demonstrando grande potencial para a reutilização de resíduos inorgânicos, particularmente os da própria indústria cerâmica e os do beneficiamento mineral (PRESOTTO, 2012).

3.3.2. Resíduos do Processamento de Porcelanato

A indústria cerâmica como um todo gera uma considerável quantidade de resíduo em praticamente todas as etapas do processo de fabricação. A Figura 3.3 apresenta, simplificada, o fluxograma do processo de fabricação de placas cerâmicas para revestimento pelo processo de monoqueima por via úmida, processo característico para a produção de porcelanato (NANDI, 2012).

A maioria dos processos de fabricação de produtos cerâmicos tradicionais envolve, essencialmente, as mesmas etapas: seleção e dosagem das matérias-primas, moagem, atomização (processos a úmido), conformação, secagem, esmaltação (produtos esmaltados), queima e polimento (produtos polidos).

Parte dos resíduos gerados no decorrer do processo de fabricação de uma indústria de cerâmica de revestimento é, com frequência, reaproveitada. No caso da queima do carvão mineral na fornalha do atomizador, as cinzas geradas são encaminhadas à indústria cimenteira. Os rejeitos gerados durante as etapas antes da calcinação, as ditas “quebras”, já são retroalimentadas na etapa de moagem em quantidade definidas de forma a não prejudicar as características do produto final. As “quebras” são produtos verdes que apresentam algum tipo de defeito e por isso são desclassificados no setor de escolha. No entanto, a indústria cerâmica tem problemas para encontrar uma solução ambientalmente correta para alguns de seus resíduos: o lodo resultante dos efluentes líquidos, os resíduos da etapa de polimento e os rejeitos gerados após a etapa de queima, denominados de “chamote” (MODESTO, 2003).

A lavagem do piso da fábrica, das linhas de produção, dos moinhos de preparação de esmaltes e demais equipamentos, gera efluentes líquidos contendo materiais sólidos em suspensão. Com a realização de um tratamento adequado, adicionando-se produtos químicos, esta água pode ser reutilizada, por exemplo, nos processos de lavagem da fábrica. No entanto, o volume de lodo resultante deste processo de lavagem, pode ultrapassar a 12 m³/mês (FERRARI, 2002).

Estes resíduos sólidos, também denominados “raspas”, contêm metais tóxicos e são classificados como Classe I ou Classe II (de acordo com a norma NBR 10004:2004), requerendo uma disposição gerenciada e de custo relativamente alto. Por ser um material composto de insumos de decoração, contendo fundentes, como fritas e vidrados, a “raspa” tem potencial para ser incorporada à massa cerâmica, pois a adição de fundentes à massa cerâmica é prática comum (FERRARI, 2002).

No mercado atual o porcelanato, pode ser classificado como esmaltado ou técnico (polido ou não). O porcelanato polido é o mais produzido comercialmente, requerendo uma etapa de polimento durante sua produção a fim de nivelar, retirar riscos e defeitos e dar brilho a superfície do produto final.

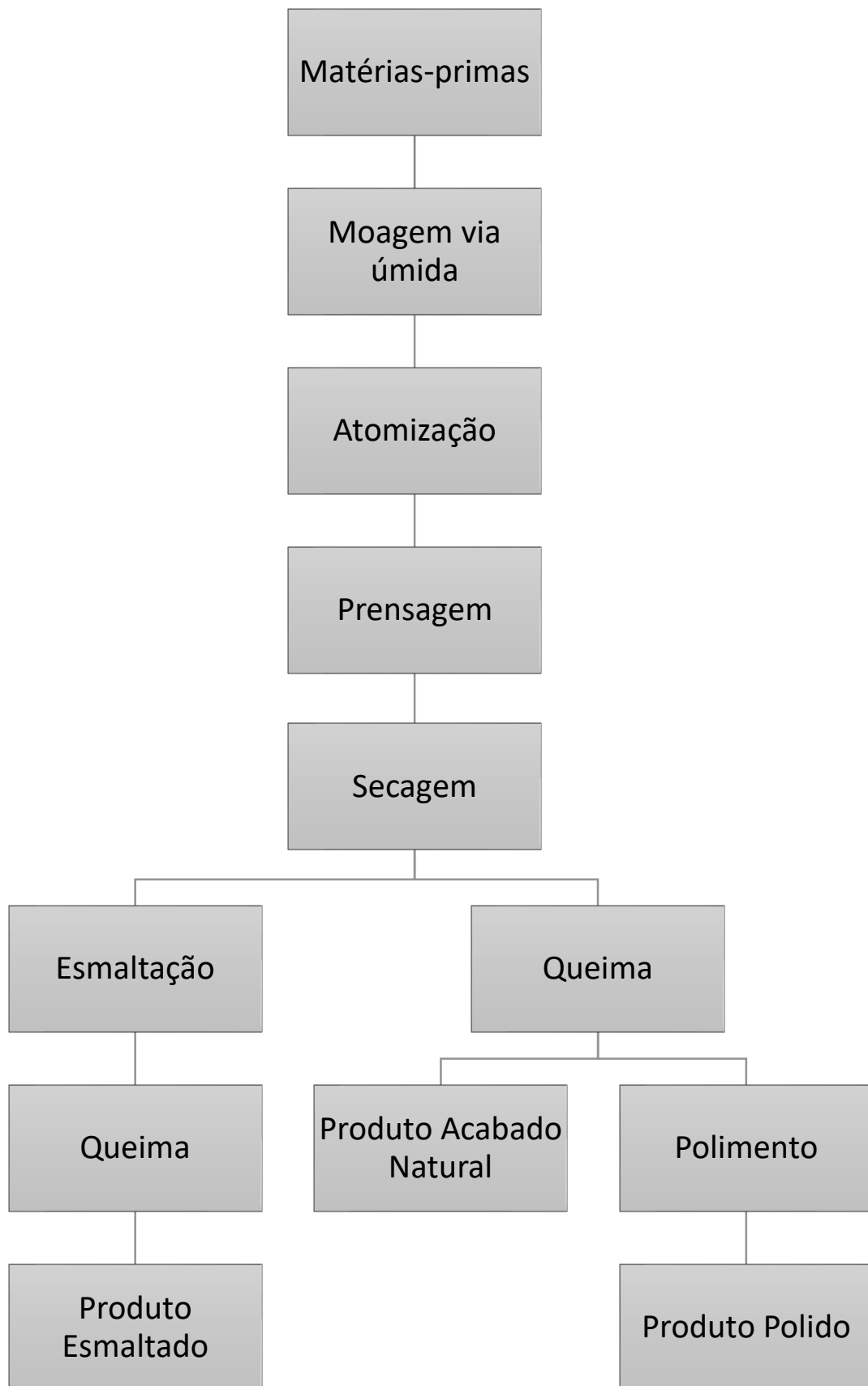


Figura 3.3 – Fluxograma do Processo de Produção de Revestimentos Cerâmicos (Fonte: Barbosa, 2008)

O processo consiste no uso de um equipamento dotado de várias cabeças polidoras de alta rotação compostas de materiais abrasivos que, em contato com as peças sob velocidade controlada e presença de água, executam o polimento. Essa parte do processamento gera uma grande quantidade de rejeito, que para um descarte adequado é necessário alto investimento. Esse rejeito é constituído essencialmente por uma mistura do material cerâmico oriundo do polimento e do material abrasivo desprendido durante o processo.

O material abrasivo utilizado durante o polimento é geralmente composto por partículas de diamante ou carbetos de silício aglomerados por cimentos à base de cloretos magnesianos. O que evidencia que o resíduo é constituído basicamente por material cerâmico e apesar do seu potencial como matéria-prima cerâmica alternativa, ele é descartado diretamente em aterros da mesma forma que o a torta obtida no tratamento dos efluentes (MARQUES, 2007).

Os resíduos provenientes do processo final de produção, identificados como “chamote”, são quase sempre descartados. Isso decorre do fato desse material já ter sido transformado e apresentar-se sinterizado (queimado). Isso implica em ter-se um material consideravelmente duro (resistente) e que, por isso, não pode ser retro-alimentado diretamente no processo sem que haja um reprocessamento prévio (CASAGRANDE, 2008).

A ação de concentrar este material em uma área específica (aterro) constitui-se em uma medida paliativa e também nociva. Paliativa porque com este volume de rejeitos há uma ocupação de uma grande área. Nociva, pois estes materiais possuem em sua cobertura, constituintes solúveis em água que representam grande periculosidade à saúde humana, como é o caso do chumbo, cádmio e outros metais tóxicos (MODESTO, 2003).

O potencial de incorporação de resíduos nas formulações de cerâmicas tradicionais, aliado às elevadas quantidades de recursos naturais consumidos a cada dia por esse segmento industrial, destaca a importância da reutilização de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas, racionalizando o uso dos recursos naturais. A diminuição gradual na abundância dos recursos minerais causou a recente tendência em substituir minerais por matérias-primas alternativas que estão disponíveis em abundância, como os resíduos industriais. Isto 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 XXI (MARQUES, 2007).

3.3.3. Reciclagem e Reaproveitamento na Cerâmica

As massas utilizadas na indústria cerâmica tradicional são de natureza heterogênea e geralmente constituídas de materiais plásticos e não plásticos, com um vasto espectro de composições, motivo pelo qual permitem a presença de materiais residuais de vários tipos, mesmo em porcentagens insignificantes (MENEZES, 2002).

Desta forma, a reciclagem e a reutilização de resíduos provenientes de diferentes processos industriais como novas matérias-primas cerâmicas têm sido objeto de pesquisas em diversas instituições, que buscam soluções que conciliem vários aspectos, como custo de disposição, tratamentos, tipo e quantidade de resíduo, tecnologia e processos de utilização e, finalmente, o impacto econômico e ambiental da reciclagem. Por esta ótica, os objetivos do presente trabalho são válidos, já que podem resolver um problema de ordem técnico/econômica e ambiental. Além disso, fabricar produtos a partir de rejeitos é uma vantagem que coloca o fabricante em uma posição fortemente competitiva no mercado, devido à questão econômica envolvida e à oportunidade de veiculação deste princípio como marketing, principalmente no aspecto ecológico.

Atualmente estudos já foram realizados, e muitos são publicados todos os anos, sobre aproveitamento de resíduos industriais no processamento de produtos cerâmicos. Muitos deles apontaram para a viabilidade de aproveitamento desses resíduos, como parte da matéria prima na composição das massas, sem prejuízos significativos nas propriedades do produto final.

CASAGRANDE (2008) comprovou a viabilidade do aproveitamento do resíduo da “quebra de escolha”, ou chamote, como matéria prima no processo de fabricação de revestimentos cerâmicos. Foi afirmado, ainda, que o processo de transformação do resíduo é compatível com as plantas cerâmicas atuais viabilizando sua introdução na indústria sem modificação nos layouts.

GRIPA (2013), estudou a viabilidade técnica da utilização de resíduos de porcelanato para a obtenção de novos materiais cerâmicos. Os ensaios realizados com as peças cerâmicas produzidas demonstraram que, se respeitadas as condições de queima determinadas, é possível produzir um novo material cerâmico a partir dos resíduos de porcelanato. As propriedades físicas apresentadas pelo novo material produzido demonstraram que as peças possuíam qualidade relativamente alta.

Em BERNARDIN (2007), foi avaliado o reaproveitamento de resíduos de esmaltação e de abrasivos para obtenção de cerâmicas. O estudo demonstrou que é possível o uso de resíduos do processamento cerâmico para obtenção de cerâmicas celulares de baixa densidade a partir de resíduos de polimento de produtos porcelânicos coletados em estações de tratamento de efluentes e resíduos de abrasivos de carbetto de silício. As cerâmicas celulares podem ser utilizadas na indústria de construção em substituição ao concreto celular pela sua baixa densidade, resultando em estruturas leves e com resistência mecânica aceitável.

Os trabalhos citados são exemplos, dentre muitos outros, de como é possível o aproveitamento de resíduos na indústria de cerâmica. A preocupação com a preservação do meio ambiente vem crescendo muito nos últimos anos, e no Brasil não é diferente. Vários fatores apontam este crescimento, destacando-se o aumento do interesse do grande público que gradativamente vai tornando a marca ambiental argumento de marketing, o aumento da quantidade e nível das organizações da sociedade civil dedicadas ao tema e a exigência de certificação ambiental às empresas brasileiras exportadoras trazendo reflexos mesmo na indústria interna.

4. Materiais e métodos

4.1. Materiais utilizados

A parte experimental deste estudo sobre a influência da granulometria foi desenvolvida utilizando dois tipos de cerâmicas de revestimento distintas: o porcelanato esmaltado e o porcelanato polido.

O porcelanato polido recebe polimento mecânico, o qual resulta em uma superfície com intensidade variável de brilho em toda a superfície ou parte dela, de acordo com o efeito estético desejado. O brilho originado, como efeito de polimento, é oriundo do próprio porcelanato. Apresenta ainda uma alta resistência e durabilidade o que garante o uso do piso por anos sem problemas e com as mesmas características iniciais.

O porcelanato esmaltado, diferentemente do polido tem seu brilho oriundo da camada de esmalte aplicado sobre ele. No processo de fabricação as matérias-primas são submetidas a altas temperaturas resultando um baixo percentual de absorção de água.

Na Figura 4.1 estão representadas as matérias-primas utilizadas:

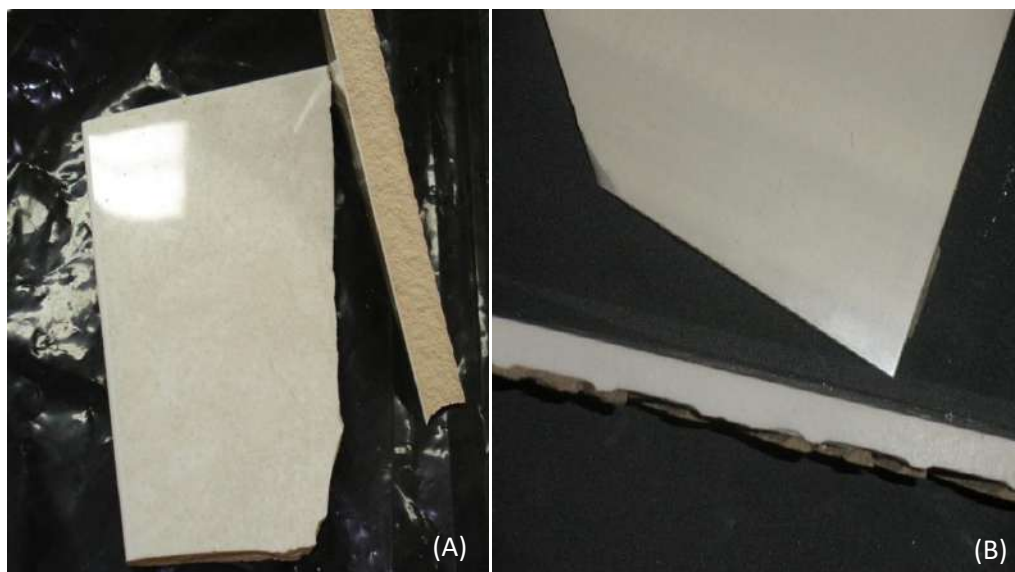


Figura 4.1 – Placas de Porcelanato Esmaltado (A) e Porcelanato Polido (B) (Fonte: Própria autora, 2017)

As placas cerâmicas empregadas no trabalho foram recolhidas durante obras realizadas na Escola de Química da UFRJ.

4.2. Metodologia

O fluxograma da Figura 4.2 apresenta, esquematicamente, o procedimento adotado para o desenvolvimento deste trabalho. Estão contempladas as etapas de preparação e caracterização das matérias-primas; conformação, secagem e queima dos corpos-de-prova e caracterização da cerâmica obtida. Este procedimento foi realizado para ambos os grês porcelanatos separadamente.

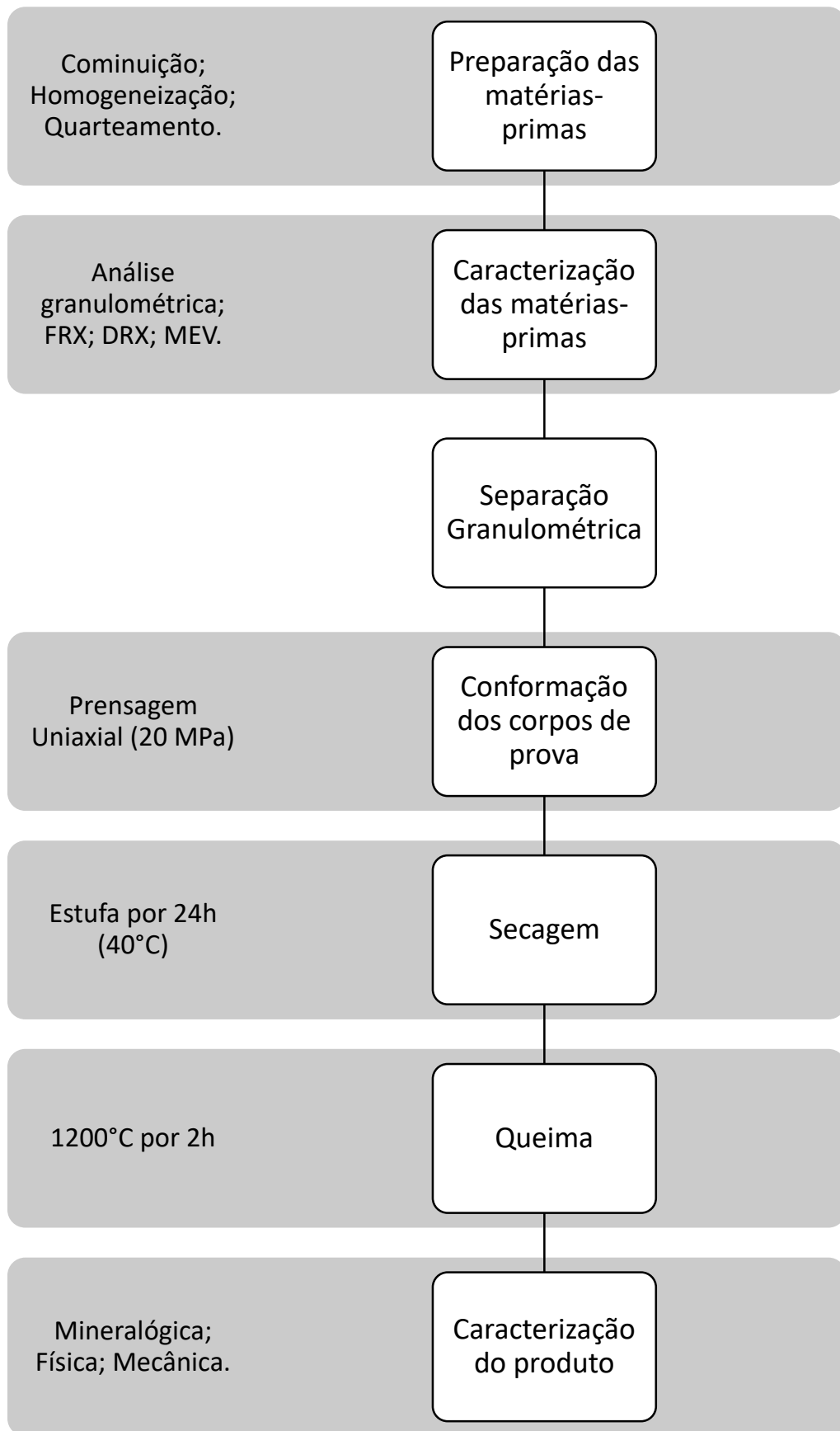


Figura 4.2 – Fluxograma da metodologia adotada (Fonte: Própria autora, 2017)

4.3. Tratamento das matérias-primas

4.3.1. Cominuição e Homogeneização das Matérias-Primas

Os resíduos coletados foram submetidos a uma quebra manual, com auxílio de um martelo, a fim de se obterem fragmentos com dimensões viáveis de serem introduzidas no equipamento de britagem.

Em seguida foram utilizados os seguintes equipamentos de cominuição: britador de rolos e pulverizador de disco. Ambos são da marca DENVER. Estes estão ilustrados na Figura 4.3. Na etapa de britagem do material, empregou-se inicialmente a maior abertura e em uma segunda passagem, a menor abertura. A cominuição foi finalizada no pulverizador de disco.

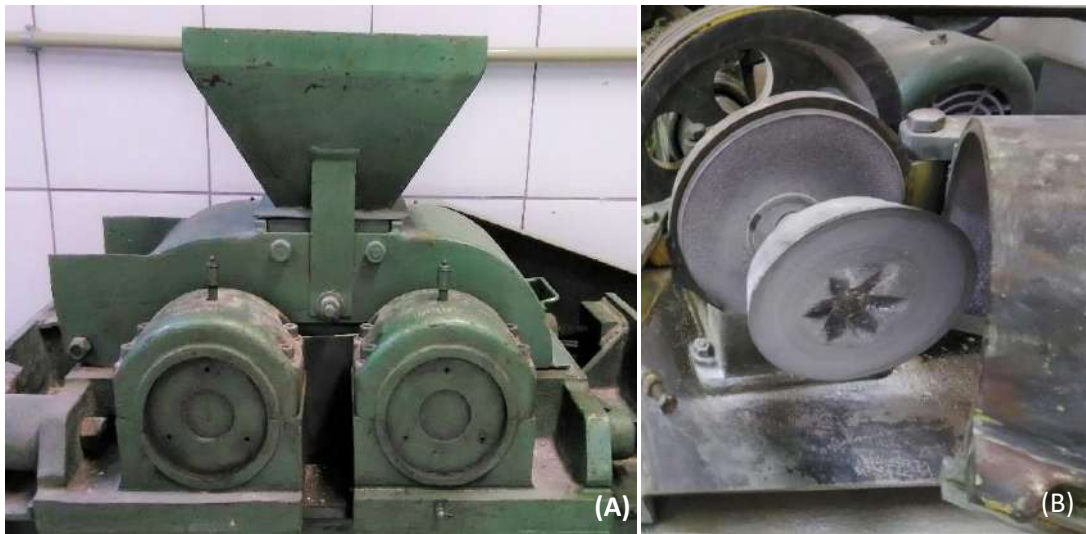


Figura 4.3 – Britador de rolos (A) e pulverizador de disco (B) (Fonte: Própria autora, 2017)

Em sequência foi realizado processo de homogeneização. Desta maneira, pôde-se, em seguida, proceder com o quarteamo, que permite a correta obtenção da amostra final para estudo.

O quarteamo é um dos métodos mais antigos de amostragem, podendo ser manual ou mecânico. Permite a obtenção de uma fração de massa que representa o todo. Neste trabalho foi implementada a metodologia da pilha cônica (Figura 4.4). Com a amostra homogeneizada, constrói-se um cone e em seguida, o cone é dividido em quatro porções iguais. Aquelas diametralmente opostas são tomadas como amostra final ou como amostra para construção de um novo cone (SAMPAIO & SILVA, 2007).

O quarteamo está ilustrado na Figura 4.5.

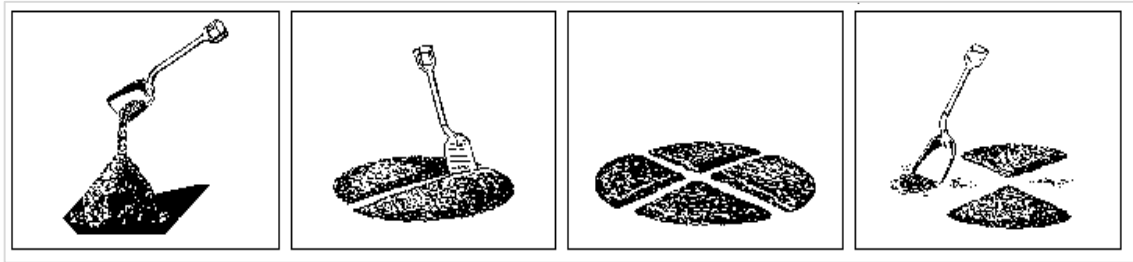


Figura 4.4 – Representação da metodologia de quartear amostra por pilha cônica (Fonte: SAMPAIO & SILVA, 2007)



Figura 4.5 – Ilustração do quartear amostra realizado (Fonte: Própria autora, 2017)

4.3.2. Análise Granulométrica das Matérias-Primas

A análise granulométrica fornece a distribuição percentual, em peso, dos tamanhos dos grãos da amostra, sendo usualmente aplicada para avaliação da eficiência do processo de cominuição. O método mais utilizado para obtenção da curva de distribuição granulométrica é a classificação por peneiramento, sendo esta a técnica aplicada neste trabalho.

Ao final do quartear amostra, seguiu-se para etapa de peneiramento. Para esta finalidade, foi utilizado um agitador de peneiras da marca PRODUTEST.

O peneiramento foi executado em duas etapas. Inicialmente utilizou-se uma seleção de peneiras ABNT com as seguintes aberturas, em mesh: 115, 170, 200, 250 e 270. Sendo estas as faixas granulométricas escolhidas para estudo. Na segunda etapa utilizou-se as seguintes peneiras ABNT, em mesh: 28, 35, 48, 60 e 100.

A Figura 4.6 ilustra o sistema de peneiras e agitador utilizado neste trabalho.



Figura 4.6 – Agitador com série de peneiras (Fonte: Própria autora, 2017)

Após a pesagem de cada fração granulométrica, realizou-se o cálculo da distribuição granulométrica a fim de se obter as porcentagens de material retido, acumulado e passante na série de peneiras.

4.4. Caracterização Elementar das Matérias-Primas

4.4.1. Caracterização Mineralógica

4.4.1.1. Análise por Fluorescência de Raios – X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra, assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra.

Na espectrometria de fluorescência de raios-X uma fonte de radiação de elevada energia provoca a excitação dos átomos da substância que pretende-se analisar. Quando um átomo no estado fundamental fica sob a ação de uma fonte externa de energia, ele absorve esta energia, promovendo elétrons a níveis mais energéticos. Neste estado o átomo estará numa situação instável.

Na natureza tudo tende a buscar o estado de estabilidade, desta forma o átomo excitado tende naturalmente a retornar ao seu estado fundamental, ocorrendo uma emissão de energia. Esta energia envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento químico, permitindo a sua identificação e correspondente quantificação (BECKHOFF, 2006).

Esta técnica foi utilizada para a determinação dos teores dos elementos na forma de óxidos.

4.4.1.2. Análise por Difração de Raios-X (DRX)

Dentre as várias técnicas de caracterização de materiais, a técnica de difração de raios-X é a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos, os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X.

O equipamento consiste em um tubo emissor de raios-X, uma câmara circular onde se deposita a amostra e um receptor que detecta os raios difratados. Ao incidir um feixe de raios-X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. A difração de raios-X ocorre segundo a Lei de Bragg, a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (característicos para cada fase cristalina).

Dentre as vantagens da técnica de difração de raios-X para a caracterização de fases, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos (pois o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina), a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa destas fases (ALBERS, 2002).

4.4.1.3. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A utilização desta técnica permite realizar um estudo das características superficiais e da morfologia das partículas. Quando uma radiação é empregada para iluminar um objeto, o valor limite do poder de resolução é definido pelo comprimento de onda da radiação. No microscópio eletrônico, a amostra é bombardeada com um feixe de elétrons altamente energético, permitindo, portanto, um poder de resolução bem mais elevado que na microscopia ótica.

4.5. Preparo dos Corpos de Prova e Ensaio de Queima

Para a verificação da influência da granulometria no reprocessamento de porcelanato foram produzidos cinco corpos de prova para cada granulometria a ser estudada, para cada um dos materiais de revestimentos. Utilizou-se as granulometrias de 115, 170, 200, 250, e 270 mesh. A preparação da massa cerâmica foi realizada utilizando 20g do resíduo moído e com auxílio de um graal e pistilo, incorporou-se água até a obtenção de uma massa úmida passível de moldagem. A prensagem foi a operação de conformação realizada para produção dos corpos de prova deste trabalho. A massa cerâmica foi inserida em uma matriz retangular de aço inox com as seguintes dimensões: 60 mm de comprimento, 20 mm de largura e 5 mm de espessura, ilustrada na Figura 4.7. A compactação da massa cerâmica foi realizada aplicando-se uma pressão uniaxial de 20 MPa, para este fim foi utilizada a prensa ilustrada na Figura 4.8.



Figura 4.7 – Matriz retangular para compactação da massa cerâmica (Fonte: Própria autora, 2017)



Figura 4.8 – Prensa de pressão uniaxial (Fonte: Própria autora, 2017)

Em seguida realizou-se o procedimento de secagem que tem como objetivo a remoção da umidade, de forma a impedir que ocorram fraturas na peça causadas pela rápida evaporação da água durante a queima. A secagem foi executada em uma estufa durante 24 horas, com temperatura de $40\pm 10^{\circ}\text{C}$. Ao final, realizou-se a mensuração das dimensões dos corpos de prova.

A produção do material reprocessado finalizou-se com a inserção dos corpos verdes em um forno elétrico para serem calcinados a uma temperatura de $1200\pm 20^{\circ}\text{C}$ durante um período de duas horas. A calcinação foi realizada utilizando este patamar de temperatura devido aos resultados de trabalho anterior (GRIPA, 2013), onde utilizando temperatura abaixo de 1100°C , os corpos de prova esfarelavam após 24 horas, tornando inviável a continuidade dos ensaios.

Após o resfriamento por convecção natural, os corpos foram removidos do forno e realizou-se novamente a mensuração das dimensões como demonstrado na Figura 4.9. Ademais, obteve-se o peso seco (P_S), pesando-se as amostras.

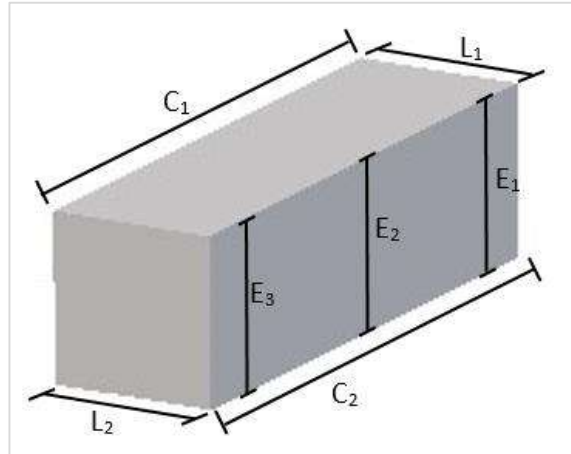


Figura 4.9 – Modelo para aferição das dimensões (Fonte: Própria autora, 2017)

4.6. Caracterização física e mecânica dos corpos de prova

Com o intuito de caracterizar o material produzido, ensaiaram-se os corpos sinterizados quanto à retração linear, à absorção de água, à porosidade aparente, à densidade e à tensão de ruptura a flexão. A partir dessas análises é possível determinar a classe à qual o material produzido pertence, conforme a norma NBR-13817 citada no item 3.2.1 deste trabalho.

4.6.1. Avaliação da retração linear (RL)

A retração linear é a avaliação da dimensão das peças antes e após o processo de sinterização, em porcentagem. Resultados com valores positivos indicam que houve retração e negativos, indicam expansão.

Em razão dos corpos de prova possuírem formato retangular, a retração linear foi obtida como função do comprimento (maior dimensão da peça), visto que esta dimensão é a que apresenta maior variação após a queima, possibilitando uma avaliação mais clara dos resultados.

As amostras foram medidas com paquímetro DIGIMESS com resolução de 0,01 mm. A partir dos seus valores de comprimento calculou-se a retração linear de queima (RL) utilizando-se a Equação (1) (SANTOS, 1989):

$$RL(\%) = \left(\frac{C_I - C_F}{C_I} \right) \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

C_I – Comprimento inicial do corpo de prova, antes da queima (em u.a.);

C_F – Comprimento final do corpo de prova, depois da queima (em u.a.).

4.6.2. Ensaio de absorção de água (AA)

A porosidade é um dos parâmetros de maior relevância na caracterização de um material cerâmico. Essa propriedade do material queimado é influenciada pela porosidade inicial do material conformado, pela formação da fase líquida na queima e pelo rearranjo das fases cristalinas. Um parâmetro capaz de representar a porosidade de uma cerâmica é a absorção de água (AA). Representada em porcentagem, a absorvidade é a especificação que irá determinar a classe à qual o revestimento cerâmico pertencerá.

A absorção de água do material cerâmico queimado é um parâmetro utilizado para medir a porosidade aberta e avaliar a fundência do material. No decorrer da sinterização, a porosidade, que no início era toda aberta, vai diminuindo de volume e algumas conexões entre poros desaparecem, produzindo poros fechados e abertos. Portanto, uma alta absorção de água significa uma alta porosidade aberta. Materiais muito porosos tendem a ser frágeis, pois a existência de porosidade propicia a formação de trincas e falhas, prejudiciais à resistência mecânica do material.

O procedimento para determinar o nível de absorção do corpo consistiu na imersão os corpos de prova em água destilada, inicialmente em ebulição, durante um período de 24 horas. Em seguida, foram emersos do banho e seu excesso de água superficial removidos com um pano úmido. Assim, após pesagem do corpo úmido, pôde-se obter a porcentagem de água a partir da Equação 2 (SANTOS, 1989):

$$AA(\%) = \left(\frac{P_U - P_S}{P_S} \right) \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

P_U – Peso do corpo de prova úmido (em u.a);

P_S – Peso do corpo de prova seco (em u.a).

4.6.3. Ensaio de porosidade aparente (PA)

Outro parâmetro utilizado para descrever a porosidade do material é a porosidade aparente (PA). Dada em porcentagem, é a medida do volume total de poros abertos em relação ao volume total do corpo de prova e pode ser obtida pela Equação 3 (SANTOS, 1989).

O procedimento experimental consiste na obtenção do peso imerso totalmente em água, após 24 horas de imersão. Para obtenção do peso imerso (P_i) utilizou-se do método da balança hidrostática, ilustrada na Figura 4.10.

$$PA(\%) = \left(\frac{P_U - P_S}{P_U - P_I} \right) \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

P_U – Peso do corpo de prova úmido (em u.a);

P_S – Peso do corpo de prova seco (em u.a);

P_I – Peso do corpo de prova imerso (em u.a).



Figura 4.10 – Balança hidrostática (Fonte: GRIPA, 2013)

4.6.4. Densidade (D)

A densidade das peças produzidas foi determinada utilizando a equação (4), que relaciona a porosidade aparente e a absorção de água (SANTOS, 1989):

$$D = \frac{PA}{AA} \quad \text{Equação (4)}$$

4.6.5. Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão (TRF)

A Tensão de Ruptura a Flexão é um ensaio destrutivo que visa determinar a resistência à tensão aplicada de forma pontual no centro de uma peça apoiada em dois pontos. Essa propriedade indica a capacidade do material de suportar esforços exercidos por cargas que possam levar a rupturas, esmagamento ou quebras e é importante conhecer esta propriedade para correto manuseio da peça cerâmica.

Para a obtenção dos valores de TRF dos corpos de prova preparados, utilizou-se a máquina de ensaio universal, modelo DL-2000, da EMIC e ilustrada na Figura 4.11.

Este aparelho aplica uma força com velocidade definida e controlada no centro da peça cerâmica, estando o ponto de aplicação de força em contato com a peça. Quando a peça rompe, o aparelho fornece o valor da força máxima aplicada no momento de ruptura.



Figura 4.11 – Equipamento para ensaio de tensão de ruptura à flexão (Fonte: Própria autora, 2017)

A tensão de ruptura é calculada através da equação 5 (SANTOS, 1989):

$$TRF (kgf/cm^2) = \frac{3 \times P \times b}{2 \times L \times E^2} \quad \text{Equação (5)}$$

Em que:

- P – Carga atingida no momento da ruptura (em kgf);
- b – Distância entre os apoios do corpo de prova (em cm);
- L – Largura do corpo de prova (em cm);
- E – Espessura do corpo de prova (em cm).

5. Resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos pelos ensaios e análises realizados nas matérias-primas e nos produtos finais obtidos.

5.1. Caracterização das Matérias-Primas

5.1.1. Análise granulométrica

A classificação por tamanho de partícula após a moagem foi realizada por peneiramento a seco entre 0,60 mm (28 mesh) e 0,053 mm (270 mesh). Os resultados da classificação estão dispostos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Distribuição granulométrica das matérias-primas

Peneira		Porcelanato Polido		Porcelanato Esmaltado	
mesh	mm	% Retido	% Acumulado	% Retido	% Acumulado
28	0,600	6,57	6,57	14,81	14,81
35	0,425	7,07	13,65	14,15	28,95
48	0,300	8,72	22,37	9,25	38,20
60	0,250	9,31	31,68	7,20	45,40
100	0,150	15,71	47,39	9,71	55,11
115	0,125	7,75	55,14	2,82	57,94
170	0,090	7,63	62,78	5,27	63,21
200	0,074	5,63	68,14	6,66	69,86
250	0,063	9,49	77,63	17,06	86,92
270	0,053	5,04	82,67	6,74	93,66
Fundo	< 0,053	17,33	100	6,34	100

A partir da avaliação dos resultados da análise granulométrica, demonstra-se a superioridade à abrasão do porcelanato esmaltado frente ao porcelanato polido, visto que o primeiro apresenta 55,11% de sua massa de grãos até 100 mesh, enquanto o polido, 47,39% de massa. Tal comportamento está de acordo com os dados apresentados pela indústria de cerâmica de revestimento já que somente o porcelanato esmaltado tem classificação PEI (*Porcelain Enamel Institute*) que se refere à resistência a abrasão.

As Figuras 5.1 e 5.2 demonstram as distribuições granulométricas para os dois materiais.

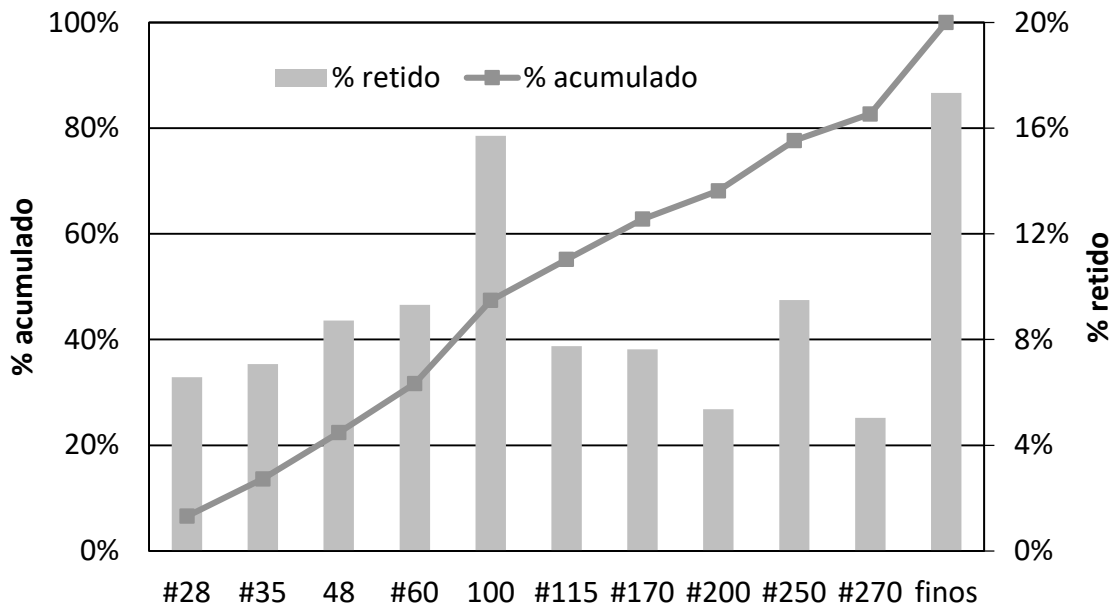


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica do porcelanato polido

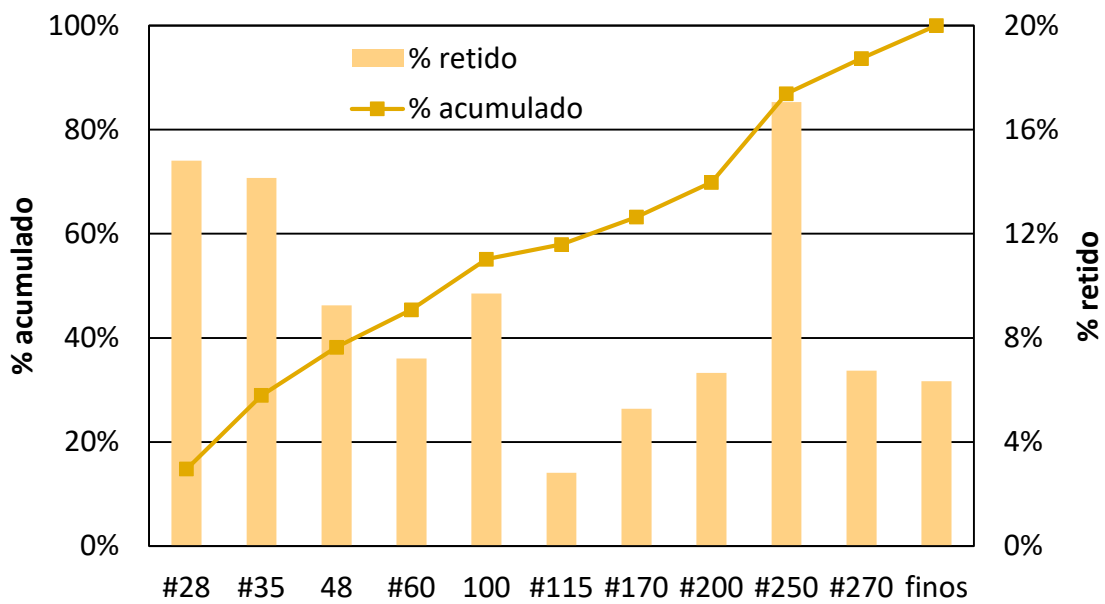


Figura 5.2 – Distribuição granulométrica do porcelanato esmaltado

5.1.2. Caracterização mineralógica

Para a caracterização mineralógica das matérias primas foram realizadas as técnicas de Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia de Varredura (MEV).

5.1.2.1. Análise por fluorescência de Raios-X (FRX)

Os resultados obtidos na análise de FRX para os resíduos estudados são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Composição química elementar das sobras de porcelanato polido e esmaltado.

Componente	% (massa) resíduo porcelanato polido	% (massa) resíduo porcelanato Esmaltado
SiO ₂	69,608	62,013
Al ₂ O ₃	20,125	23,212
CaO	0,624	7,467
Fe ₂ O ₃	1,472	1,901
K ₂ O	2,899	1,909
TiO ₂	0,252	0,568
SO ₃	0,027	0,093
MgO ₂	0,038	0,620
Na ₂ O	3,720	1,350
P ₂ O ₅	0,094	0,078
ZrO ₂	0,300	0,423
MnO	0,038	-
SrO	0,008	0,037
ZnO	0,380	0,318
Rb ₂ O	0,026	0,011
CuO	0,010	-

A partir dos dados da Tabela 5.2, é possível verificar que a caracterização química do resíduo de porcelanato é essencialmente constituída pelos óxidos de SiO₂, Al₂O₃, K₂O e Na₂O. Apontam ainda a presença fundentes, K₂O e Fe₂O₃, totalizando 4,30% e 3,81% para os porcelanatos polido e esmaltado, respectivamente. Não foi considerado a perda ao fogo, visto que analisou-se um material que foi previamente queimado.

5.1.2.2. Análise por Difração de Raios –X (DRX)

Os resíduos de porcelanato apresentaram os difratogramas da Figura 5.3. Em geral, as massas de grês porcelanato são preparadas a partir de uma mistura de argilas íltico-cauliníticas, feldspatos, areias de quartzo ou feldspáticas, caulins, corantes e outros componentes.

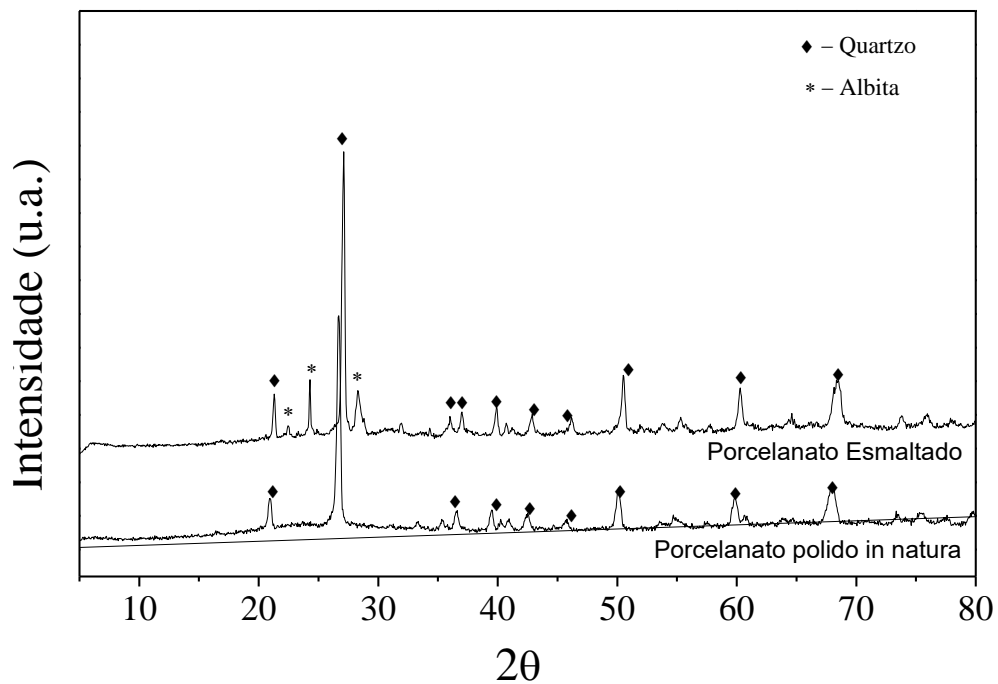


Figura 5.3 – Difratoograma do porcelanato polido e do porcelanato esmaltado in natura

Nos difratogramas dos porcelanatos *cominuídos in natura* é possível observar a presença de Quartzo (SiO_2) JCPDS (46-1045). No porcelanato esmaltado, observa-se, além do pico de quartzo, o pico da albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) JCPDS (09-0466), um feldspato usado na formulação de porcelanato que atua como fundente. Logo, é possível inferir que, independentemente de ser polido ou esmaltado, o material cerâmico estudado é composto principalmente por quartzo.

5.1.2.3. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise microestrutural do porcelanato polido está ilustrada na Figura 5.4.

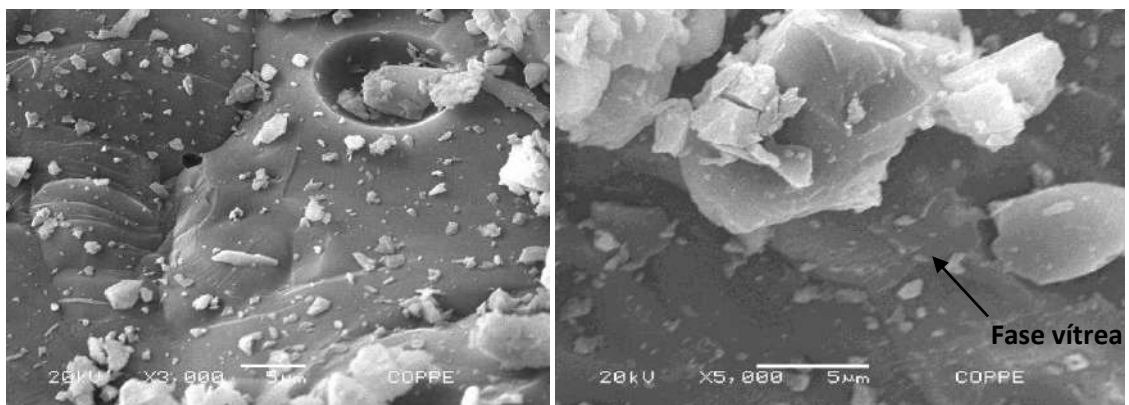


Figura 5.4 – Fotomicrografia do porcelanato polido cominuído *in natura*

Observa-se a superfície do porcelanato polido, que possui um aspecto homogêneo pouco poroso de natureza densa e formato irregular. Verifica-se a presença de uma fase vítrea formada pelo quartzo que se dissolveu parcialmente.

A análise microestrutural do porcelanato esmaltado está ilustrada na Figura 5.5. Observa-se na figura, a superfície do porcelanato esmaltado, que possui um aspecto heterogêneo pouco poroso, de natureza densa, e formato irregular.

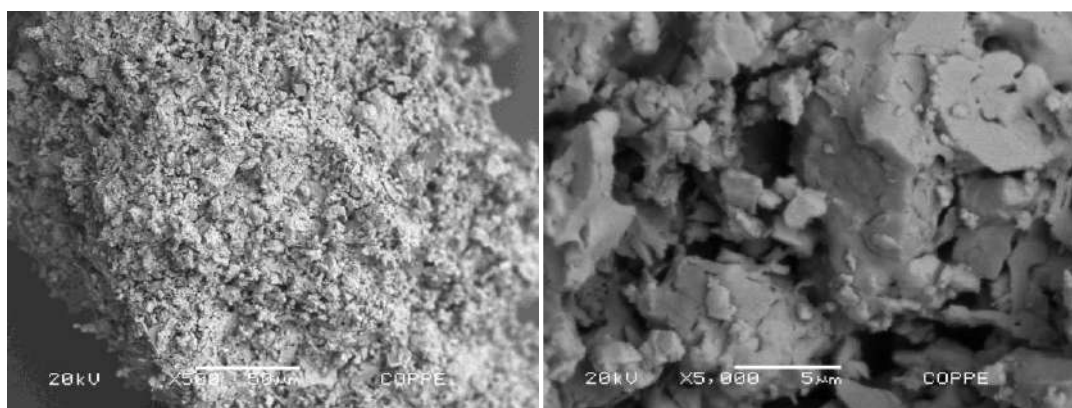


Figura 5.5 – Fotomicrografia do porcelanato esmaltado cominuído in natura

5.2. Avaliação dos corpos de prova após a queima

De todos os estágios no processo de produção de peças cerâmicas, a queima é a mais importante. Enquanto a massa cerâmica é aquecida, nela há diversas transformações químicas e físicas ocorrendo e ao passo que o processo de queima avança, o grau de sinterização aumenta. Essa característica tem influência direta nas propriedades que aqui serão analisadas.

Para avaliar as propriedades físico-mecânicas de cada produto final, foram realizados os ensaios físico-mecânicos de: Retração Linear (RL), Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e de Tensão de Ruptura à Flexão em três pontos.

5.2.1. Porcelanato Polido

Durante o procedimento de produção dos corpos cerâmicos, pôde-se determinar de forma preliminar que o porcelanato polido produzia corpos de prova frágeis quando utilizadas as partículas retidas nas peneiras de 115 e 170 mesh, tornando seu manuseio mais complexo. Após a etapa de secagem, confirmou-se a fragilidade dos corpos verdes. As granulometrias de 115# e 170# apresentaram quatro das cinco amostras fragmentadas após a remoção da umidade.

A resistência a verde ou a seco, é uma propriedade importante e que se deve dar a devida atenção visto que demonstra a presença de problemas como trincas, conformação não adequada, não uniformidade da densidade ou a presença de partículas grossas. O corpo de prova úmido apresenta forças capilares compressivas que mantém as partículas próximas. Durante a secagem com a evaporação da água, a tensão capilar induzida desaparece, restando somente as forças iônicas atraindo os cristais. Desta forma, o corpo verde está suscetível a estresses que possam causar fraturas e trincas, comprometendo sua estrutura (RING, 1996).

A baixa resistência a seco das amostras de 115# e 170# foi atribuída ao tamanho de partícula grande, não permitindo o empacotamento adequado e conseqüentemente, as forças iônicas não sendo suficiente para manter a conformação.

A sinterização dos corpos restantes das granulometrias de 115#, 170#, ratificou a existência da alta fragilidade das amostras, visto que trincaram logo no início do processo de queima. As amostras de 200#, também apresentaram fraturas após essa etapa. Os corpos de prova de 250# e 270# não apresentaram problemas durante a produção. Na figura 5.6 estão ilustradas as peças.



Figura 5.6 – Corpos de prova de porcelanato polido (Fonte: Própria autora, 2017)

5.2.2. Porcelanato Esmaltado

A produção das peças utilizando o porcelanato esmaltado seguindo, a metodologia apresentada neste trabalho, não demonstrou nenhum problema. As amostras foram todas queimadas por duas horas a 1200°C, não havendo fraturas após o resfriamento. Na figura 5.7 estão representados os corpos de provas produzidos com porcelanato esmaltado.



Figura 5.7 – Corpos de prova de porcelanato esmaltado (Fonte: Própria autora, 2017)

5.3. Caracterização física e mecânica dos corpos de prova cerâmicos

Como a finalidade deste estudo foi avaliar a influência da granulometria nas propriedades do produto final, os resultados foram dispostos de maneira separada por matéria prima utilizada.

Os resultados de cada análise foram obtidos pela média aritmética dos cinco corpos de prova de cada granulometria. Em sequência foram avaliadas e discutidas as propriedades dos corpos de prova.

5.3.1. Propriedades física e mecânica dos corpos de prova preparados com resíduo de porcelanato polido

As variações de comportamento no que tange as propriedades físico-mecânicas como Retração Linear (RL), Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (AA), Densidade (D) e Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) em função das diferentes granulometrias foram analisadas e os resultados obtidos para os corpos de prova preparados com porcelanato polido são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores médios dos corpos de prova de porcelanato polido

	#115		#170		#200		#250		#270	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Retração Linear (%)	-	-	-	-	15,87	-	16,28	0,28	12,38	0,89
Absorção de Água (%)	-	-	-	-	2,36	0,29	0,37	0,07	0,22	0,22
Porosidade Aparente (%)	-	-	-	-	5,67	0,63	0,84	0,15	0,51	0,12
Densidade	-	-	-	-	2,22	0,01	2,29	0,01	2,29	0,05
Tensão de Ruptura à Flexão (MPa)	-	-	-	-	33,31	-	46,27	4,68	33,04	1,05

5.3.1.1. Retração Linear (RL)

No que diz respeito ao aspecto dimensional, durante o processo de sinterização do porcelanato, por volta de 1200°C, ocorrem retrações no produto que aumentam à medida que a temperatura aumenta. Este comportamento é consequência da fase líquida formada, promovida pela presença de materiais fundentes. Essa fase líquida é responsável pelo processo de vitrificação que reduz gradativamente o volume de poros, causando a densificação do material.

O chamote utilizado foi estabilizado a temperaturas tão altas quanto aquelas nas quais a peça será queimada; assim, nenhuma reação ocorre posteriormente nesse material. O chamote apresenta retração apenas devido aos pontos de contato que se sinterizam.

O controle da retração e a sua redução estão relacionados com o empacotamento das partículas, quanto maior o grau de empacotamento, maior será a retração da peça cerâmica. Desta forma, a avaliação da retração das amostras informa a influência que a alteração dos tamanhos das partículas exerce sobre o empacotamento.

Avaliando o comportamento do porcelanato polido, representado na figura 5.8, pode-se verificar essas duas situações. Nas faixas granulométricas de #200 e #250 há pouca variação na retração, apresentando uma média de 16,08% e nos corpos de prova produzidos com a massa de #270, temos uma redução significativa para 12,38%.

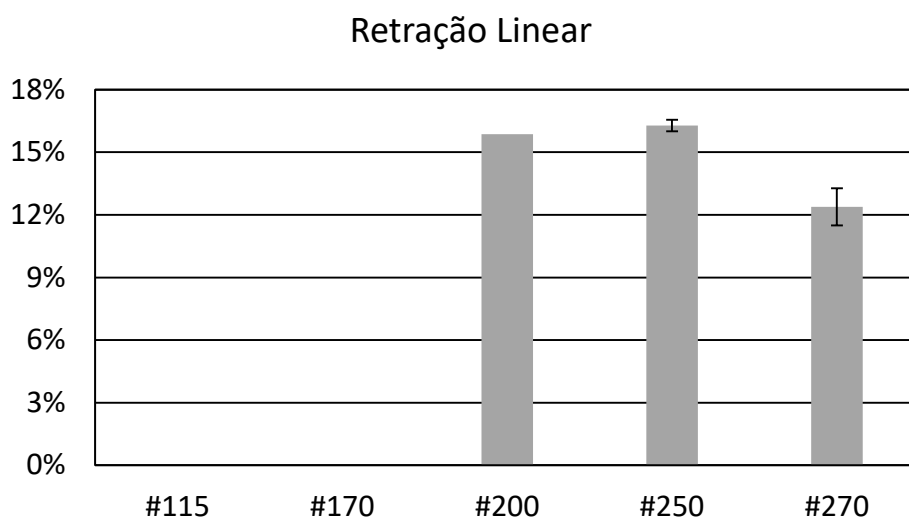


Figura 5.8 – Retração Linear das peças produzidas com porcelanato polido

5.3.1.2. Absorção de Água

Conforme mencionado anteriormente, a matéria prima utilizada já sofreu o processo de sinterização previamente. Desta forma, poucos foram os pontos onde houve essa transformação termoquímica. Assim, o parâmetro que mais influenciou a quantidade de água absorvida, foi o grau de empacotamento da amostra. Espera-se que a redução da granulometria permita uma maior aproximação das partículas, e que com a sinterização, haja uma diminuição da quantidade de poros abertos, locais onde haveria o acúmulo de água.

Observando a Figura 5.9, nota-se de forma bem expressiva, o decaimento da absorção de água com a diminuição da granulometria. Obtendo-se os valores de 0,37% para a faixa de 250# e 0,22% para a de 270#. Desta forma, de acordo com a Tabela 3.2, pode-se classificar esses produtos como porcelanato e o material de 200#, com absorção de 2,36%, estaria na categoria grês.

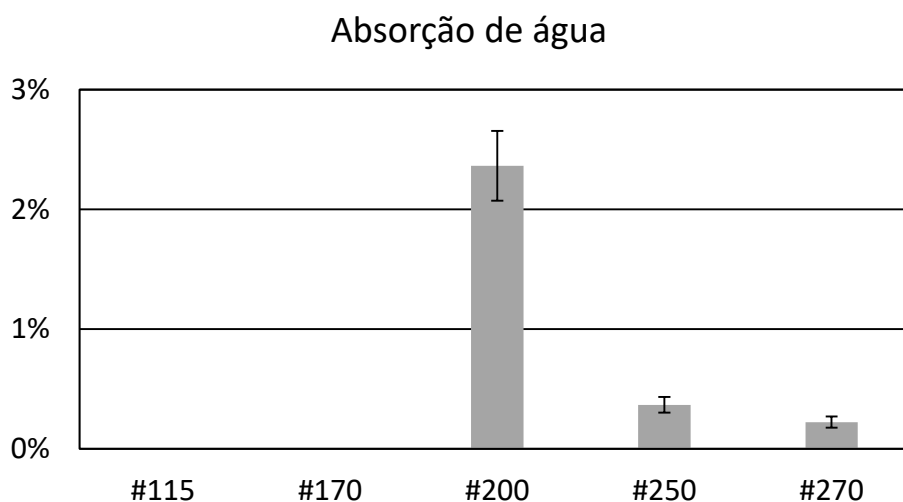


Figura 5.9 – Absorção de água das peças produzidas com porcelanato polido

5.3.1.3. Porosidade Aparente (PA)

Diferentemente da propriedade anterior de absorção de água, a porosidade aparente não somente expressa o volume de poros abertos, como também considera o espaço ocupado pelos poros fechados. Porém, como essa propriedade, assim como a absorção de água, é uma representação da porosidade do material, espera-se que ambos os ensaios apresentem tendências semelhantes.

Os resultados do porcelanato polido, representados no gráfico da Figura 5.10, para a porosidade aparente seguiram a direção dos resultados do ensaio de absorção, sendo a redução no volume ocupado pelos poros abertos e fechados mais significativo nas faixas mais finas (250# e 270#), correspondendo a 0,84% e 0,51%, respectivamente. A partir dos resultados da absorção de água para essas faixas (0,37% e 0,22%), pode-se obter apenas o volume dos poros fechados, sendo eles 0,47% e 0,29% para os tamanhos de 250# e 270#, respectivamente. Ou seja, a redução dos poros fechados confirmou o melhor empacotamento das partículas.

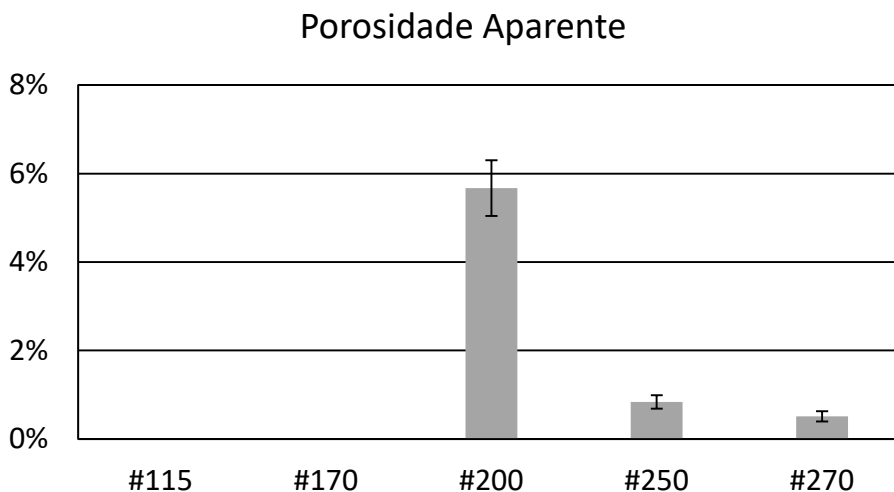


Figura 5.10 – Porosidade Aparente das peças produzidas com porcelanato polido

5.3.1.4. Densidade (D)

Densidade é definida simplesmente como uma razão de massa e volume. Neste trabalho ela foi obtida através da razão entre a porosidade aparente e a absorção de água. A densificação do material é função das diversas características e eficiência das etapas de processamento do material. Uma forma mais direta de avaliar o empacotamento das partículas é a densidade, uma propriedade não regulamentada, mas que auxilia no controle durante o processamento.

A partir do gráfico da Figura 5.11, pode-se perceber um leve aumento na densidade das amostras de porcelanato polido. A variação está de acordo com o esperado e com os resultados das análises de porosidade anteriores, onde uma redução no volume de poros promove um aumento na densidade do material.

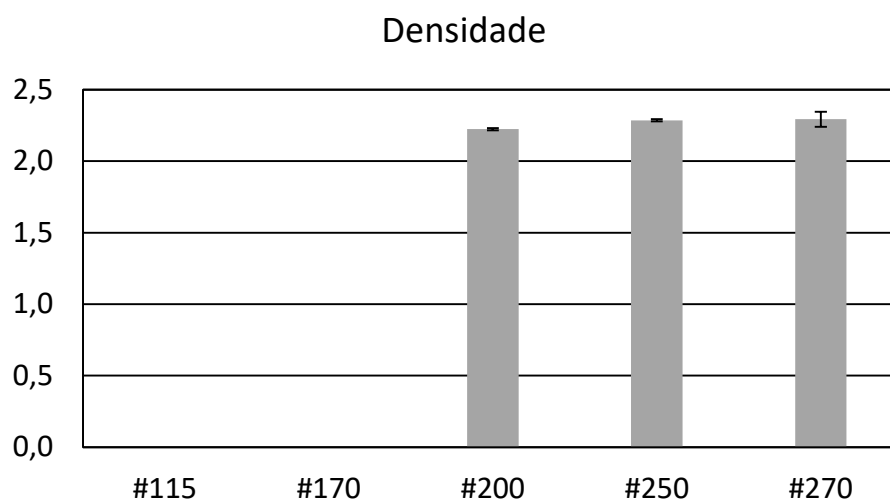


Figura 5.11 – Densidade das peças produzidas com porcelanato polido

5.3.1.5. Tensão de Ruptura à flexão (TRF)

A resistência mecânica de um produto cerâmico está diretamente relacionada com a força de coesão entre as partículas e com a porosidade do material. Quanto mais poroso, maior a possibilidade de o material apresentar trincas e falhas e, portanto, menor será sua resistência, reduzindo-se os valores de TRF. Ademais, outros influenciadores do grau de resistência são o método de prensagem e com a uniformidade da massa cerâmica, de forma a se obter uma densidade uniforme na peça. (NORTON, 1973).

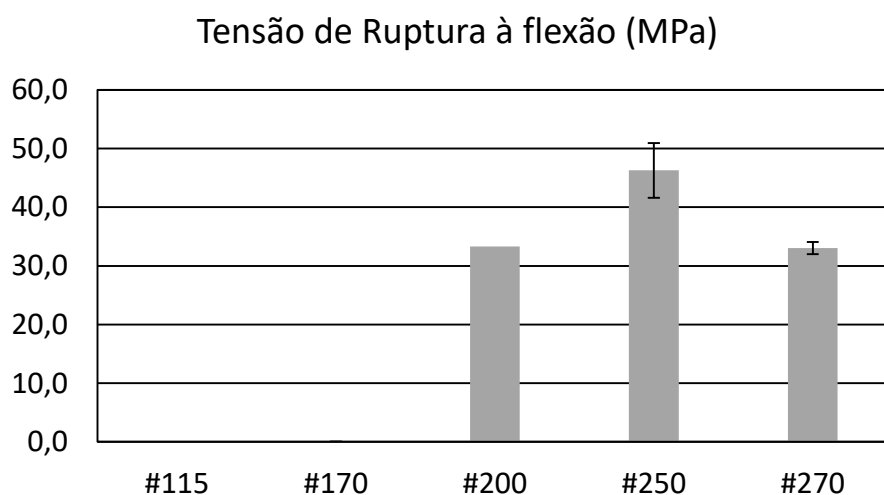


Figura 5.12 – TRF das peças produzidas com porcelanato polido

Os corpos de provas produzidos com as granulometrias de 250# e 270# do resíduo de porcelanato polido podem ser classificados como um produto porcelanato e grês respectivamente, de acordo com a NBR-13818. A norma regulamenta especificações e

métodos de ensaio para placas cerâmicas para revestimento, relaciona a Absorção de Água com a Tensão de Ruptura à Flexão e determina valores mínimos de TRF para cada faixa de AA encontrada (Tabela 3.2).

5.3.2. Propriedades física e mecânica dos corpos de prova preparados com resíduo de porcelanato esmaltado

As variações de comportamento no que tange as propriedades físico-mecânicas como Retração Linear (RL), Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA), Densidade (D) e Tensão de Ruptura a Flexão (TRF) em função das diferentes granulometrias foram analisadas e os resultados obtidos são mostrados Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores médios dos corpos de prova de porcelanato esmaltado.

	#115		#170		#200		#250		#270	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Retração Linear (%)	16,05	0,25	17,06	0,22	15,32	0,37	16,21	0,40	16,25	0,46
Absorção de Água (%)	0,50	0,08	0,39	0,06	0,26	0,11	0,19	0,06	0,06	0,05
Porosidade Aparente (%)	1,11	0,16	0,86	0,13	0,57	0,24	0,42	0,14	0,15	0,11
Densidade	2,22	0,04	2,21	0,02	2,22	0,02	2,25	0,04	2,26	0,05
Tensão de Ruptura à Flexão (MPa)	39,28	1,27	39,70	1,46	37,19	1,56	39,85	2,73	45,54	3,69

5.3.2.1. Retração Linear (RL)

Apesar da Retração Linear não ser um parâmetro regulamentado pelo órgão de normatização responsável (ABNT), ela é um importante parâmetro industrial, pois o percentual de retração durante a queima de um material específico deve ser conhecido para que se produza um corpo verde nas dimensões necessárias para que, com a retração, se atinja uma peça calcinada com dimensões padronizadas.

A retração linear pós-queima dos corpos de prova produzidos a partir do porcelanato esmaltado está representado na Figura 5.13 para todas as faixas granulométricas utilizadas.

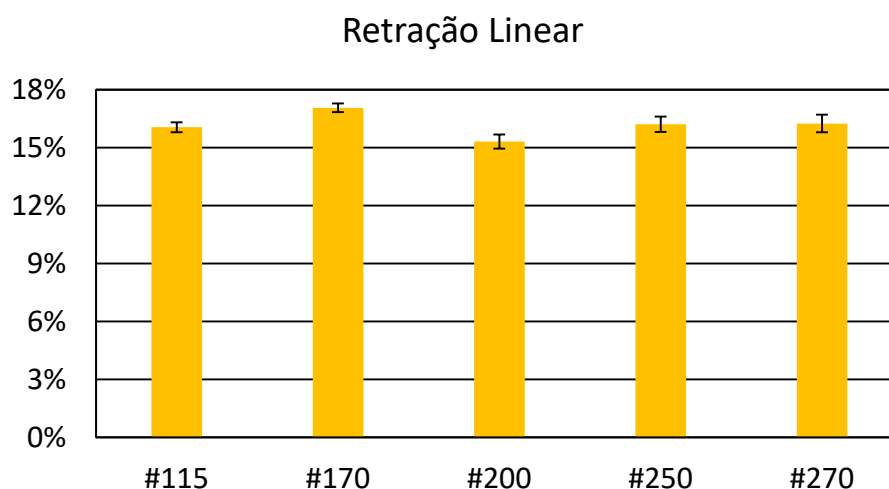


Figura 5.13 – Retração Linear das peças produzidas com porcelanato esmaltado

Os resultados expressam uma tendência semelhante ao longo das cinco granulometrias, apontando para uma média de 16,18%. Apesar do comportamento coerente com a teoria, os corpos de prova produzidos não tiveram um empacotamento suficiente para reduzir o grau de retração, houve apenas a contribuição da retração decorrente da sinterização dos pontos de contato entre as partículas.

5.3.2.2. Absorção de Água (AA)

Em relação aos dados obtidos no ensaio de absorção de água observa-se uma diminuição do percentual de absorção de água à medida que o granulometria diminui.

Quando materiais à base de cerâmicos são aquecidos a uma faixa de temperatura de 1000-1200°C, algumas reações complexas e intrincadas podem ocorrer. Uma dessas reações é a vitrificação que consiste na formação gradual de um vidro líquido que flui para o interior do corpo de prova e preenche parte do volume dos poros. O grau de vitrificação depende da temperatura e do tempo de queima, assim como da composição da massa cerâmica. Essa fase tende a escoar ao redor das partículas que permanecem sem fundir e preenchem os poros como resultado de forças de tensão superficial (ou por ação capilar) (CALLISTER, 2007). A Figura 5.14 apresenta os resultados de absorção de água para o porcelanato esmaltado.

Absorção de água

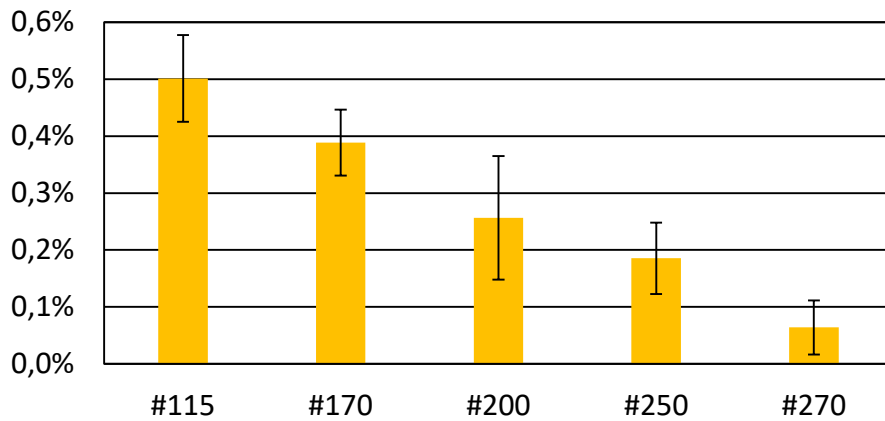


Figura 5.14 – Absorção de água das peças produzidas com porcelanato esmaltado

No porcelanato esmaltado também se pode constatar a influência do tamanho de partícula na porosidade do material queimado. Pode-se observar que todas as faixas granulométricas apresentam valores iguais ou abaixo de 0,5% e, conforme os dados da Tabela 3.2, a porcentagem de água absorvida pela cerâmica define a classe do produto. Verifica-se, então, que todos os corpos de prova produzidos podem ser classificados como porcelanato. Porosidade Aparente (PA)

No gráfico da Figura 5.15, observa-se uma diminuição dos valores encontrados para a porosidade aparente à medida que o granulometria diminui de 1,11% (115#) para 0,29% (270#). As prováveis reações de vitrificação, que explicam a redução da porosidade, também parecem explicar os resultados obtidos através deste ensaio. Ou seja, os resultados dos ensaios de porosidade aparente corroboram os resultados da absorção de água.

Porosidade Aparente

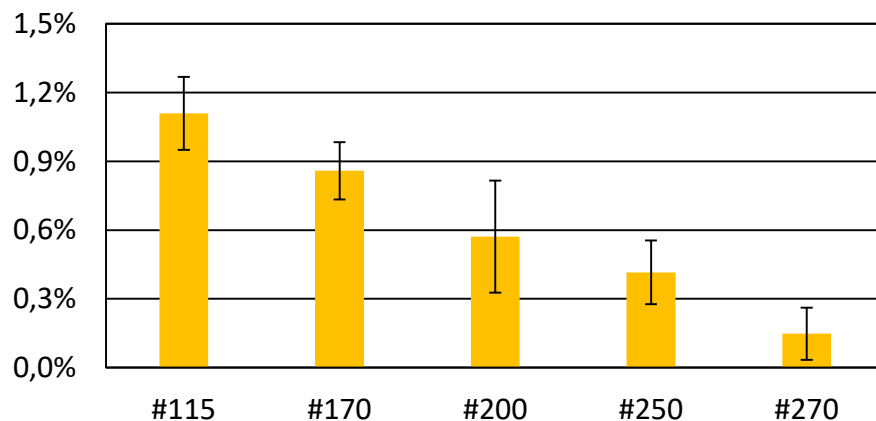


Figura 5.15 – Porosidade Aparente das peças produzidas com porcelanato esmaltado

5.3.2.3. Densidade (D)

As peças produzidas a partir do porcelanato esmaltado, apesar de apresentarem redução na quantidade de poros significativa para o tipo de material produzido, a variação total da porosidade aparente entre a maior e a menor granulometria utilizada é de 0,96%. Desta forma, é coerente as densidades apresentarem pouca variação entre si, como apresentado no gráfico da Figura 5.16.

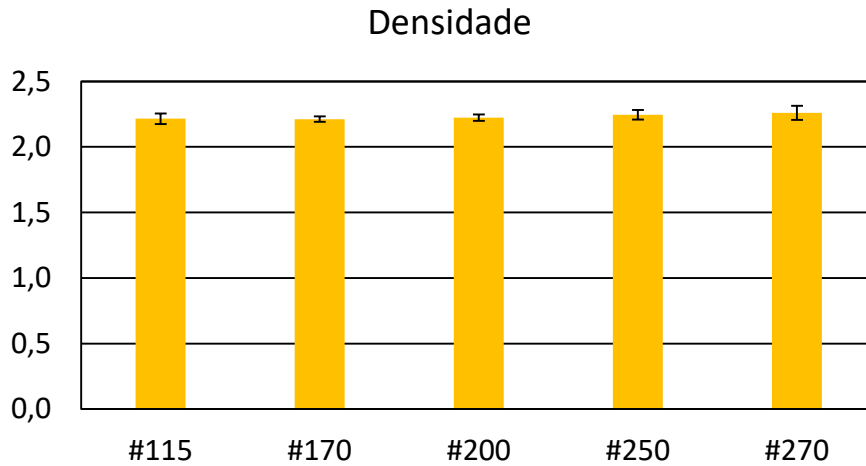


Figura 5.16 – Densidade das peças produzidas com porcelanato esmaltado.

5.3.2.4. Tensão de Ruptura a flexão (TRF)

A Figura 5.17 apresenta os resultados de TRF para os corpos de porcelanato esmaltado.

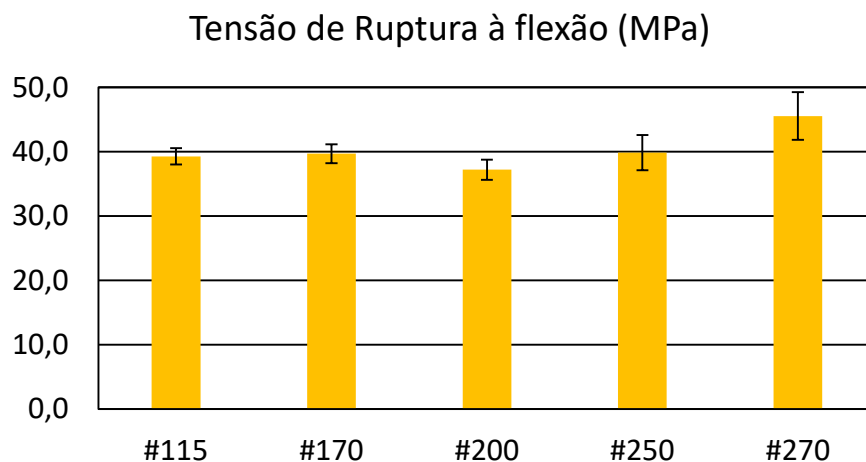


Figura 5.17 – TRF das peças produzidas com porcelanato esmaltado

Pelos dados da Figura 5.17 referente à tensão de ruptura a flexão dos corpos de prova produzidos com porcelanato esmaltado, é possível observar que para as faixas granulométricas de 115# a 250#, o valor encontrado está na ordem de 38 MPa, não havendo uma influência significativa da granulometria no valor da TRF. Entretanto, para 270# verifica-se um aumento de 38 para 45 MPa. Isto se deve, provavelmente, à sílica presente no resíduo

que ocupa os espaços vazios e aumenta a coesão entre os aglomerantes da amostra conferindo uma maior resistência.

Os corpos de provas produzidos com diferentes granulometrias do resíduo de porcelanato esmaltado podem ser classificados como um produto porcelanato de acordo com a NBR-13818 (Tabela 3.2).

5.4. Caracterização mineralógica das massas cerâmicas após a queima

5.4.1. Análise por Difração de Raios – X (DRX)

Com a finalidade de elucidar os resultados obtidos, os corpos de prova após a queima foram caracterizados por Difração de Raios – X. Foram realizadas análises para as frações de ambos os resíduos de porcelanato, antes da queima e depois da queima, para os corpos de prova preparados com as frações retidas em 115 mesh e 270 mesh.

5.4.1.1. Corpos produzidos a partir de porcelanato polido

A Figura 5.18 representa os DRX do porcelanato polido antes da queima.

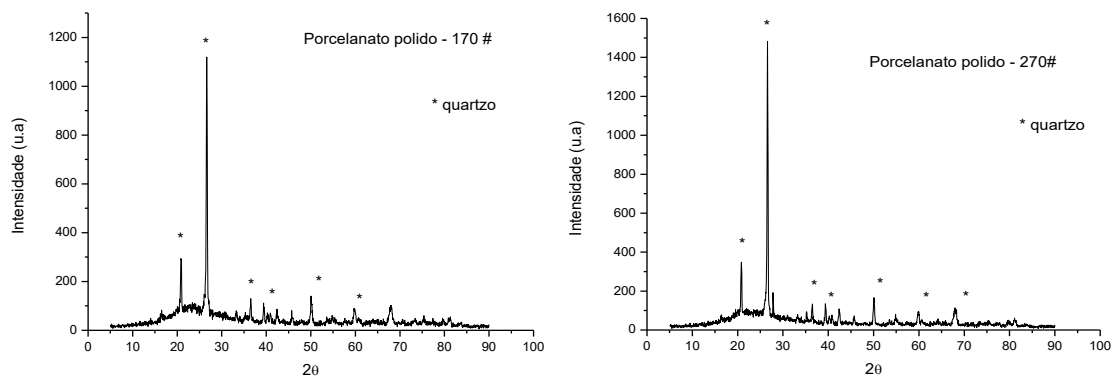


Figura 5.18 – Difratoograma do porcelanato polido das frações retidas em 170# e 270#.

Pelos difratogramas da Figura 5.18 é possível observar somente a presença do Quartzo (SiO_2) JCPDS (46-1045) independente da granulometria. O porcelanato consiste de uma matriz vítrea onde o quartzo é a maior fase cristalina. Mais de 70% do quartzo inicial permanece não dissolvido na manufatura do grês porcelanato devido ao rápido ciclo de queima empregado (PINHEIRO, 2009).

A Figura 5.19 representa os DRX do porcelanato polido após a queima.

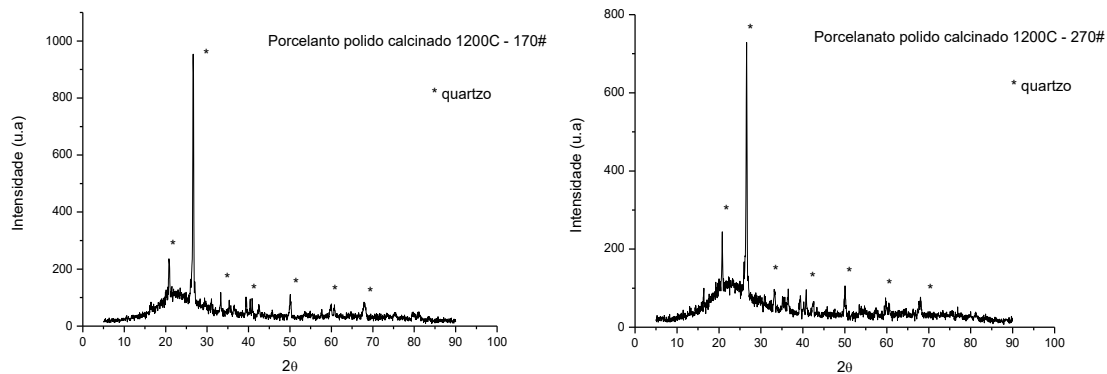


Figura 5.19 – Difratoograma do porcelanato polido calcinado a 1200°C, frações retidas em 170# e 270#

Com a análise do material calcinado (Figura 5.19), novamente não se observa a presença de nenhuma outra fase cristalina além do quartzo, em nenhuma das granulometrias. Isto explica a dificuldade de moldar os corpos de prova abaixo de 200 mesh. O aumento no conteúdo de quartzo, assim como o aumento no tamanho das suas partículas levam a um aumento do quartzo que não se dissolve durante a queima. Isto provoca alterações microestruturais, como a elevação da porosidade devido à redução do grau de sinterização do corpo cerâmico e presença de trincas (PINHEIRO,2009).

5.4.1.2. Corpos produzidos a partir de porcelanato esmaltado

A Figura 5.20 representa os DRX do porcelanato esmaltado antes da queima.

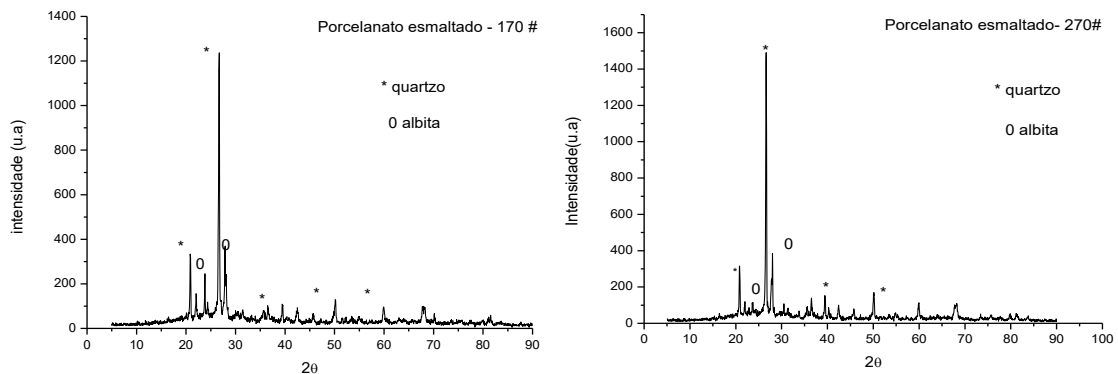


Figura 5.20 – Difratoograma do porcelanato esmaltado das frações retidas em 170# e 270#

Pelo difratograma da Figura 5.20 é possível observar que as fases cristalinas presentes são o Quartzo (SiO_2) JCPDS (46-1045) e a Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) JCPDS (09-0466). Não houve o aparecimento de outra fase cristalina à medida que a granulometria diminui.

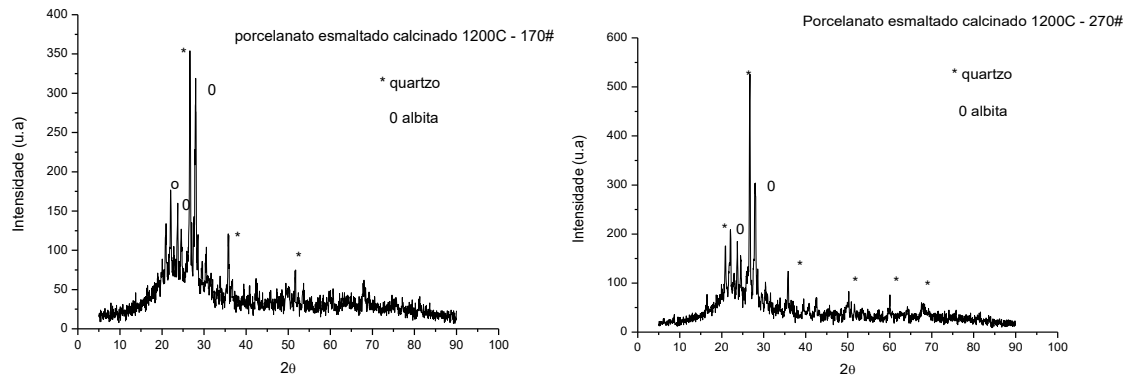


Figura 5.21 – Difratoograma do porcelanato esmaltado calcinado a 1200°C, frações retidas em 170# e 270#.

Novamente só se observaram as fases presentes do Quartzo (SiO_2) JCPDS (46-1045) e da Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) JCPDS (09-0466), sem o aparecimento de outra fase cristalina na temperatura empregada e nem à medida que a granulometria diminui.

Para os corpos de prova preparados com este resíduo não se observou dificuldade na etapa de conformação. Provavelmente a presença da Albite, que é um fundente, contribuiu para uma maior formação de fase líquida. Esta fase líquida é originada principalmente da fusão das partículas da Albite provocando o preenchimento dos poros abertos, que é responsável pela redução nos valores de absorção de água e um aumento na tensão de ruptura a flexão.

6. Conclusão

Pelos dados obtidos neste trabalho verificou-se que as peças cerâmicas produzidas utilizando 100% de chamote de porcelanato apresentam:

- Retração linear médio na ordem de 15% para os dois revestimentos utilizados, independentemente do grau de cominuição. Indicativo que não há mudança de fase do resíduo de porcelanato para a temperatura de queima (1200°C);
- Para o percentual de absorção de água observou-se uma diminuição à medida que a granulometria diminui de 2,36% (200#) para 0,22% (270#) para o porcelanato polido e nos corpos de prova produzidos a partir de porcelanato esmaltado, de 0,50% (115#) para 0,06% (270#). Muito provavelmente esta diminuição deve-se à vitrificação da sílica presente no resíduo;
- Pelos valores obtidos para a porosidade aparente nota-se a influência da granulometria, pois houve uma diminuição de 5,67% (200#) para 0,51% (270#) nas peças do revestimento polido e 1,11% (115#) para 0,29% (270#) nas peças do revestimento esmaltado;
- Como os valores de TRF estão atrelados ao percentual de absorção de água, a diminuição da granulometria corrobora os resultados encontrados, onde a menor granulometria do material produzido com porcelanato esmaltado (270#) apresentou o maior valor de resistência, em torno de 48 MPa.

De acordo com as normas NBR-13817 e NBR-13818, os materiais cerâmicos produzidos neste trabalho estão contidos na categoria porcelanato (necessário possuir absorção de água menor que 0,5% e tensão de ruptura a flexão maior ou igual a 35MPa) e na categoria grês (necessário possuir absorção de água entre 0,5% e 3,0% e tensão de ruptura à flexão maior ou igual a 30MPa).

Na produção do material à base do resíduo de porcelanato polido, a granulometria é um parâmetro que deve ser levado em consideração, visto que só é possível realizar a conformação por prensagem utilizando-se o material retido a partir da peneira de 200#.

Diferentemente do que se observa para o material à base de porcelanato polido e do que se observa na maioria dos processos industriais, a granulometria não se manifesta de modo incisivo na produção do material à base de porcelanato esmaltado. Os dados obtidos demonstraram a viabilidade de produzir materiais cerâmicos alternativos com alta qualidade sem a necessidade de se trabalhar na faixa granulométrica abaixo de 115#, diminuindo o custo de moagem. Além da vantagem econômica, existe o benefício relacionado ao meio ambiente, com um material a menos a ser descartado.

Referências Bibliográficas

- ABCERAM. <Disponível em:<<http://abceram.org.br/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- ALBERO, J. L. A. A Operação de prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte II: A compactação. Cerâmica Industrial, São Carlos, v. 5, n. 6, p. 14-20, 2000.
- ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F.G.; MACHADO, R.; BALDO, J.B.; BOSCHI, A.O. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X (A simple method for the characterization of clay minerals by X-ray diffraction). Cerâmica, v. 48, n. 305, p. 34, 2002.
- ANFACER. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/>>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- ARAÚJO, P. A. S. Caracterização de matérias-primas regionais e desenvolvimento de formulações de massas cerâmicas para porcelanato. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004, Resíduos Sólidos – Classificação, ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13816, Placas Cerâmicas – Terminologia, ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13817, Placas Cerâmicas – Classificação, ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13818, Placas Cerâmicas – Especificações e Métodos de Ensaio, ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR. 15463: 2007. Placas Cerâmicas para Revestimento – Porcelanato, 2007.
- BARBOSA, D.S.; SILVA, J.E.; ANTONIO, R.; HOTZA, D. Controle e automação na indústria cerâmica: estudo de caso na fabricação de porcelanato no Brasil. Revista Cerâmica Industrial, v. 13, n. 4, p. 23-30, 2008.
- BECKHOFF, B.; KANNGIEßER, B.; LANGHOOF, N.; WEDELL, R.; WOLFF, H. Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. 1 ed. Berlin-London: Springer, 2006.
- BERNARDIN, A. M. Cerâmicas Celulares Obtidas a partir de Resíduos de Polimento. São Paulo: Cerâmica Industrial, v. 12, n. 1/2, p. 31-35, 2007.
- BRAGANÇA, S. R.; LENGELER, H. C. de M.; BERGMANN, C. P. Rocha com espodumênio como fundente para massas cerâmicas tradicionais. Cerâmica. São Paulo, SP. Vol. 56, n. 339 (jul./set. 2010), p. 291-299, 2010.
- CALLISTER Jr, W. D.; Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, 7ª.ed., Rio de Janeiro, LTC, 2007.

CARDOSO, A. C. F.; GALATTO, S. L.; GUADAGNIN, M. R. Estimativa de Geração de Resíduos da Construção Civil e Estudo de Viabilidade de Usina de Triagem e Reciclagem. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 31, p. 1-10, 2014.

CASAGRANDE, M. C. Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v. 13, n. 1/2, p. 34-42, 2008.

DE OLIVEIRA, A. P. N. Grês porcelanato: aspectos mercadológicos e tecnológicos. *Cerâmica Industrial*, v. 3, n. 3, p. 34-41, 1998.

FERRARI, K. R.; FERRI, C.F.; SILVA, L.L.; BATISTA, L.C.Z.; FILHO, P.M.F. Ações para a diminuição da geração de resíduos na indústria de revestimentos cerâmicos e a reciclagem das “raspas”. Parte I: resultados preliminares. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 2, p. 38-41, 2002.

GRIPA, E. Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduos de Porcelanato para a Obtenção de Novos Materiais Cerâmicos. Projeto Final de Curso, 47p. UFRJ/EQ, 2013.

HECK, C. Grês porcelanato. *Cerâmica Industrial*, v. 1, n. 21-24, 1996.

JUNIOR, M. C.; BOSCHI, A.C.; MOTTA, J.F.M.; TANNO, L.C.; SINTONI, A.; COELHO, J.M.; CARIDADE, M. Panorama e perspectivas da indústria de revestimentos cerâmicos no Brasil. *Ceram. Ind*, v. 15, n. 3, p. 7-18, 2010.

MARQUES, L. N. Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. *Revista eletrônica de materiais e processos*, v. 2, n. 2, p. 34-42, 2007.

MENEGAZZO, A. P. M. Grés porcelanato. Parte I: uma abordagem mercadológica. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 1-10, 2000.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C. O Estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.

MODESTO, C. Obtenção e Caracterização de Materiais Cerâmicos a partir de Resíduos Sólidos Industriais. *Cerâmica Industrial*, v. 8, n. 4, p. 14-18, 2003.

MONFORT, E.; ENRIQUE, J.E. Economia Energética e Vantagens Meio ambientais da Reutilização de Resíduos. *Cerâmica Industrial*, v. 1, n. 4-5, 1996.

NANDI, V. S. Caracterização de resíduo sólido de ETE da indústria cerâmica de revestimento. *Cerâmica Industrial*, v. 17, n. 12, p. 32-35, 2012.

NORTON, F. H. Introdução à tecnologia cerâmica. E. Blucher, 1973.

OLIVEIRA, A. P. N. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 6, p. 37-47, nov/dez, 2000.

PAIXÃO, C. A.; CAETANO, L. F.; COLIANTE, J. G. R.; FILHO, L. C. P. S.; BERGMANN, C. P. Estudo da Viabilidade de Utilização de Resíduos Cerâmicos para Confecção de Argamassas. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 16, n. 4, p. 33-38, 2011.

PINHEIRO, B. C. A. Processamento e caracterização de massas cerâmicas incorporadas com o resíduo borra de petróleo encapsulada para fabricação de grês porcelanato. 2009. 205f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Laboratório de Materiais Avançados, Campos dos Goytacazes, 2009.

PRADO, A. C. A.; ZANARDO, A.; MENEGAZZO, A.P.M.; MORENO, M.M.T. Influência da distribuição granulométrica na estabilidade dimensional de placas cerâmicas de base vermelha. *Cerâmica*, São Paulo, v. 54, n. 332, p. 466-471, Dec. 2008.

PRESOTTO, P. Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduo de serpentinito e argila vermelha. In: 56 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2012, Curitiba. Anais do 56 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2012.

REED, J. S. Principles of ceramics processing. New York: John Wiley & Sons, 1995

RICHERSON, D. W. Modern ceramic engineering. Marcel Dekker, inc. New York, 1982.

RING, T. A. Fundamentals of ceramic powder processing and synthesis. Academic Press, 1996.

RODRIGUEZ, A. M. Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grês porcelanato. *Cerâmica Industrial*, v. 9, n. 33-38, 2004.

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

SACMI – Grês fine porcellanato – Edizione Sacmi Imola, 1996.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. Análise granulométrica por peneiramento. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 55-72.

SÁNCHEZ, E. Considerações Técnicas sobre Produtos de Revestimento Porcelânico e seus Processos de Manufatura. Parte I. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 8, n. 2, p. 7-16, 2003.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia de argilas. São Paulo: Ed. Edgard Blücher LTDA, 1989.

VAN-VLACK, L. H. Propriedades dos materiais cerâmicos. Tradução: Cid Silveira e Shiroyuki Oniki. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.