

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

ISADORA FOLCO SANTIAGO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE
PORCELANATO PARA APLICAÇÃO EM MATERIAIS CERÂMICOS

BELO HORIZONTE

2020

ISADORA FOLCO SANTIAGO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE
PORCELANATO PARA APLICAÇÃO EM MATERIAIS CERÂMICOS

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2020

ISADORA FOLCO SANTIAGO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE
PORCELANATO PARA APLICAÇÃO EM MATERIAIS CERÂMICOS

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

Aprovado em 27/11/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva - Orientador

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

Eng. Naira Raquel de Souza

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico essa dissertação à algumas pessoas que foram importantes durante todo o caminho.

Ao meu professor orientador Paulo, que dedicou tempo e disposição para me acompanhar nesse trabalho, pela paciência e por ter sido um mentor excelente durante toda minha graduação, fazendo a diferença na minha formação acadêmica.

A todos os professores e funcionários do CEFET-MG que me ensinaram muito ao longo de todos esses anos em que tive a oportunidade de estudar nessa instituição que possui tanta excelência.

À minha família, meus pais, irmãos e sobrinhos por proporcionar um ambiente em que foi possível me dedicar aos meus estudos e objetivos.

Ao meu namorado, Rodrigo, por toda a parceria e suporte durante todo o período de graduação, sempre acreditando em mim.

Aos meus colegas e todas as pessoas que tiveram presentes de alguma forma durante o percurso, fazendo a diferença na minha caminhada e me ajudando a crescer.

Muito obrigada.

RESUMO

Na produção do porcelanato, comumente realiza-se a etapa de polimento, a fim de se melhorar o aspecto estético e brilho da peça. Durante o processo de polimento, estima-se a produção de 250 g de resíduo por m² de porcelanato polido. A destinação desses resíduos é, geralmente, feita em aterros. Essa destinação possui um custo elevado e pode trazer problemas ambientais como a contaminação do solo, da água e da vegetação local. Com isso, é evidente a necessidade de se estudar novas utilizações para esse resíduo. O presente trabalho retrata um estudo da possibilidade da utilização de um resíduo de polimento de porcelanato em diferentes aplicações (em pavimentação intertravada, argamassa, bloco de concreto, cerâmica celular, cerâmica vermelha e em geopolímeros), a partir de caracterizações feitas no material (granulométrica, química, mineralógica e morfológica) e comparação das características obtidas com as características observadas na literatura para as aplicações propostas. Os resultados obtidos revelaram que o resíduo apresentou granulometria com diâmetro médio de 16,93 µm e D₅₀ igual a 10,95 µm, composição química com predominância de sílica, alumina, zircônia e outros óxidos, composição mineralógica com a presença de quartzo, mulita, zircônio e carbeto de silício e morfologia de partículas angulares e irregulares. Essas características, em comparação com os dados obtidos na literatura, se mostraram promissoras para a maioria das aplicações propostas, porém com menor probabilidade para aplicação em geopolímeros.

Palavras-chave: porcelanato, polimento, resíduo, argamassa, pavimentação intertravada, geopolímero.

ABSTRACT

During the production of porcelain tiles, the polishing step is usually performed in order to improve the aesthetic aspect and brightness of the piece. During the polishing process, it is estimated the generation of 250g of waste per m² of polished porcelain. The destination of these residues is commonly done in landfills. This destination has a high economic cost and can bring environmental problems such as contamination of the soil, water and local vegetation. Thus, it is evident the need to study new uses for this residue. The present work portrays a study of the possibility of using a porcelain polishing residue in different applications (in interlocking pavement, mortar, concrete block, cellular ceramics and in geopolymers), based on characterizations made in the material (granulometric, chemical, mineralogical and morphological) and comparison of the characteristics obtained with the characteristics observed in the literature for the proposed applications. The results obtained in this work revealed that the residue presented granulometry with an average diameter of 16.93 μm and D_{50} equal to 10.95 μm , chemical composition with predominance of silica, alumina, zirconia and other oxides, mineralogical composition with the presence of quartz, mullite, zirconium and carbide silicon and angular and irregular particle morphology. These characteristics, in comparison with the data obtained in the literature, proved to be promising for most of the proposed applications, however it is not possible to state that the studied residue would be successful for application in geopolymers.

Keywords: porcelain tiles, polishing, residue, mortar, interlocking paving, geopolymer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da produção de revestimentos cerâmicos	15
Figura 2 – Distribuição granulométrica do resíduo de polimento de porcelanato, em comparação com o cimento CP V, areia e pedrisco.....	21
Figura 3 – Imagem obtida ao MEV de amostras de resíduo de polimento de porcelanato.....	22
Figura 4 – Pavimento intertravado	24
Figura 5 – Fluxograma do procedimento experimental	34
Figura 6 – Análise granulométrica para amostra de resíduo de polimento de porcelanato (RPP).....	37
Figura 7 – Difratoograma obtido e refinamento de Rietveld, para a amostra de resíduo de porcelanato.....	40
Figura 8 – Imagem obtida ao MEV de amostra de resíduo de polimento de porcelanato metalizada	42
Figura 9 – Imagem obtida ao MEV de amostra de resíduo de polimento de porcelanato metalizada	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química, em termos de óxidos, do resíduo de polimento de porcelanato.....	19
Tabela 2 – Resultados de difração de raios X do resíduo de polimento de porcelanato.....	20
Tabela 3 – Resultados de análises granulométricas do resíduo de polimento de porcelanato.....	20
Tabela 4 – Composição química qualitativa do resíduo de polimento de porcelanato (RPP), em termos de óxidos.....	38
Tabela 5 – Indicadores estatísticos, em números, para a amostra em estudo.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al_2O_3	Óxido de alumínio (alumina)
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres
CaO	Óxido de cálcio
CO_2	Dióxido de Carbono
CPV	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de Raios X
EM	Norma Europeia
Fe_2O_3	Óxido de ferro
FRX	Fluorescência de Raios X
K_2O	Óxido de potássio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgO	Óxido de magnésio
Na_2O	Óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
RPP	Resíduo de Polimento de Porcelanato
SiC	Carbeto de Silício
SiO_2	Óxido de Silício (sílica)
SO_3	Óxido Sulfúrico
ZrO_2	Óxido de zircônio (zircônia)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1. Objetivo Geral	13
2.2 Objetivo Específico	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Porcelanato	14
3.2. Processo de Fabricação do Porcelanato	15
3.3. Resíduo de Polimento de Porcelanato	18
3.4. Reutilização do Resíduo de Polimento de Porcelanato	22
3.4.1. Bloco intertravado de concreto	23
3.4.2. Argamassa	26
3.4.3. Geopolímeros	28
3.4.4. Bloco de Concreto	29
3.4.5. Cerâmica celular	30
3.4.6. Solo	31
3.4.7. Cerâmica vermelha	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. Material	34
4.2. Métodos	34
4.2.1. Análise Granulométrica	35
4.2.2. Fluorescência de Raios X	35
4.2.3. Difração de Raios X	35
4.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura	36
4.2.5. Avaliação da reutilização do resíduo na produção de novos materiais cerâmicos	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. Análise Granulométrica	37

5.2. Fluorescência de Raios X (FRX)	38
5.3. Difração de Raios X (DRX)	39
5.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	41
6. CONCLUSÃO	44
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	47
ANEXOS	52
ANEXO A – DIFRATOGRAMAS DE RESÍDUOS DE POLIMENTO DE PORCELANATO	52
ANEXO B – DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE RESÍDUOS DE POLIMENTO DE PORCELANATO	55

1 INTRODUÇÃO

Cerâmicas de revestimento são materiais compostos de argila e outras matérias-primas inorgânicas, utilizadas comumente para revestimento de paredes e pisos e podem ser conformadas por extrusão, prensagem, entre outros processos. Essas placas podem ser esmaltadas ou não e são incombustíveis e não afetadas pela luz (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). O Brasil é o terceiro maior produtor e segundo maior consumidor de revestimentos cerâmicos (ANFACER, 2019). Em 2018, a produção de revestimento cerâmicos totalizou cerca de 871 milhões de m², sendo que os porcelanatos representaram, aproximadamente, 152 milhões m² (ANFACER, 2019).

O processo produtivo do porcelanato consiste em moagem e atomização das matérias primas, seguida de prensagem, secagem e sinterização dos corpos cerâmicos, podendo ou não existir a etapa final de polimento. Normalmente, os porcelanatos polidos possuem um maior valor agregado, já que apresentam menor rugosidade e um melhor aspecto estético e brilho, sendo mais produzidos (MARQUES et al., 2007). Esse processo gera cerca de 250 g de resíduo de por m² de porcelanato polido (JESUS, 2019). Considerando os dados de produção de porcelanato da ANFACER, pode-se estimar uma quantidade de até 38 mil toneladas de resíduo gerados no ano de 2018, por exemplo, sendo uma quantidade expressiva gerada.

No entanto, apesar da crescente da demanda de utilização do revestimento de porcelanato polido, o estudo da destinação dos resíduos gerados por esse processo não acompanhou o mesmo ritmo (SILVA, 2016). A destinação desses resíduos é comumente feita em aterros. Essa destinação possui um custo elevado e pode trazer problemas ambientais como a contaminação do solo, da água e da vegetação local (NASCIMENTO, 2016).

Com isso, alguns estudos foram destinados à reutilização desse resíduo no processo produtivo de alguns produtos. A utilização do resíduo de polimento de porcelanato diretamente no processo produtivo do próprio porcelanato não é recomendada, devido à presença do carbetto de silício (SiC) no resíduo, que se decompõe durante o processo, formando gás carbônico (CO₂). Esse gás favorece a formação de poros, trincas e deformação na peça, comprometendo as propriedades

finais do produto (MARQUES et al., 2007). A destinação do resíduo de polimento de porcelanato vem sendo estudada, portanto, em outras aplicações, como por exemplo em indústrias cimentícias e na própria indústria cerâmica (SILVA, 2016). Algumas aplicações relevantes que podem ser citadas são para piso intertravado de concreto (PURIFICAÇÃO, 2009; NASCIMENTO, 2016; PENTEADO et al., 2015), em argamassas (STEINER et al., 2015; BREITENBACH et al., 2017) e em geopolímeros (RAMOS, 2017).

Existem várias vantagens na reutilização de resíduos nos processos de fabricação, como a economia no gasto com matérias primas e de recursos minerais e menor gasto com transporte de matéria prima e de resíduos até o destino final (PURIFICAÇÃO, 2009). Diante deste panorama, este trabalho propôs, a partir da caracterização do resíduo de polimento de porcelanato, a avaliação da viabilidade de utilização deste material na aplicação de processos de fabricação de diversos materiais cerâmicos, como em pavimentação intertravada, cerâmica celular, argamassas e geopolímeros.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a possibilidade de reutilização de resíduo, proveniente da etapa de polimento de porcelanato, na fabricação de diferentes produtos cerâmicos.

2.2 Objetivo Específico

- Identificar as fases presentes no resíduo de polimento de porcelanato comparando com as fases presentes na amostra de matéria prima para a produção de porcelanato;
- Avaliar as características do resíduo, em termos de granulometria, composição química e fases cristalinas presentes, por meio de ensaio de granulometria por difração à laser, difração de raios X e fluorescência de raios X.
- Avaliar, a partir dos resultados de caracterização, a possibilidade de reutilização do resíduo de polimento de porcelanato na obtenção de geopolímeros, pavimentação intertravada, cerâmica celular, cerâmica vermelha, blocos de concreto e argamassas.
- Indicar, por comparação entre resultados de caracterização realizados e os obtidos na literatura específica, a melhor possibilidade de reutilização desse resíduo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Porcelanato

A norma NBR 15463 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) define o porcelanato como “placa cerâmica para revestimento com baixa porosidade e elevado desempenho técnico”, podendo ser ou não esmaltada, polida ou natural, retificada ou não retificada. Essas placas cerâmicas para revestimento são consideradas como um material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas, que tem como função o revestimento de pisos e paredes.

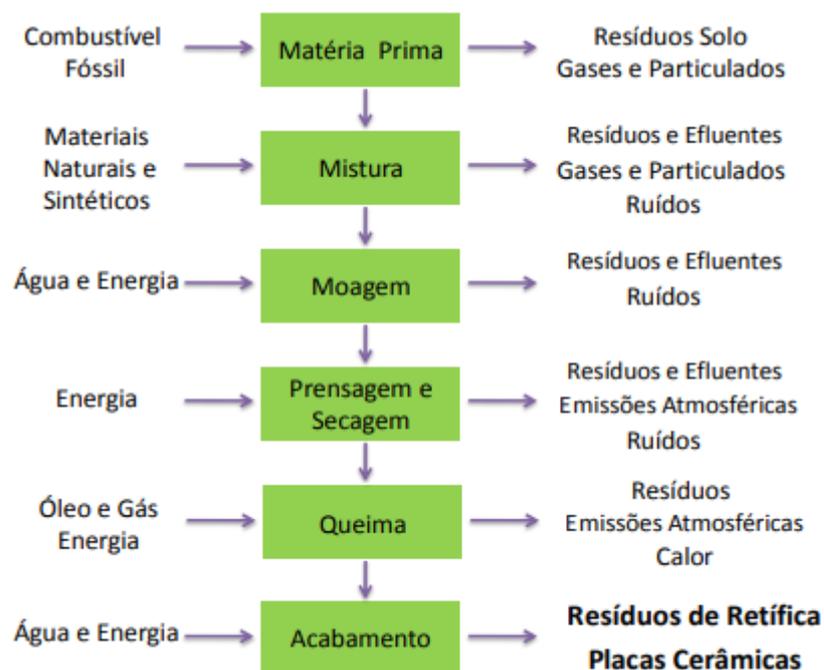
Segundo a norma NBR 13818 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), as placas cerâmicas para revestimento possuem grupos de classificação quanto a algumas características, como características geométricas e características físicas e químicas. Entre as características físicas, as placas cerâmicas para revestimento apresentam diferentes grupos de absorção de água. O porcelanato faz parte do grupo de absorção de água Bla (codificação dos grupos de absorção de água, norma NBR 13818), que significa um material prensado com absorção de água menor ou igual a 0,5 %, com elevada resistência mecânica, resistência ao risco e ao ataque químico.

Quanto à composição do porcelanato, segundo Nascimento (2016), uma massa desse material é composta por mistura de argilas, feldspatos, areias feldspáticas e, em algumas situações, caulins, filitos e aditivos. Os feldspatos, nessa composição, possuem a função de fundentes, propiciando o aparecimento das primeiras fases líquidas na sinterização. Essas fases líquidas contornam as partículas mais refratárias, as aproximando através de forças de tensão superficiais geradas nos poros mais finos, gerando a contração da peça. Com isso, os feldspatos contribuem no processo de densificação, possuindo influência direta nas propriedades mecânicas finais da peça (JESUS, 2019). Os caulins, por serem ricos em alumina, podem fazer parte da reação de vitrificação durante a sinterização, ou formar mulita com formato de agulhas, que atuam como esqueleto do corpo e contribuem para o aumento da resistência mecânica. Já as argilas têm como função proporcionar plasticidade para as peças (ROSSO et al., 2005).

3.2. Processo de Fabricação do Porcelanato

As etapas do processo de fabricação do porcelanato, de forma simplificada, podem ser representadas pelo fluxograma presente na Figura 1. Nesse fluxograma, são representadas as fases do processo, os recursos de entrada utilizados em cada fase, além dos resíduos gerados nas etapas.

Figura 1 - Fluxograma da produção de revestimentos cerâmicos



Fonte: Modificado de Carvalho, 2013.

A dosagem das matérias-primas é realizada baseada em análises químicas prévias, com o controle da quantidade de cada componente, em massa. O processo pode ser realizado por meios mecânicos tradicionais ou por sistemas de células de carga deformáveis (JESUS, 2019).

A moagem de porcelanatos deve proporcionar uma elevada finura da massa, com o fim de se obter um valor de absorção de água praticamente nulo. Essa etapa deve ser feita de maneira eficiente, caso contrário, pode comprometer a reatividade

da massa na etapa de queima, tendo como consequência o arrancamento de partículas durante o polimento e o afloramento de poros fechados à superfície. A resistência mecânica também está diretamente relacionada ao tamanho dos microporos gerados no interior da peça, que depende também do tamanho de partículas da massa (ROSSO et al., 2005).

A etapa de moagem pode ser feita tanto por “via úmida” ou por “via seca”. De acordo com Moraes (2007), a moagem por via úmida apresenta melhor resultado. Esse processo tem como maior benefício a obtenção da homogeneização de um amplo espectro de matérias-primas, proporcionando um alto grau de finura e, conseqüentemente, obtendo-se pós fluidos que asseguram o enchimento ideal da forma. Ao final desse processo, o produto é uma suspensão aquosa das matérias-primas moídas, com um teor de água que varia em torno de 30 % a 40 %. Essa água é eliminada em uma etapa posterior, com o uso do atomizador (MORAES, 2007).

Após a moagem, realiza-se a atomização que é o processo em que é feita a desumidificação da suspensão obtida na moagem, através da injeção dessa suspensão a alta pressão (22 atm) dentro de uma câmara de secagem. Nessa câmara, a suspensão entra em contato com o ar a uma temperatura de, aproximadamente, 600°C, resultando na evaporação da água e tendo como produto dessa etapa grãos arredondados e com distribuição granulométrica adequada para a etapa de prensagem (JESUS, 2019). De acordo com Rosso et al. (2005), a etapa de atomização pode afetar a fluidez do pó e o preenchimento do molde na prensa e, conseqüentemente, pode alterar a resistência mecânica a verde das peças e gerar problemas dimensionais e trincas durante a queima.

A etapa de prensagem tem como objetivo a conformação da peça e a densificação do corpo cerâmico a verde. A pressão de conformação utilizada é da ordem de 45 MPa, gerando um corpo com densidade que varia entre 1,88 g/cm³ a 1,96 g/cm³, representando 75 % da densidade final do produto sinterizado. Durante o processo, os pós apresentam teores de umidade entre 5,0 % e 5,5 % e a prensagem ocorre entre uma superfície móvel (punção) e outra fixa (estampo). Quanto maior o grau de compactação do pó nessa etapa, maior a superfície de contato entre os grânulos e, conseqüentemente, maior a possibilidade de reação entre eles durante a etapa de sinterização (MORAES, 2007).

A etapa de secagem é feita a fim de se reduzir a quantidade de água utilizada para a moldagem, reduzindo o tempo gasto na etapa de sinterização (queima). Nessa etapa, é importante tomar cuidado com o parâmetro de velocidade de secagem das peças, já que uma velocidade alta pode causar fissuras na peça quando a água interna migrar para fora da peça. Além disso, deve-se ter atenção em relação às variações dimensionais em função da quantidade de água liberada, para que não surjam zonas de retração diferenciadas, que induzem o aparecimento de tensões internas no material (MORAES, 2007).

A densificação via fase líquida, reduzindo ao máximo a porosidade das peças, ocorre durante a etapa de sinterização. A manutenção das condições de contração linear e porosidade deve ser observada através do controle da quantidade e da viscosidade da fase líquida no processo (ROSSO et al., 2005). A sinterização é realizada utilizando ciclos de queima rápida, sendo que esses ciclos devem obedecer a um intervalo de tempo total de no máximo 60 minutos, com intervalo de temperatura máxima variando entre 1250 °C e 1260 °C (HECK, 1996). Na literatura, são encontrados outros valores de intervalo de tempo total de 50 minutos a 70 minutos e ciclos de temperaturas da ordem de 1200 °C a 1230 °C (OLIVEIRA, 1998). Esses conjuntos de valores são tidos como prática usual na indústria.

Por último, realiza-se o polimento das peças obtidas após o processo de sinterização. O objetivo dessa fase é a obtenção de peças com aparência brilhosa, que é uma característica desejada, pelo aspecto estético e pela facilidade de limpeza. Esse polimento é feito a partir do emprego de abrasivos (normalmente de carbetos de silício) sucessivamente mais finos para obtenção da superfície lisa e com brilho (MORAES, 2007).

O equipamento de polimento possui várias polidoras que executam o polimento quando em contato com as peças, em alta rotação, velocidade controlada e presença de água. Na primeira parte, realiza-se o desgaste acentuado da peça, com abrasivos diamantados e magnesianos de 100 mesh (0,149 mm) a 200 mesh (0,074 mm), onde se dá o nivelamento da peça. Na segunda etapa, realiza-se a preparação do polimento, utilizando-se granas de 240 mesh (0,059 mm) a 700 mesh (0,0198 mm). Na última etapa, acontece o polimento, onde não existem mais riscos na peça e ela começa a receber o brilho, utilizando granas de 800 mesh (0,019 mm) a 3000 mesh (0,0051 mm) (ROSSO et al., 2005).

Na etapa de polimento, é importante se observar a pureza das matérias primas do porcelanato, para garantir a qualidade do polimento. Além disso, a qualidade e a quantidade da água também são importantes para o resultado final do produto, sendo necessária uma quantidade elevada em cada unidade de polimento (cerca de 4000 L), existindo uma necessidade de recirculação dessa água para aproveitamento, sendo preciso um tratamento químico-físico dessa água para decantação dos resíduos do polimento e uma filtro-prensagem. A água é importante durante o processo, já que tem como função a diminuição do atrito entre os abrasivos e a peça e a retirada dos resíduos gerados que ficam sobre as peças e que podem causar riscos e arranhões (ROSSO et al., 2005).

3.3. Resíduo de Polimento de Porcelanato

O resíduo de polimento de porcelanato (RPP) é definido por Breitenbach (2017) como “uma mistura de material cerâmico resultante do polimento e de material desprendido durante o processo”. Como utiliza-se água durante o processo, o material pulverulento, juntamente com essa água, forma uma “lama” que resulta em um pó de coloração branca, após seco (ARAÚJO, 2016). Vale ressaltar que o processo de fabricação do porcelanato leva à geração e o descarte de subprodutos ao longo de todas as etapas, mas a maior quantidade de resíduos gerados provém da etapa de polimento (ARAÚJO, 2016).

Normalmente, o RPP é descartado em aterros. Esse tipo de descarte propicia elevados custos por perdas, necessidade de grandes áreas para armazenagem do material de descarte e possibilidade de problemas ambientais, como transporte aéreo de material pulverulento e contaminação do solo, vegetação e lençol freático (BREITENBACH, 2017).

De acordo com Souza (2007), estima-se que, diariamente, são produzidos entre 30 toneladas e 35 toneladas de resíduo de porcelanato, apenas em uma empresa que possui um pátio de mais de 40.000 m². Com isso, existe uma necessidade de se explorar a reutilização desses resíduos, já que os estudos sobre a destinação dos resíduos não acompanharam o crescimento da demanda da utilização do revestimento de porcelanato na construção civil (SILVA, 2016).

De acordo com dados obtidos na literatura, a composição química do RPP normalmente apresenta uma elevada quantidade de sílica, proveniente do porcelanato e do abrasivo (carbeto de silício), de alumina, proveniente também do porcelanato e de óxido de magnésio, relacionado ao cimento cloro-magnésiano utilizado na fabricação do abrasivo. Também apresenta uma quantidade pequena de óxidos fundentes, originadas da peça de porcelanato (ARAÚJO, 2016). Alguns valores de composição química encontrados na literatura podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química, em termos de óxidos, do resíduo de polimento de porcelanato

Pesquisadores	Óxidos Presentes (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Outros
Silva (2012)	59,92	24,26	1,29	8,41	2,25	*	*	3,87
Marques et al. (2007)	55,16	18,75	0	10,00	0,54	0,8	0,17	14,58
Rambaldi (2007)	64,06	16,54	1,4	4,63	2,05	0,5	4,43	6,39
Bernadin (2007)	59,5	17,3	1,6	5,3	2,8	0,7	3,6	9,2
Silva (2005)	61,77	22,96	0,88	4,55	1,29	0,25	2,27	6,03
Nascimento (2016)	64,32	19,28	1,71	10,32	2,80	0,94	*	0,63
Santos (2019)	64,32	19,28	1,71	10,32	2,80	0,94	*	0,63
Breitenbach (2017)	64,00	21,70	2,60	5,40	2,00	1,00	*	0,50
Steiner (2015)	66,40	21,04	2,60	1,24	2,25	1,68	2,70	2,09
Ramos (2017)	67,70	21,00	2,60	1,10	2,30	1,80	1,80	1,7
Lorenzi (2005)	63,72	15,49	0,91	6,37	1,36	0,67	2,66	8,82
Araújo (2016)	62,57	18,71	2,63	1,20	6,42	5,53	0,02	2,92

Fonte: Adaptado de Silva, 2016.

Com relação as fases cristalinas presentes no resíduo, geralmente, observam-se a presença de mulita, quartzo, carbeto de silício e periclásio (MgO), como indicado na Tabela 2, ressaltando que os difratogramas correspondes estão em anexo (Anexo A).

Tabela 2 - Resultados de difração de raios X do resíduo de polimento de porcelanato

Pesquisadores	Fases presentes			
Marques (2007)	Mulita	Quartzo	Carbeto de silício	Periclásio
Santos (2019)	Mulita	Quartzo	Carbeto de silício	Óxido de magnésio
Bernadin (2007)	Albita	Quartzo	Zircônio	-
Pureza (2004)	Mulita	Quartzo	Albita	-
Araújo (2016)	Mulita	Quartzo	Carbeto de silício	-
Nascimento (2016)	Mulita	Quartzo	Carbeto de silício	Periclásio

Fonte: própria autora.

O quartzo é proveniente do porcelanato, da fração que não sofreu processos químicos durante a queima. A porção que sofreu processos químicos pode ser observada na forma de mulita. Já a presença de carbeto de silício está relacionada ao abrasivo e o periclásio, relacionado ao cimento magnésiano utilizado na fabricação da matriz do abrasivo. (SILVA, 2016). Em alguns casos, como observado no trabalho de Bernadin (2007), observa-se também a presença de óxido de zircônio. A presença desse óxido pode ser justificada por ser um material comumente utilizado na fabricação de placas cerâmicas com a finalidade de se obter a opacidade e alvura do material (COOK et al., 2017).

Quanto à granulometria do RPP, trata-se de um resíduo muito fino. Na literatura, o RPP é encontrado em faixas abaixo de 75 μm , com um diâmetro médio na faixa de 5 μm a 15 μm , como indicado na Tabela 3, ressaltando que as curvas de análise granulométrica correspondentes estão em anexo (Anexo B).

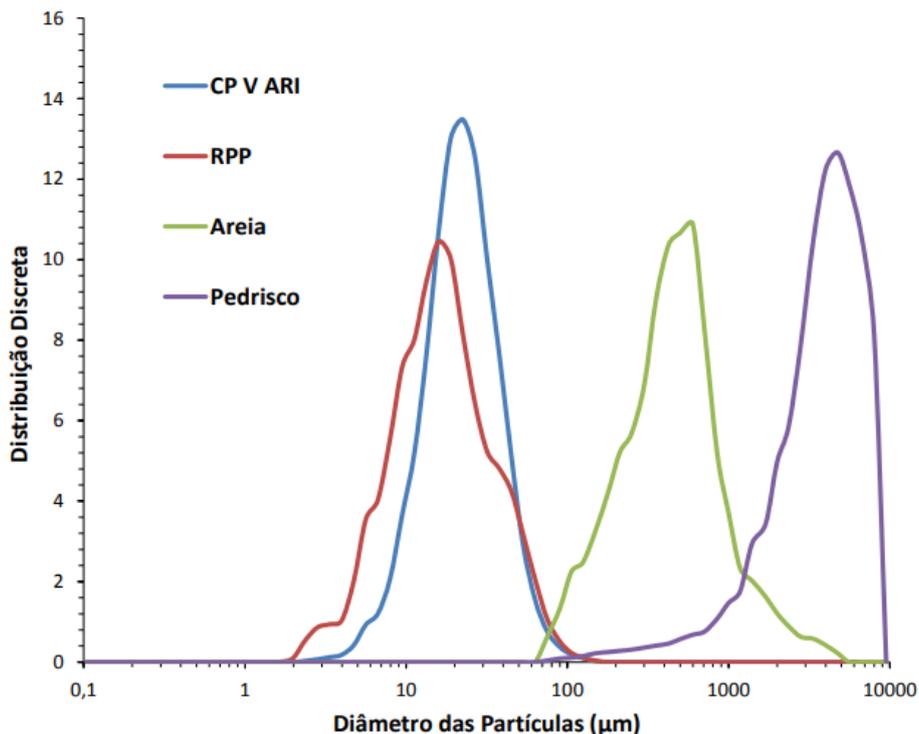
Tabela 3 - Resultados de análises granulométricas do resíduo de polimento de porcelanato

Pesquisadores	Diâmetro de partículas (μm)			
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	D-médio
Steiner (2014)	2,05	10,10	31,87	13,74
Breitenbach (2017)	1,27	5,44	11,27	5,93
Bernadin (2007)	-	-	-	10

Fonte: própria autora.

É mostrado na Figura 2 uma comparação da granulometria do resíduo de polimento de porcelanato, em relação ao cimento, à areia e pedrisco (agregados utilizados para fabricação de argamassas e concretos), percebe-se que o RPP possui granulometria mais próxima à do cimento do que dos agregados (areia e pedrisco).

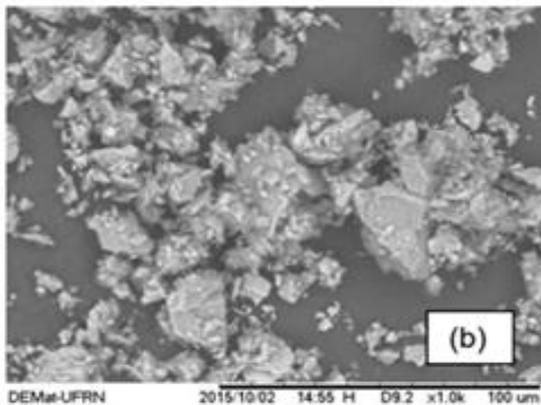
Figura 2- Distribuição granulométrica do resíduo de polimento de porcelanato, em comparação com o cimento CP V, areia e pedrisco



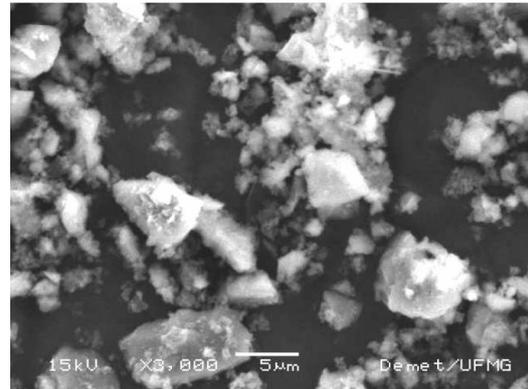
Fonte: Nascimento, 2016.

A morfologia das partículas presentes no resíduo pode ser observada na Figura 3. De acordo com os pesquisadores, geralmente, os resíduos apresentam partículas com formatos irregulares e angulares. Além disso, eles observaram a formação de aglomerados de partículas, indicando que essas partículas apresentam uma granulometria fina.

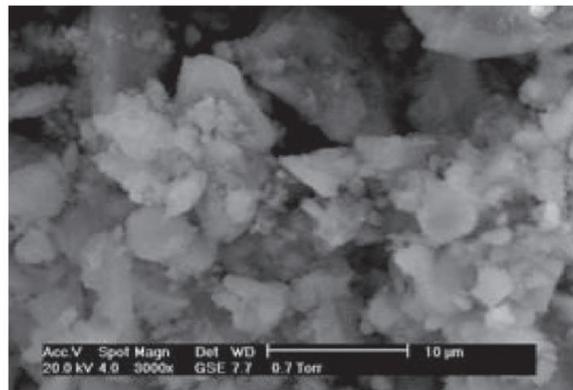
Figura 3 – Imagens obtidas ao MEV de amostras de resíduo de polimento de porcelanato



Fonte: Silva, 2016



Fonte: Silva, 2005



Fonte: Breitenbach et al., 2017

3.4. Reutilização do Resíduo de Polimento de Porcelanato

Considerando a geração anual expressiva de resíduos de polimento de porcelanato (cerca de 38 mil toneladas), fizeram-se necessários estudos acerca da destinação desse produto. Alguns empecilhos ambientais e econômicos são observados na destinação do RPP. De acordo com a norma NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), o resíduo é classificado como não inerte (classe II-a), sendo exigida uma disposição final controlada. Considerando esse fator, alguns custos de transporte são gerados, sendo estimados cerca de R\$ 300,00 por tonelada transportada (MATOS, 2019). Em contraponto, a destinação do resíduo para produção de novos produtos cerâmicos pode gerar um valor agregado ao material. Além dos fatores econômicos citados, o

reaproveitamento do resíduo gerado em larga escala e a consequente redução de áreas de aterro controlado são fatores ambientais importantes de serem considerados.

Inicialmente, foram propostos estudos acerca da reutilização do resíduo de polimento de porcelanato no próprio processo de fabricação do porcelanato. Entretanto, foi observado que esse resíduo possui componentes químicos que favorecem a formação de uma porosidade indesejada e causa uma expansão volumétrica inadequada do material, sendo inapropriado para a utilização em produtos densos como o porcelanato. Essa expansão acontece pela presença de partículas de carbeto de silício, que em determinada temperatura se decompõem, gerando CO₂, que provoca uma expansão volumétrica no material, em conjunto com o processo de vitrificação do material cerâmico, de forma que a superfície se torna impermeável à passagem desse gás para o exterior da peça (SILVA, 2016). Com isso, a reutilização do resíduo foi estudada para diferentes aplicações na indústria cerâmica.

3.4.1. Bloco intertravado de concreto

De acordo com a norma NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), blocos intertravados de concreto são componentes pré-moldados, utilizados como material de revestimento em um pavimento intertravado. O pavimento intertravado (Figura 4) é um pavimento flexível, no qual sua estrutura possui uma camada de base e uma camada de revestimento, constituída de peças justapostas de concreto, sem uma camada de assentamento e com suas juntas preenchidas por material de rejuntamento e sendo o intertravamento do sistema proporcionado pela contenção. Um grande diferencial e relevância desse tipo de pavimentação é o fato de poder ser desmanchado e reconstruído com 100 % de aproveitamento das peças, além de permitir uma diversidade de geometrias e cores, característica relevante para áreas de trânsitos de pedestres ou veículos (NASCIMENTO, 2016).

Figura 4 - Pavimento intertravado



- (a) Em fase de acabamento.
- (b) Detalhe de assentamento dos blocos.

Fonte: Carvalho, 2013.

Nascimento (2016) estudou a incorporação do resíduo de polimento de porcelanato em blocos intertravados de concreto para pavimentação. A granulometria do resíduo utilizado apresentou valores predominantemente entre 10 e 20 μm , sendo menor que a granulometria observada nos agregados areia e pedrisco, se aproximando mais da granulometria observada no cimento CP V (Figura 2). As fases cristalinas identificadas no resíduo foram a mulita, carbeto de silício e óxido de magnésio (Anexo A). A análise química, realizada por FRX, indica uma quantidade predominante de sílica e alumina, com a presença de outros óxidos como óxido de magnésio, óxido de potássio e óxido de ferro, como apresentado na Tabela 1.

Quanto à avaliação dos concretos incorporados com resíduo de polimento de porcelanato, os blocos que tinham a incorporação do resíduo apresentaram menor capacidade de absorção de água, cumprindo os requisitos da norma NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), mantiveram a resistência à abrasão, porém não apresentaram uma resistência à compressão satisfatória para atividades onde tem fluxo de carros. Dessa forma, a incorporação do resíduo de polimento de porcelanato, nos estudos de Nascimento (2016), é recomendada para implantações que não exijam uma boa resistência e exija um bom acabamento, por exemplo, para fluxo de pedestres.

Penteado et al. (2015) também realizaram estudos acerca do reaproveitamento de resíduo de polimento de placas cerâmicas, incluindo resíduo de polimento de

porcelanato, para reutilização em blocos de pavimentação. O resíduo de polimento de porcelanato utilizado apresentou uma granulometria que varia entre 70 μm e 120 μm , se aproximando mais da granulometria da areia do que do cimento. As fases cristalinas observadas foram quartzo, zirconita e traços de óxido de ferro e calcita.

Quanto a resistência à compressão, todos os blocos, independentemente do tempo de cura (7 ou 28 dias) e se o resíduo foi utilizado em substituição a areia ou ao cimento se mostraram eficientes para serem utilizados para pavimentação destinada ao tráfego de veículos leves, de acordo com a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Para o tráfego de veículos pesados, as amostras em que o RPP foi utilizado em substituição à areia se mostraram eficientes, enquanto as amostras em que o RPP foi utilizado em substituição ao cimento apresentaram uma performance satisfatória para até 10 % de resíduo, considerando um período de 7 dias e até 20 % de substituição, considerando um período de 28 dias. Os melhores resultados foram observados no período de 28 dias, para 30 % de substituição à areia e 5 % para substituição ao cimento.

Na avaliação da porosidade, Penteado et al. (2015) observaram que há uma tendência de aumento na porosidade e na absorção de água com o aumento da porcentagem de resíduo, o que justifica a queda na resistência à compressão. Todas as amostras apresentaram um valor de absorção de água abaixo de 6 %, sendo valores aceitáveis, de acordo com a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Com esse estudo, Penteado et al. (2015) concluem que a utilização do resíduo de polimento de porcelanato como material alternativo a esse processo é promissora.

Outro estudo acerca da reutilização do resíduo de polimento de porcelanato como substituição para produção de concreto intertravado foi realizado por Santos (2019). A granulometria observada do resíduo de polimento de porcelanato no estudo de Santos (2019) foi de um diâmetro médio de 4,32 μm , sendo mais fino que o cimento que apresenta um diâmetro médio de 7,89 μm , o que favorece a atuação do resíduo como efeito fíler (preenchendo vazios, além de aumentar a viscosidade – diminuindo a penetração – do ligante asfáltico). A composição química do resíduo apresenta a predominância de SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , K_2O , CaO , Fe_2O_3 , entre outros elementos,

representados na Tabela 1. Quanto a composição mineralógica, observa-se a presença de mulita, quartzo, carbetto de silício e óxido de magnésio (Anexo A).

Quanto à resistência à compressão, para a aplicação do resíduo em substituição à matéria prima, observou-se uma queda no desempenho para um período de 7 dias e melhoria no desempenho mecânico para um período de 28 dias, para até 30 % de resíduo. Já para adição à matéria prima, o RPP contribuiu para um aumento médio de resistência tanto para 7 dias, quanto para 28 dias. Santos (2019) também observou a absorção de água, sendo que todos os traços estudados apresentaram valores de absorção aceitáveis, de acordo com a ABNT NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Com isso, observa-se a possibilidade da utilização do resíduo de polimento de porcelanato tanto para adição, quanto para substituição parcial do cimento, apresentando melhores desempenhos quando feita a adição, em comparação com a substituição.

3.4.2. Argamassa

A norma NBR 13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) define a argamassa como “uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria”.

No Brasil, são estimadas cerca de 210 milhões de toneladas por ano de consumo de agregado miúdo para concreto e argamassa, sendo grande parte desses agregados miúdos naturais (areia) extraídos de leitos de rios, tendo como consequência a retirada da cobertura vegetal e impacto ao meio ambiente. A utilização de resíduo de polimento de porcelanato como substituto parcial desses agregados é promissora pela possibilidade de preenchimento dos poros presentes na argamassa tradicional, podendo promover melhorias nas propriedades relacionadas ao desempenho mecânico, aderência e durabilidade (BREITENBACH et al., 2017).

Breitenbach et al. (2017) estudaram a adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. O resíduo utilizado por Breitenbach et al. (2017) apresentou uma composição química com presença de SiO_2 ,

Al_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , SO_3 , Fe_2O_3 , entre outros elementos, como listado na Tabela 1. As fases observadas no DRX foram predominantemente quartzo e mulita, vindos da superfície do porcelanato e SiC (carbeto de silício), proveniente do material abrasivo. Quanto à sua granulometria, o diâmetro médio observado foi de $5,93 \mu\text{m}$, sendo 50 % das partículas menores que $5,44 \mu\text{m}$ e 90% menores que $11,27 \mu\text{m}$ (Anexo B). Quanto à morfologia do resíduo, as partículas observadas através de MEV apresentaram formatos irregulares e angulares (Figura 3).

O índice de consistência dos estudos de Breitenbach et al. (2017) mostra que a adição de RPP exigiu uma maior quantidade de água em relação à argamassa padrão. Também se observou um aumento na densidade da massa das argamassas no estado fresco para um teor de até 15 % de RPP, em relação à argamassa de referência. Os resultados de resistência à compressão no estado endurecido, aos 90 dias de cura mostram um aumento da resistência com o aumento no teor de resíduos, sendo que as argamassas contendo entre 10 % e 20 % de RPP apresentaram os maiores resultados em relação à argamassa de referência. Os valores encontrados são aceitáveis para a aplicação proposta (alvenarias de edifícios antigos), segundo norma europeia EN 1015-8 (1999).

Um outro estudo realizado para avaliação da utilização de resíduo de polimento de porcelanato na fabricação de argamassa foi feito por Steiner et al. (2015). O resíduo utilizado por Steiner et al. (2015), apresenta um diâmetro médio de partículas de $13,74 \mu\text{m}$, sendo que 50 % das partículas possuem diâmetro menor que $10,10 \mu\text{m}$ e 90 % menores que $31,87 \mu\text{m}$ (Anexo B). A composição química do resíduo apresentou predominantemente SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , K_2O , Fe_2O_3 , Na_2O e outros elementos, como visto na Tabela 1. Quanto à composição mineralógica, observou-se um alto teor de quartzo no resíduo.

O índice de consistência das argamassas se manteve praticamente constante, indicando uma igualdade nos parâmetros para aplicabilidade das argamassas produzidas com o resíduo. Quanto à resistência à compressão, observa-se um aumento na resistência à compressão, em relação à referência, para um período de 100 e 120 dias, na substituição de 25 % do cimento pelo RPP e a concentração de 30 % foi estatisticamente equivalente à mistura de referência.

3.4.3. Geopolímeros

O ramo da construção civil tem buscado alternativas para diminuir emissões de dióxido de carbono (CO_2) e outros poluentes em seus processos, além de buscar melhorar as propriedades e desempenho dos materiais utilizados nas atividades (GERALDO, 2017).

O cimento Portland é o tipo de cimento mais utilizado atualmente, no entanto, a produção desse tipo de cimento apresenta uma alta emissão de dióxido de carbono. Com isso, para diminuir a pegada de carbono proveniente da produção do cimento Portland, alguns materiais alternativos estão sendo estudados, entre eles, os geopolímeros (BERNAL; PROVIS, 2014).

Os geopolímeros podem ser definidos como polímeros inorgânicos, constituídos de poli-sílico-aluminatos. Esses materiais são produzidos com baixa emissão de gases e com custo competitivo. Além disso, os geopolímeros apresentam propriedades como estabilidade química, resistência mecânica elevada, baixa condutividade térmica e alta durabilidade (RAMOS, 2017).

Ramos (2017) estudou o desempenho de cimentos geopoliméricos contendo resíduo de polimento de porcelanato. A composição mineralógica do resíduo de polimento de porcelanato é composta por quartzo, albita, wollastonita, hematita e anortita com predominância de presença de quartzo. Quanto à composição química, é composto predominantemente de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , entre outros elementos, como indicado na Tabela 1.

Quanto às propriedades mecânicas, Ramos (2017) percebeu melhores desempenhos mecânicos nas composições contendo 15 % de resíduo, obtendo valores próximos aos obtidos na composição de referência (sem resíduo). Com isso, a utilização de resíduo de polimento de porcelanato torna-se promissora para a produção de cimento geopolimérico.

3.4.4. Bloco de concreto

O concreto pode ser definido como uma mistura de cimento, água, agregado graúdo e agregado miúdo, podendo ter também aditivos na sua composição. Esse material possui uma larga aplicação em elementos estruturais e não estruturais na construção civil, sendo assim um dos materiais mais utilizados nesse ramo. As propriedades dos concretos podem ser manipuladas a partir do processo de dosagem, dependendo da aplicação em que será submetido. Os agregados, na composição do concreto, representam cerca de 60 % a 80 % do volume total, sendo partículas que possuem a função de enchimento, influenciando diretamente na densidade e resistência mecânica deles (SANTOS, 2019).

Silva (2005) estudou o comportamento do concreto de Cimento Portland produzido com a adição de resíduo de polimento de porcelanato. O resíduo utilizado por Silva (2005) apresentou altos teores de silício e oxigênio, médios teores de alumínio e zircônio e baixos teores de magnésio, com traços de ferro, cálcio, potássio, fósforo e sódio, como detalhado na Tabela 1. A presença de zircônio está associada ao grau de brancura do porcelanato. No espectrograma do DRX, observou-se a presença de quartzo e mulita, sendo uma estrutura basicamente cristalina. A morfologia do resíduo utilizado, analisada através de MEV, se mostrou irregular e angular (Figura 3). O diâmetro médio encontrado para as partículas de RPP utilizadas no trabalho foi de 10,01 μm , sendo que 50 % das partículas apresentaram diâmetros menores que 7,00 μm e 90 % menores que 23,05 μm .

No estado fresco, as misturas de concreto produzidas com adição de resíduo de polimento de porcelanato apresentaram melhor consistência, menor exsudação e melhor coesão. Quanto à resistência à compressão, a adição de RPP aumentou o desempenho do concreto para todos os teores, em relação ao valor de referência. Para uma idade de 3 dias, os concretos com 10 % de adição obtiveram um ganho médio de 8,3 % de resistência e com 20 % de adição apresentou um ganho de 10,1 %, em relação ao concreto de referência. Para 28 dias, os concretos com 10% de RPP ganharam 5,1 % em relação aos concretos de referência e aqueles com 20 % de resíduo apresentaram um aumento de 9 %. O melhor valor observado, em geral, foi para 10 % de resíduo, devido a um aproveitamento satisfatório de propriedades mecânicas e aspectos de durabilidade.

Souza (2007) também estudou o comportamento do concreto produzido com resíduo de polimento de porcelanato. O resíduo utilizado apresentou as fases cristalinas mulita, quartzo, carbeto de silício e óxido de magnésio, sendo os dois primeiros oriundos da massa porcelânica e os dois últimos oriundos do abrasivo utilizado no processo de polimento. A granulometria desse resíduo indica que aproximadamente 50 % das partículas apresentaram diâmetros menores que 30 μm . Quanto à composição química, é um material composto predominantemente por óxido de silício, óxido de alumínio, seguido por óxido de magnésio e outros óxidos.

O concreto obtido por Souza (2007) com a utilização do resíduo de polimento de porcelanato apresentou uma menor porosidade e absorção de água, favorecendo a durabilidade do concreto. A resistência à compressão apresentada pelos concretos que foram produzidos com a adição de resíduo de polimento de porcelanato apresentaram um aumento, tanto para os períodos de 7 dias, quanto para 28 e 90 dias, sendo que esse aumento chegou em até 50 %, em comparação com o concreto de referência, quando utilizados aditivos plastificantes juntamente com o resíduo.

3.4.5. Cerâmica celular

Materiais celulares são materiais que apresentam uma rede de unidades celulares, com arranjo bi ou tridimensional de filamentos interconectados, com as arestas destas células sendo formadas por esses filamentos. As cerâmicas celulares apresentam um arranjo parcialmente regular de células ocas, abertas ou fechadas, formando uma rede tridimensional. Por ser um material poroso, apresenta aplicações estruturais limitadas. Sendo assim, as propriedades deste material favorecem sua utilização no uso de filtração de partículas em fluidos gasosos a altas temperaturas, como filtros cerâmicos (PORTO, 2016).

Bernadin et al. (2007) estudaram a reutilização de resíduos de polimento de porcelanato para produção de cerâmicas celulares. O resíduo utilizado apresentou em sua composição uma predominância de sílica e alumina, com a presença de outros óxidos, como óxido de magnésio, de potássio e de sódio, como visto na Tabela 1. A distribuição granulométrica do resíduo (Anexo B) indica um diâmetro médio de

partícula de 10 μm , sendo que 100 % das partículas possuem diâmetros menores que 75 μm . Na estrutura cristalina, é possível identificar a presença de quartzo, albita e zircônio (Anexo A).

Neste estudo, Bernadin et al. (2007) concluíram que é possível utilizar rejeito de polimento de porcelanato para produção de cerâmicas celulares, em conjunto com restos de abrasivos de carbeto de silício. A resistência à flexão encontrada é menor do que a amostra de referência, devido ao aumento de porosidade, mas alcança valores aceitáveis para aplicação em construção civil. As espumas obtidas também apresentaram uma boa isolamento térmica e acústicas, podendo ser utilizadas em substituição à madeira e polímeros expandidos em forrações e divisórias internas. Com isso, a utilização de resíduo de polimento de porcelanato para aplicação em cerâmicas celulares se mostra promissora.

3.4.6. Solo

Araújo (2016) estudou a utilização de resíduo de polimento de porcelanato como componente da mistura de material na compactação de aterros, realizando a incorporação com solo. Em relação à granulometria do resíduo utilizado, 50 % das partículas apresentaram diâmetros inferiores a 6 μm . A composição química do resíduo apresentou uma predominância de sílica e alumina, com a presença de outros óxidos, como óxido de potássio, óxido de ferro, entre outros, como detalhado na Tabela 1. As fases identificadas no material foram quartzo, mulita e carbeto de silício (Anexo A). Quanto à morfologia, as partículas do resíduo apresentaram um formato angular e irregular (Figura 3).

A adição do resíduo de polimento de porcelanato ao solo, estudado por Araújo (2016) provocou uma melhoria nas propriedades geotécnicas do material, tendo obtido melhores valores para uma presença de 5 % de resíduo, aumentando a capacidade de carga do solo em relação ao solo puro e apresentando menores recalques.

Silva (2016) também estudou misturas de solo e resíduo de polimento de porcelanato, mas para aplicação em obras rodoviárias. O resíduo estudado por Silva (2016) é o mesmo utilizado por Araújo (2016), apresentando as mesmas propriedades

de granulometria, composição química, composição mineralógica e morfologia. Neste estudo, concluiu-se que, de forma geral, o resíduo não altera o comportamento do solo de forma significativa para teores de até 10 % de adição, sendo que com a mistura de 5 % apresentou, em alguns casos, resistência superior ao do solo puro.

3.4.7. Cerâmica vermelha

Cerâmica vermelha, também chamada de cerâmica estrutural, é um subgrupo cerâmico, empregado na construção civil, utensílios domésticos e de adorno, que tem como característica a coloração avermelhada dos produtos (blocos, telhas, tijolos, elementos vazados, entre outros). A principal matéria-prima para fabricação dessas cerâmicas são as argilas. Esses materiais são caracterizados pela boa durabilidade e resistência mecânica, além do baixo custo. A indústria de cerâmica vermelha é um destaque no que tange à absorção de resíduos como matéria-prima, uma vez que as massas argilosas são heterogêneas, com ampla variação mineralógica (ARAÚJO, 2008).

Lorenzi (2005) estudou o reaproveitamento do resíduo de polimento de porcelanato na fabricação de cerâmica estrutural. O resíduo utilizado apresentou diâmetro médio de partículas de 5,4 μm , com 100 % das partículas abaixo de 45 μm . Quanto à composição química, o resíduo é composto predominantemente por sílica e alumina, com presença de óxido de magnésio, óxido de zircônio, entre outros óxidos, com as quantidades indicadas na Tabela 1.

Os resultados encontrados por Lorenzi (2005) indicam que é interessante a utilização de resíduo em uma quantidade de percentual de até 5 % de incorporação, com aumento de resistência mecânica e bons valores de densidade aparente a verde e, após a sinterização, também foram observadas melhorias em propriedades como absorção de água, densidade aparente e resistência à compressão.

Pureza (2004) também estudou a incorporação de resíduo de polimento de porcelanato em massas cerâmicas de argila vermelha. O resíduo utilizado apresentou uma composição química com a presença principalmente de sílica e alumina,

apresentando também, em sua composição, óxido de magnésio, óxido de ferro, entre outros óxidos. Quanto à composição mineralógica, foram observadas as presenças de quartzo, albita e mulita (Anexo A). O resíduo apresentou uma granulometria com diâmetro médio de 8.27 μm , com 50 % das partículas com diâmetros menores que 4,58 μm e 90 % menores que 21.89 μm .

Como resultado, Pureza (2004) percebeu que a incorporação dos resíduos promoveu uma maior densificação, redução de absorção de água e aumento da retração linear, além de aumento na resistência mecânica para todas as formulações que possuíam a adição de resíduo. Com isso, a aplicação de resíduo de polimento de porcelanato incorporado em massas cerâmicas de argila vermelha pode ser promissora.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

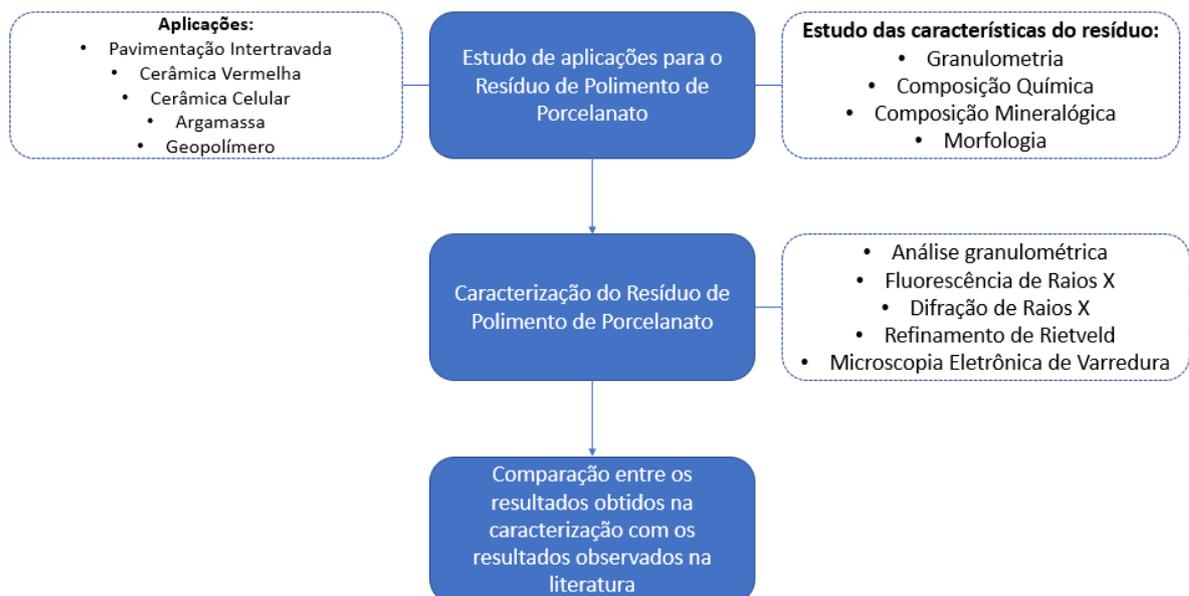
4.1. Material

O resíduo do polimento do porcelanato utilizado neste estudo foi proveniente do processo de fabricação do porcelanato polido cristal, cedido por uma empresa situada em Santa Luzia, Minas Gerais.

4.2. Métodos

Neste trabalho, a metodologia consistiu na caracterização química e mineralógica do resíduo de polimento de porcelanato. Na Figura 5, é representado um fluxograma que demonstra a metodologia utilizada no trabalho.

Figura 5- Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: própria autora.

Para a caracterização do resíduo de polimento de porcelanato, foram realizados procedimentos de análise granulométrica por difração a laser, análise química por fluorescência de raios X (FRX), análise morfológica por microscopia

eletrônica de varredura (MEV), análise mineralógica por difração de raios X (DRX) e quantificação das fases pelo método de refinamento Rietveld. A indicação de reutilização do resíduo foi realizada por comparação com dados encontrados na literatura.

4.2.1. Análise granulométrica

As análises granulométricas foram realizadas no Analisador de Partículas por difração a Laser (CILAS modelo 1090), aplicando a teoria de Fraunhofer. O equipamento utilizou faixa analítica de 0,04 a 500 μm , 64 detectores, 100 classificações de tamanho de partículas e 2 emissores de laser com obscuração de 15 %.

4.2.2. Fluorescência de raios X

A determinação da composição química das amostras de resíduo de polimento de porcelanato foi obtida por fluorescência de raios X, utilizando o equipamento Shimadzu EDX-720. As análises foram realizadas sob vácuo em termos dos óxidos presentes.

4.2.3. Difração de raios X

As fases presentes nas amostras foram identificadas, utilizando o difratômetro da Shimadzu XRD – 700, pelo método do pó nas seguintes condições operacionais: radiação $\text{CuK}\alpha$ (35 KV/ 40 mA), velocidade do goniômetro $0,02^\circ$ em 2θ por passo, com tempo de contagem de 5 segundos por passo e coletados de 5° a 80° em 2θ . As interpretações dos espectros foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF 02 (ICDD, 2003).

A quantificação mineralógica foi realizada pelo método de refinamento Rietveld. Para o refinamento foi utilizado o programa GSAS (LARSON; VON DREELE, 2001) com a interface EXPGUI utilizando a função de perfil pseudo-Voigt de Thompson-Cox-

Hastings, sendo a radiação de fundo ajustada pelo polinômio de Chebyshev. Foram refinados o fator de escala, célula unitária, radiação de fundo, assimetria do perfil, parâmetros da largura total à meia altura e, a partir dos parâmetros de alargamento instrumental obtidos com um padrão, posição atômica, deslocamentos atômicos isotrópicos e fatores de ocupação dos cátions. Os valores de χ^2 foram aferidos para verificação da qualidade do refinamento.

4.2.4. Microscopia eletrônica de varredura

As análises no MEV foram realizadas no equipamento Shimadzu SSX-550 equipado com detector de elétrons secundários. Para tal, as amostras foram pulverizadas em uma fita de carbono e recobertas com ouro.

4.2.5. Avaliação da reutilização do resíduo na produção de novos materiais cerâmicos

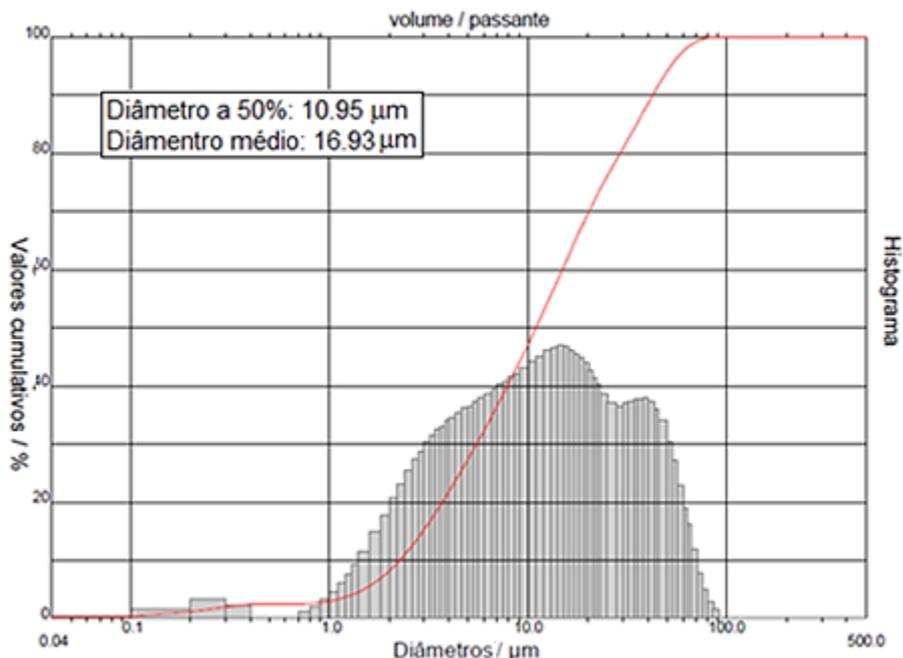
A partir da comparação dos resultados de caracterização do resíduo de polimento de porcelanato em estudo com os resultados obtidos por diferentes autores (BERNADIN, 2007; SILVA, 2005; NASCIMENTO, 2016; SANTOS, 2019; BREITENBACH, 2017; STEINER, 2015; RAMOS, 2017; LORENZI 2005; ARAÚJO, 2016), foi realizada a avaliação da reutilização deste resíduo na produção de argamassa, piso de concreto intertravado, bloco de concreto, cerâmica celular, em incorporação ao solo, em cerâmicas vermelhas e geopolímeros. E por fim, foi sinalizado a sua melhor utilização, entre as que foram propostas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica do resíduo de polimento de porcelanato (Figura 6) indica que 50 % das partículas possui um diâmetro inferior a 10,95 μm , com um diâmetro médio de 16,93 μm . Neste gráfico, percebe-se uma curva mais larga, com presença de partículas entre as faixas de 1 μm e 100 μm .

Figura 6- Análise granulométrica para amostra de resíduo de polimento de porcelanato (RPP)



Fonte: Própria autora.

A granulometria observada se aproxima aos dados obtidos na literatura, com uma maior semelhança aos estudos de Nascimento (2016), Steiner (2014), Silva (2005) e Bernadin (2007) que utilizaram o resíduo de polimento de porcelanato para aplicações em piso de concreto intertravado, argamassa, bloco de concreto e cerâmica celular, respectivamente. Outros autores que encontraram uma granulometria menor, mas da mesma ordem de grandeza foram Breitenbach et al.

(2017), que estudaram a adição do RPP em argamassas de restauro e Pureza (2004) e Lorenzi (2005), que aplicaram o resíduo no processo de fabricação de cerâmicas vermelhas. Com isso, considerando a granulometria, verifica-se que o resíduo pode ser utilizado para aplicações em pavimentação intertravada, argamassas, blocos de concreto, cerâmicas vermelhas e cerâmicas celulares.

5.2. Fluorescência de Raios X (FRX)

Os resultados da análise química da amostra do resíduo de polimento de porcelanato podem ser visualizados na Tabela 4. Observa-se que o resíduo estudado apresentou em sua composição uma predominância dos óxidos sílica (SiO_2), zircônia (ZrO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de potássio, entre outros óxidos

Tabela 4 – Composição química qualitativa do resíduo de polimento de porcelanato (RPP), em termos de óxidos.

Composto	RPP (%m/m)
SiO_2	37
Al_2O_3	6
ZrO_2	39
CaO	3
K_2O	8
Fe_2O_3	4
TiO_2	2

Fonte: própria autora.

Esses valores encontrados se aproximam com os valores de referência observados na literatura, com a predominância de SiO_2 (37 %) e presença de óxidos como Al_2O_3 (6 %) e CaO (3 %). Essa composição já era esperada, já que o resíduo é formado por material cerâmico proveniente do próprio porcelanato e do abrasivo utilizado no polimento (ROSSO et al., 2005). Com isso, a presença de SiO_2 está possivelmente associada ao quartzo e a presença de Al_2O_3 (óxido de alumínio) e K_2O

(óxido de potássio) associada aos feldspatos, que são matérias-primas utilizadas na fabricação do porcelanato.

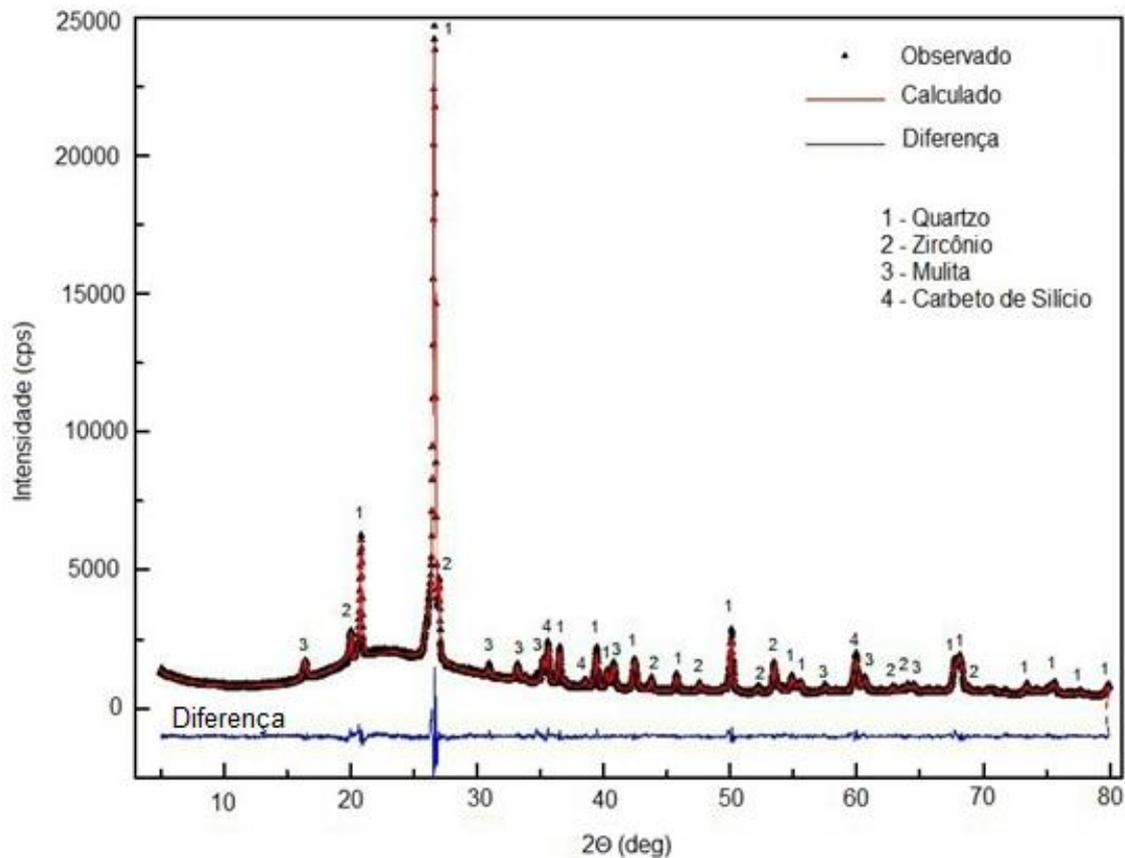
Um óxido encontrado em uma proporção considerável e que não foi detectado nos trabalhos de referência (Tabela 1) é o ZrO_2 . A presença desse óxido pode ser justificada pela utilização do composto para a fabricação do porcelanato, já que é um material comumente utilizado na fabricação de placas cerâmicas com a finalidade de se obter a opacidade e alvura do material (COOK et al., 2017). Outra hipótese para a presença do ZrO_2 , e falta da presença do MgO (óxido de magnésio, material comumente detectado devido à sua presença nos materiais abrasivos) é a utilização do ZrO_2 nos materiais abrasivos, que podem ter se desprendido e incorporado no produto, na etapa de polimento.

A composição química encontrada, calculada na forma de óxidos, de forma geral, apresenta semelhanças em relação a todos os trabalhos estudados para as aplicações propostas, sendo assim, o resíduo estudado, em relação à composição química, se mostra promissor para aplicações em piso intertravado, bloco de concreto, argamassas, cerâmica celular, geopolímeros e cerâmica vermelha, sendo que apresentou uma semelhança maior com o resíduo estudado por Silva (2005) e Lorenzi (2005) que estudaram a aplicação do resíduo na fabricação de blocos de concreto e cerâmica vermelha, respectivamente.

5.3. Difração de Raios X (DRX)

As fases observadas no difratograma (Figura 7) foram predominantemente quartzo, zircônia, mulita e carbetto de silício. As fases encontradas se apresentaram similares às fases observadas nas referências dos dados obtidos na literatura (Tabela 2). Sabe-se que, durante a sinterização do porcelanato, ocorre a associação dos feldspatos e argilominerais com o quartzo presente na amostra, resultando na formação de mulita. A presença de carbetto de silício está, provavelmente, associada à etapa de polimento, sendo esse material comumente presente no polidor utilizado (ROSSO et al., 2005). A presença de zircônio também pode estar associada à utilização desse elemento no processo de fabricação do porcelanato, com a finalidade de se obter opacidade e alvura no produto (COOK et al., 2017).

Figura 7 - Difratoograma obtido e refinamento de Rietveld, para a amostra de resíduo de porcelanato.



Fonte: própria autora.

O resultado do refinamento (Figura 7) demonstrou que, exceto para o pico de quartzo de maior intensidade, houve boa concordância entre os difratogramas teórico (calculado) e experimental (observado). Para que o refinamento seja considerado perfeito, a linha que representa o difratograma calculado deve se sobrepor à linha que representa o difratograma observado e a linha de diferença deve equivaler o mais próximo possível a uma reta. Fatores como escala, background e orientação preferencial podem influenciar na qualidade do refinamento (KINAST, 2000), e provavelmente é um desses fatores que está afetando a concordância do pico de quartzo.

Na Tabela 5, são mostrados os indicadores estatísticos para o Refinamento de Rietveld realizado na amostra em estudo.

Tabela 5 – Indicadores estatísticos, em números, para a amostra em estudo

INDICADORES	PORCELANATO
χ^2	2,5
Rp	3,2
Rwp	4,8

Fonte: própria autora.

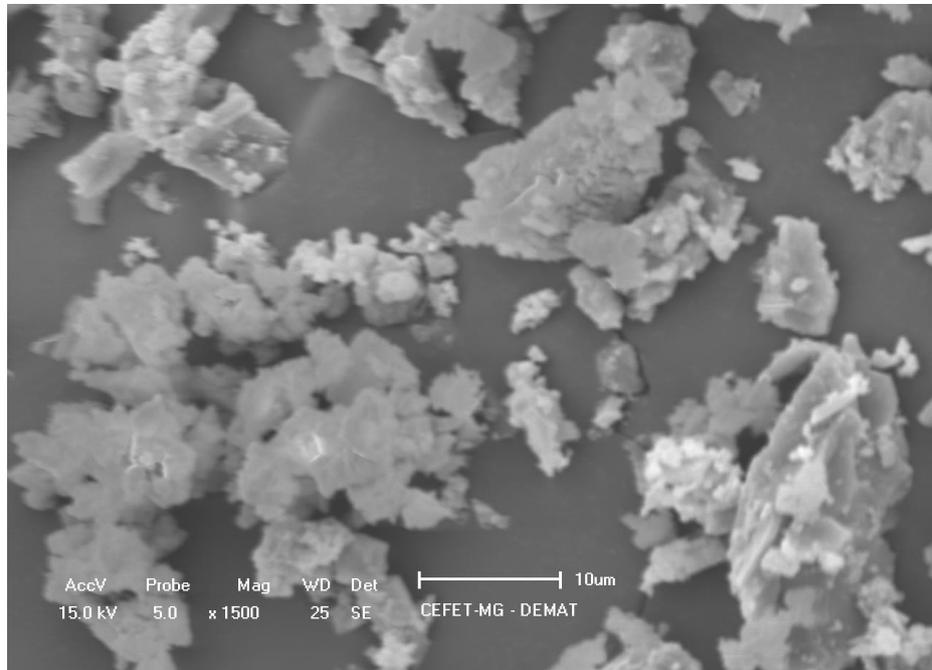
Os parâmetros estatísticos Rp (fator de perfil) e Rwp (fator de perfil ponderado) e o χ^2 (Goodness of Fit = GOF = S) indicam a qualidade do refinamento (POST E BISH, 1989; YOUNG, 1993). Pode-se observar na Tabela 5 que os valores parâmetros de ajuste Rp e Rwp estão um pouco elevados (3,2 e 4,8, respectivamente). Mas, esse ajuste para as amostras analisadas está na gama encontrada para sistemas contendo multiminerais naturais, como foi demonstrado por Mumme et al. (1996). O valor do parâmetro χ^2 deve ser equivalente a 1,0 % em um refinamento perfeito, mas na prática valores inferiores a 5,0 % remetem a um bom refinamento (McCUSKER et al., 1999). O bom refinamento para essa amostra pode ser observado pelo baixo valor de χ^2 (Tabela 5), sendo este 2,5 %.

Para a aplicação em geopolímeros, as fases encontradas foram diferentes da observada no DRX. No trabalho de Ramos (2017), o resíduo utilizado para aplicação em geopolímeros apresentou as fases quartzo, albita, wollastonita, hematita e anortita. Dessa forma, conclui-se que, em termos de composição mineralógica, o resíduo utilizado é promissor para aplicações em argamassa, piso de concreto intertravado, cerâmica vermelha, cerâmica celular e bloco de concreto, mas não é possível concluir a possibilidade de sua utilização na fabricação de geopolímeros.

5.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

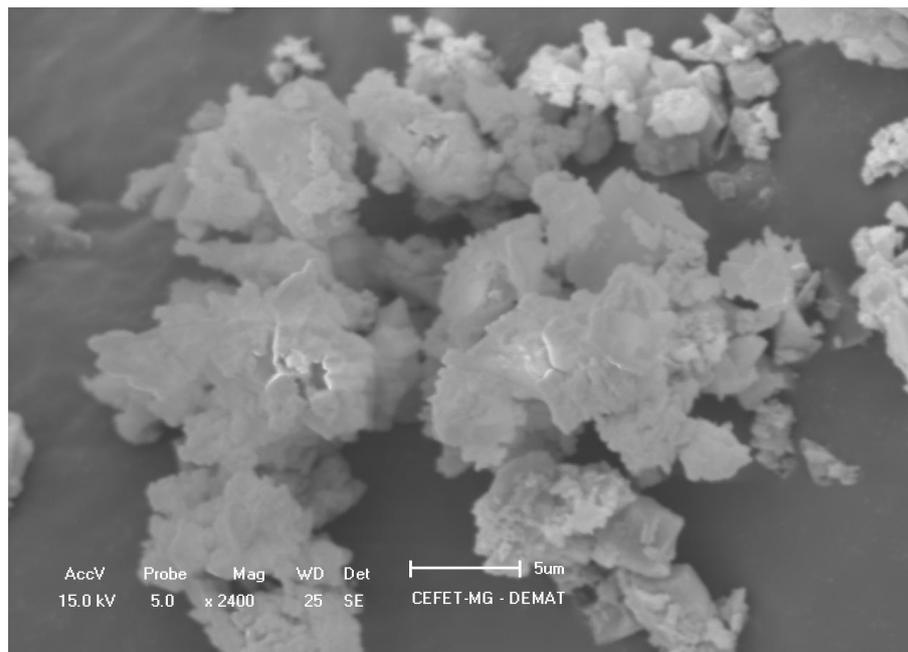
Nas Figuras 8 e 9, são representadas as imagens obtidas no MEV. Nas imagens obtidas, pode-se observar que as partículas do resíduo são angulares e apresentam aspectos irregulares e forma aglomerados, devido a sua granulometria fina.

Figura 8 – Imagem obtida ao MEV de amostra de resíduo de polimento de porcelanato metalizada



Fonte: Própria autora.

Figura 9 - Imagem obtida ao MEV de amostra de resíduo de polimento de porcelanato metalizada



Fonte: própria autora.

O formato observado se assemelha aos dados obtidos na literatura (Figura 3). Breitenbach et al. (2017) perceberam uma melhora na trabalhabilidade, consistência, coesão e plasticidade das argamassas em que houve a substituição parcial da areia pelo RPP. Com isso, em termos de morfologia, o resíduo também se mostra promissor para aplicação em argamassa.

6. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho avaliaram a possibilidade da utilização do resíduo de polimento de porcelanato em seis diferentes aplicações: em piso de concreto intertravado, argamassa, geopolímeros, cerâmica celular, cerâmica vermelha e bloco de concreto, em termos de características do resíduo (granulometria, composição química, composição mineralógica e morfologia), em comparação com os dados obtidos na literatura.

- A composição mineralógica observada apresenta a presença das fases quartzo, zircônio, mulita e carbeto de silício. Essas fases são similares aos valores encontrados na literatura para aplicações em produção de piso de concreto intertravado, argamassa e bloco de concreto, tendo como fase diferente o zircônio, que foi encontrado apenas no resíduo aplicado para cerâmica celular. Para aplicação em geopolímeros, as fases encontradas foram diferentes das demais e das observadas no resíduo estudado, sendo observadas as fases quartzo, albita, wollastonita, hematita e anortita. Dessa forma, o resíduo pode ser promissor para as aplicações propostas, mas não é possível concluir que pode ser promissor para ser utilizado na fabricação de geopolímeros.

- A granulometria obtida foi um diâmetro médio de 16,93 μm com 50 % das partículas apresentando um diâmetro inferior a 10,95 μm . Essa faixa de granulometria é mais fina do que agregados miúdos, como areia, sendo mais próxima da faixa granulométrica observada nos cimentos. Observam-se nos dados obtidos na literatura resultados promissores de resíduos com faixas similares para aplicação em piso de concreto intertravado, argamassas, blocos de concretos e cerâmicas vermelhas.

- A composição química observada apresenta predominância de SiO_2 (37 %) com presença de Al_2O_3 (6 %) e outros óxidos que também foram observados na literatura, uma vez que a composição química do resíduo é semelhante à composição do porcelanato, com elementos provenientes dos grãos abrasivos utilizados no processo de polimento. Um elemento diferente encontrado foi o ZrO_2 (39 %) que pode ser explicado pela utilização desse composto para se obter opacidade e alvura no material e também pode ter sido utilizado nos grãos abrasivos.

Com isso, o resíduo, em termos de composição química, se mostra promissor para todas as aplicações propostas, com destaque para blocos de concreto e cerâmicas vermelhas.

- Nas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, observa-se um formato angular e irregular das partículas. Na literatura, resíduos com morfologias similares foram utilizados para aplicação em argamassa, apresentando bons resultados de propriedades como trabalhabilidade, consistência, coesão e plasticidade. Dessa forma, o formato observado não impacta negativamente nessas propriedades, assim o resíduo pode ser utilizado para as aplicações propostas.

Dessa forma, conclui-se que o resíduo estudado apresenta probabilidade de viabilidade de aplicação, em termos de granulometria, composição química, composição mineralógica e morfologia para todas as aplicações propostas (argamassa, bloco de concreto, pavimentação intertravada, cerâmicas vermelhas e cerâmica celular), com uma menor probabilidade para o geopolímero, a partir dos dados estudados na literatura.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido às limitações relacionadas à realização deste trabalho, propõem-se algumas sugestões de futuros trabalhos a fim de se explorar mais profundamente as possibilidades da reutilização do resíduo de polimento de porcelanato para as aplicações propostas. Dentre as sugestões, destacam-se:

- Síntese de corpos de provas de argamassa com a utilização de resíduo de polimento de porcelanato, em substituição ao cimento e à areia, avaliando propriedades como trabalhabilidade, densidade, absorção de água, porosidade e resistência à compressão.
- Síntese de corpos de prova de piso de concreto intertravado e blocos de concreto, com a utilização de resíduo de polimento de porcelanato, em substituição ou adição ao cimento, avaliando propriedades como resistência à compressão e absorção de água.
- Síntese de geopolímeros, com a utilização de resíduo de polimento de porcelanato, em substituição ao metacaulim, avaliando propriedades como resistência à compressão e absorção de água.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Sílvia Cristina Justo Fernandes Nobre de. **Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ARAÚJO, Franciulli da Silva Dantas de. **Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação - Especificação. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15463. Placas cerâmicas para revestimento – porcelanato. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13281. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13818. Placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

ANFACER. Números do Setor. 2019. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/numeros-do-setor>>. Acesso em: 31 out. 2020.

BERNAL, S.; PROVIS, J. Durability of Alkali-Activated Materials: Progress and Perspectives. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 97, n.4, 2014.

BERNADIN, A. M. et al. Reaproveitamento de resíduos de polimento e de esmaltação para obtenção de cerâmica celular. **Cerâmica Industrial**, Criciúma, v. 11, n. 5/6, p. 31-34, set/dez, 2006.

BERNADIN, A. M. et al. Cerâmicas Celulares Obtidas a partir de Resíduos de Polimento. **Cerâmica Industrial**, Criciúma, v. 12, n. 1/2, p. 0, 2007.

BREITENBACH, S. B.; SANTOS, O. C.; ANDRADE, J. C. S.; NASCIMENTO R. M.; MARTINELLI, A. E. Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. **Cerâmica**[online], v.63, n.367, pp.395-401, 2017.

CARVALHO, Eduardo Viviani de. **Utilização do resíduo da retífica de cerâmica de revestimento na produção de concreto para pavimento intertravado**. 2013. 161 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2013.

COOK, S.; MASBATE, J.; BARRINGTON, C. Otimização de desempenho e custo na produção de placas cerâmicas: obtenção de brancura e opacidade utilizando zircônio. **Cerâmica Industrial**, [s.l], v. 22, n. 2, p. 7–12, mar. 2017.

EN 1015-8: 1999: draft European Standard, Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar. CEN: Bruxelas, 1999.

GERALDO, R. H. et al. Alkali-activated binder containing wastes: a study with rice husk ash and red ceramic. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 365, p. 44-51, mar. 2017.

HECK, C. Grês Porcelanato. **Cerâmica Industrial** v.4, 21-24p Agosto/Dezembro: 21-24. 1996.

JESUS, Adriane Cristina de. **Influência da adição de nefelina sienito em massas cerâmicas contendo resíduo de polimento de porcelanato**. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

KINAST, E. J. **Refinamento Estrutural com o Método Rietveld: Implementação e Ensaios com o Programa FullProf**. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2000.

LARSON, A. C.; VON DREELE, R. B. General structure analysis system (GSAS). **Los Alamos: National Laboratory**, 2001.

LORENZI, V. **Reaproveitamento do Resíduo Sólido Proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria Cerâmica de Grês Porcelanato**. 2005. 120 f. 2005. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais)– Universidade do Extremo Sul de Santa Catarina, Criciúma.

MARQUES, L. N.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H. L. L.; FERREIRA, H. C. Reaproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s.l.], v.2.2, p.34-42, jul/ago, 2007.

MATOS, P. R. **Estudo do uso de resíduo de polimento e porcelanato em concreto autoadensável**. Florianópolis, 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.

McCUSKER, L. B., VON DREELE, R. B., COX D. E., LOUER, D., SCARDI, P. Rietveld refinement guidelines. **Journal of Applied Crystallography**, v. 32, p. 36-50, 1999.

MORAES, Márcio Luiz Varela Nogueira de. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. 2007. 153 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

MUMME, W. G., TSAMBOURAKIS, G., MADSEN, I. C., HILL, R. J. 1996. Improved petrological modal analysis from X-ray powder diffraction data by use of the Rietveld method. II. Selected sedimentary rocks. **Journal of Sedimentary Research**, v. 66, p. 132–138.

NASCIMENTO, Maria Victória Leal de Almeida. **Estudo de blocos intertravados de concreto para pavimentação de resíduo do polimento do porcelanato**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

OLIVEIRA, N. O. Pedro, maio/junho. “Gres porcelanato: aspectos mercadológicos e tecnológicos”. **Cerâmica Industrial**. Vol. 3, No. 3. 1998

PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano; DE CARVALHO, Eduardo Viviani; LINTZ, Rosa Cristina Cecche. Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 514-520, 2016.

PORTO, V. S. **Desenvolvimento de cerâmica porosa celular utilizando resíduos de vidro de lâmpada fluorescente em sua composição**. 2016. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2016.

POST, J. E , and BISH, D. L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data. **Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy**, v. 20, p. 277-308, 1989.

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

PURIFICAÇÃO, Eduardo Bruno da. **Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto**. 2009. 109 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

RAMBALDI, E. et al. Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n. 12, p. 3509-3515, 2007.

RAMOS, Giovany Antonio. **Cimento geopolimérico contendo resíduo do polimento de placas cerâmicas**. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ROSSO, Jeancarlo; CUNHA, Edilene de Souza; ROJAS-RAMÍREZ, Roberto A. Características técnicas e polimento de porcelanatos. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 4, p. 11-14, 2005.

SANTOS, Humberto Mycael Mota. **Uso de resíduo do polimento do porcelanato em concreto como adição e como material cimentício suplementar**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. Belo Horizonte, 2005. 92 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

SILVA, Moacir Guilhermino da. **Avaliação da incorporação combinada dos resíduos de cascalho de perfuração de poço de petróleo e de polimento do porcelanato em cerâmica vermelha**. 2012. 158 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SILVA, Filipe Bruno dos Santos. **Avaliação de misturas de solo de resíduo de polimento de porcelanato para emprego em obras rodoviárias**. 2016. Dissertação de Mestrado. Natal, 2016.

SOUZA, Paulo Alysson Brilhante Faheina de. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. 232 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

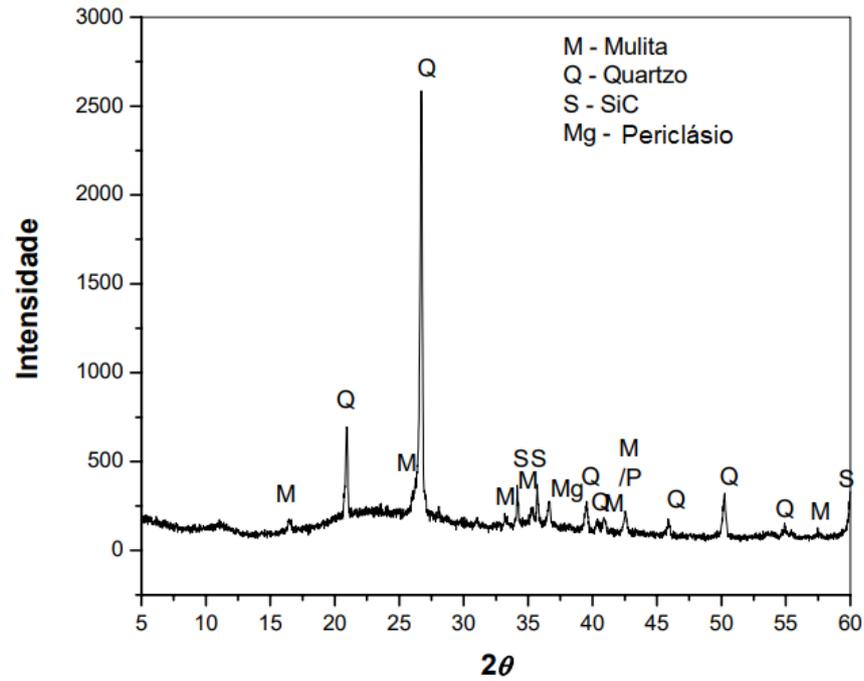
STEINER, L. R. **Efeito do resíduo de polimento de porcelanato como material cimentício suplementar**. Criciúma, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

STEINER, Luiz Renato; BERNADIN, Adriano Michael; PELISSER, Fernando. Effectiveness of ceramic tile polishing residues as supplementary cementitious materials for cement mortars. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 4, p. 30-35, 2015.

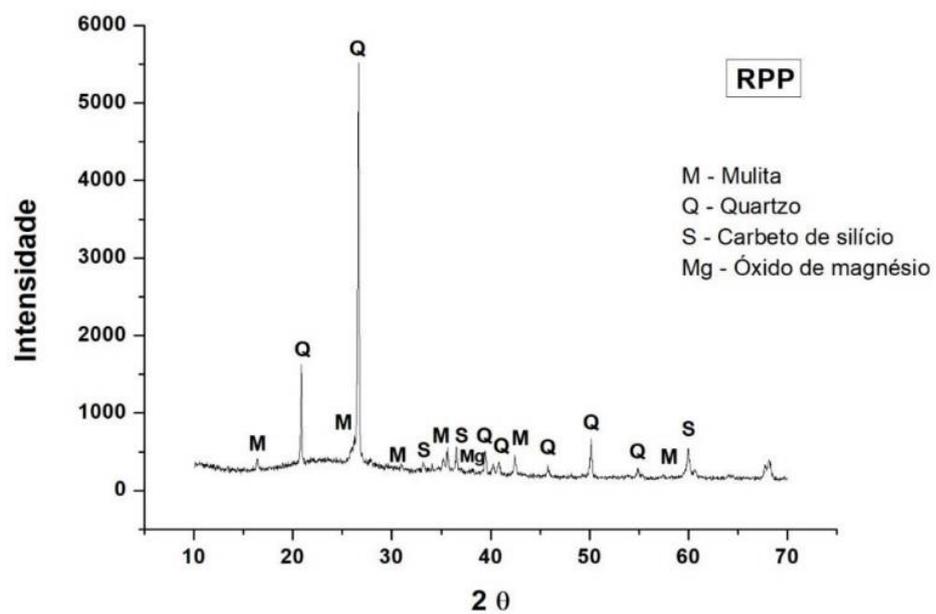
YOUNG, R. A. The Rietveld Method. **International Union of Crystallography**, 1993, 298 p.

ANEXOS

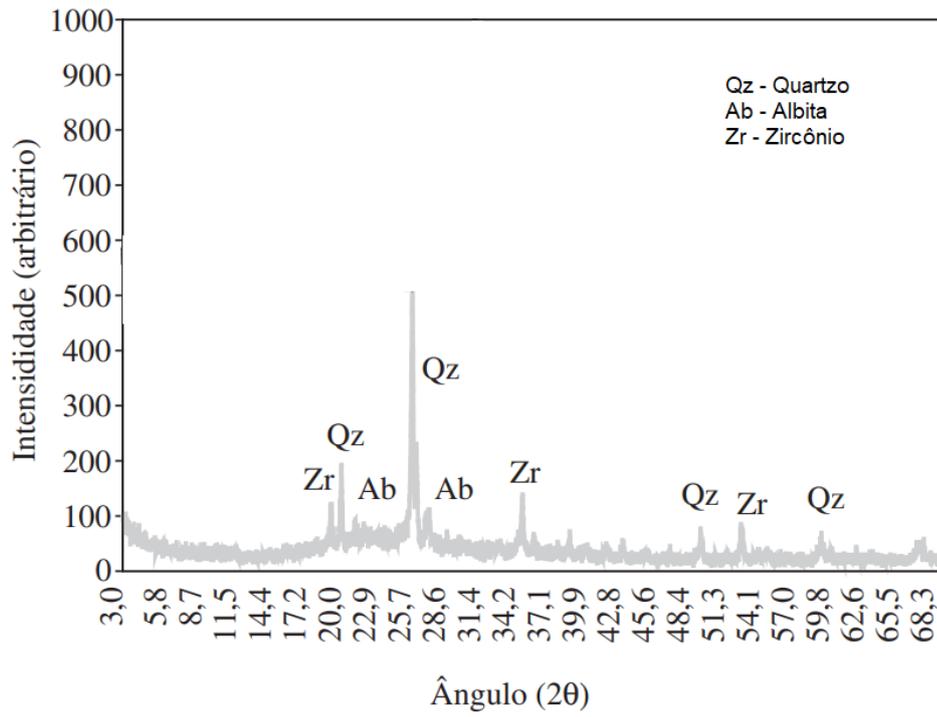
ANEXO A – DIFRATOGRAMAS DE RESÍDUOS DE POLIMENTO DE PORCELANATO



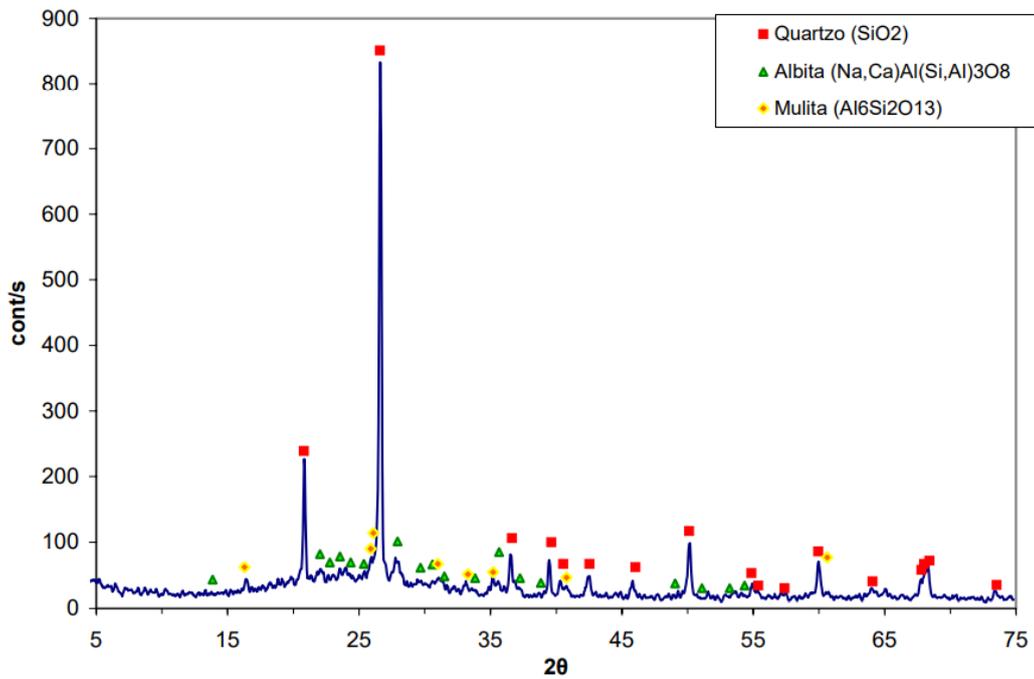
Fonte: Marques et al., 2007.



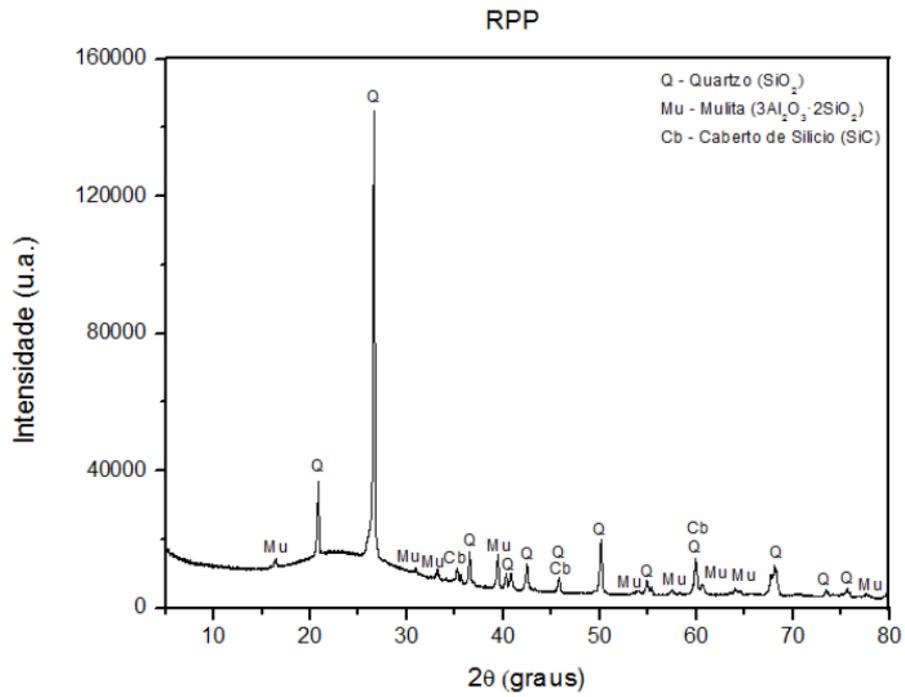
Fonte: Santos, 2019.



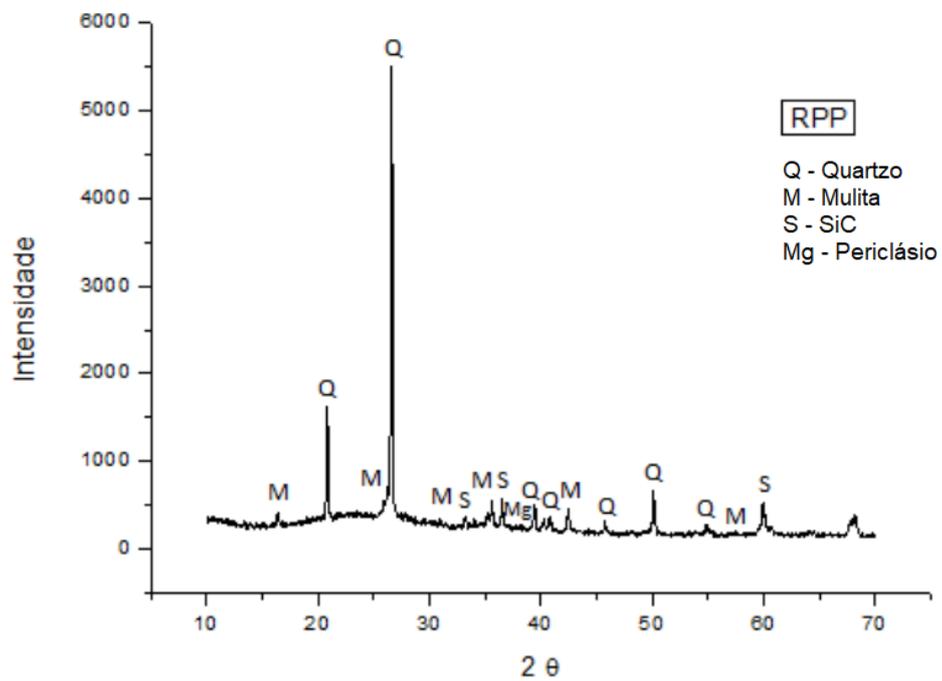
Fonte: Adaptado de Bernadin, 2007.



Fonte: Pureza, 2004.

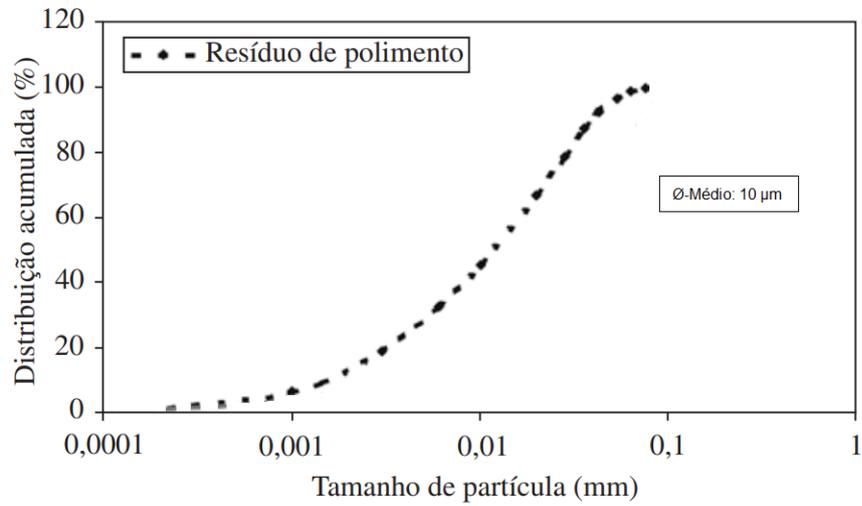


Fonte: Araújo, 2016.

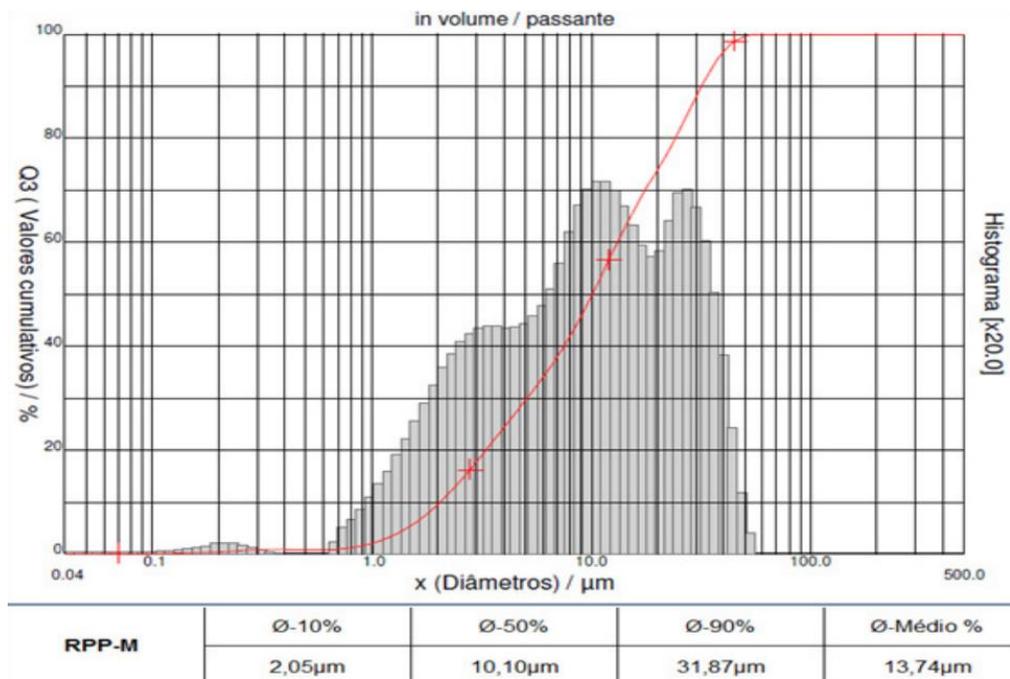


Fonte: Nascimento, 2016.

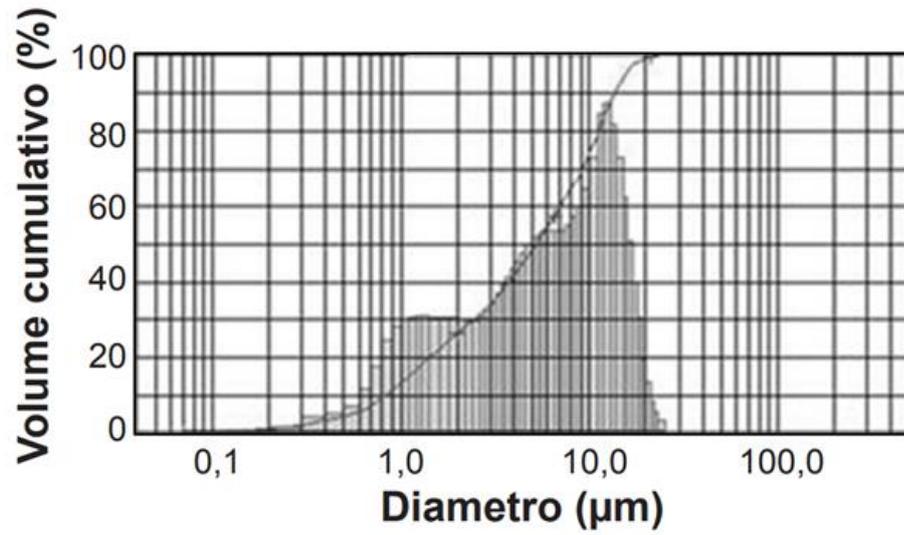
ANEXO B – DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE RESÍDUOS DE POLIMENTO DE PORCELANATO



Fonte: Bernadin, 2007.



Fonte: Steiner, 2014.



	\varnothing -10%	\varnothing -50%	\varnothing -90%	\varnothing -Médio %
RPP	1,27 μm	5,44 μm	11,27 μm	5,93 μm

Fonte: Adaptado de Breitenbach et al., 2017.