



Dissertação de Mestrado

Daniela Casagrande Matos

**Reaproveitamento do chamote de porcelanato para o desenvolvimento de
novos compósitos cimentícios**

**Belo Horizonte
Agosto de 2015**



Daniela Casagrande Matos

Reaproveitamento do chamote de porcelanato para o desenvolvimento de novos compósitos cimentícios

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de pesquisa em Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa em Reciclagem

Orientadora: Dr^a. Ivete Peixoto Pinheiro

Co-orientador: Dr. Claudinei Rezende Calado

Belo Horizonte, agosto de 2015.

Dedico a todos o mérito acumulado pelos meus esforços.
Que este trabalho possa gerar benefício para todos.

AGRADECIMENTOS

Em primeira instância, dedico o mérito deste trabalho a Deus, na pessoa de Jesus Cristo e no seu Divino Espírito Santo, juntamente com Nossa Senhora, e agradeço por me abençoarem, ouvirem e intercederem por mim durante todo esse período. Honra e glória a Deus, cuja sabedoria, misericórdia e compaixão estarão sempre presentes na sua Divina Providência.

Aos meus pais, José e Mônica, pelo amor incondicional, apoio, orações constantes e compreensão. Obrigada por sempre incentivarem a mim e aos meus irmãos a dedicação aos estudos e por nos oferecer as condições necessárias para isso. Sou uma pessoa abençoada por ter vocês na minha vida. Aos meus irmãos Cynthia e Felipe, e ao meu cunhado Lucas, pelo amor e amizade e por serem os alicerces da minha vida. Este projeto é uma homenagem a todos vocês.

Ao meu namorado, Daniel, por oferecer tanto amor, carinho e compreensão. Obrigada por acreditar e incentivar a minha carreira acadêmica e sempre me oferecer condições para alcançar os meus sonhos. Também agradeço por sempre me ajudar na superação de todos os meus obstáculos com a sua serenidade e companheirismo.

À minha avó Clarice (*in memoriam*), por todo o carinho e amor que me ofereceu ao longo de sua vida, além de sempre incentivar meus estudos.

Aos meus tios Elzane, Stelina, Adilson e Patrícia, Alexandre e Patrícia, Jonathan e Patrícia, Ivan e Ana, e primos, que sempre estiveram presentes, incentivando e torcendo pelo meu sucesso profissional.

À Lourdinha, Danilo, Gustavo e Felipe, que como uma segunda família, me acudiram durante todo esse processo. Obrigada por estarem presentes na minha vida de uma maneira tão especial.

À minha orientadora, Ivete Peixoto Pinheiro, pela dedicação, atenção, paciência e acompanhamento constante. Agradeço a análise criteriosa da dissertação e por não medir esforços para que esse trabalho fosse realizado. Obrigada pela boa vontade

em auxiliar e por ser esta professora tão capacitada e competente que é. O seu empenho foi crucial para a conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador, Claudinei Rezende Calado, que além de ser um brilhante professor, ainda me acudiu nos momentos mais difíceis. Obrigada por todo o ensinamento gerado durante o processo, análises de FRX, DRX e TGA-DTA, por me levar às visitas técnicas, pela paciência, pelo apoio incondicional e principalmente, pela grande oportunidade de ter te conhecido. O seu profissionalismo e atenção foram essenciais durante todo esse processo.

Ao professor Augusto César da Silva Bezerra, que foi muito além de um professor. Obrigada por ter me acolhido no seu laboratório e oferecido todas as condições possíveis para que este trabalho pudesse ter sido realizado. Agradeço a enorme compreensão e solidariedade que teve comigo, além de me ensinar a moldar, ensaiar e caracterizar meus resultados. Sem a sua capacidade, inteligência e conhecimento únicos, nada disso teria acontecido.

Agradeço aos professores Conrado de Souza Rodrigues e Sidney Nicodemos da Silva, pelas importantes sugestões oferecidas na qualificação. Tais considerações foram um verdadeiro “divisor de águas” neste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais, principalmente ao Bruno e à Gabriela e ao Professor Paulo. Obrigada por me ajudarem a analisar os resultados com tanta boa vontade. À Ivete, pela graciosidade e gentileza constante.

Aos funcionários e amigos do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais, Marcos, Natália, Adilson e Zefa. Obrigada pela boa vontade e bom humor ao me ajudarem a realizar todos os ensaios, principalmente ao Marcos, que me ajudou em todos os ensaios de absorção.

As minhas amigas, que são como irmãs na minha vida: Tainã, Larissa, Nicole, Juliana e Erika e a todos os amigos pela atenção, amizade, inteligência, paciência, pelo apoio e conselhos concedidos.

Às empresas Cecrisa Revestimentos S/A e a Marmorites Santa Izabel por cederem os materiais para a realização do trabalho.

A CAPES, pelo auxílio à pesquisa e ao CEFET/MG pela bolsa de Mestrado e suporte instrumental.

A todos que, de alguma forma, direta ou indireta, colaboraram na realização deste trabalho e que, embora não citados aqui, não deixam de merecer meu agradecimento.

*“Como os fios de linho balançam de um lado
para o outro,
impelidos pelo sopro do vento,
de igual modo,
tudo aquilo que eu fizer será alcançado,
controlado pelos movimentos de um coração
onde mora a alegria”*

Shantideva

RESUMO

O interesse em estudar novas formas sustentáveis de redução e tratamento dos resíduos industriais e urbanos gera grande discussão a respeito de novas estratégias que auxiliem a cadeia produtiva. Dentre tantos resíduos estudados, o presente trabalho utilizou o resíduo cerâmico originado no processo pós-queima das placas de porcelanato, chamado chamote, utilizando esse resíduo no desenvolvimento de um novo compósito cimentício para a produção de piso. O resíduo foi utilizado em substituição do material de referência, o agregado de granitina, que é utilizado na confecção do piso comercial marmorite. Para caracterizar química e fisicamente os agregados, o compósito com chamote e o piso marmorite foram realizados os seguintes ensaios: Fluorescência de Raios-X, Difração de Raios-X, Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Térmica Diferencial (DTA), Resistência à Compressão para as idades de cura de 3, 7, 28 e 63 dias e Tração na Flexão aos 28 dias nas argamassas. A difração de raios X do marmorite apresentou as fases de carbonato de cálcio e óxido de silício, enquanto no compósito com chamote de porcelanato, foram identificadas as fases de quartzo e de carbonato de cálcio. De acordo com a TGA-DTA foi possível constatar que o marmorite e o compósito com chamote são estáveis termicamente até a temperatura de 430°C. O comportamento térmico observado para o compósito com chamote revelou uma perda de massa durante o ensaio de 11,2%. Para os ensaios de compressão, o compósito com chamote mostrou um ganho de 20% nos valores de resistência à compressão em relação ao marmorite. Para o ensaio de resistência à tração na flexão, o compósito com chamote apresentou resistência à flexão mais elevada do que a do marmorite. Por fim, os resultados apresentados para os ensaios referentes à absorção de água, mostraram que quanto maior for a idade do compósito, menor é o teor de água absorvida. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se a possibilidade de substituição de 100% da granitina pelo chamote. Para todos os ensaios realizados, o compósito com chamote obteve resultados semelhantes ou melhores em relação ao piso de referência, tendo sido avaliado o seu uso potencial como agregado em uma matriz cimentícia.

Palavras-chave: Porcelanato, Resíduo, Reciclagem, Chamote.

ABSTRACT

The interest in studying new sustainable forms of reduction and treatment of industrial and municipal waste generated great discussion of new strategies that help the supply chain. Among many studied waste, this study used the ceramic waste originated in the post-firing process of porcelain tile plates, called grog, using this waste in the development of a new cementitious composite to the floor of production. The residue was used in place of the reference material, the aggregate marble waste, which is used in making commercial marble waste floor. For chemical and physical characteristics aggregates, following tests were performed in marble waste floor and grog composite: X-Ray Fluorescence, X-ray diffraction; Thermogravimetric analysis (TGA) and Differential Thermal Analysis (DTA), compressive strength for healing ages 3, 7, 28 and 63 days and traction in flexion at 28 days in mortars. The X-ray diffraction showed the the marble waste floor phases of calcium carbonate and silicon oxide as the composite with porcelain tile grog, quartz phases and calcium carbonate were identified. According to the TGA-DTA it was found that the marble waste floor and the grog composite are thermally stable up to 430°C temperature. The thermal behavior observed for the aggregate of grog composite revealed a mass loss of 11.2% during the test. For compression testing, the grog composite showed a gain of 20% in compressive strength values compared to marble waste floor. For the strength test to traction in flexion, the grog composite was resistant to bending higher than the marble waste floor. Finally, the results for tests regarding the absorption of water showed that the greater the age of the composite is less absorbed water content. According to the results obtained, there was the possibility of replacing 100% of the marble waste to grog. For all trials, the grog composite obtained similar or better results compared to the reference floor and was evaluated their potential use as aggregate in a cement matrix.

Keywords: Porcelain Tile, Waste, Recycling, Grog.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais produtores mundiais 2010-2013.	21
Figura 2 – Exportações de revestimentos cerâmicos brasileiros 2014.....	22
Figura 3 – Piso Marmorite.	24
Figura 4 – Diagrama ternário Caulinita – Feldspato – Quartzo.	27
Figura 5 – Porcelanato quebrado após a queima (chamote).	31
Figura 6 – Piso de marmorite.	33
Figura 7 – Variações dos tamanhos de granitina.	33
Figura 8 – Pigmentos (óxidos) utilizados no acabamento do marmorite.	34
Figura 9 – Sistema do piso marmorite.....	35
Figura 10 – Amostras para caracterização.....	43
Figura 11 – Moinho planetário.....	43
Figura 12 – Moinho Los Angeles.....	44
Figura 13 – Ensaio de granulometria.	46
Figura 14 – Preparação dos corpos-de-prova (marmorite e compósito com chamote)	47
Figura 15 – Moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão e tração na flexão (marmorite e compósito com chamote).....	48
Figura 16 – Fluorescência de raios –X por Energia Dispersiva (FRX/EDX).....	49
Figura 17 – Difrátômetro de Raios – X (DRX).	49
Figura 18 – Analisador térmico (TGA-DTA).....	50
Figura 19 – Corpos de prova submersos e identificados	51
Figura 20 – Pesagem dos corpos-de-prova	52
Figura 21 – Pesagem hidrostática.....	52
Figura 22 – Máquina universal de ensaios.....	54
Figura 23 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	55
Figura 24 – Equipamento para metalização.....	56
Figura 25 – Difrátograma do agregado de granitina.....	59
Figura 26 – Difrátograma do agregado de porcelanato.....	60
Figura 27 – Gráfico da análise termogravimétrica da granitina.	61

Figura 28 – Gráfico da análise termogravimétrica do porcelanato.	63
Figura 29 – Análise da perda de massa dos agregados.	65
Figura 30 – Gráfico da Curva Granulométrica.....	66
Figura 31 – Difratoograma do marmorite.	68
Figura 32 – Difratoograma do compósito com chamote.....	69
Figura 33 – Gráfico da análise termogravimétrica do marmorite.....	70
Figura 34 – Gráfico da análise termogravimétrica do compósito com chamote.	71
Figura 35 – Análise da perda de massa do marmorite e do compósito com chamote.	73
Figura 36 – Massa específica do marmorite e do compósito com chamote para todas as idades de cura.	76
Figura 37 – Gráfico da Absorção de Água do marmorite e do compósito com chamote para todas as idades de cura.	76
Figura 38 – Gráfico do índice de vazios do marmorite e do compósito com chamote para todas as idades de cura.	77
Figura 39 – Gráfico de Resistência à compressão.....	78
Figura 40 – Gráfico de resistência à tração na flexão para 28 dias.....	80
Figura 41 – Microscopia Eletrônica de Varredura (500x).	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporção de materiais utilizados.....	42
Tabela 2 – Série de peneiras	45
Tabela 3 – Caracterização química do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	57
Tabela 4 – Caracterização física do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial....	57
Tabela 5 – Composição química em termos da composição mássica do Porcelanato e da granitina.....	58
Tabela 6 – Análise da variação de massa da granitina nas etapas da TGA-DTA	62
Tabela 7 – Análise da variação de massa do porcelanato nas etapas da TGA-DTA	64
Tabela 8 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado (granitina) ...	65
Tabela 9 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado (chamote de porcelanato)	66
Tabela 10 – Análise da variação de massa do marmorite nas etapas da TGA-DTA.	70
Tabela 11 – Análise da variação de massa do compósito com chamote nas etapas da TGA-DTA.....	72
Tabela 12 – Massas das amostras do marmorite.....	74
Tabela 13 – Massas das amostras de compósito com chamote.....	75
Tabela 14– Amostras do marmorite e compósito com chamote para ensaios de A , ρ_s e I.V.....	75
Tabela 15 – Resistência à compressão pelas respectivas idades de cura	78
Tabela 16 – Resistência à tração na flexão para 28 dias.....	79

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Processo de fabricação do porcelanato.	28
Fluxograma 2 – Processo de fabricação do marmorite.	37
Fluxograma 3 – Etapas referentes à elaboração dos corpos de prova do marmorite e do compósito com chamote.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	= Absorção de Água por Imersão
ABCERAM	= Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	= Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFACER	= Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica, para revestimentos, louças sanitárias e congêneres
Bla	= Grupo de Absorção de Água A em função do Método de Fabricação
CEFET MG	= Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CP	= Corpo de prova
C.V.	= Coeficiente de variação
DM	= Dimensão Máxima
DRX	= Difração de raios X
DTA	= Análise Térmica Diferencial
EDS	= Espectroscopia de energia dispersiva
EDX	= Energia dispersiva
FRX	= Fluorescência de raios X
I_v	= índice de vazios
NBR	= Norma Brasileira
ρ_s	= massa específica da amostra seca
MEV	= Microscopia Eletrônica por Varredura
Mf	= massa final no ensaio de TGA
m_i	= massa da amostra saturada e imersa em água, em gramas.
MPa	= Mega Pascal
m_s	= massa da amostra seca em estufa, em gramas;
m_{sat}	= massa da amostra em água após imersão, em gramas;
TGA	= Análise termogravimétrica.

LISTA DE SÍMBOLOS

- α = Alfa da fase quartzo
- β = Beta da fase quartzo
- \emptyset = Diâmetro de uma circunferência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 A Indústria de Revestimentos Cerâmicos	21
3.1.1Histórico	21
3.2 Resíduos Cerâmicos e seu Impacto Ambiental	23
3.3 O Porcelanato	25
3.3.1 Definição	25
3.3.2 Composição	25
3.3.3 Características técnicas	27
3.4 Processo de Fabricação do Porcelanato	28
3.5 O Marmorite	32
3.6 O Processo de Fabricação do Marmorite	34
3.7 Elaboração de Compósito Cimentício com Chamote	37
4. METODOLOGIA	40
4.1 Etapas do Desenvolvimento do Trabalho	40
4.2 Visita Técnica	41
4.3 Materiais Utilizados	41
4.4 Métodos	42
4.4.1 Preparação dos agregados	42
4.4.2 Preparação dos grãos de chamote de porcelanato	43
4.4.3 Desenvolvimento do marmorite e do compósito com chamote	46
4.4.4 Caracterização: Análise química (agregados e argamassas)	48
4.4.5 Caracterização: Análise física (argamassas)	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57

5.1 Caracterização do Cimento	57
5.2 Caracterização dos Agregados de Porcelanato e Granitina.....	58
5.2.1 Fluorescência de raios X	58
5.2.2 Difração de raios- X (DRX).....	58
5.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA-DTA).....	61
5.2.4 Curva granulométrica	65
5.3 Caracterização do Marmorite e do Compósito com Chamote.....	67
5.3.1 Difração de raios- X (DRX).....	67
5.3.2 Análise Termogravimétrica (TGA-DTA) das argamassas.....	69
5.3.3 Absorção de água (A), massa específica (ρ_s) e índice de vazios (I.v).....	74
5.4 Comportamento Mecânico do Marmorite e do Compósito com Chamote ...	77
5.4.1 Resistência à compressão	77
5.4.2 Resistência à tração na flexão	79
5.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	80
6 CONCLUSÃO	82
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento do consumo de bens duráveis em escala industrial gera, além da escassez das matérias-primas que compõem os produtos, o aumento da quantidade de resíduos que são despejados na natureza. Essa situação tem motivado uma importante demanda para o desenvolvimento de novas pesquisas, que possam suprir as necessidades da indústria de modo geral e resolver a destinação destes resíduos.

Dentre os setores industriais do Brasil, o de revestimentos cerâmicos é responsável por grande parte da geração de resíduos, que, mesmo constituídos de grande volume para descarte, são destinados aos aterros específicos, diminuindo a oportunidade de serem reutilizados na geração de novos produtos.

Em relação ao objeto desta pesquisa, o porcelanato, de acordo com os fabricantes, durante o seu ciclo de produção, na etapa pós-queima, a placa cerâmica ocasionalmente pode vir a trincar, devido a falhas microestruturais que ocorrem durante os choques térmicos, pelos quais a peça é submetida (MORAES, 2007).

O resíduo de quebra recebe o nome de chamote. Este material é descartado, visto que sua reinserção no processo inicial não é adequada. O principal motivo deve-se pela placa passar pelo processo de queima, que ocorre em ciclos rápidos de 40-60 minutos, variando de 1180-1260°C, gerando, desse modo, uma alteração na sua composição química e estrutural, ao obter um alto nível de densificação (NONI JR. et al., 2010). Por esse motivo, a reinserção do chamote através da sua moagem e posterior mistura à massa pronta original torna-se inviável.

Devido a esse fato, surge a iminência de estudar esse resíduo, de modo que ele possa ser reutilizado de alguma maneira, reduzindo o impacto do seu descarte ao meio ambiente. Melo et al. (2009) afirmam que: “neste sentido, esforços estão sendo concentrados em projetos que visem à redução do volume de rejeitos industriais ou

o reaproveitamento destes para a produção de materiais com aplicação comercial”. Por conseguinte, a presente pesquisa teve interesse desenvolver um compósito com chamote a partir de uma matriz cimentícia que futuramente possa ser utilizada como revestimento cerâmico.

Para efeito de comparação, foi usado o piso de marmorite, de acordo com os padrões industriais empregados. Esse piso possui grande utilização no mercado, logo, o desenvolvimento de um piso semelhante a ele, principalmente em relação às suas propriedades mecânicas, poderá ser uma solução factível para a problemática do chamote. Portanto, sua utilização será promissora, principalmente em relação aos benefícios gerados para o meio ambiente, para a sociedade como um todo e para a cadeia produtiva da Construção Civil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar a viabilidade da reutilização de chamotes do porcelanato para a confecção de novos compósitos cimentícios.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a composição química e mineralógica dos materiais a partir dos ensaios de Termogravimetria (TGA) e Difração de Raios-X (DRX).
- Realizar testes de análise microestrutural utilizando os laboratórios de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva - MEV/EDS.
- Determinar as características mecânicas de resistência à compressão e razão na flexão.
- Analisar os coeficientes de absorção de água, porosidade e massa específica dos compósitos obtidos para o tempo de cura de 3, 7, 28 e 63 dias.

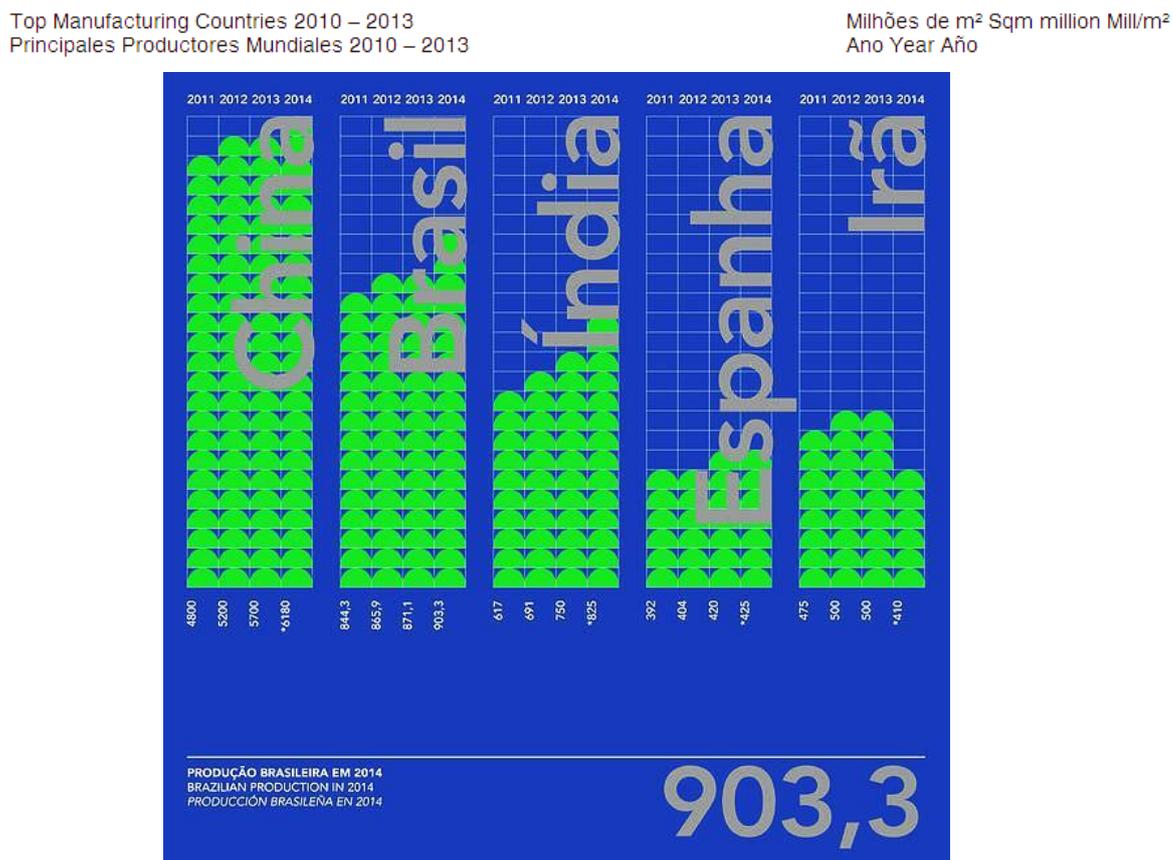
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Indústria de Revestimentos Cerâmicos

3.1.1 Histórico

A indústria de revestimentos cerâmicos possui grande influência no setor econômico do Brasil e do mundo. De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica, para revestimentos, louças sanitárias e congêneres, a ANFACER (2014), o país é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a segunda posição em produção e consumo (Figura 1) em m², em uma estimativa, considerando somente a produção em território nacional.

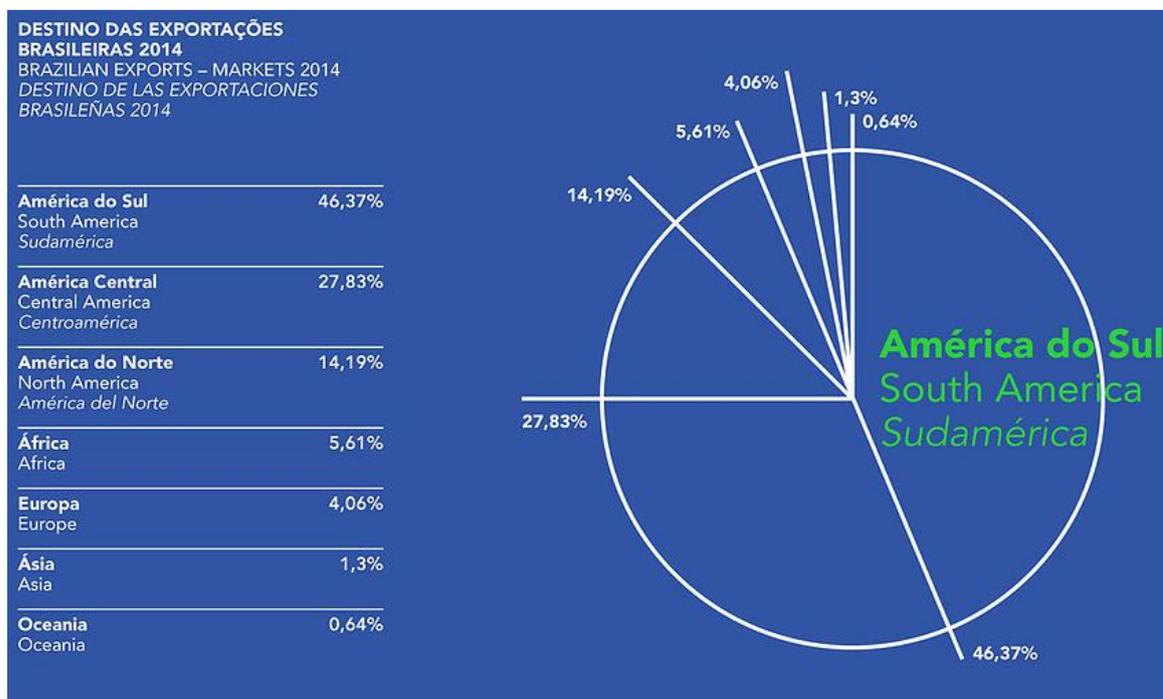
Figura 1 – Principais produtores mundiais 2010-2013.



Fonte: ANFACER (2014).

Conforme a mesma associação, esse fato se deve à abundância de matérias-primas naturais, fontes de energia alternativas, entre outros fatores, que permitem ao país grande destaque, principalmente no mercado internacional. De acordo com as informações da ANFACER, em 2014 o Brasil exportou para 113 países, totalizando 69,2 milhões de metros quadrados, o que equivale a uma receita de US\$ 279,8 milhões. As exportações brasileiras têm como principais destinos a América do Sul, a América Central, a América do Norte e a África. Tais informações podem ser conferidas na Figura 2.

Figura 2 – Exportações de revestimentos cerâmicos brasileiros 2014.



Fonte: ANFACER (2014)

A construção civil, de maneira geral, tem grande impacto econômico no Brasil. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção (ABRAMAT) e a Fundação Getúlio Vargas (FVG) em 2014, a cadeia produtiva de construção civil teve uma produção total de aproximadamente R\$349,2 bilhões, o que equivale a 8,5% do PIB brasileiro. A sua contribuição no setor de geração de empregos também é notória, conforme demonstram os 826 mil trabalhadores que atuavam na cadeia no mesmo ano.

Segundo as informações citadas, é possível concluir que o mercado brasileiro está em expansão no cenário nacional e internacional, o que ressalta a sua responsabilidade no que se refere à quantidade de resíduos produzidos durante o seu processo de fabricação e principalmente, em relação ao seu descarte (ABRAMAT e FGV, 2014).

3.2 Resíduos Cerâmicos e seu Impacto Ambiental

Na indústria de revestimentos cerâmicos, tanto no Brasil quanto no mundo, a relação entre resíduos descartados versus a produção constitui um importante gargalo industrial, que se sobrepõe principalmente no custo final do produto. Na produção nacional, o volume descartado representa em média 3,0% de toda a produção de revestimentos cerâmicos (PAIXÃO et al., 2011).

Considerando que esses rejeitos ocupam mais de 80 km² anualmente em áreas específicas (aterros) (MODESTO et al., 2003), e sabendo que os constituintes solúveis do porcelanato são o chumbo, o cádmio e outros metais pesados, é notório o problema ambiental gerado por apenas descartar o material nos aterros sem oferecer nenhuma solução sustentavelmente coerente.

O mármore, agregado usado no marmorite, piso utilizado como referência no presente estudo, também é descartado em grande quantidade como resíduo nos aterros. Conforme Yaprak et al. (2011), na Turquia, onde há jazidas de mármore, são gerados por dia 1.400 toneladas de resíduo (com granulometria abaixo de 1mm de diâmetro), que é um material calcário, também sendo armazenado em áreas de depósito. De acordo com os autores, isso significa que, no país, esse resíduo não será utilizado por nenhuma indústria local.

Hebhoub et al. (2011) apud Brito et al. (2014), em seu estudo a respeito da incorporação dos resíduos de mármore como agregados graúdos no concreto, afirmam que, durante o processo de extração dos blocos, os rejeitos constituem

atualmente 80% da pedra extraída, que já é considerada de menor qualidade, por conter muitas impurezas, que impedem seu uso como material ornamental. De acordo com os mesmos autores, “os resíduos ainda são eliminados em lugares distantes da escavação, o que contribui para a degradação do meio ambiente e da paisagem natural, por ocupar a terra de forma indiscriminada”.

O resíduo de mármore é amplamente utilizado para a confecção do piso Marmorite (Figura 3), em diversas granulometrias. Após a sua moagem e peneiração, tamanhos específicos são utilizados junto com uma massa cimentícia, gerando um piso de considerável resistência mecânica. A granitina, que é o resíduo do marmorite, existe em várias cores, o que ainda permite uma ampla gama de combinações, oferecendo valor estético ao produto final.

Figura 3 – Piso Marmorite.



Fonte: 3G Pisos Concreto Estampado

A utilização da granitina é uma solução econômica e ambientalmente sustentável, que tem funcionado há bastante tempo para os resíduos de mármore (granitina). Por isso, o presente trabalho tem como objetivo investigar essa possibilidade de

aplicação, oferecendo ao chamote de porcelanato uma nova e importante aplicação no mercado nacional.

3.3 O Porcelanato

3.3.1 Definição

O porcelanato é um revestimento cerâmico que possui excelentes características técnicas, onde se destacam, prioritariamente, a sua alta resistência mecânica, resistência ao risco e ao ataque químico. A denominação porcelanato, conforme Moraes (2007) se deve ao fato das características técnicas do produto lembram substancialmente as porcelanas.

O material é classificado conforme a NBR 15463 (ABNT, 2013) placas cerâmicas para revestimento: porcelanato pelo grupo Bla, grupo dos elementos prensados e com percentual de absorção de água contido no intervalo de 0% a 0,5%. Pode ser fabricado para uso como esmaltado ou técnico, sendo que, o último deve atingir um percentual de absorção de até 0,1% (MAGALHÃES et al., 2014). De acordo com Moraes (2007) esse valor está diretamente relacionado ao grau de porosidade do produto, quanto menor, menor será a absorção de água, o que aumenta a compacidade do produto.

3.3.2 Composição

Uma massa de porcelanato é composta basicamente por uma mistura de argilas, feldspatos, areias feldspáticas, quartzo, caulins, filitos e aditivos, quando necessários (ROSSO et al., 2005). Em relação às matérias-primas, os feldspatos desempenham nas massas de porcelanato a função de fundentes, já que proporcionam as primeiras fases líquidas que aparecem durante a queima.

Estas fases líquidas contornam as partículas mais refratárias, aproximando-as por meio das forças de tensão superficial que são geradas nos poros mais finos, fato que leva a retração da peça (ROSSO et al., 2005). Desta maneira, os feldspatos são

os responsáveis iniciais do processo de densificação das peças e, conseqüentemente, para as propriedades desejadas do porcelanato.

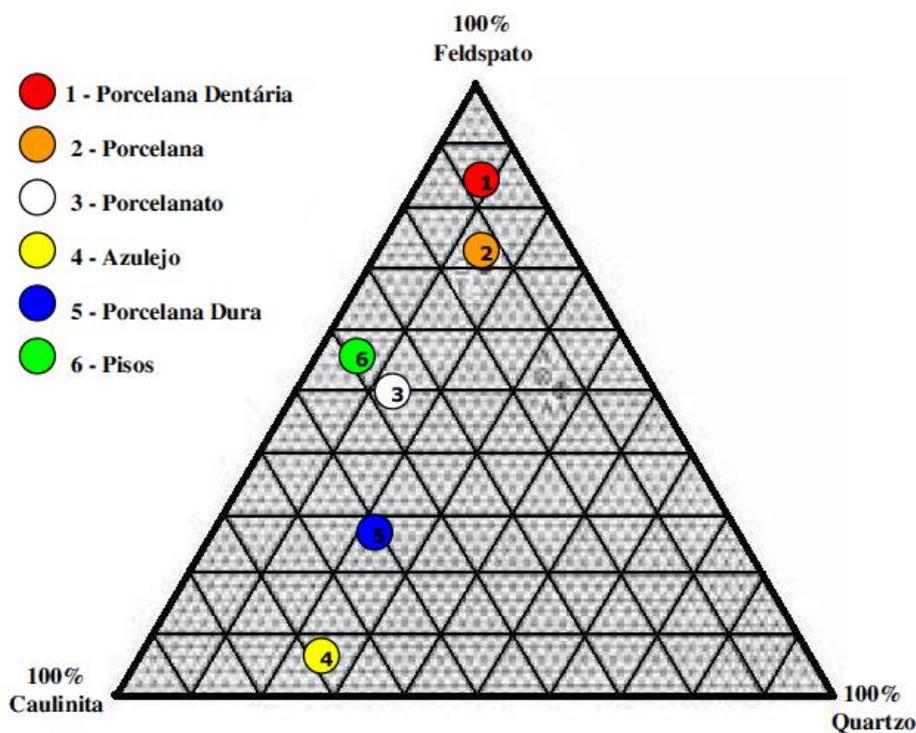
A presença do quartzo nas composições é fundamental, já que este é um dos componentes responsáveis para o controle da dilatação e para o ajuste da viscosidade da fase líquida, formada durante a sinterização da massa cerâmica. Também contribui na secagem e liberação dos gases durante a queima e é um importante regulador da relação SiO_2 e Al_2O_3 para a formação de mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) (MORAES, 2007).

Embora seja uma argila, o caulim ainda é uma importante matéria-prima para a constituição do porcelanato. O mineral mais utilizado pela indústria é a caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (PINHEIRO et al., 2007) e é empregada na massa em teores de 10% a 15% e contribui para a alvura da massa, após a sua sinterização. Também possui grande quantidade de óxido de alumínio (Al_2O_3), que, em sua constituição predominante pós queima, também forma a mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), a qual atua como esqueleto do corpo contribuindo para o aumento da resistência mecânica do material (MORAES, 2007).

As argilas, por sua vez, têm a função de proporcionar plasticidade, ou seja, a capacidade de conformação das peças (ROSSO et al., 2005). São compostas por caulinita e outros argilominerais subordinados (ilita e emectita). Na composição da massa, têm a função de oferecer a cor clara na queima, além da plasticidade e características ligantes à cerâmica. Contribui também na densidade durante a queima, além de conferir a alta resistência mecânica aos produtos finais (MORAES, 2007).

De acordo com Sanchez et al. (2001) “as misturas de matérias-primas utilizadas em sua fabricação caracterizam-se por serem compostas, geralmente, por uma porcentagem variável (30-50% em peso) de caulim e/ou argilas ílítico-cauliníticas, e uma proporção similar à anterior de feldspatos sódico-potássicos.” A Figura 4 apresenta o diagrama ternário das principais matérias-primas empregadas na produção do revestimento e as respectivas composições dos compostos produzidos.

Figura 4 – Diagrama ternário Caulinita – Feldspato – Quartzo.



Fonte: Moraes (2007)

Por fim, é importante que as matérias-primas apresentem baixo teor de óxido de ferro, visto que a eficácia dos pigmentos que são adicionados à composição depende diretamente da brancura do produto queimado (SANCHEZ et al., 2001).

3.3.3 Características técnicas

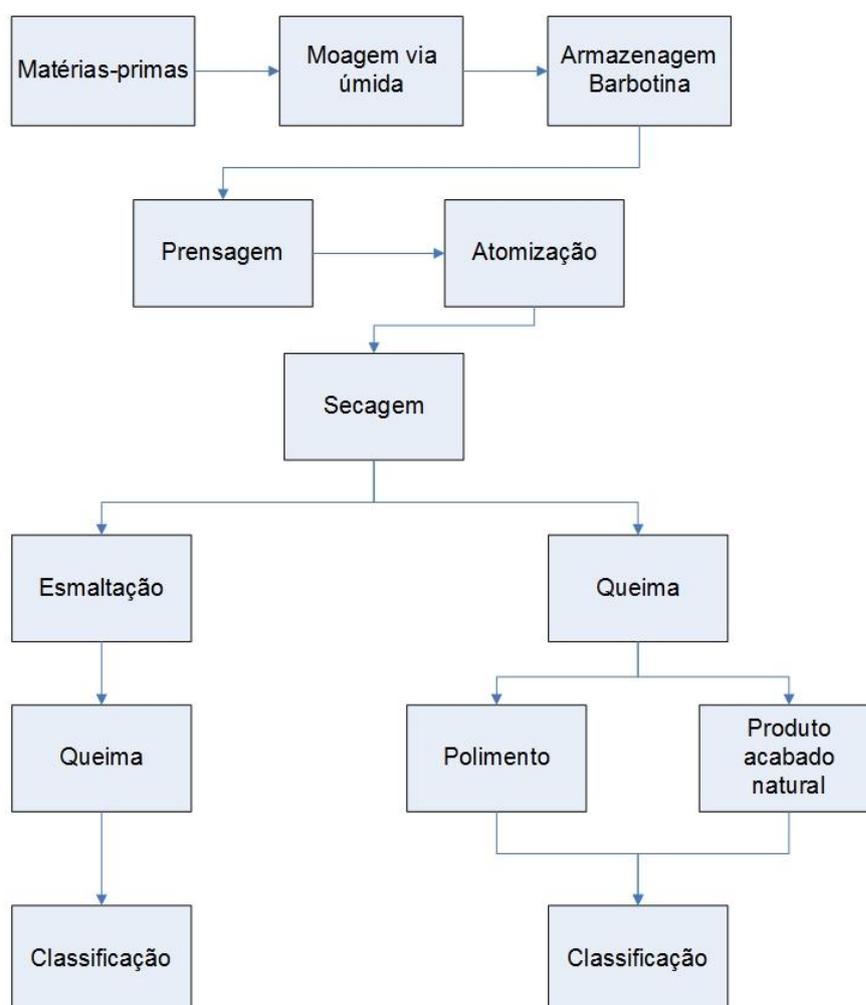
Algumas características técnicas do porcelanato são as resistências à abrasão profunda e à flexão. A resistência à abrasão é diretamente influenciada pela porosidade do porcelanato e deve-se principalmente a quantidade de minerais duros presentes em sua composição, como a mulita e o quartzo, e formam o “esqueleto da peça” (ROSSO et al., 2005). Já a resistência à flexão, que é uma das características mais importantes quando se deseja produzir porcelanatos, possui valores altos por causa do alto grau de sinterização e gresificação alcançado, visto que estes tipos de

composições permitem obter densidades aparentes após queima entre $2,36 \text{ g/cm}^3$ e $2,46 \text{ g/cm}^3$ (ROSSO et al.,2005).

3. 4 Processo de Fabricação do Porcelanato

De acordo com Barbosa (2011), as etapas para o processo de fabricação de revestimentos cerâmicos são: “dosagem, moagem, armazenamento de barbotina, atomização, armazenamento de pó, prensagem, secagem, esmaltação, decoração, queima e classificação”. Com o objetivo de esquematizar o processo de fabricação foi elaborado o Fluxograma 1 para facilitar a compreensão das fases discutidas.

Fluxograma 1 – Processo de fabricação do porcelanato.



Fonte: própria autora

O processo se inicia pela dosagem das matérias-primas, a partir de uma formulação pré-determinada. Para isso, é necessário, conforme Rosso et al. (2005), “haver um controle rigoroso na pré-liberação das matérias-primas e também da umidade de consumo das mesmas”. Dessa maneira, a formulação atinge os parâmetros determinados pela norma.

A NBR 15463 (ABNT, 2013): placas cerâmicas para revestimento: porcelanato; tem o objetivo de estabelecer os requisitos exigíveis para fabricação, marcação, declarações em catálogos, recebimento, inspeção, amostragem e aceitação de placas cerâmicas para revestimento do tipo porcelanato. Dessa maneira, o produto gerado se enquadra nas especificações exigidas pela indústria, para que a sua comercialização esteja consoante com os parâmetros exigidos pelo mercado.

Durante a fase de moagem é necessário o controle granulométrico, para que, deste modo, possa-se garantir as condições de compactação ideais e conseqüentemente as características do produto sinterizado. De acordo com Moraes (2007), o processo de moagem acontece por via úmida, pois esta é a que fornece os melhores resultados para a fabricação do porcelanato.

Conforme Moraes, 2007:

O processo por via úmida consiste em moer a matéria-prima a úmido e secar a barbotina¹ em um atomizador. O maior benefício adquirido nesse processo, (...) é conseguir a homogeneização de um amplo aspecto das matérias-primas, deixando-as extremamente finas e conseqüentemente, obtendo-se pós muito fluidos que asseguram o enchimento ideal da forma.

Após sair dos moinhos, em uma primeira etapa, a barbotina é peneirada com malha #60 (250µm), para que possam ser separadas partículas de maiores dimensões (BARBOSA, 2011) e depois é armazenada e homogeneizada. Após a armazenagem, ainda passa por uma bateria de peneiras mais finas (#80, 177µm) e é conduzida para o atomizador, através de uma bomba pneumática (chamada por “bomba de barbotina”). As principais variáveis verificadas durante este processo são: resíduo, massa específica e tempo de escoamento (BARBOSA, 2011).

¹ Barbotina: argila finamente misturada para fazer cerâmica

A atomização consiste basicamente em desumidificar a barbotina, que ocorre a partir de um atomizador, também conhecido por “*spray dryer*”. O processo consiste na injeção de barbotina à alta pressão, onde entra em contato com o ar a uma temperatura variante entre 500 e 600°C (MORAES, 2007).

De acordo com Rosso et al., 2005:

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

Na fase de prensagem, busca-se, além da conformação, reduzir a porosidade interna da peça. A pressão específica de compactação varia de 400 kgf/cm² a 500 kgf/cm². (ROSSO et al., 2005). De acordo com Barbosa (2011), são prensadas quatro peças ao mesmo tempo. A prensa possui seu próprio controle automático de pressão, mas ainda assim, são feitas verificações de hora em hora para prevenir danos posteriores. A massa específica é um parâmetro avaliado nessa etapa, sendo avaliada pelo teor de umidade e pela pressão de compactação.

Após a conformação do corpo virgem, a peça é secada com o objetivo de deixar um índice mínimo de umidade nas peças. O processo reduz a quantidade de água de 5,4% a 6% para valores inferiores a 0,5%, podendo ainda ser obtidos valores inferiores a 0,1% (SILVA, 2001, apud BARBOSA, 2011). A operação é realizada a partir de um secador vertical mediante a circulação de ar quente, o qual gera os gradientes necessários tanto para a transferência de massa como para transporte de calor (BARBOSA, 2011).

Na etapa da queima, ocorre o processo de densificação via fase líquida, reduzindo ao máximo a porosidade das peças. Durante a queima, ocorre a sinterização da massa cerâmica, etapa responsável pelos valores de absorção de água quase nulos, além de atingir a estabilidade dimensional dentro do ciclo considerado (MORAES, 2007).

Nesta fase, a formação da fase vítrea, deve-se à utilização de matérias-primas consideradas como fundentes. Por possuir elevada viscosidade, e pela força da capilaridade, é estabelecido um fluxo laminar, cujo efeito promove uma gradativa redução do volume dos poros (MORAES, 2007).

O controle da quantidade e viscosidade da fase líquida é fundamental para manter as condições de contração linear e porosidade e a temperatura de queima deve ser aquela que proporcione a maior densificação de massa possível. (ROSSO et al., 2005).

A esmaltação consiste na aplicação de uma camada de material vítreo no substrato cerâmico. O objetivo desta etapa é contribuir na impermeabilização, no aumento da resistência ao desgaste, além de implementar propriedades estéticas. Constitui de uma fase importante, no que se refere à qualidade do produto final (MORAES, 2007).

Após a queima, conforme visita técnica realizada², algumas amostras são retiradas dos lotes para que suas características físico-químicas sejam conferidas e comparadas com as especificações. As peças quebram durante o ciclo de queima (os chamotes), são retirados e armazenados em caçambas (Figura 5).

Figura 5 – Porcelanato quebrado após a queima (chamote).



Fonte: própria autora - Cecrisa Revestimentos S/A.

² Visita técnica à Cecrisa Revestimentos S/A.

Durante o processo de polimento é utilizado um equipamento dotado de diversas cabeças polidoras, compostas de materiais abrasivos, cujo contato com peças em alta rotação, velocidade controlada e presença de água, executa o polimento (BITTENCOURT, 2002). Já o objetivo do polimento, é obter placas com aparência altamente brilhante, uma característica bastante valorizada pelos consumidores, pois, além de contribuírem na limpeza, também agregam forte senso estético.

Por fim, as placas cerâmicas recebem uma classificação onde os primeiros parâmetros avaliados são os referentes à tolerância dimensional, à curvatura e aos defeitos de ortogonalidade. As placas cerâmicas que são rejeitadas nesse processo são descartadas, gerando novos lotes de chamote (BARBOSA, 2011). Os defeitos superficiais e de tonalidade são verificados visualmente, e semanalmente são realizados ensaios de flexão, para o controle de qualidade das peças. A partir dos resultados obtidos, principalmente os negativos, as variáveis do processo são revisadas (BARBOSA, 2011).

3.5 O Marmorite

De acordo com Camargo (2010), o marmorite é um piso rígido (Figura 6), geralmente polido e moldado *in loco*. Sua composição é constituída por grânulos de minerais (mármore, granito, quartzo e calcário, sendo estes utilizados misturados, ou não) e cimento (comum ou branco). Por ser de baixo custo, seu uso no Brasil se tornou uma alternativa aos revestimentos importados e às pedras ornamentais. Como características mecânicas, apresenta elevada resistência à abrasão e baixa absorção de água.

Figura 6 – Piso de marmorite.



Fonte: própria autora - visita técnica à empresa Marmorites Santa Izabel.

Conforme Nascimento et al.,(2011) as granitinas (Figura 7) “são agregados granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para uso em argamassas e concreto. Já Camargo (2010) define que: “são grãos de rochas moídas, derivadas de um processo de moagem seletiva por cores e granulometria”. Os grãos maiores conferem ao piso uma maior resistência à abrasão, enquanto que a resistência mecânica está relacionada ao tipo de mineral empregado, sendo maior no quartzo, intermediária no granito e inferior no mármore.

Figura 7 – Variações dos tamanhos de granitina.



Fonte: própria autora - visita técnica à empresa Marmorites Santa Izabel.

Para o acabamento estético do piso, comumente são utilizados pigmentos (Figura 8), que não afetam o tempo de pega inicial do cimento, nem a resistência à compressão final do piso. Podem tingir tanto a argamassa feita com cimento branco,

quanto a de cimento comum. Usualmente, para pigmentar são utilizados nas cores vermelho (óxido férrico, Fe_2O_3), amarelo (hidróxido de ferro, FeOOH), preto (magnetita, Fe_3O_4), verde (óxido de cromo, Cr_2O_3) e azul (óxido de cobalto, $\text{Co}(\text{Al},\text{Cr})_2\text{O}_4$) (CAMARGO, 2010). Também são realizadas misturas com as cores principais, com o objetivo de ter uma maior gama de cores.

Figura 8 – Pigmentos (óxidos) utilizados no acabamento do marmorite.



Fonte: Plan Service Engenheiros Associados

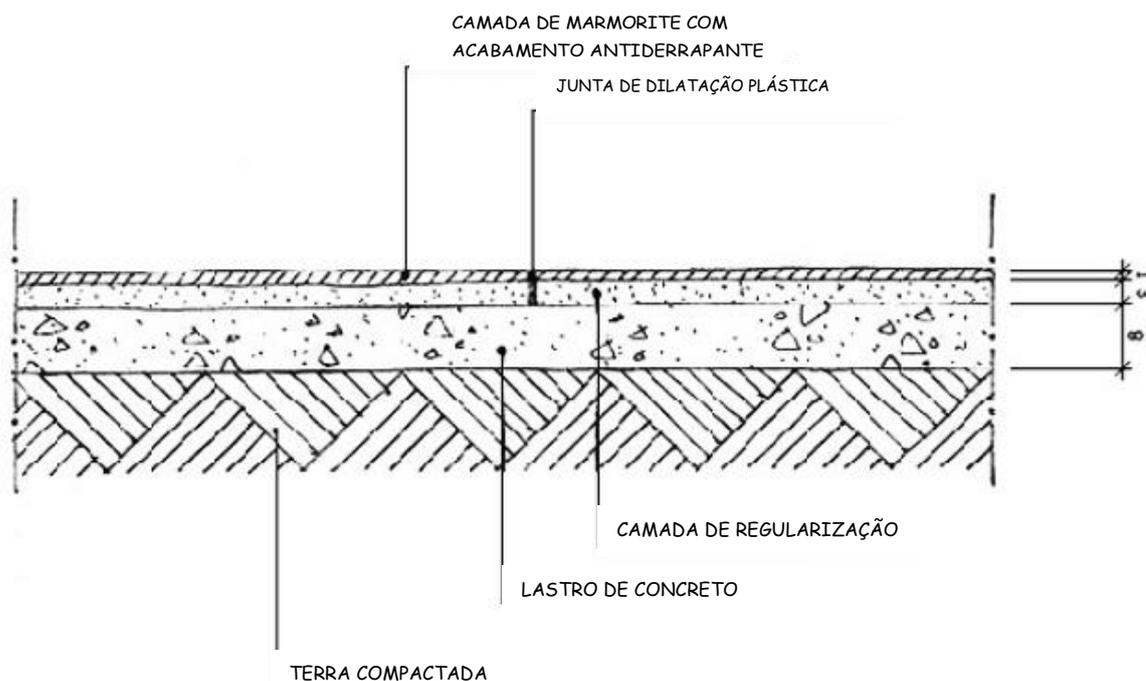
3.6 O Processo de Fabricação do Marmorite

Como já dito anteriormente, o marmorite é um piso feito no próprio local de uso, o que faz da aplicação (Figura 9), a principal etapa do processo de fabricação. Para que seja moldado de maneira correta, são necessários alguns cuidados.

A base deve ser limpa e sem ondulações, com idade de cura superior a 14 dias, o que garante um melhor acabamento final. Este deve ser áspero (sarrafeado), permitindo uma maior aderência da massa. O contrapiso deve ser totalmente regularizado e com lastro de concreto adequado. As juntas, cujos perfis podem ser de latão, alumínio ou PVC, devem estar completamente retilíneas e totalmente unidas, criando um espaço contínuo (CAMARGO, 2010).

Se a cura for úmida é necessária ser durante 7 dias. Após a primeira cura, faz-se o polimento grosso e a estucagem, para preencher os poros abertos. São aguardados mais 2 dias de cura, para que possa ser feito o polimento fino e a aplicação da resina (CAMARGO, 2010).

Figura 9 – Sistema do piso marmorite.



Obs: unidades em centímetros.

Fonte: Camargo (2010).

Para o preparo da argamassa, o cimento, a granitina e o pigmento devem ser misturados a seco, adicionando água em pequenas quantidades, permitindo que a massa se torne plástica, mas sem a ocorrência de segregação do material (CAMARGO, 2010).

Conforme o procedimento de execução da empresa Marmorites Santa Izabel, a fabricação do piso marmorite é realizada da maneira descrita abaixo, segundo o sítio eletrônico da Decorbel Revestimento (2015).

Deve-se limpar, molhar bem o local e esfregar nata de cimento e areia (1:2 com vassoura). Com a argamassa de traço em volume de cimento e areia de 1:3 ou 1:4,

fazer o contrapiso (emboço), colocando as juntas e deixando 1 centímetro de altura para o marmorite.

Na fundição, deve-se aplicar a argamassa de cimento e granitina (o mármore triturado) recém-misturada, bem batida, sarrafeia-se, batendo e nivelando, cilindra-se e faz o acabamento com desempenadeira de aço. Após 24h é recomendado molhar bem, repetindo o processo durante 3 dias.

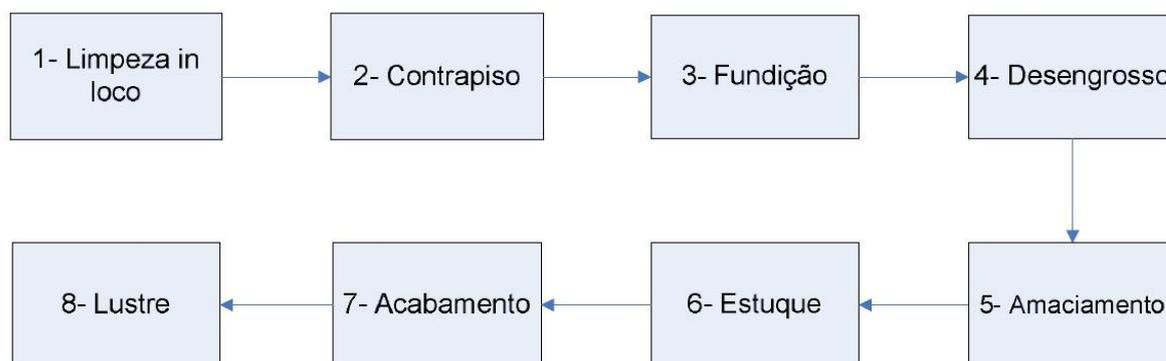
O desengrosso deve ser feito no mínimo 3 dias após a fundição, passando o esmeril grão 24 ou 36 mesh, até ficar plano e a granitina e as juntas bem visíveis. O amaciamento é feito em seguida ao desengrosso, com esmeril grão 60 ou 80 mesh.

Terminando o amaciamento é feito o estuque, ou seja, já sem arranhões, escovam-se todos os orifícios, lava-se muito bem, estuca-se e molha o piso no mínimo 3 dias. O acabamento é realizado 3 dias depois de estucado e mantido úmido. É passado o esmeril grão 220 mesh até desaparecer todas as sombras e ficar bem vidrado. Para aprimorar o acabamento, também é passado o esmeril grão 320 mesh. O lustro é feito em seguida com esmeril grão 320. Recomenda-se friccionar a resina, depois lavar e secar o piso.

A manutenção é realizada com ceras ou resinas acrílicas e recomenda-se não usar sapólio ou ácido no marmorite, além de encerá-lo regularmente. O Consumo por m² x 1 cm de marmorite é de aproximadamente 10Kg de cimento, 4,5L de água, 20Kg de granitina.

De maneira a facilitar a compreensão o processo, foi elaborado o Fluxograma 2 para facilitar visualização das etapas referentes à fabricação do piso.

Fluxograma 2 – Processo de fabricação do marmorite.



Fonte: própria autora

3.7 Elaboração de Compósito Cimentício com Chamote

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um compósito cimentício a partir da adição de chamotes de porcelanato, em substituição à granitina utilizada no piso de referência, o marmorite.

Essa solução visa oferecer soluções práticas para a problemática dos resíduos provenientes de defeitos estéticos e/ou estruturais, que são desprezados pela indústria cerâmica de porcelanato.

Os trabalhos semelhantes a esse como Purificação (2010), Yaprak et al. (2011), Pelisser; Steiner; Bernardin (2012), Hebhoub et al. (2010) e André et al.(2014), utilizando resíduos provenientes de revestimentos cerâmicos ou de outras fontes, têm mostrado resultados significativos, o que demonstra a importância desta pesquisa por novas soluções para a problemática em questão.

Purificação (2010) realizou a produção de pisos intertravados de concreto com utilização de 100% de agregados reciclados e substituição de 10%, 20% e 30% do volume do cimento CPV-ARI por Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP). Os ensaios obtiveram resultados satisfatórios na substituição de 20% do cimento CPV-ARI, pelo pó de porcelanato. Neste traço, foi atingida a resistência mínima de liberação exigida com 7 dias, obtendo média de 36,64 MPa de resistência à compressão.

Yaprak et al. (2011) analisaram os efeitos da utilização de agregados finos reciclados de concreto em substituição de areia de rio, para a fabricação de novos concretos. A substituição ocorreu em 10, 20, 30, 40, 50 e 100%, sendo realizados os ensaios de absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias de cura, sendo que os melhores resultados foram a partir da incorporação de 10% do resíduo na mistura. Obtendo valores de absorção de água de 1,7% e 44,10 MPa de resistência à compressão.

Pelisser; Steiner; Bernardin (2012) analisaram a eficiência da hidratação do cimento Portland a partir da adição de 10 e 20% de resíduo de polimento de porcelanato na pasta do cimento. Os resultados de resistência nas argamassas feitas com idade de cura de até 56 dias mostraram um aumento significativo da resistência à compressão, maior do que 50%, melhorando o desempenho do cimento e contribuindo, de tal modo, com a investigação de novos materiais que possam ser usados de maneira substitutiva em relação às matérias-primas originais.

Hebhoub et al. (2010) demonstraram a possibilidade de utilizar resíduos finos de mármore como substitutos dos agregados naturais na produção de concreto. A substituição ocorreu em três etapas: a primeira mistura foi em substituição da areia, a segunda, em substituição do cascalho, e a terceira, em substituição a areia e o cascalho. As formulações foram produzidas com relação de água/cimento constante. Os resultados mostraram que a substituição dos agregados naturais pelos resíduos de mármore foi melhorada em todas as formulações, podendo ocorrer em até 75%, favorecendo, dessa maneira, a resistência mecânica do concreto.

André et al.(2014) avaliaram a influência da substituição de agregados primários (basalto, granito e pedra calcária) por agregados graúdos de resíduo de mármore, em proporções de 20, 50 e 100% do volume total de agregados, para a elaboração de concreto. As misturas foram testadas no estado fresco, para avaliar a melhora da aplicabilidade e da densidade, e no estado endurecido, para avaliar a resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e imersão, carbonatação e penetração de cloretos. Os resultados indicaram que não existem diferenças significativas entre um concreto produzido por agregados primários ou pelos agregados residuais, tornando a utilização desse resíduo perfeitamente viável.

A partir das informações citadas, é possível constatar que os estudos provenientes da análise da substituição de matérias-primas por agregados residuais têm se tornado uma realidade. Dessa maneira, as pesquisas contribuem com soluções que permitam a diminuição dos impactos ambientais gerados pelos resíduos, além de divulgarem resultados importantes gerados pelas incorporações.

4. METODOLOGIA

4.1 Etapas do Desenvolvimento do Trabalho

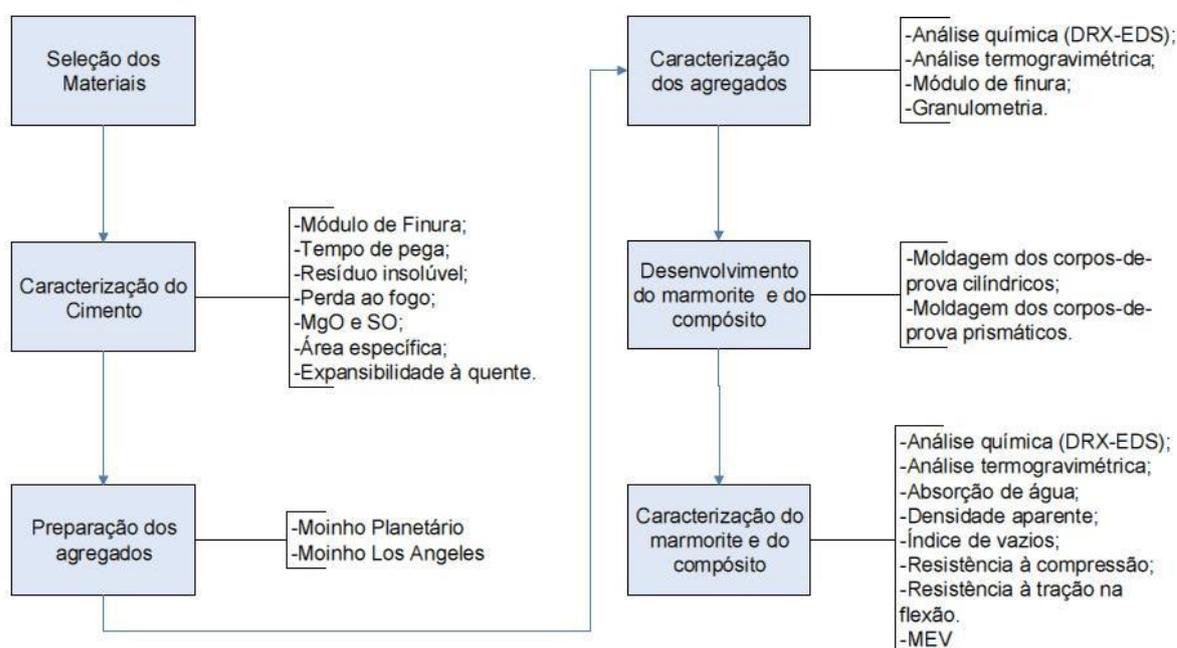
Os experimentos iniciaram pela caracterização dos agregados, sendo que a primeira etapa constou da preparação dos mesmos. Para tanto, a placa de porcelanato foi quebrada e moída empregando o moinho Los Angeles. O ensaio de granulometria prescrito pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) – agregados: determinação da composição granulométrica foi realizado para que houvesse uma referência em relação à distribuição dos tamanhos de grãos.

Em seguida, foram preparadas frações das amostras moídas, tanto do porcelanato quanto da granitina, para caracterização química empregando as técnicas de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TGA).

Na terceira etapa, foram confeccionados corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos do marmorite e de porcelanato, identificado como compósito, para realização dos ensaios mecânicos e de absorção de água, nas respectivas idades de cura de 3, 7, 14 e 63 dias. No total, foram moldados 5 corpos de prova de cada idade para o ensaio de compressão, 3 corpos-de-prova nas respectivas idades para o ensaio de absorção de água, e 3 corpos-de-prova para o ensaio de tração na flexão na idade de 28 dias. Por fim, as amostras fraturadas com idade de cura de 63 dias foram analisadas micrograficamente, com o uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O Fluxograma 3 detalha as etapas do trabalho desenvolvido. Inicialmente foi realizada a seleção dos materiais, em seguida foram caracterizados o cimento e agregados, cujos ensaios realizados também estão detalhados. Foi desenvolvido e caracterizado o compósito cimentício e moldados corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos para a verificação da interação dos agregados e a matriz. Por fim, todos os corpos-de-prova foram ensaiados.

Fluxograma 3 – Etapas referentes à elaboração dos corpos de prova do marmorite e do compósito com chamote.



Fonte: própria autora.

4.2 Visita Técnica

Foram realizadas duas visitas técnicas, a primeira na empresa Marmorites Santa Izabel, em Belo Horizonte-MG, e a segunda, em uma unidade da empresa Cecrisa na cidade de Santa Luzia-MG. As visitas técnicas tiveram em ambas, objetivos de acompanhar todo o processo de produção, tanto do marmorite, quanto do porcelanato e, sobretudo, o recolhimento de amostras necessárias para esse trabalho. Para o desenvolvimento a empresa Marmorites Santa Izabel concedeu 20 kg do marmorite moído na granulometria padrão industrial e a Cecrisa forneceu uma placa de porcelanato, tamanho 120x60cm, para que esta pudesse ser processada conforme a necessidade do projeto a ser executado.

4.3 Materiais Utilizados

Para a preparação das composições foram empregadas matérias-primas de características similares às utilizadas nas indústrias para a fabricação do Marmorite.

Os materiais empregados neste trabalho foram: chamote de porcelanato Portobello³, granitina da empresa Marmorites Santa Izabel⁴ e cimento Portland de alta resistência inicial - CP V⁵.

Nesta pesquisa foi utilizado Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI MAX), dado que este material não possui adições significativas. Segundo a NBR 5733 (ABNT, 1991) este cimento possui em sua constituição, teores entre 95 e 100% de clínquer e sulfato de cálcio, com a adição de até 5% de material carbonático na produção do aglomerante. O cimento utilizado foi o Cimento Nacional doado pela Brennand Cimentos.

As composições foram preparadas com a mistura de água, cimento e agregado, com traço 1:2. A mistura foi realizada a partir de um misturador mecânico de argamassa e a composição das misturas foi constituída de 280g de água, 624g de cimento e 1248g de agregado graúdo (granitina ou porcelanato) (Tabela 1).

Tabela 1 – Proporção de materiais utilizados

Materiais	Descrição	Quantidade (g)
Aglomerante	Cimento Portland de alta resistência inicial - CPV	624
Agregado	Granitina ou Chamote de porcelanato britado	1248
Água	Água potável	280

Fonte: própria autora

4.4 Métodos

4.4.1 Preparação dos agregados

³ Material cedido pela empresa Cecrisa Revestimentos S/A: placa 1200x600mm.

⁴ Material cedido pela empresa Marmorites Santa label: 20 kg de granitina.

⁵ Material cedido pela Brennand Cimentos.

Os experimentos se iniciaram pela preparação dos agregados, onde as amostras de granitina e de chamote de porcelanato (Figura10) foram selecionadas e preparadas para os ensaios de caracterização a partir da moagem dos grãos no moinho planetário Fritsch Pulverisette (Figura 11) com rotação de 300 rpm e com duração de 10 minutos. Os agregados foram processados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais DET/CEFET-MG

Figura 10 – Amostras para caracterização.



Fonte: própria autora.

Figura 11 – Moinho planetário.



Fonte: própria autora.

4.4.2 Preparação dos grãos de chamote de porcelanato

Para que o chamote de porcelanato fosse utilizado na moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos, foi necessário martelar a placa cerâmica, para depois processá-la no moinho Los Angeles, o qual teve a função de moer os chamotes. De

acordo com o processo de fabricação do marmorite, a maneira correta para beneficiar o agregado seria a partir da britagem, mas como não havia esse equipamento na instituição, o processo foi realizado de maneira semelhante, através do Moinho Los Angeles (Figura 12). Essa ação foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais DET/CEFET-MG, e a utilização do moinho foi conduzida com os seguintes parâmetros: velocidade de 300 rpm, durante 10 minutos e 20 esferas de metal.

Figura 12 – Moinho Los Angeles



Fonte: própria autora

Após a moagem do chamote de porcelanato, os grãos de chamote foram peneirados conforme ensaio de granulometria feito pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003): agregados: determinação da composição granulométrica, para que seus tamanhos pudessem ser registrados.

De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), as peneiras selecionadas fizeram parte da série normal estabelecidas na Tabela 2. A dimensão máxima característica corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Tabela 2 – Série de peneiras

Série Normal	Série intermediária
75mm	-
-	63mm
-	50mm
37,5mm	-
--	31,5mm
--	25mm
19mm	-
-	12,5mm
9,5mm	-
-	6,3mm
4,75mm	-
2,36mm	-
1,18mm	-
600µm	-
300µm	-
150µm	-

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Através da NBR NM 248 (ABNT, 2003), tem-se a informação sobre o cálculo do módulo de finura, que é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio são: balança (com resolução de 0,1% da massa da amostra do ensaio); estufa (capaz de manter a temperatura no intervalo de $100 \pm 5^\circ\text{C}$); peneiras; agitador mecânico de peneiras; bandejas; escova ou pincel e fundo avulso da peneira.

Para a realização do ensaio, em primeiro lugar, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 100°C , após esfriar em temperatura ambiente foram determinadas as suas massas (m_1 e m_2). Após, as peneiras foram empilhadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo e com o fundo de peneiras para o conjunto.

Os cálculos necessários para a conclusão do ensaio são as porcentagens médias, retida e acumulada, em cada peneira, com aproximação de 1% e o módulo de finura, com aproximação de 0,01.

O ensaio de granulometria (Figura 13) foi importante para caracterizar e limitar o tamanho máximo de grão, para ambos os agregados (granitina e chamote).

Figura 13 – Ensaio de granulometria.



Fonte: própria autora.

No presente trabalho, optou-se por utilizar todo o resíduo proveniente da moagem do chamote de porcelanato, em vez de selecionar o tamanho de grão similar ao da granitina. Dessa maneira há um ganho sustentável considerável, já que o objetivo principal é o reuso completo do material. Para futuras pesquisas, pode-se priorizar o uso do chamote de acordo com as peneiras usadas no tamanho do agregado para a fabricação do marmorite, se a estética for um parâmetro a ser considerado.

4.4.3 Desenvolvimento do marmorite e do compósito com chamote

Para a realização do trabalho, foram elaborados corpos de prova do marmorite e do compósito com chamote, feito a partir da moldagem da argamassa comercial com granitina, de modo que suas características físico-químicas fossem usadas para comparação com o compósito feito de argamassa e chamote de porcelanato. O piso

de marmorite foi elaborado a partir de uma matriz formada de pasta de cimento, agregado graúdo, miúdo e água.

4.4.3.1 Moldagem dos corpos de prova – marmorite e compósito com chamote

A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos de prova cilíndricos, de 50 mm de diâmetro e 100mm de altura, foi conduzida de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996):cimento Portland: determinação da resistência à compressão. O marmorite foi preparado por meio de um misturador mecânico e compactado manualmente nos moldes. A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais DET/CEFET-MG, conforme as recomendações da norma.

A colocação da granitina e do chamote de porcelanato na forma (Figura 14) foi feita com o auxílio da espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo em cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, sendo homogeneamente distribuídos. Após a compactação, os corpos de prova foram rasados com auxílio de uma espátula, foram identificados e depositados em um local para aguardar a desforma.

Figura 14 – Preparação dos corpos-de-prova (marmorite e compósito com chamote)



Fonte: da própria autora

Nas primeiras 24 horas de cura, os corpos-de-prova foram mantidos nas formas (Figura 15), sendo desmoldados após este período e colocados em recipientes

hermeticamente fechados e estanques. Aos 3, 7, 28 e 63 dias de idade, os corpos-de-prova foram retirados da cura e ensaiados mecanicamente.

Figura 15 – Moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão e tração na flexão (marmorite e compósito com chamote).



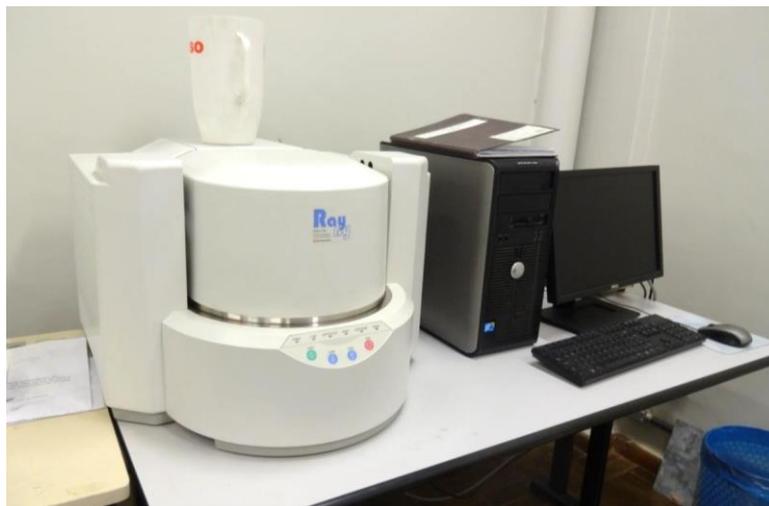
Fonte: da própria autora

4.4.4 Caracterização: Análise química (agregados e argamassas)

4.4.4.1 Fluorescência de Raios X

A análise química das matérias-primas foi necessária para determinar a composição dos agregados. Os resíduos foram caracterizados no Laboratório de Caracterização do DEMAT/CEFET-MG por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios – X por energia dispersiva (EDX). A fluorescência foi obtida pelo método do pó, coletado em um equipamento EDX – 720 SHIMADZU, nas seguintes condições de operação: ar sintético e colimador de 10mm (Figura 16).

Figura 16 – Fluorescência de raios –X por Energia Dispersiva (FRX/EDX)



Fonte: própria autora.

4.4.4.2 Difração de raios X

As análises por difração de raios X nas amostras de granitina, chamote de porcelanato, marmorite e compósito com chamote, foram realizadas no Laboratório de Caracterização do DEMAT/CEFET-MG no Difratorômetro de Raios X da marca SHIMADZU XRD (Figura 17) modelo 7000, usando radiação Cu ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$), produzidos sob condição 40kV e 30mA. Os espectros de difração foram coletados varrendo no intervalo de 2θ , $4^\circ - 80^\circ$, passo 0,02, velocidade de $2^\circ/\text{min}$ e fendas de 1° e 0,3mm.

Figura 17 – Difratorômetro de Raios – X (DRX).

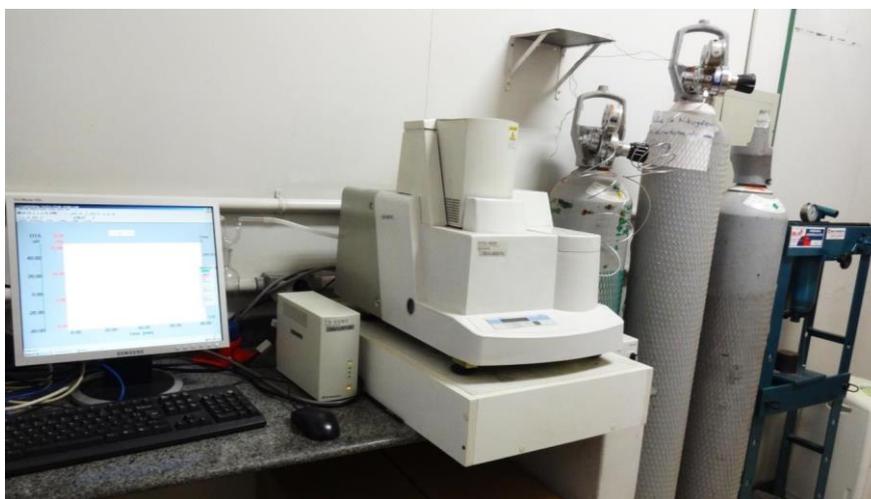


Fonte: própria autora.

4.4.4.3 Termogravimetria (TGA/DTA)

Para o ensaio de termogravimetria, as amostras de granitina, chamote de porcelanato, marmorite e compósito com chamote foram analisadas no Laboratório de Análises Térmicas/CEFET-MG no analisador térmico da marca SHIMADZU DTA – 60H. Os parâmetros de ensaio para as amostras de granitina, porcelanato, marmorite e compósito com chamote foram: taxa de aquecimento 10°C/min, temperatura máxima 1200°C, atmosfera utilizada de ar sintético, fluxo de gás 50mL/min. A massa utilizada variou de 5,5 a 5,8 mg (Figura 18).

Figura 18 – Analisador térmico (TGA-DTA)



Fonte: própria autora

4.4.5 Caracterização: Análise física (argamassas)

4.4.5.1 Determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios

Para o ensaio de massa específica foi utilizada como referência a norma NBR 9778 (ABNT, 2009): argamassa e concreto endurecido – determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Todos os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais DET/CEFET-MG.

Para a realização do ensaio, foram necessários os seguintes equipamentos: balança hidrostática, com capacidade mínima para 10 kg e resolução de 1g; estufa capaz de manter a temperatura entre 95 a 105°C; recipiente constituído de um cesto de arame com de capacidade para 4dm³ a 7dm³ e tanque de água. Nos ensaios realizados não foi utilizado o aquecimento da água, todas as medidas foram conduzidas com a água a temperatura ambiente.

Para o ensaio de massa específica, o procedimento do ensaio inicia-se com a pesagem da amostra e submersão (Figura 19) na água à temperatura ambiente por um período de (24±4) h. Após, retira-se a amostra da água e envolve-a em pano absorvente até que toda a água visível seja eliminada, ainda que a superfície da mesma se apresente úmida. Imediatamente após ser enxugada (Figura 20), pesa-se a amostra com precisão de 1g (m_i massa na amostra saturada).

Figura 19 – Corpos de prova submersos e identificados



Fonte: própria autora

Figura 20 – Pesagem dos corpos-de-prova



Fonte: própria autora

Logo após, coloca-se a amostra no recipiente, para pesá-la submersa em água (Figura 21) mantida a (23 ± 2) °C com precisão de 1g (m_i , massa da amostra saturada e imersa em água).

Para o cálculo da massa da amostra seca é necessário secar a amostra a 100°C até a massa ficar constante, deixar esfriar até a temperatura ambiente durante 1h a 3h ou até que a amostra esteja a uma temperatura que permita a sua manipulação (aproximadamente 50°C) e pesar com precisão de 1g (m_s , massa da amostra seca em estufa).

Figura 21 – Pesagem hidrostática



Fonte: própria autora

Os cálculos utilizados para a elaboração da tabela de resultados, retirados da NBR 9778 (ABNT, 2009) foram os referentes à massa específica, absorção de água e índice de vazios.

Para o cálculo da massa específica da amostra seca utiliza-se a expressão:

$$\rho_s = \frac{m}{m_{sat} - m_i} \quad (1)$$

Onde:

ρ_s é a massa específica da amostra seca, em g/cm³;

m_s é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

m_{sat} é a massa da amostra em água após imersão, em gramas;

m_i é a massa da amostra saturada e imersa em água, em gramas.

A equação para o cálculo de absorção de água é feita a partir da fórmula seguinte:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

A é a absorção de água, em porcentagem;

m_{sat} é a massa da amostra em água após imersão, em gramas;

m_s é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

E, por fim, a equação para o cálculo de índice de vazios é a seguinte:

$$IV = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Iv é o índice de vazio;

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra em água após imersão, em gramas;

m_s é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

m_i é a massa da amostra saturada e imersa em água.

4.4.5.2 Ensaio de Compressão e Tração na Flexão (marmorite e compósito com chamote)

A resistência à compressão e à tração na flexão são as propriedades mais importantes a serem investigadas nas argamassas. As amostras foram curadas e testadas de acordo com as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007): concreto: ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. A máquina utilizada para o ensaio foi um equipamento universal (Figura 22) de ensaios EMIC DL30.000 com taxa de carregamento de 0,25 MPa/s.

Figura 22 – Máquina universal de ensaios.



Fonte: da própria autora

Para o ensaio de tração na flexão foram moldados corpos-de-prova de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005): argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, determinação da resistência à tração na flexão e à compressão,

sendo utilizados moldes prismáticos de 40x40x160mm. Para o ensaio, foi utilizada a mesma máquina universal, e com taxa de incremento de carregamento de 50 N/s.

4.4.5.3 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

Para a realização do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Figura 23), foram selecionadas amostras fraturadas do marmorite e do compósito com chamote, com o objetivo de avaliar a interface da matriz com os agregados. Para a realização do ensaio, as amostras foram analisadas no Laboratório de Caracterização do DEMAT/CEFET-MG. A varredura foi feita com aumento de 300x e 500x e análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), com os parâmetros de operação do MEV: corrente de filamento de 30mA, tensão de 25kV, *probe* 5,0, e revestimento das amostras com ouro (Figura 24).

Figura 23 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Fonte: própria autora

Figura 24 – Equipamento para metalização



Fonte: própria autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados em três seções, na primeira serão apresentados os dados de caracterização dos agregados, na segunda, a caracterização do compósito com chamote e a sua interação com os agregados e na terceira, o comportamento do compósito com chamote.

5.1 Caracterização do Cimento

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da caracterização química do cimento Portland de Alta Resistência e na tabela 4 a caracterização física foi fornecida pelo fabricante.

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, foi observado que todos os parâmetros físico-químicos do cimento empregado neste trabalho estão de acordo com as normas estabelecidas como parâmetros de qualidade para este produto.

Tabela 3 – Caracterização química do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências
Resíduo insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,57	≤ 1,0
Perda ao fogo - PF	ABNT NM 18/12	%	3,75	≤ 4,5
Óxido de magnésio - MgO	ABNT NM 21/12	%	1,48	≤ 6,5
Trióxido de enxofre - SO ₃	ABNT NM 16/12	%	2,73	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - CO ₂	ABNT NM 20/12	%	2,61	≤ 3,0

Fonte: NBR 5733 (ABNT, 1991) (valores de referência da Brennard Cimentos).

Tabela 4 – Caracterização física do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências
Área específica (Blaine)	ABNT NBR 16372/15	cm ² /g	4,507	≥ 3.000
Resíduo na peneira #200	ABNT NBR 11579/12	%	0,06	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	0,87	-
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	30,4	-
Início de pega	ABNT NM 65/03	Minutos	142	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	Minutos	191	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/91	mm	0,00	≤ 5,0

Fonte: NBR 5733 (ABNT, 1991) (valores de referência da Brennard Cimentos).

5.2 Caracterização dos Agregados de Porcelanato e Granitina

5.2.1 Fluorescência de raios X

Na tabela 5 são apresentadas as composições químicas em relação aos teores mássicos dos óxidos correspondentes do porcelanato e da granitina.

Tabela 5 – Composição química em termos da composição mássica do Porcelanato e da granitina

Composto	Granitina		Porcelanato	
	Teor (% peso)	Desvio	Teor (% peso)	Desvio
CaO	92,00	0,07	3,29	0,01
SiO ₂	4,76	0,14	64,29	0,29
Fe ₂ O ₃	1,92	0,01	2,51	0,01
K ₂ O	0,66	0,01	3,92	0,02
ZrO ₂	0,21	0,00	8,94	0,01
Al ₂ O ₃	-	0,00	13,05	0,41
TiO ₂	-	0,00	1,66	0,02

Fonte: própria autora

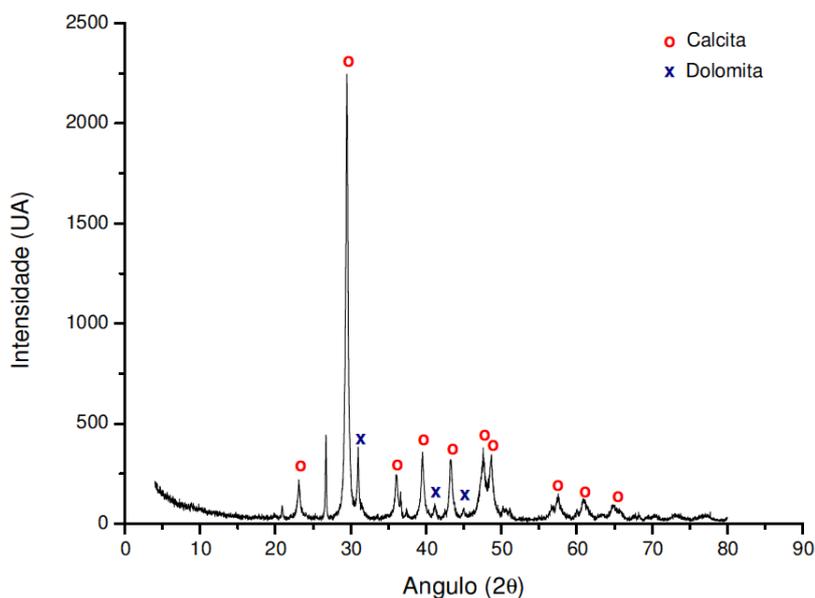
Pelos dados apresentados na tabela 5, foi observado que existem grandes diferenças na composição química dos dois agregados usadas no preparo da argamassa. A granitina é mais rica em óxido de cálcio, aproximadamente 92% de sua composição mássica, que muito provavelmente é proveniente de compostos de calcário e/ou óxido de cálcio, como por exemplo o mármore, calcário, etc. E na granitina 4,8 % de sua composição é constituída por composto na qual entra em sua composição os silicatos.

No caso do porcelanato, foi observado que sua composição química é formada por compostos que contém silicato (64,3%), óxido de alumínio (13,1%) e óxido de zircônio (8,9%) e titânio (1,7%).

5.2.2 Difração de raios- X (DRX)

A Figura 25 representa o difratograma obtido experimentalmente para o agregado de granitina.

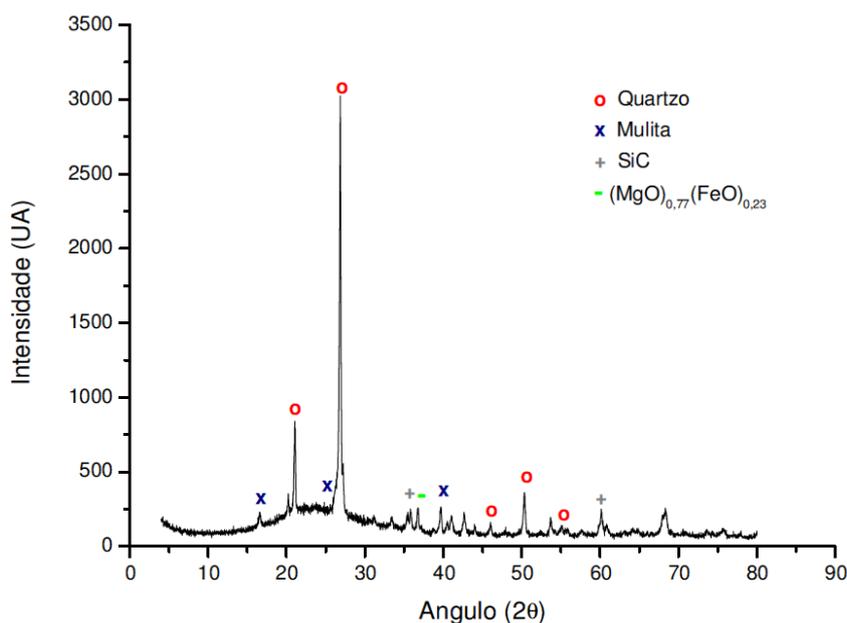
Figura 25 – Difratoograma do agregado de granitina.



Fonte: própria autora

Analisando o difratograma da Figura 25, observa-se que as principais fases cristalinas existentes são de calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$). Segundo Suctu et al. (2015) os resíduos de mármore podem ser constituídos por carbonatos de cálcio e magnésio e também silicatos, entretanto, neste estudo, a quantidade de α -quartzo é demasiada baixa para ser detectada por DRX, tendo, no entanto, sua presença confirmada pela fluorescência de raios X. Resultado semelhante foi verificado por Fahad et al.(2014).

Figura 26 – Difratoograma do agregado de porcelanato.



Fonte: própria autora

Analisando o difratograma da Figura 26, observa-se que o resíduo é formado por fases cristalinas que foram identificadas como sendo a mulita, quartzo, carbeto de silício e uma mistura entre os óxidos de magnésio e ferro.

Quando o porcelanato é queimado a partir de 1200°C forma-se a fase mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) no material. Essa fase é formada a partir de espinélios e aluminossilicatos amorfos obtidos a 980 °C, originada das argilas que possuem como minerais argilosos a caulinita e a illita, além de outros aluminossilicatos. A fase mulita é a fase que confere ao porcelanato uma melhoria em seu desempenho mecânico, por exemplo, no seu elevado módulo de flexão, análise que também foi observada no trabalho de Santos (2014).

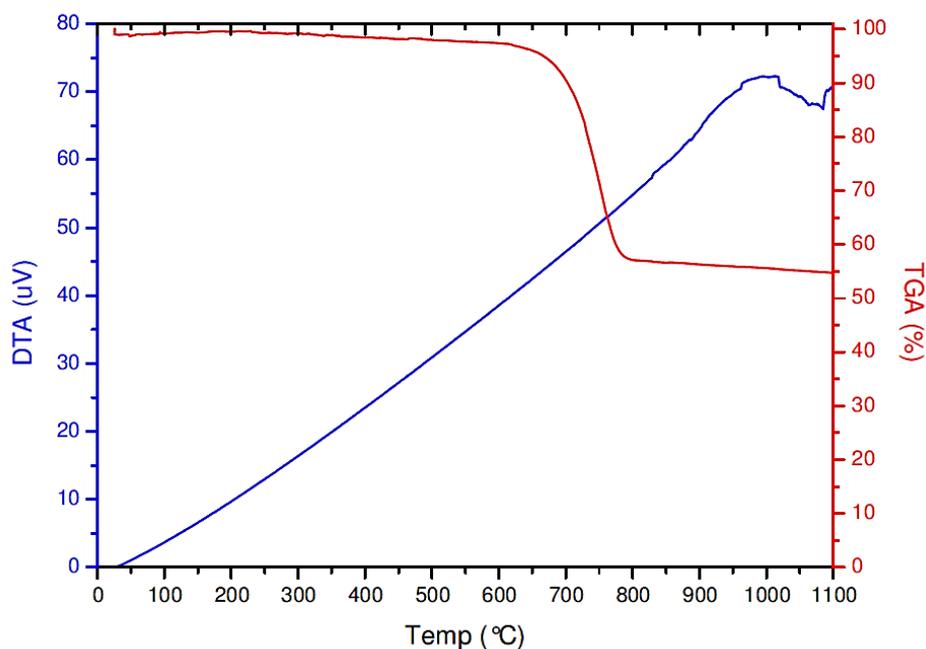
De acordo com Marques (2007) o porcelanato é um material constituído por uma grande quantidade de fase vítrea e fases cristalinas que podem ser detectadas por meio da técnica de difração de raios X, fato constatado no difratograma da Figura 26. Os óxidos fundentes presentes no porcelanato (Fe_2O_3 , Na_2O e K_2O) em geral se

concentram na fase vítrea após o processamento, conforme Santos (2014) já havia analisado.

5.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA-DTA)

A Figura 27 representa o comportamento térmico da amostra de granitina determinado empregando-se a Termogravimetria (TGA-DTA). Pela análise da curva termogravimétrica, observa-se que o processo de decomposição da granitina ocorre em três etapas distintas.

Figura 27 – Gráfico da análise termogravimétrica da granitina.



Fonte: própria autora

A primeira etapa inicia à temperatura de 26°C e termina aos 620°C. Nesta faixa de temperatura foi observada uma perda de massa de 2,15% em relação à massa inicial, esta etapa pode ser associada à perda de água do material.

Na segunda etapa, que ocorreu no intervalo de 620°C a 790°C, houve a maior perda de massa do material, no teor de 40,28%. -Conforme Aliabdo et al. (2014) esse fenômeno ocorre por causa da decomposição térmica de carbonato de cálcio e de magnésio provenientes da calcita (CaCO_3) e da Dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) e pela presença de hidróxido de cálcio, o que pôde ser corroborado no gráfico da Figura 27.

Na terceira etapa, onde houve a variação de temperatura de 790°C a 1100°C, tendo uma perda de massa no valor de 7,43%. A partir dessa temperatura, o material não perdeu mais massa, gerando um resíduo com 53,29% da quantidade total, encontrando-se na forma de óxido de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO), resultado semelhante ao de Suctu et al.,(2015).

Os resultados apresentados acima são resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise da variação de massa da granitina nas etapas da TGA-DTA

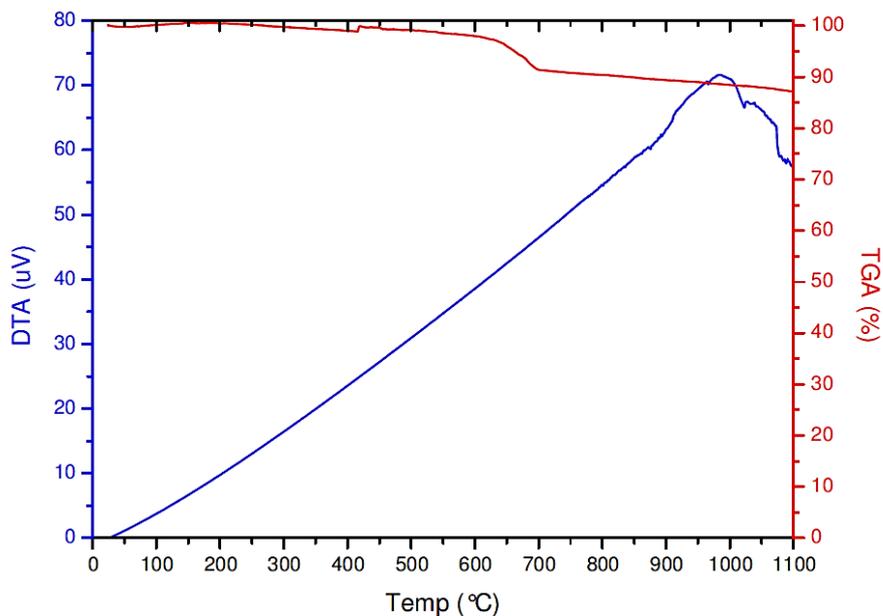
Etapa	Temperatura °C	Massa inicial (mg)	Massa final (mg)	Perda de massa (%)
1	26 – 620	8,5052	8,3224	2,15
2	620– 790	8,3224	4,8966	40,28
3	790 – 1100	4,8966	4,5325	7,43
Resíduo	1100	4,5325		-

Fonte: própria autora

Pela análise dos dados contidos na Tabela 6, foi observado que o agregado de granitina é estável termicamente até a temperatura de 620°C, nesta temperatura o composto degrada e libera uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2), molécula gerada pela decomposição da calcita e da dolomita.

Pela curva termogravimétrica (Figura 28) observa-se que o processo de decomposição do porcelanato ocorreu em quatro etapas distintas.

Figura 28 – Gráfico da análise termogravimétrica do porcelanato.



Fonte: própria autora

A primeira etapa inicia à temperatura de 25°C e termina aos 410°C. Nesta faixa de temperatura foi observada uma perda de massa de 1,12% em relação à massa inicial, esta etapa foi associada à perda de umidade da estrutura do material.

Na segunda etapa, que ocorreu no intervalo de 410°C a 609°C, houve uma perda de massa do material de 1,05% em relação à massa inicial do composto.

Na terceira etapa, que ocorreu entre as temperaturas de 609°C a 690°C, houve uma perda de massa de 6,41%, acredita-se, conforme resultado apresentado por Zhou et al. (2011), que tal fato poderia ser a transição de quartzo α para β .

A quarta e última etapa, ocorreu na faixa de temperatura de 690°C a 1100°C, nesta etapa houve uma perda de massa de 6,41%. Esta etapa pode ser atribuída ao colapso estrutural de metacaulinita e a formação de alumina (Al_2O_3). A partir de 1159°C, onde ocorre a sinterização do porcelanato, tem-se a fusão completa de

feldspato e formação da mulita, conforme, também, foi observado por Zhou et al.(2011). Após essa fase o material não perdeu mais massa, gerando um resíduo com 85,1% em teor mássico em relação à massa inicial, ao final desta etapa todos os constituintes presentes no resíduo encontram-se na forma final de óxido.

Os resultados apresentados acima foram resumidos na tabela 7.

Tabela 7 – Análise da variação de massa do porcelanato nas etapas da TGA-DTA

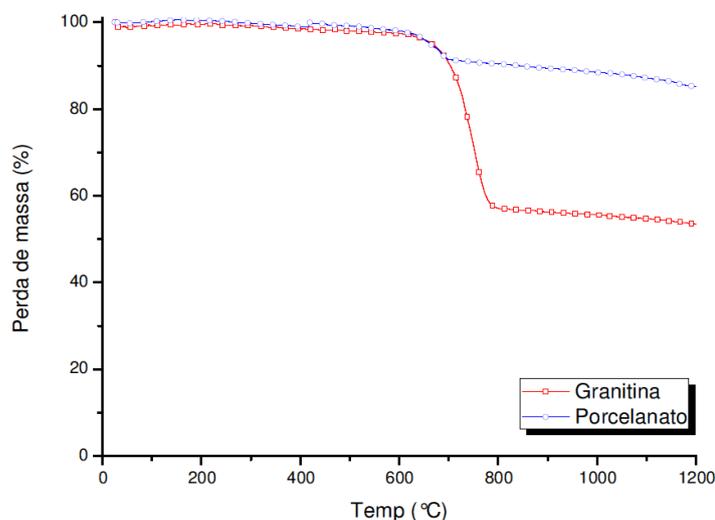
Etapa	Temperatura °C	Massa inicial (mg)	Massa final (mg)	Perda de massa (%)
1	25 – 410	5,3047	5,2455	1,12
2	410 – 609	5,2455	5,1900	1,05
3	609 – 690	5,1900	4,8535	6,34
4	690 – 1100	4,8535	4,5134	6,41
Resíduo	1100	4,5134		-

Fonte: própria autora

Analisando a Tabela 7, observa-se que o agregado de porcelanato foi estável termicamente até a temperatura de 410°C. O comportamento térmico observado para este agregado é muito diferente do da granitina. Embora a faixa de estabilidade térmica seja parecida, este compósito com chamote apresenta uma estabilidade térmica, em toda a faixa estudada, muito maior do que o agregado de granitina. Ao final do processo, foi observado que a perda ocorrida durante toda a faixa de temperatura estudada foi de 15% em relação à massa inicial.

Por fim, têm-se o gráfico comparativo da TGA-DTA dos agregados, na figura 29. Avaliando a perda de massa durante o processo de análise termogravimétrica, verifica-se que a estabilidade do porcelanato é muito maior do que da granitina.

Figura 29 – Análise da perda de massa dos agregados.



Fonte: própria autora

Foi observado que a primeira etapa de degradação de ambos os agregados, desconsiderando a etapa associada à perda de umidade, ocorrem em uma faixa de temperatura muito próximas.

5.2.4 Curva granulométrica

Os agregados apresentaram composições granulométricas conforme exibidas nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado (granitina)

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)		Material retido %				Material Passante (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Média	Acumulado	Acumulado
9,50							100,0%
6,30	52,78	52,68	10,6%	10,5%	10,5%	10,5%	89,5%
4,80	199,80	194,73	39,9%	39,0%	39,5%	50,0%	50,0%
2,36	231,27	234,31	46,3%	46,9%	46,6%	96,6%	3,4%
1,18	14,36	16,73	2,9%	3,3%	3,1%	99,7%	0,3%
0,60	0,15	0,10	0,0%	0,0%	0,0%	99,7%	0,3%
0,30	0,15	0,03	0,0%	0,0%	0,0%	99,7%	0,3%
0,15	0,09	0,07	0,0%	0,0%	0,0%	99,7%	0,3%
Fundo	1,40	1,35	0,3%	0,3%	0,3%	100%	0,0%
Amostra seca (g):	500	500					

Fonte: própria autora

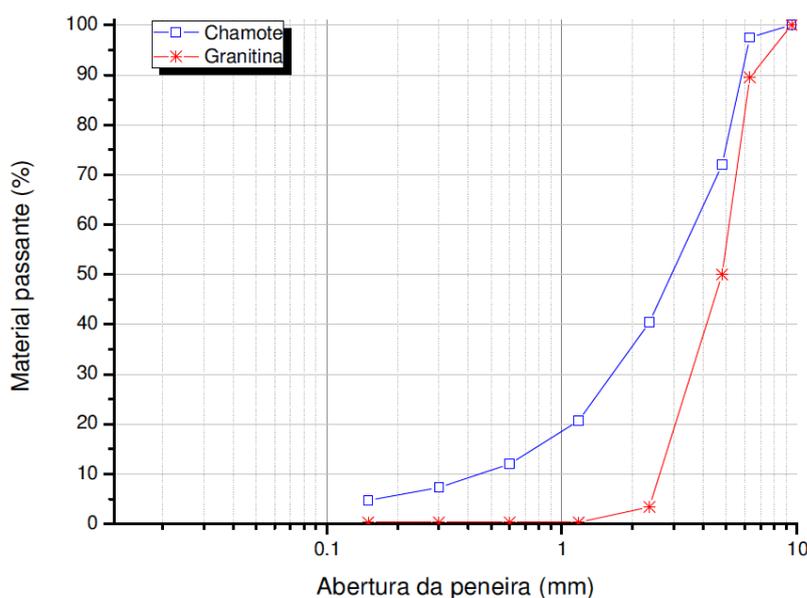
Tabela 9 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado (chamote de porcelanato)

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)		Material retido %				Material Passante (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Média	Acumulado	
9,50							100,0%
6,30	10,03	14,67	2,0%	2,9%	2,5%	2,5%	97,5%
4,80	114,18	140,46	22,8%	28,1%	25,5%	28,0%	72,0%
2,36	152,66	162,90	30,5%	32,6%	31,6%	59,6%	40,4%
1,18	105,33	92,00	21,1%	18,4%	19,7%	79,3%	20,7%
0,60	49,68	37,79	9,9%	7,6%	8,7%	88,0%	12,0%
0,30	27,37	19,69	5,5%	3,9%	4,7%	92,7%	7,3%
0,15	14,72	11,00	2,9%	2,2%	2,6%	95,3%	4,7%
Fundo	26,03	21,49	5,2%	4,3%	4,8%	100,0%	0,0%
Amostra seca (g):	500	500					

Fonte: própria autora

A Figura 30 apresenta as curvas granulométricas da granitina e do chamote de porcelanato, sendo que os módulos de finura foram 5,56 e 4,45 respectivamente. A DM (dimensão máxima) característica foi igual a 6,3mm. O chamote de porcelanato adicionado apresentou, portanto, uma granulometria bem menor que a granitina.

Figura 30 – Gráfico da Curva Granulométrica.



Fonte: própria autora

De acordo com os resultados obtidos, é possível analisar que, para a granitina, o volume retido acumulado na peneira 2,36mm é de 96,6%, enquanto que, para o porcelanato, o valor foi de 59,6%. Logo, é possível constatar que a quantidade de porcelanato que atua como agregado graúdo de tamanho semelhante à granitina é de aproximadamente 60%, sendo que a quantia restante, pertencente às peneiras de malhas menores, atuou como agregado miúdo na argamassa. Pelo pó obtido da moagem do porcelanato ser bastante fino, é provável que ele tenha contribuído na performance da argamassa, ao preencher poros que ficariam abertos em outras condições.

No presente trabalho, a curva granulométrica do agregado porcelanato foi estabelecida com o objetivo de verificar os tamanhos de grãos obtidos a partir da moagem no moinho Los Angeles. Como foi possível observar, os grãos não foram selecionados de acordo com os tamanhos de grão da granitina (oferecidos pela Marmorite Santa Izabel), uma vez que o objetivo deste trabalho é o de aproveitar ao máximo o resíduo gerado. Dessa maneira, a granitina foi utilizada apenas como um modelo para conferir se, na moagem, era possível obter agregados graúdos semelhantes no chamote de porcelanato moído.

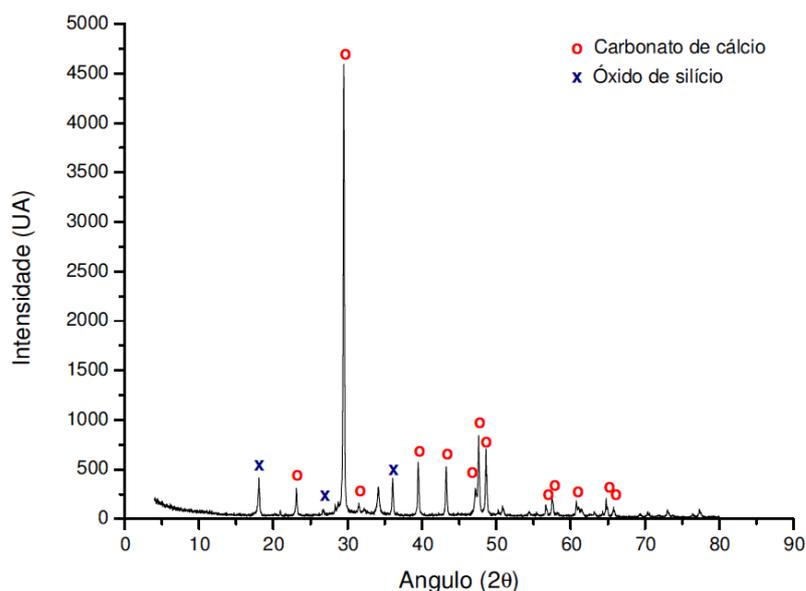
5.3 Caracterização do Marmorite e do Compósito com Chamote

5.3.1 Difração de raios- X (DRX)

A Figura 31 apresenta o difratograma da argamassa obtida empregando como agregado a granitina. Analisando o difratograma da Figura 31, foram observadas as principais fases do marmorite encontradas foram de carbonato de cálcio e o óxido de silício. A fase CaCO_3 encontra-se em maior quantidade, sendo que este carbonato é proveniente do cimento e da granitina, que apresenta em sua composição a calcita e dolomita, ver item 5.1.2, e em menor quantidade, óxido de silício. Ocorrência semelhante foi observada no trabalho de Aliabdo; Elmoaty; Auda (2015). Analisando o difratograma abaixo, observa-se que as principais fases cristalinas existentes são de Carbonato de Cálcio (CaCO_3) e Óxido de silício ($-\text{SiO}_2$). Devido à semelhança química entre o cimento e o agregado, acredita-se que haverá uma forte interação

entre estas fases, o que resultará em uma melhoria na propriedade mecânica da argamassa obtida. Esta observação deverá ser comprovada pelos ensaios mecânicos de compressão e tração na flexão realizados neste trabalho.

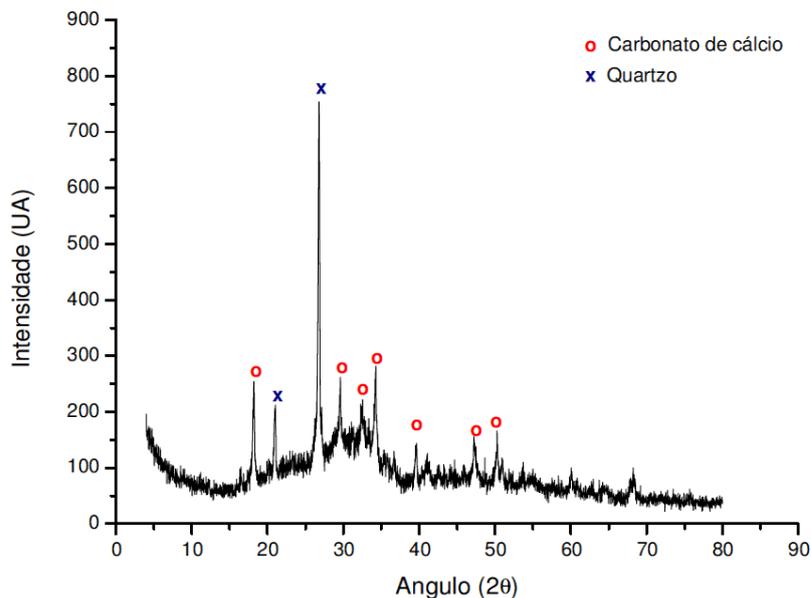
Figura 31 – Difratoograma do marmorite.



Fonte: própria autora

Analisando o difratograma da Figura 32, foi observado que o compósito com chamote é formado por uma fase vítrea (amorfa), evidenciada pela existência de um alargamento na linha base entre os ângulos 15° e 35° em 2θ . Resultado semelhante foi observado nos estudos de Pelisser; Steiner; Bernardin (2012), as fases cristalinas foram identificadas como sendo o quartzo, proveniente dos agregados de porcelanato e de carbonato de cálcio, proveniente do cimento, conforme também observado por Suctu et al. (2015).

Figura 32 – Difratoograma do compósito com chamote.



Fonte: própria autora

5.3.2 Análise Termogravimétrica (TGA-DTA) das argamassas

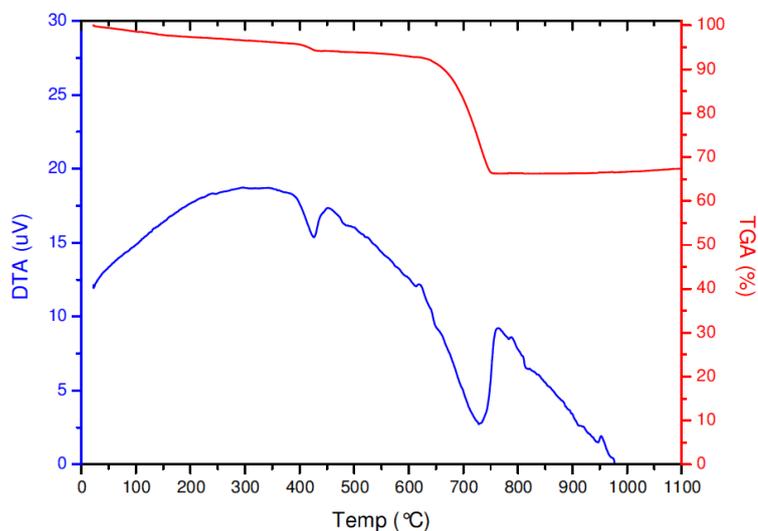
A Figura 33 representa a curva termogravimétrica e da DTA do marmorite. Pelo comportamento apresentado o processo de decomposição do marmorite ocorreu em 3 (três) etapas distintas.

A primeira etapa inicia à temperatura de 23°C e termina à temperatura de 430°C. Nesta faixa de temperatura foi observada uma perda de massa de 5,84% em relação à massa inicial, proveniente da perda de água do material e de acordo com a curva DTA este processo é endotérmico.

Na segunda etapa, que ocorreu no intervalo de 430°C a 650°C, houve uma perda de massa do marmorite de 29,54% devido à liberação do dióxido de carbono, proveniente da decomposição dos carbonatos que entram na composição da granitina. A partir dos 500°C acontece a quebra dos silicatos hidratados da pasta cimentícia, o que também contribui nesta etapa para a perda total de massa. Pela

análise da curva TGA-DTA, foi observado que esta etapa representa um processo endotérmico.

Figura 33 – Gráfico da análise termogravimétrica do marmorite.



Fonte: própria autora

Na terceira etapa, que ocorreu na faixa de temperatura de 650°C a 1100°C, houve uma perda mínima de massa, no valor de 1,76%. A partir dessa temperatura, o material não perdeu mais massa, gerando um resíduo com teor mássico de 65,17% em relação à massa inicial, nesta temperatura os compostos encontram-se na forma de óxido. Pela análise dos dados contidos na Tabela 10, foi observado que o marmorite é estável termicamente até a temperatura de 430°C.

Os resultados apresentados da Figura 33 foram resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise da variação de massa do marmorite nas etapas da TGA-DTA

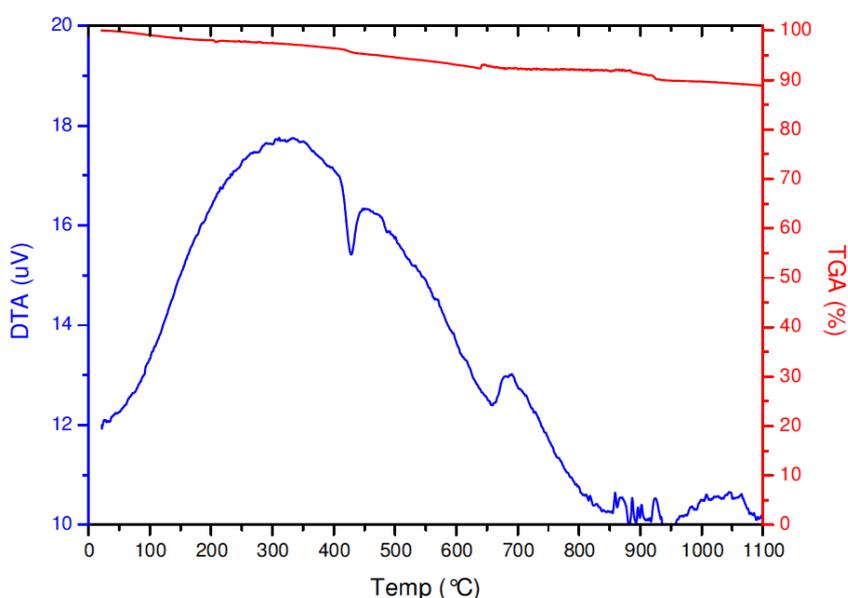
Etapa	Temperatura °C	Massa inicial (mg)	Massa final (mg)	Perda de massa (%)
1	23 – 430	5,5284	5,2057	5,84
2	430 – 650	5,2057	3,6675	29,54
3	650 – 1100	3,6675	3,6026	1,76
Resíduo	1100		3,6026	-

Fonte: própria autora

A Figura 34 representa a curva termogravimétrica e da DTA do comportamento térmico do compósito com chamote. O processo de decomposição do compósito ocorreu em 4 (quatro) etapas distintas.

A primeira etapa inicia à temperatura de 22°C e termina aos 430°C. Nesta faixa de temperatura foi observada uma perda de massa de 2,60%, esta perda foi associada à perda de água do material.

Figura 34 – Gráfico da análise termogravimétrica do compósito com chamote.



Fonte: própria autora

A segunda etapa iniciou à temperatura de 430°C e terminou a 650°C, nesta etapa houve uma perda de massa do material de 4,40%, em relação à massa inicial, esta perda foi associada à decomposição de carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio, semelhante aos trabalhos de Pelisser; Steiner; Bernardin (2012).

Na terceira etapa houve uma perda de massa no valor de 3,10%, esta etapa ocorreu dentro da faixa de temperatura de 650°C a 920°C. De acordo com Pelisser; Steiner; Bernardin (2012), esse fato pode estar relacionado à concentração de hidróxido de cálcio, que pode ser maior que a encontrada.

A quarta etapa iniciou a temperatura de 920°C e terminou à 1100°C, nesta faixa de temperatura foi observada uma perda mínima de massa, no valor de 1,10%. A partir dessa temperatura, o material não perdeu mais massa, gerando um resíduo com teor mássico de 88,8% em relação à massa inicial. Nesta temperatura todos os componentes da mistura encontram-se na forma de óxidos. Conforme Pelisser; Steiner; Bernardin (2012) afirmam que a quantidade de carbonato de cálcio determinada pela análise de TGA-DTA, provavelmente está associada ao calcário adicionado durante a sua produção (0% - 10%, de acordo com a NBR 11578) ou o carbonato de cálcio não sinterizado durante o processo de clinquerização, bem como, no compósito em estudo, proveniente do agregado de porcelanato. Os dados apresentados da análise da figura 34 encontram-se resumidos na tabela 11.

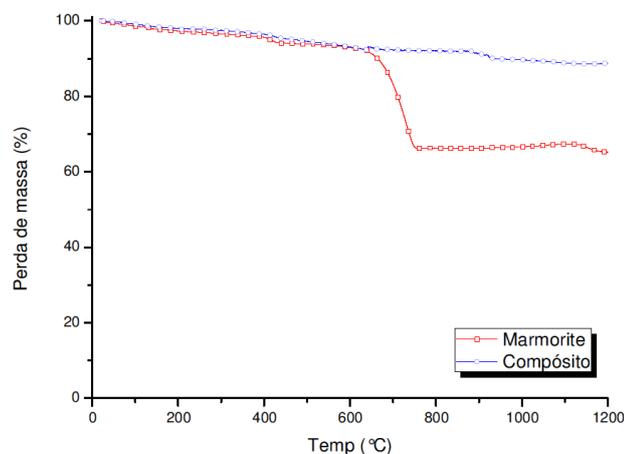
Tabela 11 – Análise da variação de massa do compósito com chamote nas etapas da TGA-DTA

Etapa	Temperatura °C	Massa inicial (mg)	Massa final (mg)	Perda de massa (%)
1	22 – 430	5,8263	5,6747	2,60
2	430 – 650	5,6747	5,4193	4,40
3	650 – 920	5,4193	5,2359	3,10
4	920 – 1100	5,2359	5,1710	1,10
Resíduo	1100	5,1710		-

Fonte: própria autora

Analisando a tabela 11, observa-se que a argamassa de porcelanato foi estável termicamente até a temperatura de 430°C. O comportamento térmico observado para este agregado é muito diferente da outra argamassa. Por fim, têm-se o gráfico comparativo da TGA dos compósitos com os dois agregados (Figura 35), avaliando a perda de massa durante o processo de análise termogravimétrica.

Figura 35 – Análise da perda de massa do marmorite e do compósito com chamote.



Fonte: própria autora.

Foi observado que o comportamento térmico entre as argamassas é diferente. A argamassa que usou o porcelanato como agregado apresentou uma maior estabilidade térmica.

Para ambos os materiais é possível fazer uma mesma análise, de acordo com Ollivier e Vichot (2008), sobre o comportamento individual dos componentes da. Observa-se que na TGA apresentada na figura 35 houve uma redução de massa do marmorite dentro da faixa citada anteriormente, mas que não houve o mesmo comportamento com o compósito com chamote. Observa-se que na TGA, apresentada na figura 35, que de 400°C até 800°C existe uma redução de massa do marmorite, mas não ocorre o mesmo comportamento com o compósito com chamote. Ollivier; Vichot (2008), também, observaram uma redução de massa na mesma faixa de temperatura para o concreto estudado.

De acordo com a Figura 34, verifica-se pela curva de DTA que existe um pico endotérmico à 400°C, 650°C e a partir de 850°C. Observou-se, também, que nenhuma etapa exotérmica foi verificada. Estudo semelhante realizado por Klimesch e Ray (1996) mostrou que a TGA em concretos curados depois de 24 horas, na presença de quartzo moído e a partir da temperatura de 400°C, formaram silicatos hidratados de cálcio (C-S-H) e hidróxido de cálcio (C-H). De acordo com os mesmos autores, a partir de aproximadamente 400°C, foi observado um pico endotérmico.

Ainda, segundo o trabalho destes autores, nenhuma etapa exotérmica foi constatada para 100% da pasta de cimento.

5.3.3 Absorção de água (A), massa específica (ρ_s) e índice de vazios (I.v)

Os resultados experimentais coletados para a determinação do teor de absorção de água (A), índices de vazios (I.v) e da massa específica (ρ_s) dos concretos para 3, 7, 28 e 63 dias foram apresentados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Massas das amostras do marmorite.

Idades (dias)	m_s (g)	m_{sat} (g)	m_i (g)
3	441,42	459,25	263,22
	445,20	462,36	266,50
	448,95	465,24	269,58
Média	445,1±3,76	462,28±2,99	266,43±3,18
7	450,21	467,10	270,67
	450,63	467,73	270,98
	447,74	463,43	267,33
Média	451,53±4,46	466,09±2,17	269,6±1,85
28	434,96	449,41	254,47
	439,53	453,50	258,64
	432,44	447,48	252,65
Média	435,64±3,55	450,13±3,02	255,25±3,00
63	457,34	463,25	267,19
	460,43	466,74	269,86
	452,94	459,08	263,89
Média	456,90 ±3,75	463,02±3,83	266,98±2,99

m_s = massa da amostra seca em estufa

m_{sat} = massa da amostra em água após imersão

m_i = massa da amostra saturada e imersa em água

Fonte: própria autora.

Tabela 13 – Massas das amostras de compósito com chamote.

Idades (dias)	m_s (g)	m_{sat} (g)	m_i (g)
3	418,18	429,75	231,65
	416,88	430,08	232,89
	417,79	428,88	232,10
Média	417,62±0,67	429,57±0,62	232,21±0,63
7	421,57	430,82	233,13
	420,45	429,76	231,85
	420,03	429,61	231,88
Média	419,68±2,36	430,06±0,66	232,29±0,73
28	424,27	433,93	236,65
	425,06	434,63	237,88
	425,60	435,52	237,59
Média	424,98±0,67	434,69±0,80	273,37±0,64
63	424,63	431,09	230,09
	424,15	430,68	228,01
	426,06	432,91	230,55
Média	424,95±0,99	431,56±1,19	229,55±1,35

m_s = massa da amostra seca em estufa

m_{sat} = massa da amostra em água após imersão

m_i = massa da amostra saturada e imersa em água

Fonte: própria autora.

De posse dos valores apresentados nas Tabelas 12 e 13, foi possível determinar para as amostras do marmorite e do compósito com chamote os valores de absorção de água (A%), a massa específica (ρ_s) e o índice de vazios (I.v.).

Pelos resultados apresentados na tabela 14 pode-se dizer que, de maneira geral, quanto maior for a idade do concreto menor é o teor de água absorvida. A redução no teor de água absorvida está diretamente ligada a uma redução na porosidade aberta do material que é um indício da densificação da amostra. O aumento da densificação pode ser confirmado pela redução do índice de vazios (I.v.), à medida que se aumenta a idade de cura do concreto.

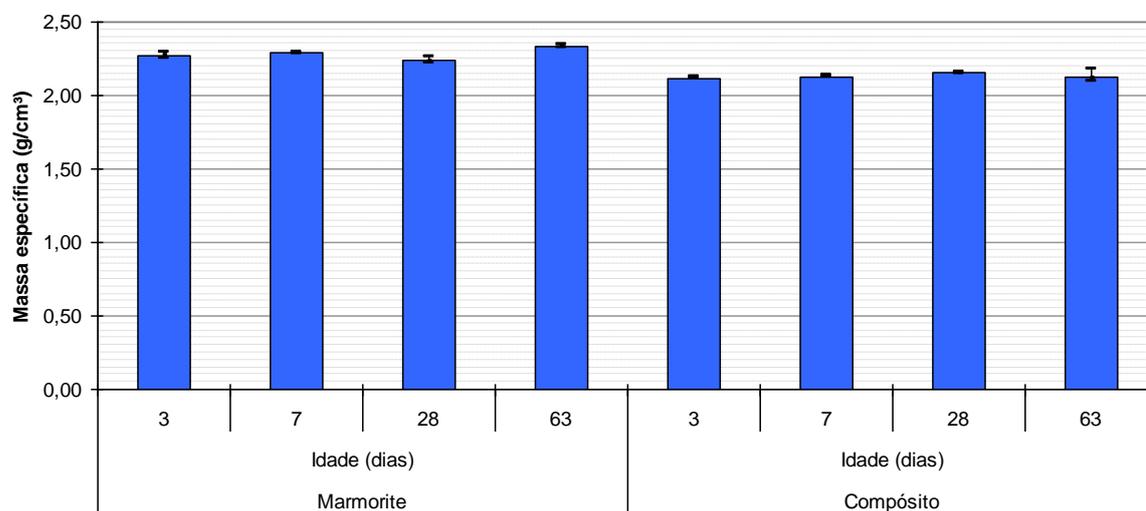
Tabela 14– Amostras do marmorite e compósito com chamote para ensaios de A, ρ_s e I.V.

Idade (dias)	Marmorite				Compósito			
	03	07	28	63	03	07	28	63
ρ_s (g/cm ³)	2,27	2,29	2,24	2,33	2,12	2,13	2,15	2,13
A (%)	3,84	3,68	3,33	1,34	2,86	2,23	2,29	1,56
I.V.(%)	8,73	8,03	7,43	3,12	6,06	4,74	4,92	3,27

Fonte: própria autora

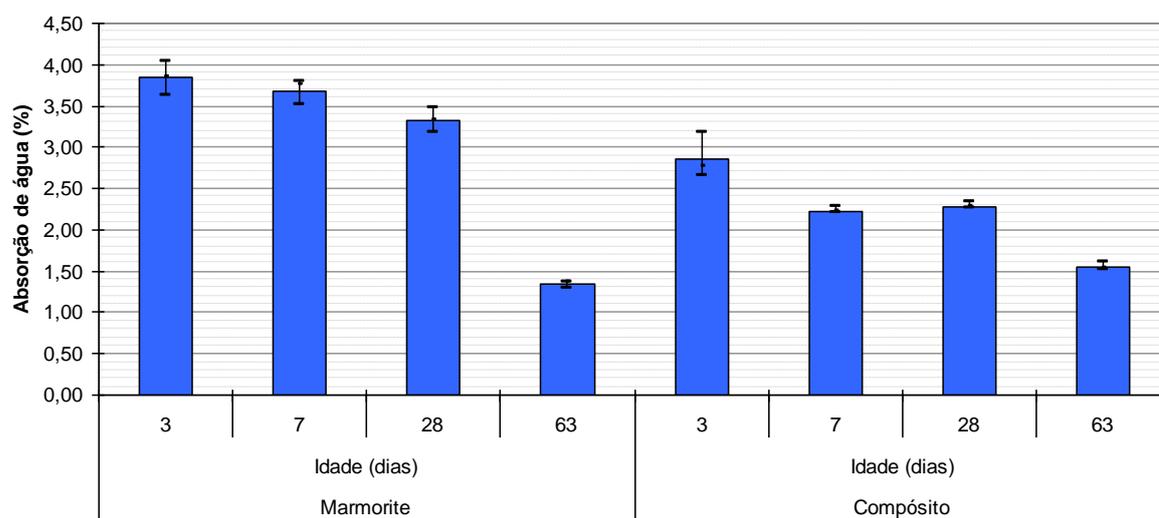
As figuras 36, 37 e 38 exibem os gráficos dos respectivos ensaios realizados.

Figura 36 – Massa específica do marmorite e do compósito com chamote para todas as idades de cura.



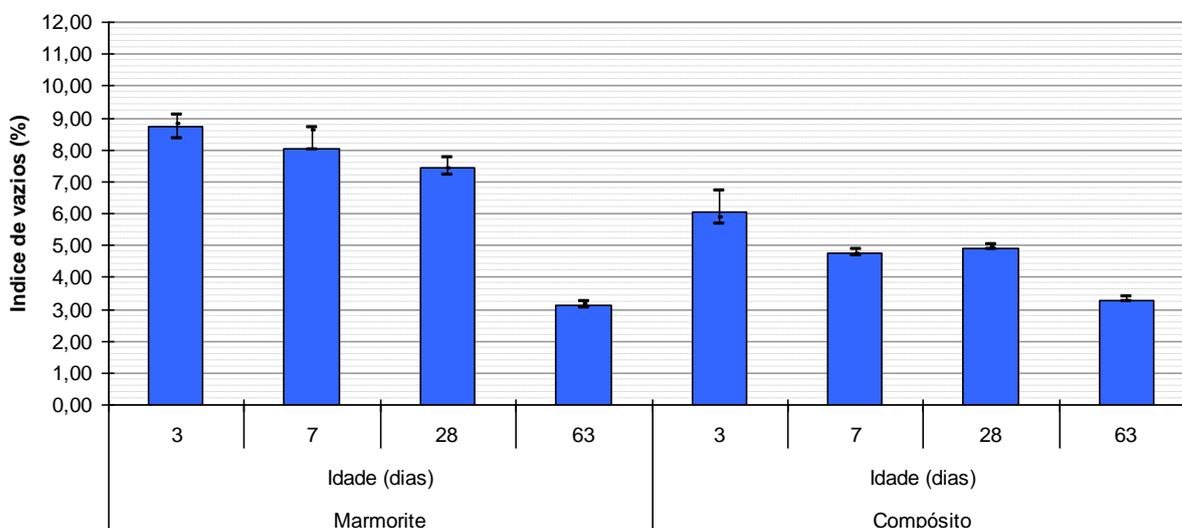
Fonte: própria autora

Figura 37 – Gráfico da Absorção de Água do marmorite e do compósito com chamote para todas as idades de cura.



Fonte: própria autora

Figura 38 – Gráfico do índice de vazios do marmorite e do compósito com chamote para todas as idades de cura.



Fonte: própria autora

5.4 Comportamento Mecânico do Marmorite e do Compósito com Chamote

5.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão e à tração na flexão são as propriedades mais importantes a serem investigadas nas argamassas. Os cilindros de concreto foram curados e testados de acordo com as NBR 7215 (ABNT, 1996): cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Foram ensaiados a 3, 7, 28 e 63 dias de cura, a fim de avaliar o seu desenvolvimento da força de acordo com a substituição de granitina por porcelanato. A formulação de porcelanato mostrou um ganho de resistência significativa em relação ao marmorite a 100% de substituição. A Tabela 15 mostra a média das resistências adquiridas no ensaio de compressão do marmorite e do compósito com chamote.

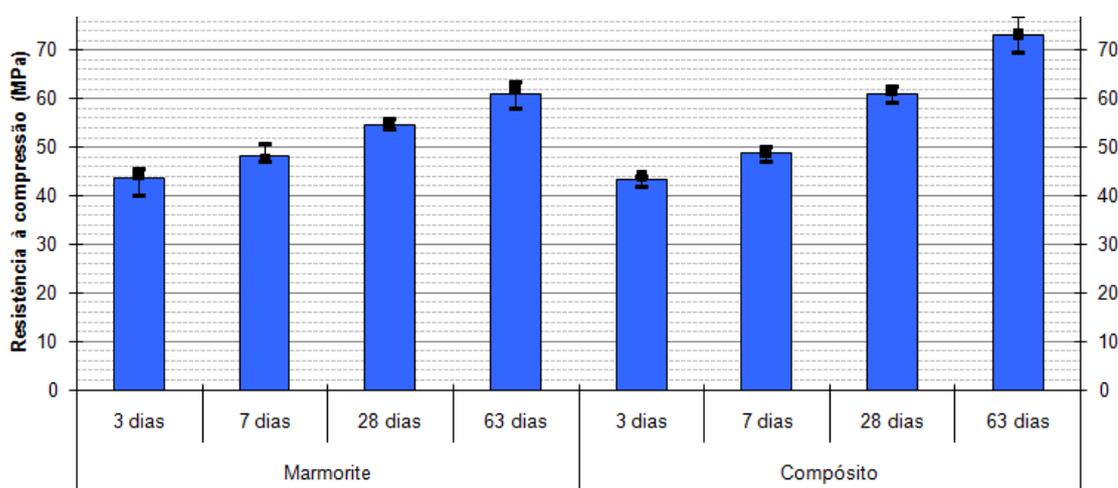
Tabela 15 – Resistência à compressão pelas respectivas idades de cura

Idades de cura	Marmorite	Compósito de chamote
	Resistência à compressão (média) (MPa)	Resistência à compressão (média) (MPa)
3	43,53±2,10	43,39±0,86
7	48,11±1,39	48,72±1,13
28	54,61±0,79	61,03±1,48
63	60,89±2,34	72,97±3,25

Fonte: própria autora

O Gráfico da Figura 39 mostra que o compósito com chamote oferece uma boa resistência à compressão para a formulação realizada. O ensaio de compressão simples não mede a força de união da interface do agregado, mas através dela, é possível comparar o efeito da substituição dos mesmos. De acordo com os dados apresentados, os valores de resistência à compressão do compósito com chamote são aproximadamente 20% maiores em relação ao marmorite após 63 dias de cura. Dito isto, a substituição em 100% da granitina pelo chamote de porcelanato traz benefícios consideráveis para a resistência do material.

Figura 39 – Gráfico de Resistência à compressão



Fonte: própria autora

Conforme resultados observados, com a diminuição da porosidade, houve um aumento da resistência mecânica, em conformidade com o trabalho de Bezerra et al. (2009), onde observou que a porosidade dos sólidos, em geral, é inversamente

proporcional à resistência mecânica, e varia de forma direta com a permeabilidade e massa específica dos materiais. De acordo com o mesmo autor, “constata-se que os corpos de prova que receberam mais golpes durante a moldagem apresentaram maiores resistências à compressão. Isto estaria relacionado ao fato de que os golpes promovem a diminuição da porosidade”, fato que também ocorreu no presente trabalho, visto que os corpos de prova foram adequadamente adensados a partir da quantidade de golpes proposta na norma. Além disso, a granulometria utilizada também permitiu uma diminuição da quantidade de poros, já que estes foram preenchidos pelo pó do chamote de porcelanato, proveniente da moagem. Para a massa específica observa-se, de maneira geral, pequena diminuição dos valores com o aumento dos dias de cura, tanto para o marmorite, quanto para o compósito com chamote.

5.4.2 Resistência à tração na flexão

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, os moldes prismáticos de 40x40x160mm da argamassa foram curados e testados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005): argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. De acordo com a mesma norma, os corpos de prova foram testados aos 28 dias de cura, para também avaliar o desempenho de acordo com a substituição de granitina por porcelanato. A formulação de porcelanato novamente mostrou um ganho de resistência significativa em relação ao marmorite a 100% de substituição. A Tabela 16 mostra a média das resistências adquiridas no ensaio de tração na flexão do marmorite e do compósito com chamote.

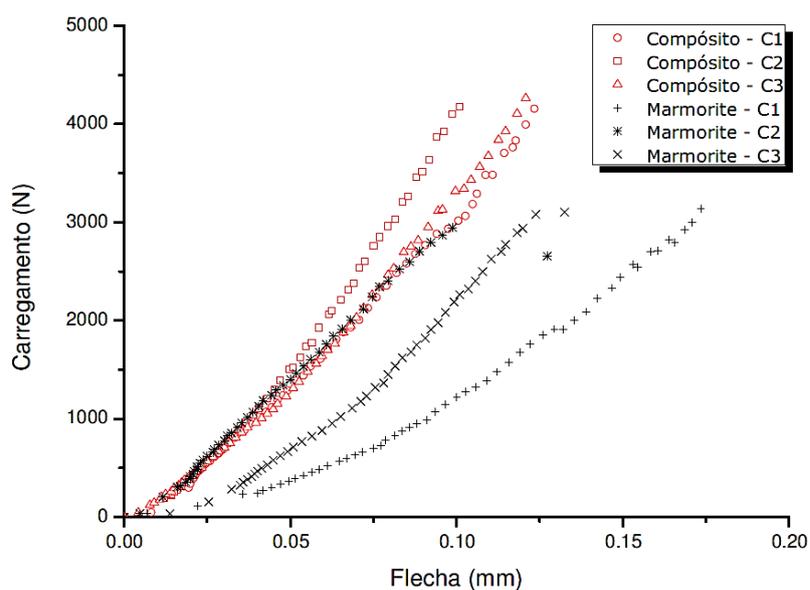
Tabela 16 – Resistência à tração na flexão para 28 dias

Idade (dias)	Marmorite (média)			Compósito (média)		
	Força Máxima (N)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Flecha (mm)	Força Máxima (N)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Flecha (mm)
28	3146,52 ± 83,85	8,85 ± 0,23	0,13 ±0,04	4234,19 ± 69,41	11,91 ± 0,19	0,12 ±0,01

Fonte: própria autora.

A Figura 40 exibe os valores da resistência à tração na flexão para 28 dias. Foi possível observar que o compósito com chamote obtido com 100% de substituição do granitina, no compósito com chamote, apresentou resistência à flexão mais elevada do que o marmorite. Observa-se, também, menor dispersão dos resultados de deformação para o compósito com chamote.

Figura 40 – Gráfico de resistência à tração na flexão para 28 dias

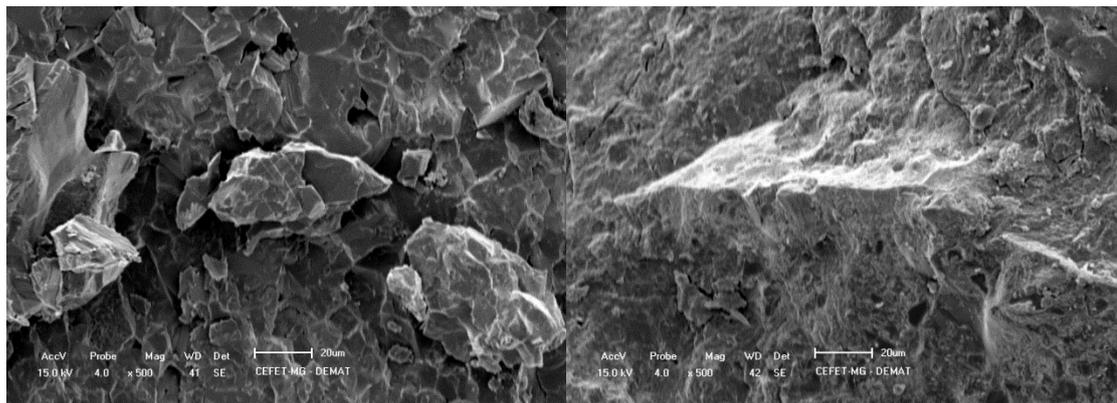


Fonte: própria autora

5.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 41 representa a micrografia por MEV das argamassas com agregados de marmorite e porcelanato.

Figura 41 – Microscopia Eletrônica de Varredura (500x).

**(a)****(b)**

a) marmorite e (b) compósito.

Fonte: própria autora.

A Figura 41 (a) representa a imagem da superfície fraturada, após ensaio de compressão da argamassa produzida com agregado de granitina. Foi constatada, pela imagem, uma topografia irregular, devido a uma fratura frágil. Este tipo de fratura foi devido à alta cristalinidade do material, sendo possível analisar, nestas imagens, os contornos dos agregados na massa.

No entanto, a Figura 41 (b), representa a superfície, após o ensaio de compressão da argamassa produzida com o agregado de porcelanato. A topografia da superfície é irregular, sendo possível visualizar o contorno de um agregado de porcelanato. Pelo aspecto da superfície, a fratura observada foi frágil, contudo foi possível observar que a superfície do compósito com chamote é mais regular do que a do marmorite, indicando que o grau de cristalinidade da argamassa de marmorite é maior do que a observada para a confeccionada com o porcelanato.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um compósito cimentício com adição de chamote de porcelanato ocorreu devido a uma necessidade latente, tanto em âmbito nacional quanto internacional, de reaproveitar resíduos provenientes da indústria cerâmica. Para alcançar esse objetivo, foram desenvolvidos corpos-de-prova nas idades de cura de 3, 7, 28 e 63 dias, respeitando o traço 1:2 para a relação entre cimento e agregado. Neles foram realizados diversos ensaios destrutivos e não destrutivos de modo a avaliar o seu desempenho como piso, a partir da comparação com o piso industrial marmorite.

De acordo com os objetivos específicos e metodologia proposta, as caracterizações químicas realizadas pelas técnicas de Fluorescência de Raios X- EDS revelaram que a granitina possui uma constituição mineralógica de óxido de cálcio, o que compreende 92% de sua composição mássica, devido à sua estrutura calcária proveniente do mármore. O difratograma da granitina revelou as fases cristalinas de calcita (CaCO_3) e Dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$), o que corrobora o EDX apresentado. Em relação à análise térmica, foi possível constatar que a granitina é estável termicamente até a temperatura de 620°C , sendo que nesta temperatura, o composto degrada e libera uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2), o que resultou numa perda de massa de aproximadamente 40,3%. Todos estes resultados convergem para uma mesma direção, indicando que a granitina é composta majoritariamente por carbonatos.

Já no porcelanato, a sua composição química é formada por compostos que contém silicato (64,3%), óxido de alumínio (13,1%) e óxido de zircônio (8,9%), que associados a um tratamento térmico, leva à formação de novas fases, como a mulita. Na TGA, o porcelanato mostrou ser estável termicamente até a temperatura de 410°C . Embora a faixa de estabilidade térmica seja parecida com a observada para a granitina, este composto apresenta uma estabilidade térmica muito superior. O resíduo corresponde a 85% da massa do composto inicial.

Para as argamassas obtidas, pela difração de raios X, foram observadas no marmorite as fases de carbonato de cálcio e o óxido de silício, enquanto no compósito com chamote de porcelanato as fases cristalinas identificadas foram quartzo, proveniente do agregado de porcelanato, e o carbonato de cálcio, proveniente da pasta cimentícia.

De acordo com a TGA-DTA do marmorite e do compósito com chamote, ambos são estáveis termicamente até a temperatura de 430°C. O comportamento térmico observado para o marmorite é muito diferente da argamassa com chamote de porcelanato, visto principalmente, em relação à perda de massa durante o ensaio, que foi de 11,2%, o que revela uma estabilidade térmica muito mais elevada.

A curva granulométrica dos agregados granitina e chamote de porcelanato, revelou os valores de módulos de finura de 5,56 e 4,45 respectivamente. Logo, pelo módulo de finura, pode-se afirmar que o chamote de porcelanato apresentava-se com menor granulometria que a granitina. Verifica-se, também, que a massa retida acumulada na peneira 2,36mm, para a granitina foi de 96,6%, enquanto que, para o agregado de porcelanato, o valor foi de 59,6%, portanto, este apresenta uma granulometria bem menor que a granitina. Sugere-se que o pó proveniente da moagem do porcelanato, tenha agido diretamente na argamassa do compósito com chamote, além de contribuir como agregado miúdo.

Para os ensaios de compressão, o compósito com chamote mostrou um ganho de resistência significativa em relação ao marmorite a 100% de substituição, com aumento de 20% nos valores de resistência à compressão do compósito com chamote em relação ao marmorite após 63 dias de cura.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, com as amostras com 28 dias de cura, o compósito com chamote apresentou resistência à flexão mais elevada do que o marmorite. Observa-se, também, menor dispersão da flecha para o compósito com chamote.

As microscopias foram realizadas nas superfícies fraturadas, após ensaio de compressão do marmorite e do compósito com chamote. No primeiro, foi constatada pela imagem uma topografia irregular, devido a uma fratura frágil, revelando a alta

cristalinidade do material. Para o porcelanato, foi possível observar na topografia da superfície irregular, o contorno de um agregado de porcelanato.

Por fim, os resultados apresentados para os ensaios referentes à absorção de água, massa específica e índice de vazios, mostraram de maneira geral, que quanto maior for a idade do concreto menor é o teor de água absorvida. Para a massa específica observa-se, de maneira geral, a pequena diminuição dos valores com o aumento dos dias de cura, tanto para o marmorite, quanto para o compósito com chamote.

De acordo com os resultados apresentados no presente trabalho, pode-se concluir que o chamote de porcelanato é um material com características físico-químicas bastante superiores à granitina. Tal potencial revela a sua possibilidade de inserção em pisos e até uma possível redução da quantidade de cimento utilizado, já que para este tipo de produto, usualmente são utilizados como referência aqueles que alcançam até 40 MPa em relação à sua taxa de compressão e no presente trabalho o valor de 73 MPa é bem superior.

Diversos ganhos em relação à reutilização do chamote de porcelanato para elaboração de piso foram verificados neste trabalho. Em primeiro plano, porque 100% do seu peneiramento foram utilizados, o que para a indústria, de uma maneira geral, seria uma solução amplamente viável. O estudo comprovou que não é necessário selecionar peneiras para isso, o que evita que o pó proveniente da moagem seja descartado, gerando mais resíduos para a indústria.

Em relação ao apelo estético do produto, a partir das peneiras utilizadas no trabalho é possível ter um aspecto visual semelhante ao marmorite, cuja estética é valorizada principalmente por causa da sua característica rústica. A vantagem de se trabalhar com os mais diversos tipos e cores de chamote de porcelanato deve-se pela possibilidade de fazer as mais diversas combinações, o que possivelmente agradará o público consumidor, caso o compósito com chamote se torne comercialmente viável na forma de piso.

Portanto, conclui-se que as vantagens da utilização do compósito com chamote de porcelanato como piso são de grande relevância para o meio acadêmico, para a indústria e para a sociedade como um todo. Os dados estatísticos revelam, a cada

dia, que o descarte de materiais em aterros próprios têm se tornado um gargalo bastante complexo de se solucionar, logo, a reciclagem é o meio mais oportuno de transformar um resíduo em um produto de grande valor agregado.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que o presente trabalho foi realizado com uma proporção fixa de água/aglomerante, sugere-se uma continuidade trabalhando com essa variável, a fim de avaliar as propriedades mecânicas das argamassas desenvolvidas.

Sugere-se também, fazer um estudo mais detalhado da microestrutura da matriz das argamassas por meio de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, assim como outras técnicas de obtenção de imagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3G PISOS Concreto estampado. Disponível em: < <http://3gconcretoestampado.com.br/>>. Acesso em: 08 nov. 2014.

ANDRÉ, A.; BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. **Journal of Cleaner Production**. v.65, p.389 – 396.2014.

ALIABDO, A.A.; ELMOATY, A.M.; AUDA, E.M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 50, p. 28 – 41. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS PROJETOS. **Perfil da cadeia produtiva da construção e da indústria de materiais e equipamentos**. 60 p. 2014. Disponível em: <<http://www.abramat.org.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES – ANFACER. 2014. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/>>. Acesso em: 14 abr. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5733**: cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15**: cimento Portland: análise química – determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 16**: cimento Portland: análise química – determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: cimento: análise química – determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 20**: cimento Portland e suas matérias-primas. Análise química – determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 21**: cimento Portland: análise química – método optativo para a determinação de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: cimento Portland: determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (n° 200). Rio de Janeiro, 2012. Versão corrigida 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: cimento Portland: determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 13555**: solo-cimento - Determinação de absorção de água. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15463**: placas cerâmicas para revestimento: porcelanato. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16372**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

BARBOSA, D.S. **Controle do tamanho final de porcelanatos**: modelagem e simulação das etapas de prensagem e secagem. 2011, 147p. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011.

BEZERRA, A.C.S.; SOARES, M.M.N.S.; SILVA, M.J.; PÁDUA, P.G.L.; AGUILAR, M.T.P.; CETLIN, P.R. Influência do adensamento do concreto nos resultados de módulo de elasticidade. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA, 10 Y CONGRESO DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN, 12. CONPAT. Valparaíso-Chile. 2009. **Anais...**, Valparaíso, 2009.

BITTENCOURT, E.L.; BENINCÁ, E. Aspectos superficiais do grês polido. **Revista Cerâmica Industrial**, v.7, p.40-46, jul./ago. 2002.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. 2013. Disponível em: <<http://www.cbci.org.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

CAMARGO, M.F.S. **Pisos à base de cimento: caracterização, execução e patologias.** 2010, 124 f. Monografia (Especialização) – Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.

DERCOBEL Revestimentos. Disponível em: <<http://www.decorbelrevestimentos.com.br/>> Acesso em: 03 mar. 2014.

ELIANE Revestimentos. Disponível em: < <http://novo.eliane.com/institucional/sustentabilidade>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

FAHAD, M.; IQBAL, Y. Kinetic and thermodynamic study of calcite marble samples from lesses Himalayas. **Int J Thermophys – Springer Science.** v. 35, p. 361 – 374. 2014.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. 2013. Disponível em: <<http://www.portal.fgv.br/>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

HEBHOUB, H.; AOUN, H; BELACHIA, M.; HOUARI, H.; GHORBEL, E. Use of waste marbel aggregates in concrete. **Construction and Building Materials.** v. 25, p. 1167 – 1171. 2011.

KLIMESCH, S. D.; RAY, A. The use of DTA/TGA to study the effects of ground quartz with different surface areas in autoclaved cement: quartz pastes. Part 1: A method for evaluating DTA/TGA results. **Thermochimica Acta.**v. 289, p. 41 – 54. 1996.

MAGALHÃES, M.; CONTARTESI, F.; CONSERVA, L.R.F.; MELCHIADES, F.G.; BOSCHI, A. O. Efeito dos ciclos de queima sobre as temperaturas de mínima absorção de água e máxima densificação de porcelanatos. **Cerâmica Industrial,** v.19, p. 20–25, mar./abr. 2014.

MARMORITES SANTA IZABEL. Disponível em: <<http://www.marmoritesantaizabel.com.br/>>. Acesso em: 18 nov. 2014.

MARQUES, L. N.; MENEZES, R.R.; NEVES, G.A.; SANTANA, L.N.L.; LIRA, H.L.; FERREIRA, H.C. Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos,** Campina Grande, v.2, n. 2, p. 34 – 42. 2007.

MELO, M.M.; PINHEIRO, A.S.; NASCIMENTO, R.M.; MARTINELLI, A.E.; DUTRA, R.P.S.; MELO; M.A.F. Análise microestrutural de misturas cerâmicas de grês porcelanato com adição de chamote de telhas cerâmicas. **Revista Cerâmica.** n. 55, p. 356 – 364, 2009.

MODESTO, C.; BRISTOT, V.; MENEGALI, G.; BRIDA, M.; MAZZUCCO, M; MAZON, A.; BORBA, G; VIRTUOSO, J; GASTALDON, M.; OLIVEIRA, A.P. Obtenção e

caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. **Revista Cerâmica Industrial**, v.8, p. 14-18, jul./ago. 2003.

MORAES, M. L. V. N. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. 2007, 153f. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

NASCIMENTO, G.B.; CARVALHO Jr., A.N.; GUMIERI, A.G. **Caracterização de argamassas de pó-de-pedra para restauração de fachadas no estilo art déco**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 9., 2009. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

NONI Jr. A.; HOTZA, D.; SOLER, V.C.; VILCHES, E.S. Influence of composition on mechanical behavior of porcelain tile. Part I: Microestrutural characterization and developed phases after firing. **Materials Science & Engineering A.**, n.527, p. 1730 – 1735.2010.

OLLIVIER, J.P.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto**: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo. IBRACON.2014. 606 p.

PLAN SERVICE ENGENHEIROS ASSOCIADOS. Disponível em: <<http://www.planservice.com.br/>> Acesso em: 08 nov. 2014.

PELISSER, F.; STEINER, L.R.; BERNARDIN, A.M. Recycling of porcelain tile polishing residue in Portland cement: hydration efficiency. **Environmental Science & Technology**. v. 46, p. 2368 – 2374. 2012.

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 a confecção de argamassas. **Cerâmica Industrial**, v. 16, p. 33 – 38, jul./ago. 2011.

PINHEIRO, P.G.; FABRIS, J.D; MUSSEL, W.N. MURAD, E.; SCORZELLI, R.B. **Caracterização química, ocorrência e distribuição do ferro em minerais do caulim da região do Mar da Espanha (MG)**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2002.

PURIFICAÇÃO, E. B. **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**. Dissertação (Mestrado). Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.

Resolução **CONAMA Nº 448/2012**: resíduos da construção civil. Revisão da Resolução CONAMA Nº 307/2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil.

ROSSO, J.; CUNHA, E.; ROJAS-RAMIREZ, R. Características técnicas e polimento de porcelanatos. **Cerâmica Industrial**, v.10, p. 11–14, jul./ago. 2005.

SANCHEZ,E.; ORTS, M.J.; GARCÍA-TEN, J.; CANTAVELLA,V. Efeito da composição das matérias-primas empregadas na fabricação de grês porcelanato sobre as fases formadas durante a queima e as propriedades do produto final. **Cerâmica Industrial**, v.6, n. 5, p. 11–14, set/out. 2001.

SANTOS, P.F.; CALADO, C.R; SILVA, S.N.; PINHEIRO, I.P. Reaproveitamento do resíduo proveniente do polimento do porcelanato na produção de novos produtos cerâmicos. In:CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS – CBECIMAT, 20., Joinville, 2012. **Anais...** Joinville, 2012.

SANTOS, P.F.;CALADO, C.R. PINHEIRO, I.P. Avaliação do reaproveitamento do resíduo proveniente do polimento do porcelanato na produção de materiais cerâmicos. In:REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, **37**. Sociedade Brasileira de Química, Natal, 2014. **Anais...**, 2014. Disponível em: <<http://www.sbq.org.br/>> Acesso em: 03 maio 2015.

SILVA, N; CAMPITELI, V.; GLEIZE, P.J.P. Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia de britagem de rocha calcária. In:SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 7., 2007. **Anais...**, 2007. Disponível em: <<http://www.infohab.gov.br/>>. Acesso em: 02 dez. 2014.

SUCTU, M.; ALPTEKIN, H.; ERDOGMUS, E.; YUSUF, Er.; OSMAN, G. Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. **Construction and Building Materials**.v.82, p. 1 – 8. 2015.

YAPRAK, H.; ARUNTAS, H.Y.; DEMIR, I.; SIMSEK, O.; GOKHAN, D.; Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. **International Journal of the Physical Sciences**. v. 6, p. 2455 – 2461. 2011.

ZHOU Hai-qui; XIAO Han-ning; HU Xue-yan. Sintering behavior of ceramic green body thermal analysis techniques. **Advanced Materials Research**.v.177, p. 226 – 230.2011.