

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



**Dissertação de Mestrado**

**PATRÍCIA FERREIRA SANTOS**

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO PROVENIENTE DO POLIMENTO DO  
PORCELANATO NA PRODUÇÃO DE NOVOS PRODUTOS CERÂMICOS**

**BELO HORIZONTE**

**ABRIL/2017**

PATRÍCIA FERREIRA SANTOS

REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO PROVENIENTE DO POLIMENTO DO  
PORCELANATO NA PRODUÇÃO DE NOVOS PRODUTOS CERÂMICOS

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 Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Claudinei Rezende Calado

BELO HORIZONTE

ABRIL/2017

PATRÍCIA FERREIRA SANTOS

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO PROVENIENTE DO POLIMENTO DO  
PORCELANATO NA PRODUÇÃO DE NOVOS PRODUTOS CERÂMICOS**

Dissertação apresentada em 03 de abril de 2017 por Patrícia Ferreira Santos, ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, aprovada pela banca examinadora constituída dos professores:

---

Prof.: Dr. Claudinei Rezende Calado – Orientador

---

Prof.: Dr. Sidney Nicodemos da Silva

---

Prof.: Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

ABRIL/2017

## RESUMO

Devido à grande quantidade de resíduo que vem sendo gerada nas indústrias cerâmicas, tem sido estudada uma forma de amenizar os impactos ambientais gerados pelo descarte dos resíduos obtidos durante o processo de produção do porcelanato. Dentre os diversos tipos de revestimentos cerâmicos, o porcelanato tem se destacado devido ao seu processo de produção tecnológico e às suas excelentes características técnicas. Este trabalho teve como finalidade realizar um estudo sobre as principais características do porcelanato e uma caracterização físico-química minuciosa da massa atomizada (MA) do resíduo gerado no polimento do porcelanato (torta) e das matérias primas utilizadas na produção do porcelanato por meios dos ensaios de análise termogravimétrica (TG/DTA), difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (EDX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). De acordo com os dados obtidos, pode-se afirmar que a composição química da torta (resíduo) e as fases presentes são semelhantes a da massa atomizada (porcelanato), o que possibilita sua reutilização como matéria prima na indústria cerâmica. Após a caracterização, foram propostas formulações de novas massas cerâmicas empregando ou não o resíduo obtido da etapa de polimento do porcelanato no qual as formulações partiram de composições padrões triaxiais de materiais cerâmicos que tiveram o melhor desempenho mecânico de acordo com bibliografia específica. As formulações estudadas foram divididas em série M, C, C3 e série MR. As referidas foram submetidas a ciclos de queimas distintos que variaram da temperatura ambiente até 1245°C, com o objetivo de avaliar em qual se teria as melhores respostas físicas e mecânicas. As melhores formulações dessas 4 séries foram submetidas a um ciclo de queima otimizado em uma empresa do ramo cerâmico. Para cada formulação, foram produzidos quinze corpos de prova com dimensões de 20,0X60,0X9,0mm, e esses foram prensados uniaxialmente a 54MPa. Após sinterização, os corpos de prova foram caracterizados pelos ensaios de retração linear (RL), retração volumétrica (Rv), absorção de água (AA%), densidade aparente (Dap) e porosidade aparente (Pap). O ensaio de flexão das amostras seguiu a norma NBR 13818:1997. Os resultados obtidos demonstraram que, da série M, a formulação M4 foi a que produziu um material cerâmico de melhor desempenho, ele obteve uma resistência à flexão de 32,63 MPa e uma absorção de água de 1,68%. Da série C, foi a C3 que apresentou um melhor resultado de densidade aparente (5592,78 Kg m<sup>-3</sup>), absorção de água (1,44%) e maior resistência mecânica (41,27 MPa). A série MR a MR3, com 15% em peso de resíduo, foi a de melhor desempenho com absorção de água (5,53%) e maior resistência mecânica (12,46 MPa). Por fim, na série C3, o melhor desempenho é observado para a formulação C3C com resistência mecânica (34,56 MPa), que é o ponto de máximo, que indica que houve um melhor empacotamento de partículas. Ao analisar os resultados das formulações de melhor desempenho mecânico que foram submetidas ao forno industrial, observa-se que o ciclo de queima influencia diretamente a possibilidade ou não de reutilização do resíduo gerado no polimento do porcelanato e que as três formulações testadas, apesar de não serem classificadas como porcelanatos, apresentaram ótimos desempenhos e são classificadas como outras cerâmicas.

Palavras chave: reaproveitamento, porcelanato, resíduos, cerâmica, formulação.

## ABSTRACT

Due to the large amount of residue that has been generated in the ceramic industry, a way to mitigate the environmental impacts generated by the waste disposal during the porcelain production process has been studied. Among the various types of ceramic coatings, porcelain has stood out due to its technological production process and excellent technical characteristics. The purpose of this work was to study the main characteristics of porcelain tile and a detailed physicochemical characterization of the atomized mass (MA), the residue generated in the polish of the porcelain (pie), and the raw materials used in the production of porcelain tile by means (XRD), X-ray fluorescence (EDX) and Scanning Electron Microscopy (SEM). According to the data obtained, it can be stated that the chemical composition of (Residue) and the present phases are similar to the atomized mass (porcelain), which makes possible to reuse it as a raw material in the ceramic industry. After the characterization, new ceramic mass formulations were proposed, using or not the residue obtained from the porcelain polishing phase in which the formulations were based on triaxial standard compositions of ceramic materials, which had the best mechanical performance according to specific bibliography. The formulations studied were divided into M series, C series, C3 series and MR series. They were submitted to different firing cycles ranging from room temperature to 1245° C, in order to evaluate the best physical and mechanical responses. The best formulations of these 4 series were put in an optimized firing cycle in a ceramic company. Fifteen specimens with dimensions of 20,0X60,0X9,0mm, uniaxially pressed at 54MPa, were produced for each formulation. After sintering, the samples were characterized by linear retraction (RL), volumetric retraction (Rv), water absorption (AA%), apparent density (Dap), apparent porosity (Pap). The bending test of the samples followed the standard NBR 13818: 1997. The results obtained showed that from the M series the M4 formulation produced the ceramic material with best performance, it obtained a flexural strength of 32.63 MPa and a water absorption of 1.68%. From the C series, it was the C3 that presented a better result of apparent density (5592,78 kg m<sup>-3</sup>) and water absorption (1.44%) and greater mechanical resistance (41,27 MPa). The series MR to MR3 with 15% by weight of waste was the best performance with water absorption (5.53%) and higher mechanical strength (12.46 MPa). Finally, in the C3 series, the best performance was observed in the C3C formulation in mechanical strength (34.56 MPa), which is the maximum point, which indicates that a better packaging of particles. When analyzing the results of the formulations of better mechanical performance that were submitted to the industrial furnace, it is observed that the firing cycle influenced directly on the possibility of reusing or not the residue generated in the polishing of the porcelain tile and that the three formulations tested, even if not classified as porcelain tiles, have presented excellent performances and are classified as other ceramics.

Key-words: reuse, porcelain tile, waste, ceramic, formulation.

## LISTA DE FIGURA

<b>Figura 1: Painel de Azulejos: Convento de São Francisco da Bahia. ....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 2: “Layout” dos revestimentos cerâmicos (Cerâmica Portobello). .</b>	<b>26</b>
<b>Figura 3: Materiais cerâmicos triaxiais. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4: Gráfico de densificação da placa cerâmica em função do conteúdo de caulinita. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 5: Do lado esquerdo ensaio de flexão de três pontos e do lado direito ensaio de flexão de quatro pontos. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 6: Morfologia do grão de RPP – elétrons retro-espalhados e aumento de 3000x. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 7: Abrasivos Magnesianos sintéticos. ....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 8: Fluxograma da metodologia experimental. ....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 9: Granulômetro. ....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 10: Moinho Planetário. ....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 11: Molde do corpo de prova. ....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 12: Máquina utilizada para prensagem dos corpos de prova (EMIC D30000). ....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 13: Forno de sinterização. ....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 14: Mufla NOVUS N1040. ....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 15: Forno industrial. ....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 16: Máquina utilizada para prensagem dos corpos de prova (EMIC DL-30000). ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 17: Sistema usado para medir a densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água das amostras. ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 18: Difratoograma do resíduo do polimento porcelanato (torta). ....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 19: Curva termogravimétrica do resíduo de polimento do porcelanato. ....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 20: Distribuição Granulométrica do RPP. ....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 21: Difratoograma da Argila HE90. ....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 22: Difratoograma do Caulim CR. ....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 23: Difratoograma da Feldspato FTS 2530. ....</b>	<b>91</b>

<b>Figura 24: Distribuição Granulométrica: a) da massa comercial atomizada b) da Formulação 1 c) da Formulação 2 d) da Formulação 3. ....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 25: Microscopia eletrônica de varredura dos corpos de prova:(a) e (b) Massa comercial de referência (c) e (d) Formulação 1, (e) e (f) Formulação 3, (g) e (h) Formulação 2. ....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 26: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação de referência - MB (c) e (d) Formulação - M4, (e) e (f) Formulação - M7. ....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 27: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação de referência - Cpb (c) e (d) Formulação - C4, (e) e (f) Formulação - C3. ....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 28: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação - C3C (c) e (d) Formulação - C3D. ....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 29: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação de referência - MR (c) e (d) Formulação - MR1, (e) e (f) Formulação - MR3. ....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 30: (a) - Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação de referência - Cpb (c) e (d) Formulação - C3. ....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 31: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova: (e) e (f) Formulação de referência - MB, (g) e (h) Formulação - M1. ....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 32: (c) - Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova: (i) e (j) Formulação de referência - MR, (e) e (f) Formulação - MR3 (k) e (l). ....</b>	<b>118</b>

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1: Classificação de revestimentos em função da absorção de água segundo ISO 13006/NBR 13817:1997. ....</b>	<b>23</b>
<b>Tabela 2: Módulo de resistência à flexão e carga de ruptura de acordo. ...</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 3: Resistência mecânica para porcelanato técnico e esmaltado segundo a NBR 15. 463. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 4: Composição química das materiais primas empregadas na produção do porcelanato. ....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 5: Classificação da resistência à abrasão – PEI (Cerâmica Portobello). ....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 6: Classificação da resistência à flexão das placas cerâmicas. ....</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 7: Classificação da resistência ao ataque químico. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 8: Matérias primas analisadas para produção das formulações estudadas. ....</b>	<b>67</b>
<b>Tabela 9: Formulações propostas. ....</b>	<b>68</b>
<b>Tabela 10: Formulações propostas para serie Mb e Cpb. ....</b>	<b>69</b>
<b>Tabela 11: Formulações propostas para série C3. ....</b>	<b>71</b>
<b>Tabela 12: Formulações propostas para série MR. ....</b>	<b>71</b>
<b>Tabela 13: Formulações propostas de melhor desempenho. ....</b>	<b>72</b>
<b>Tabela 14: Ciclo de queima da fase 2. ....</b>	<b>76</b>
<b>Tabela 15: Ciclo de queima da fase 4. ....</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 16: Composição química (%em peso) da torta (resíduo do polimento do porcelanato), massa atomizada (porcelanato) e do Polidor (abrasivo). ....</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 17: Composição química (%em peso) das matérias primas. ....</b>	<b>88</b>
<b>Tabela 18: Valores de densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água (patamar 1 - 10 minutos na temperatura máxima). ....</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 19: Valores de densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água (patamar 2 - 20 minutos na temperatura máxima). ....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 20: Resistências na flexão da massa comercial e das formulações 1, 2 e 3 dos patamares 1 e 2. ....</b>	<b>96</b>
<b>Tabela 21: Análises físicas e mecânicas das formulações da série M. ....</b>	<b>99</b>

<b>Tabela 22: Resistência na flexão das formulações estudadas da série M em relação a massa base.....</b>	<b>101</b>
<b>Tabela 23: Análises físicas e mecânicas da série C. ....</b>	<b>104</b>
<b>Tabela 24: Resistência na flexão das formulações estudadas da série C em relação a massa base.....</b>	<b>104</b>
<b>Tabela 25: Análises físicas e mecânicas da série C3. ....</b>	<b>108</b>
<b>Tabela 26: Resistência na flexão das formulações estudadas em relação a massa base.....</b>	<b>108</b>
<b>Tabela 27: Análises físicas e mecânicas da série MR.....</b>	<b>111</b>
<b>Tabela 28: Resistência na flexão das formulações estudadas em relação a massa base.....</b>	<b>111</b>
<b>Tabela 29: Análises físicas e mecânicas das formulações de melhor desempenho.....</b>	<b>114</b>
<b>Tabela 30: Resistência na flexão das formulações estudadas em relação a massa base da fase 4. ....</b>	<b>115</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C = Grau Celsius

µm = Micrômetro

A = Albita

AA = Absorção de água

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al = Alumínio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Alumina

ANFACER = Associação Brasileira De Cerâmica

Ca = Cálcio

D100 = Tamanho Máximo Medido da porosidade da superfície polida;

D50, D50 = Tamanho de partícula mediano de uma distribuição de tamanho de partículas (µm);

D99 = Tamanho de partícula que corta a distribuição de tamanhos em 99% abaixo do referido valor;

Dap = Densidade aparente [Kg/cm<sup>3</sup>]

DRX = Difração de raio x

EDX= fluorescência de raios X

EV = expansão volumétrica de queima

Fe =Ferro

FeO = Óxido De Ferro

G = Gibbsita

K = Caolinita

Kg/ton = Quilograma Por Tonelada

Lq = comprimento após a queima (mm)

Ls = comprimento após a secagem (mm)

M = Mulita

m = Muscovita;

m<sup>2</sup> = Metro Quadrado

m<sup>3</sup> = Metro Cúbico

MA (Torta) = Massa Atomizada

mc: Massa de sinterização

MEV = Microscopia eletrônica de varredura

mf: Massa final

Mg = Magnésio

MgO = Óxido De Magnésio

Mi = Peso do corpo imerso em água

MI: massa da amostra sob imersão

mi: Massa inicial

mm = Milímetro

MPa = Mega Pascal

Mq =Peso do corpo queimado

MS: massa da amostra seca

Mu =Peso do corpo úmido

MU: massa da amostra úmida

Na = Sódio

NBR = Norma Brasileira

O<sup>2</sup> =Oxigênio

P = Fósforo

PA = Porosidade Aparente

PEI = Porcelain Enamel Institut

Pi =Peso Imerso

Ps = Peso Seco

Pu = Peso Úmido

Q = Quartzo;

RL= Retração Linear

RLq = Retração linear pós queima

RPP = Resíduo do polimento do porcelanato

RV= Retração Volumétrica

Si = Silício

t/ano = Tonelada Por Ano

TG/DTA = Análise termogravimétrica

to = Teor de matéria orgânica

Ton = Tonelada

V<sub>final</sub> = volume das amostras após a queima

V<sub>inicial</sub> = volume das amostras antes da queima

$\sigma$  = Resistencia a flexão

## SUMÁRIO

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE FIGURA .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE TABELA.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2. OBJETIVO ESPECIFICOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. CERÂMICAS PARA REVESTIMENTO.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2. HISTORICO DAS CERÂMICAS PARA REVESTIMENTO NO BRASIL..</b>	<b>24</b>
<b>3.3. CARACTERÍSTICAS E FUNÇÕES DO REVESTIMENTO CERÂMICO..</b>	<b>27</b>
<b>3.4. MATERIAIS CERÂMICOS TRIAXIAIS .....</b>	<b>28</b>
<b>3.5. HISTÓRIA DO PORCELANATO .....</b>	<b>31</b>
<b>3.6. O GRÊS PORCELANATO .....</b>	<b>33</b>
<b>3.7. CARACTERISTICAS DO PORCELANATO .....</b>	<b>34</b>
<b>3.8. MATERIAS PRIMAS BASICAS PARA PRODUÇÃO DO PORCELANATO .....</b>	<b>37</b>
<b>3.9. ENSAIOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE CERÂMICOS .....</b>	<b>43</b>
<b>3.10. RESÍDUOS DO POLIMENTO DO PORCELANATO.....</b>	<b>52</b>

3.11.	ALTERNATIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	54
4.	METODOLOGIA.....	61
4.1.	PREPARAÇÃO DO RESÍDUO GERADO NO POLIMENTO DO PORCELANATO .....	63
4.2.	PREPARAÇÃO DAS MATERIAIS PRIMAS.....	63
4.3.	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO PORCELANATO (RPP), DAS MATERIAIS PRIMAS E DO REBOLO.....	63
4.4.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	65
4.4.1.	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (EDX) .....	65
4.4.2.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) .....	65
4.4.3.	TERMOGRAVIMÉTRIA (TG/DTA) .....	66
4.4.4.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	66
4.4.5.	GRANULÔMETRO .....	66
4.4.6.	MOINHO PLANETÁRIO .....	66
4.5.	FORMULAÇÃO PRODUZIDAS.....	66
4.6.	PRENSAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	72
4.7.	CICLO DE QUEIMA.....	74
4.8.	ENSAIOS MECÂNICOS .....	78
4.9.	ENSAIOS FÍSICOS .....	79
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	83
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO .....	83
5.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DO PORCELANATO .....	87

<b>5.3. CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES PROPOSTAS .....</b>	<b>91</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>120</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>122</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>123</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a indústria brasileira de revestimentos cerâmicos tem passado por um grande crescimento na produção de porcelanato polido, em parte, devido ao seu alto valor agregado (ANFACER, 2012).

A indústria cerâmica tem um papel fundamental na economia do País. Segundo dados da Associação Nacional de Fabricantes da Cerâmica, o Brasil é hoje um dos grandes “players” mundiais na área do revestimento cerâmico, sendo o segundo maior consumidor mundial e produtor (ANFACER, 2012).

Desde 2008, o mercado brasileiro de cerâmica vem ocupando a 2ª posição no mundo, como os principais produtores mundiais. Este fato é observado devido à crescente utilização da cerâmica para revestir pisos e paredes de todos os espaços internos da casa, assim como espaços externos além do fato da crescente qualidade e a variedade desse material (OLIVEIRA, 2012).

O setor brasileiro de revestimentos cerâmicos é constituído por 92 empresas, e possui sua maior concentração nas regiões Sudeste e Sul e em expansão no Nordeste do país. É considerado um ramo de segmento produtivo de capital essencialmente nacional, que gera milhões de empregos, cerca de 27 mil postos de trabalho diretos e em torno de 200 mil indiretos ao longo de sua cadeia produtiva (ANFACER, 2015).

O setor cerâmico de 2006 a 2015, apresentou um considerável crescimento na sua cadeia produtiva, no qual deu um salto crescente de 712,3 mil/m<sup>2</sup> para 1.069 mil/m<sup>2</sup>.

O porcelanato é um revestimento cerâmico, que devido a suas características químicas e físicas tem se tornado uma alternativa a outros produtos, como por exemplo, o granito e outras pedras naturais (KUMMER et al, 2007).

Segundo Silva (2005), o porcelanato é o resultado de um processo produtivo que requer alto padrão tecnológico, pois trata-se de um material cerâmico de fase cristalina imersa em uma fase vítrea, apresentando assim uma estrutura compacta.

De acordo com Silva (2005) as principais características do porcelanato é a sua boa resistência ao desgaste superficial, baixa absorção de água, sua excelente resistência mecânica e resistência ao ataque químico. O porcelanato também possui uma considerável dureza superficial e resistência ao congelamento além de boa resistência à compressão, isolamento a descargas elétricas estáticas e ótimo grau de higiene dos pavimentos (SILVA, 2005).

Um fator importante a ser considerado na produção do porcelanato é a qualidade das matérias-primas das cerâmicas triaxiais (argila, caulim, quartzo e feldspato), pois elas interferem nas propriedades do produto final, tais como: porosidade, resistência à fratura e acabamento (DE NONI, 2010).

De acordo com Rodrigues e Pianarcos (2004) apud: SILVA (2005, p. 62), as matérias-primas cerâmicas utilizadas para a produção do porcelanato classificam-se basicamente em plásticas (materiais argilosos em geral) e não plásticas (fundentes, inertes, carbonatos, talcos). Os materiais plásticos são aqueles que servem para auxiliar no processo de conformação do corpo cerâmico, ou seja, na prensagem do porcelanato, pois a plasticidade é uma propriedade que permite ao corpo modificar permanentemente a sua forma, sem que o mesmo sofra ruptura quando submetido uma força externa, proporcionado a resistência necessária à sua manipulação. As matérias primas não plásticas são adicionadas visando a formação da fase vítrea durante o processo de sinterização, obtendo assim um produto com alta densificação (DE NONI, 2010).

Cada uma das matérias primas atua de uma forma específica no corpo cerâmico: A argila produz nas peças a formação de fase líquida de forma gradual durante a sinterização, proporcionando uma maior resistência mecânica. O caulim aumenta o teor de alumina e auxilia na brancura do produto final. O quartzo participa da fusão com o feldspato e equilibra a viscosidade e fluxo vítreo. Já o feldspato diminui a temperatura de sinterização, atuando como fundente, formando fase vítrea, modificando a porosidades das peças (OLIVEIRA, 2012).

Dentre os produtos da família do porcelanato, o polido é o mais produzido e requer uma etapa de polimento que retira os riscos, defeitos superficiais e dá brilho a superfície do produto final. Entretanto, essa etapa do processamento gera grande quantidade de resíduo, que para um descarte adequado é necessários altos investimentos. Este resíduo é constituído essencialmente por uma mistura

do material cerâmico oriundo do polimento e do material abrasivo desprendido durante o processo de polimento (SOUZA, 2007; apud: SANTOS, 2008).

O polimento é realizado em peças sinterizadas com o objetivo de reduzir a rugosidade superficial e aumentar o brilho, conferindo características estéticas bastante valorizadas pelo consumidor. O processo de polimento consiste no uso de um equipamento dotado de várias cabeças polidoras de alta rotação, estas são compostas de materiais abrasivos que em contato com as peças sob velocidade controlada e presença de água, executam o polimento (ALVES, et al., 2010, p. 23).

Os abrasivos utilizados durante a etapa de polimento são constituídos, principalmente, por carbeto de silício (SiC), óxido de magnésio (MgO), cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>) e diamante. “A pureza das matérias-primas utilizadas na fabricação dos abrasivos é de fundamental importância para a qualidade dos mesmos e também para um polimento de qualidade” (ROSSO, 2005).

A composição química do resíduo do porcelanato é, basicamente, constituída pela própria massa do porcelanato e pelos compostos constituintes da ferramenta de corte (SOUZA, 2007; apud: SANTOS, 2008).

O resíduo gerado no polimento do porcelanato tem causado grande preocupação social e ambiental. O resíduo gerado tem colocado em destaque o impacto ambiental causado pelo lançamento de efluentes sólidos em aterros ou em outros lugares. Este descarte tem levado a contaminação ao lençol freático e imposto a sociedade uma mudança de comportamento em todos os aspectos (PUREZA, 2004).

Com o intuito de reduzir a quantidade de resíduos que estão sendo dispostas de maneira inadequadas ao meio ambiente, as indústrias estão pesquisando diversas formas de reaproveitar este resíduo além de propor a melhoria na qualidade e na eficiência do seu processo de produção (SILVA. M, A, 2011).

Visando soluções de reutilização do resíduo do porcelanato, estudos estão sendo feitos para caracterizar o resíduo do polimento do porcelanato (torta), tendo em vista o reaproveitamento do mesmo na fabricação de massa cerâmica e outros

materiais, além de poder dar um destino ecologicamente inteligente ao mesmo (SANTOS, 2014).

O presente trabalho vai estudar as propriedades físico-químicas e mecânicas do resíduo do polimento do porcelanato através da reutilização do resíduo gerado durante a etapa de polimento do porcelanato, através do estudo de novas formulações cerâmicas empregando o mesmo como matéria prima agregando assim valor ao resíduo que vem sendo descartado e reduzindo o importuno do destino final, além de atender a legislação ambiental.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1.OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem o objetivo reutilizar o resíduo gerado durante a etapa de polimento do porcelanato visando o seu reaproveitamento, agregando valor ao mesmo e reduzindo o impacto do destino final.

### 2.2.OBJETIVO ESPECIFICOS

- Selecionar e caracterizar matérias-primas de uso industrial que apórtem fases de interesse;
- Formular novas composições cerâmicas que empreguem em sua composição o resíduo obtido da etapa de polimento do porcelanato;
- Avaliar as novas massas cerâmicas empregando ensaios físicos, químicos e mecânicos;
- Avaliar o efeito do ciclo de queima nas formulações propostas;
- Avaliar a reutilização do resíduo do porcelanato na produção de novos compostos cerâmicos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. CERÂMICAS PARA REVESTIMENTO

As cerâmicas vêm sendo produzida a séculos com as mais variadas aplicações tanto para fins utilitários como louças, na construção civil na fabricação de tijolos cerâmicos como também para fins estéticos com as esculturas (PINHEIRO, 2006).

Segundo Luz (2008) a maioria dos revestimentos cerâmicos são formados por elementos metálicos e não metálicos de forma que as ligações interatômicas que se formam geralmente são totalmente iônicas ou predominantemente iônicas com alguma natureza covalente.

O termo “cerâmica” vem da palavra Keramikos que significa “matéria queimada”, indicando que as propriedades desejáveis destes materiais são atingidas mediante um tratamento térmico a uma alta temperatura conhecido como cozimento (CALLISTER, 2012).

Para se produzir materiais cerâmicos é necessário seguir uma série de etapas de manufatura para se garantir o processamento de sólidos e líquidos no qual uma ou mais etapas irá ocorrer em altas temperaturas a fim de que o produto cerâmico atinja a característica desejada (LUZ, 2008).

Segundo Silva (2010) as porcelanas são determinadas pelas fases formadas durante a etapa de sinterização e estas fases são resultado de interações complexas, a altas temperaturas.

De acordo com Luz (2008) as produções de materiais cerâmicos podem ser separadas em três distintos grupos: preparação da matéria prima (cominuição e mistura), conformação (prensagem e colagem) secagem, sinterização e acabamento final. No final do processamento a matéria prima terá suas propriedades alteradas como por exemplo a composição química, estrutura cristalina e arranjo das fases.

As placas cerâmicas para revestimentos segundo a NBR – 13816/1997 são definidas como uma mistura de um material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo

conformadas por extrusão (representada pela letra A) ou por prensagem (representada pela letra B), podendo também ser conformadas por outros processos (representados pela letra C). As placas são secadas e queimadas à temperatura de sinterização. Podem ser esmaltadas ou não esmaltadas, em correspondência aos símbolos GL (glazed) ou UGL, (unglazed), conforme ISO 13006. As placas são incombustíveis e não são afetadas pela luz

De acordo com Pinheiro (2006), os materiais cerâmicos podem ser separados de acordo com a sua finalidade, podendo então ser agrupados em 9 grupos distintos:

- Cerâmica estrutural/vermelha;
- Cerâmica branca;
- Cerâmica para revestimento;
- Cerâmica refrataria;
- Isolantes térmicos;
- Cimento;
- Vidro;
- Abrasivos e
- Cerâmicas especiais ou de alta tecnologia.

As matérias primas utilizadas para produção dos revestimentos cerâmicos são o Caulim, Argilas, Quartzo, Feldspatos, Magnesitas, Carbetos de silício (SiC), Alumina ( $Al_2O_3$ ), Titanato de bário entre outros (PINHEIRO, 2006).

As placas cerâmicas para revestimentos são compostos de argilas e materiais primas inorgânicas.

Segundo Silva (2012) uma forma mais prática de se classificar os revestimentos cerâmicos seria em função de seu acabamento superficial em esmaltados ou não esmaltados; pelo modo de conformação, em prensados, extrudados ou fabricados por outras técnicas; além de poderem ainda serem agrupados pelo teor de absorção de água.

A ABNT classifica as placas cerâmicas segundo a NBR-13817 da seguinte forma:

- Esmaltada e não esmaltada;
- Métodos de fabricação;
- Grupos de absorção de água;
- Resistência a abrasão superficial;
- Resistência ao manchamento;
- Resistência ao ataque de grupos químicos em diferentes concentrações,
- Aspecto superficial ou análise visual.

De acordo com Pinheiro (2006), a classificação mais utilizada para as cerâmicas de revestimento é conforme a absorção de água no qual divide os materiais em 5 grupos conforme mostrado na tabela 1 abaixo.

De acordo com Pinheiro (2006), a maioria das características tecnológicas dos materiais cerâmicos como a capacidade de absorção da peça, a resistência mecânica e a expansão por umidade estão associadas ao corpo da peça. As características como resistência a abrasão, resistência ao manchamento e a limpabilidade, estão associadas ao esmalte da peça. Já a resistência química e a gretagem estão associadas tanto ao corpo da peça quanto ao esmalte.

De acordo com Sliva (2015) os revestimentos cerâmicos têm se tornado ao longo do tempo mais que um item de decoração e acabamento.

**Tabela 1:** Classificação de revestimentos em função da absorção de água segundo ISO 13006/NBR 13817:1997.

<b>Tipologia de Produto</b>	<b>Absorção de Água - AA(%)</b>	<b>Grupo de Absorção</b>	<b>Aplicação</b>
Porcelanato	Até 0,5	Bla	Paredes e pisos internos e externos e fachadas**.
Grês	0,5 a 3,0	B1b	Paredes e pisos internos e externos e fachadas**.
Semi-Grês	3,0 a 6,0	B11a	Paredes e pisos internos e externos*.
Semi-porosa	6,0 a 10,0	B11b	Paredes internas e pisos internos*.
Porosa	Acima de 10,0	B111	Paredes internas*.

\*Ambientes acima de zero grau

\*\*Ambientes sujeitos a todas as temperaturas

Fonte: Rosso (2005).

Os revestimentos cerâmicos, utilizam hoje as mais variadas matérias primas, podendo produzir tanto cerâmicas vermelhas como cerâmicas brancas. As matérias primas utilizadas são classificadas como: plásticas (argila, caulim e filito) e não plásticas (quartzo, calcita, dolomita, talco, feldspato) (LUZ, 2008).

Segundo Sliva (2015) a principal vantagem da utilização do revestimento cerâmico está no fato dele apresenta características como: boa durabilidade do material; facilidade de limpeza; higiene; qualidade do acabamento final; proteção dos elementos de vedação; isolamento térmico e acústico; estanqueidade à água e aos gases; segurança ao fogo; bom aspecto estético e visual.

### 3.2.HISTORICO DAS CERÂMICAS PARA REVESTIMENTO NO BRASIL

O revestimento cerâmico vem sendo usados desde a antiguidade para revestir pisos e paredes. No entanto nesta época este era utilizado apenas pela nobreza, e pelos artesões ceramistas (SLIVA, 2015).

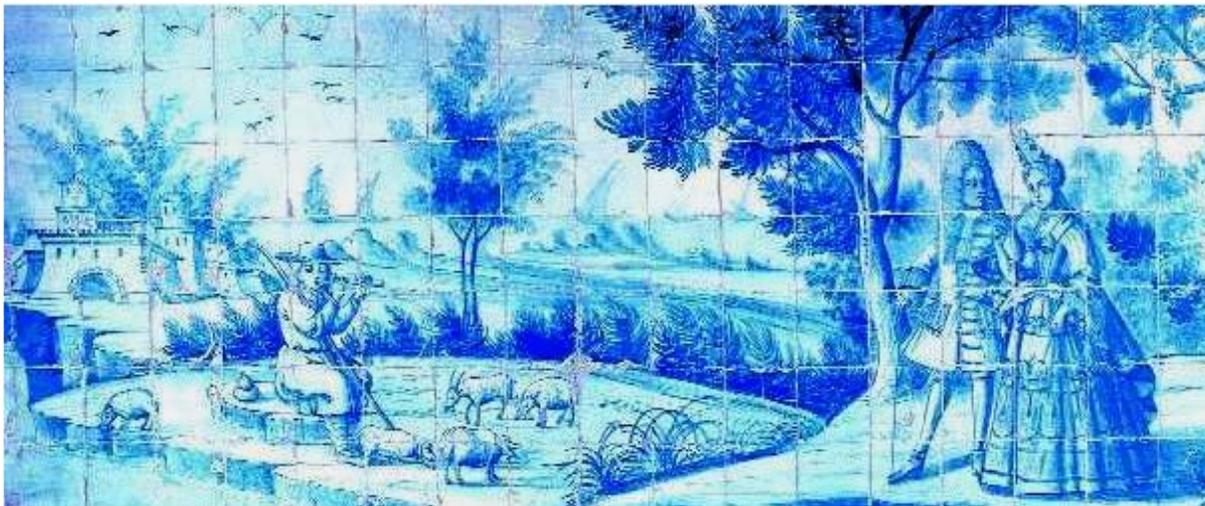
Segundo Associação Brasileira de Cerâmica os primeiros indícios de revestimentos cerâmicos no Brasil foram na Ilha de Marajó. Era uma cerâmica extremamente simples e altamente artesanal, no qual dentre os objetos se destacavam bancos, estatuetas, rodela-de-fuso, tangas, colheres, adornos auriculares e labiais, apitos e vasos miniatura (ANFACER, 2014).

Os revestimentos cerâmicos não foram trazidos ao Brasil pelos portugueses, entretanto, foram eles que instalaram e estruturaram as primeiras olarias ceramistas no Brasil e assim concentraram a mão de obra (ANFACER, 2014).

A expansão do revestimento cerâmico no Brasil foi devida as relações de dependência cultural, econômica e política que existia entre o Brasil e Portugal, até o século XIX.

No século XVI, passou-se a chagar no Brasil, azulejos vindos de Lisboa que tinham o estilo barroco. Estes azulejos eram usados como material decorativo e retratavam a paisagem divulgando o modo de vida dos portugueses ou cenas bíblicas como mostra a figura 1(ANFACER, 2014). No entanto há controvérsias sobre a nacionalidade dos primeiros revestimentos cerâmicos que chegaram no Brasil.

**Figura 1:** Painel de Azulejos: Convento de São Francisco da Bahia.



Fonte: Maliska. M, A

Os revestimentos cerâmicos no Brasil, tinham um custo muito alto, com isso inicialmente eles eram usados apenas no interior de casas e edifícios e só com o tempo os revestimentos passaram a ser utilizados nos jardins e faixadas expandindo assim no final do século XVIII para os exteriores (ANFACER, 2014).

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica devido ao grande avanço industrial no Brasil no século XIX, decorrente da Revolução Industrial, os azulejos passam a ser fortemente utilizados tanto no exterior quanto no interior das casas e edifícios. O Brasil é considerado um grande produtor de produtos cerâmicos e a qualidade e a variedade de produtos desses ramos crescem cada dia mais.

De acordo com Sliva (2015), somente por volta do século XX, que se obteve a popularidade dos revestimentos cerâmicos e a produção do mesmo se tornou em grande escala, ficando assim mais acessível a todos inclusive aos mais abastados

As placas cerâmicas pode ser feita em argila pura de massa vermelha, ou de uma mistura com cerca de nove minerais de tonalidade clara ou branca. Como no Brasil, tem a abundância dessa matéria prima, isso contribuiu muito para o crescimento desse mercado de revestimentos cerâmicos, no qual se observa

diversas opções, com características específicas para se adaptar ou compor diferentes ambientes (SLIVA, 2015).

Segundo Sliva et al (2015), atualmente existe uma variedade de produtos cerâmicos para atender aos mais variados tipos de ambientes como: áreas comerciais ou industriais, residências, fachadas e piscinas, mantendo as características contemporâneas de durabilidade aliada à beleza estética.

Segundo Luz (2008) o setor de revestimentos cerâmicos no Brasil é constituído por 94 empresas, no qual tem 117 plantas instaladas em 18 estados com mais de 25 mil postos de trabalhos diretos e mais de 250 mil indiretos, ao longo de sua cadeia produtiva. A melhor tecnologia disponível no mundo e considerada a do Brasil e quase toda a sua produção está em conformidade com as normas internacionais de qualidade.

Devido à grande diversificação do setor cerâmico conforme ilustrado na figura 2, hoje existe uma variedade de para atender aos mais variados tipos de ambientes como: áreas comerciais ou industriais, residências, fachadas e piscinas, que atendem as características contemporâneas e possuem durabilidade aliada à beleza estética.

**Figura 2:** “Layout” dos revestimentos cerâmicos (Cerâmica Portobello).



Fonte: Rebelo.C,R

### 3.3. CARACTERÍSTICAS E FUNÇÕES DO REVESTIMENTO CERÂMICO

O revestimento cerâmico devido sua grande versatilidade vem se tornando com o passar do tempo mais que um item de decoração e acabamento.

Segundo Sliva et al (2015) os produtos cerâmicos se tornaram muitas vezes indispensável na construção civil pois houve a combinação de novas tecnologias aplicadas à técnica milenar de se produzir cerâmica.

Os revestimentos cerâmicos podem apresentar formatos e dimensões variadas (podendo variar de 5mm a mais de 25mm de espessuras e de poucos centímetros a mais de metros) (LUZ, 2008).

As maiores vantagens de se utilizar do revestimento cerâmico estão, principalmente, nas seguintes características: durabilidade do material; facilidade de limpeza; higiene; qualidade do acabamento final; proteção dos elementos de vedação; isolamento térmico e acústico; estanqueidade à água e aos gases; segurança ao fogo; aspecto estético e visual agradável (SLIVA, 2015).

Para Rebelo (2010) as maiores vantagens da utilização do revestimento cerâmico estão principalmente nas seguintes características:

- Durabilidade do material;
- facilidade de limpeza;
- higiene;
- qualidade do acabamento final;
- proteção dos elementos de vedação;
- isolamento térmico e acústico;
- estanqueidade à água e aos gases;
- segurança ao fogo;
- aspecto estético e visual agradável.

De acordo com Luz (2008) as características mais comuns nos materiais cerâmicos são a dureza, resistência a compressão e a flexão, isolamento elétrico, serem antialérgico, fácil limpeza, incombustíveis e antiderrapantes.

A qualidade e a durabilidade de uma superfície com revestimento cerâmico estão fundamentadas diretamente em conceitos relacionados aos seguintes aspectos:

- planejamento e escolha correta do revestimento cerâmico;
- qualidade do material de assentamento;
- qualidade da construção e do assentamento e
- manutenção.

### 3.4. MATERIAIS CERÂMICOS TRIAXIAIS

Os revestimentos cerâmicos geralmente assim como as porcelanas, alguns refratários e produtos cerâmicos estruturais em que se formam quantidades entre 30-70% de fase vítrea na queima, são normalmente derivados de misturas triaxiais de argilas, fluxos, fluxantes e material de enchimento (MAGAGNIN, 2014).

De acordo com Magagnin (2014) os materiais cerâmicos triaxiais são compostos por uma mistura de argilominerais, feldspatos e quartzo, no qual cada um destes compostos tem uma função específica. Os argilominerais terá a função de proporcionar plasticidade na presença de umidade, além de resistência mecânica a seco nas peças, ela forma mulita e fase vítrea durante a queima.

Como exemplo de argilominerais temos a ilita (argilomineral que apresenta exatamente as características citadas anteriormente) e o óxido de potássio ( $K_2O$ ) que é como modificador de rede, agindo como fundente e um mineralizador para fase mulita. Os feldspatos são os responsáveis pela formação da fase vítrea que acelera a sinterização. Já o quartzo, por ser o componente mineral de maior temperatura de fusão, auxilia na estabilidade térmica e dimensional. Tanto o quartzo como os feldspatos são materiais que não aportam plasticidade em presença de umidade. Eles correspondem à fração de partículas de maior tamanho na mistura, normalmente com tamanhos em torno de 60-70  $\mu m$ .

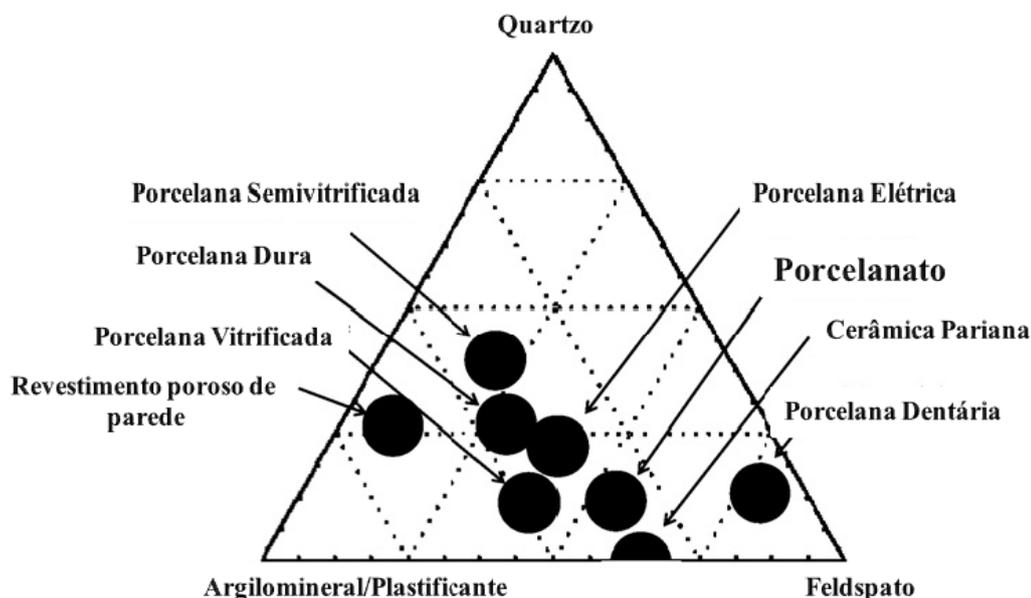
Segundo De Noni (2009) o feldspato e o quartzo, favorecem o empacotamento de partículas durante a etapa de compactação e a saída de água

durante a secagem das peças. As partículas cristalinas provenientes desses materiais ou cristalizadas durante a queima desenvolvem um importante papel de reforço da microestrutura.

O porcelanato ele é enquadrado na classe dos materiais cerâmicos triaxiais devido aos materiais que o compõem. O porcelanato é constituído basicamente por uma mistura de argilominerais, feldspatos e quartzo (DE NONI, 2007).

A Figura 3 apresenta um diagrama triaxial onde se destaca a região de composição de alguns produtos cerâmicos triaxiais (MAGAGNIN, 2014).

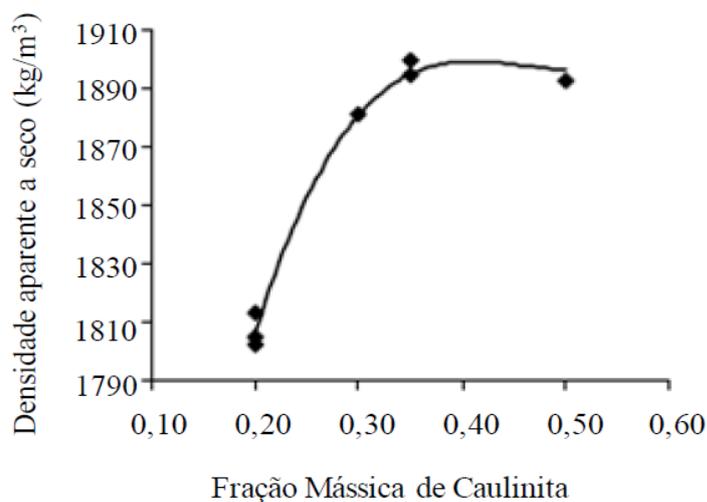
**Figura 3:** Materiais cerâmicos triaxiais.



Fonte: Magagnin, 2014.

As cerâmicas são formadas por uma região argilosa/plastificante de aproximadamente 30 a 50%. Esta é a região que desenvolve a maior densificação durante a etapa de conformação, conforme mostra a figura 4 (DE NONI, 2010).

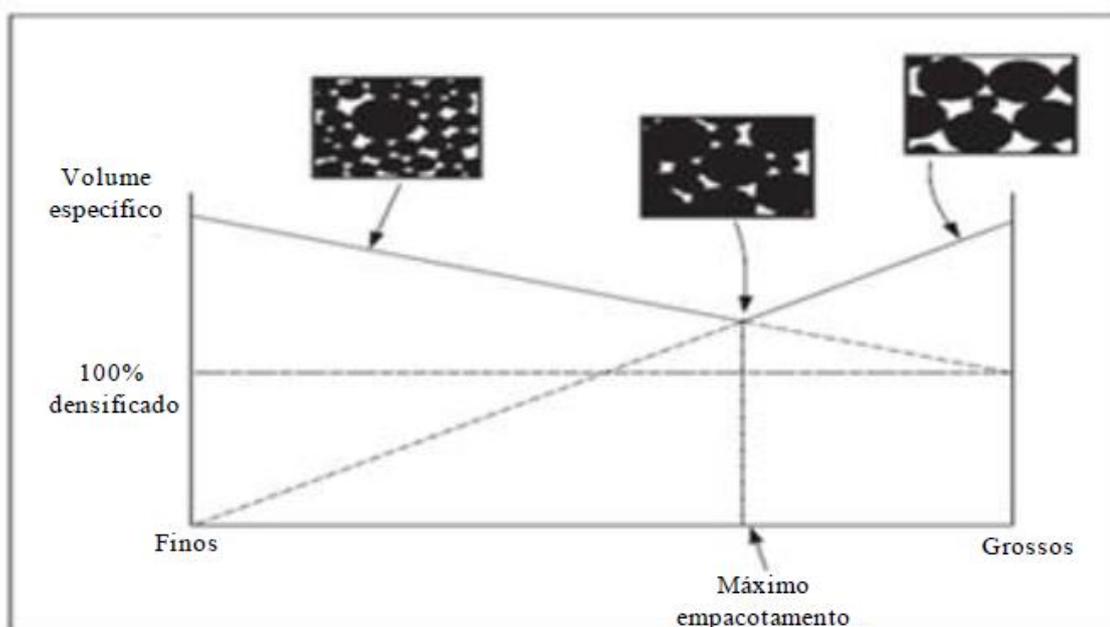
**Figura 4:** Gráfico de densificação da placa cerâmica em função do conteúdo de caulinita.



Fonte: Magagnin, 2014.

Os resultados apresentados estão de acordo com o comportamento esperado quanto ao empacotamento de partículas finas e grossas no qual se tem um empacotamento máximo com 70% de partículas grossas e 30% de partículas finas, ilustrado na figura 5 conforme mostrado por Magagnin (2014).

**Figura 5:** Sistemas de empacotamento de partículas



Fonte: Magagnin, 2014.

Segundo Magagnin (2014) apesar da composição do porcelanato se semelhante em parte à composição das porcelanas triaxiais tradicionais, o processo de fabricação é bem diferente. Esta distinção está principalmente na etapa de queima, pois no caso do porcelanato, os ciclos são muito mais rápidos e as temperaturas mais baixas do que para as porcelanas (ciclos entre 12 e 24 h, temperaturas entre 1300-1400°C). Este ciclo rápido irá proporcionar muitas de suas propriedades finais. Com respeito à etapa de resfriamento, industrialmente se é realizado bem rápido com pouco controle sobre as variáveis próprias dessa etapa da queima. Respeita-se unicamente a zona de transformação alotrópica do quartzo (573°C), onde se reduz a taxa de resfriamento para evitar o rompimento das peças, voltando a aumentar até a saída do forno. Dada a velocidade da queima as reações de fusão, cristalização e dissolução dificilmente chegam a seus estados de equilíbrio termodinâmico (DE NONI, 2007).

De acordo com De Noni Junior (2007), existem algumas semelhanças entre o porcelanato e as porcelanas triaxiais tradicionais, que consistem basicamente em três teorias aceitas sobre os mecanismos de reforço em porcelanas triaxiais que poderiam ser aplicadas para o porcelanato: a interconexão de cristais aciculares de mullita; a dispersão de fases cristalinas que limitam o tamanho do defeito natural de Griffith; e o reforço da matriz devido à diferença entre o coeficiente de expansão térmica da matriz com respeito ao das partículas cristalinas dispersas. Entretanto pode-se dizer que estes mecanismos atuam de modo simultâneo, sendo difícil muitas vezes identificar qual representa a contribuição mais importante.

### **3.5. HISTÓRIA DO PORCELANATO**

Segundo Silva (2012) o termo “porcelanato” surgiu no final de 1970, na Itália, era um material de alto desempenho, diferente de qualquer outro material cerâmico, caracterizado por uma aparência natural, assemelhando-se à rocha ou pedra natural.

Os primeiros indícios da produção do porcelanato foram na Itália na região de Saussolo no final da década de 70, graças ao pioneirismo de algumas

empresas italianas. Nesta época também houve avanços quanto ao desenvolvimento do processo de monoqueima, que, para muitos especialistas, representa a segunda revolução no setor cerâmico mundial, e a substituição dos fornos-túnel por fornos a rolo (PURIFICAÇÃO, 2009).

De acordo com Purificação (2009), enquanto as demais indústrias trabalhavam para adaptar suas plantas para produzir massas de coloração vermelha via monoqueima, os pioneiros italianos, por meio da implantação dos fornos a rolo, estavam experimentando a criação de produtos de massa vermelha com qualidades técnicas comparáveis as do porcelanato. Com a popularidade da monoqueima houve a necessidade de aumentar a produção e, para que isso fosse possível, a decisão tomada foi diminuir o tempo de queima e por meio de estudos foi constatado que para reduzir o ciclo de queima era necessário trabalhar com massas mais claras, pois essas se adaptavam melhor à queima rápida (PINHEIRO, 2006).

Porém, com o objetivo de reduzir os custos de produção e também pela menor disponibilidade de matéria-prima de coloração branca, os produtores italianos utilizavam matérias-primas cada vez menos brancas e puras. Com isso, a qualidade dos produtos caiu e a produção via monoqueima da região de Saussolo ganhou uma imagem negativa por parte dos consumidores (PURIFICAÇÃO, 2009).

Para restabelecer a confiabilidade na produção de revestimentos de Saussolo, os produtores desenvolveram o grés porcelanato, que apresentava alta resistência ao impacto. Dessa forma, iniciava-se uma grande revolução tecnológica na Itália que repercutiria em todo o mundo (PINHEIRO, 2006).

Outro avanço significativo se deu mais tarde com a implantação do processo de polimento e de técnicas de decoração que foram responsáveis pela utilização do produto tanto em termos de qualidade e resistência quanto em termos de estética e beleza (ALVEZ, 2010).

### 3.6. O GRÊS PORCELANATO

Segundo Pinheiro (2006) de todas as cerâmicas para revestimento disponíveis no mercado, o grês porcelanato era o produto que apresentava características técnicas superiores e o que apresentava os melhores efeitos estéticos, uma vez que este material é constituído por fases cristalinas de elevada dureza, e é extremamente denso.

Conforme Silva (2012), a expressão “grês porcelanato” originou-se das seguintes terminologias:

- “grês”, que consiste em um material cerâmico com estrutura compacta, característica de uma fase cristalina imersa em uma fase vítrea,
- “porcelanato”, terminologia que se refere representa o material cerâmico nobre, ou seja, se refere às características técnicas dos produtos.

De acordo com Luz (2008) o porcelanato é fruto de um processo tecnológico que permitiu a produção de um material constituído de fases cristalinas de alta dureza, não esmaltado e muito denso. Sendo tecnicamente um material policristalino com 40% de fase vítrea e com porosidade residual.

O grês porcelanato também é conhecido como “grês fino porcelanato”, “granito cerâmico” ou como e mais comumente conhecido “ porcelanato” (PINHEIRO, 2006).

O grês porcelanato possui uma grande versatilidade e foi originalmente desenvolvido para não ter esmalte na sua superfície. Entretanto, ele se insere comercialmente na categoria dos produtos tanto com superfície esmaltada quanto não esmaltado. O porcelanato sem superfície esmaltada apresenta uma maior resistência a superfície, resistência ao gelo e maior impermeabilidade, além de poderem ser polidos tendo sua aparência aproximada a dos mármore e granitos (PINHEIRO, 2006).

Nos últimos cinco anos, em consequência do grande crescimento no ramo de revestimentos cerâmicos em todo o mundo, foi observado uma crescente produção de revestimentos porcelânicos. Esse crescimento foi devido aos grandes investimentos que fabricantes e produtores do ramo tem feito no intuito

de diversifica a decoração de um produto que anteriormente não era esmaltado (PINHEIRO, 2006).

Segundo Magagnin (2014) a produção do porcelanato é dividida em três estágios que são: (1) moagem a úmido e homogeneização das matérias-primas, e secagem da suspensão resultante pelo processo de atomização (spray drying); (2) prensagem uniaxial entre 35-45 MPa do pó atomizado contendo entre 5 e 8% de umidade; (3) queima rápida entre 35-60 min (frio a frio) com temperatura máxima entre 1180-1230°C para obtenção da máxima densificação. Uma outra etapa do processamento é a coloração da massa nos porcelanatos não esmaltados, a aplicação de esmaltes e a decoração com técnica de sais solúveis ((DE NONI, 2010).

Industrialmente está associado ao grês porcelanato a sua evolução tecnológica e conceitual além do seu desenvolvimento de técnicas usadas para coloração e descoloração. Levando assim a sua utilização em locais que antes era de domínio apenas das pedras naturais (LUZ, 2008).

Assim o grês porcelanato, apresenta uma grande versatilidade. De acordo com Luz (2008), o porcelanato tem tipologias distintas que variam em função da sua utilização, como por exemplo: monocores, granito, decorados, rústicos, estruturados, esmaltados entre outros.

### **3.7. CARACTERÍSTICAS DO PORCELANATO**

O porcelanato é considerado o revestimento cerâmico de maior valor agregado. Conforme Luz (2008) destaca-se o fato que os porcelanatos são as últimas tendências em produtos cerâmicos para revestimentos com características técnicas e estéticas únicas.

É um revestimento que combina características estéticas com a mais alta tecnologia, o tornando assim adequado para diversos ambientes como revestimentos de ambientes que possuem um tráfego intenso como por exemplo os shopping center (SANTOS, 2014).

Segundo De Noni Junior (2012), dentre os distintos tipos de revestimentos cerâmicos, os porcelanatos foram os que apresentaram um maior crescimento nos últimos tempos.

De acordo com Pinheiro (2006), as características que se destacam do porcelanato são:

- Alta resistência à abrasão;
- Resistência ao gelo;
- Resistência química e ao manchamento;
- Uniformidade de cores;
- Impermeabilidade;
- Resistência à flexão;
- Facilidade de manutenção;
- Diversas possibilidades de composições.

As características mais importantes do porcelanato são a resistência ao desgaste físico, em sequência vem os baixos valores de absorção de água (esta é quase nula por volta de 0,01% a 0,02 %.), a alta resistência mecânica, a resistência ao ataque químico, a dureza superficial, a resistência ao congelamento, a resistência à compressão e o isolamento a descargas elétricas estáticas (PINHEIRO, 2006).

A ABNT publicou uma norma específica para porcelanatos, que é a norma NBR15.463, a qual destaca-se nesta norma a definição do porcelanato a partir do parâmetro absorção de água:

- Porcelanato técnico: placa cerâmica não esmaltada para revestimento que apresenta absorção de água menor ou igual a 0,1%;
- Porcelanato esmaltado: placa cerâmica esmaltada para revestimento que apresenta absorção de água menor ou igual a 0,5%.

A tabela 2 apresenta a resistência mecânica requerida pela NBR 13.817(1997), para os revestimentos de acordo com a absorção de água.

**Tabela 2:** Módulo de resistência à flexão e carga de ruptura de acordo.

<b>Tipologia de produto</b>	<b>Grupo de absorção de água</b>	<b>Absorção de água AA (%)</b>	<b>Módulo de resistência à flexão (MPa)</b>	<b>Carga de ruptura (N) para espessura 7,5 mm</b>
Porcelanato	Bla	0 a 0,5	≥ 35	≥1300
Grês	Blb	0,5 a 3	≥30	≥1100
Semi-Grês	Blla	3 a 6	≥22	≥1000
Semi-porosa	Bllb	6 a 10	≥18	≥800
Porosa	Blll	≥10	≥15	≥600

Fonte: Silva, 2012.

A NBR15.463 especifica a resistência mecânica para os porcelanatos técnicos e esmaltados conforme a tabela 3.

Ao se comparar o módulo de resistência à flexão e a carga de ruptura para os porcelanatos técnicos e esmaltados segundo a NBR 15.463 e a NBR 13.818, observa-se que os valores da NBR 15.463 são superiores. Além disso percebeu-se uma maior exigência nos valores de carga de ruptura nos porcelanatos com espessura inferiores a 7,5 mm (SILVA, 2012).

**Tabela 3:** Resistência mecânica para porcelanato técnico e esmaltado segundo a NBR 15. 463.

		<b>Técnico</b>	<b>Esmaltado</b>
<b>Módulo de Resistência à Flexão (MPa)</b>	Media	≥45	≥37
	Individual	42	35
<b>Carga de ruptura (N)</b>	e < 7,5 mm	≥900	≥900
	e ≥7,5 mm	1800	1500

Fonte: Silva, 2012.

### 3.8. MATERIAS PRIMAS BASICAS PARA PRODUÇÃO DO PORCELANATO

A seleção das matérias-primas da massa cerâmica devem ter como critérios básicos as propriedades requeridas ao produto e as características inerentes ao processo de fabricação. Entretanto as propriedades são dependentes da composição química e mineralógica das matérias primas empregadas. Assim as matérias primas são de grupos minerais distintos no qual cada uma tem uma função indispensável sobre as características finais do porcelanato (ARAÚJO, 2009).

A massa de porcelanato é composta basicamente por uma mistura de argilas, feldspato, caulim, areias feldspáticas, quartzo e aditivos quando necessário, no qual a composição necessária para a produção do porcelanato pode ser vista abaixo na tabela 4 (DE NONI, 2010).

**Tabela 4:** Composição química das materiais primas empregadas na produção do porcelanato.

MATERIAIS PRIMAS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								Perda ao fogo
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	
Caulim	49	36	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2	12
Argila Plástica	64	25	1,5	0,6	0,3	0,4	0,6	0,5	7
Feldspato	70	19	1,2	7	0,3	0,3	0,2	0,2	0,5
Quartzo	98	0,8	-	0,2	-	0,3	0,1	0,2	0,2
Talco	51	8	0,2	-	0,3	0,6	0,3	30	7

Fonte: Araújo, 2009.

### 3.8.1. Argila

A argila é um material natural, terroso e de granulação fina, as argilas são formadas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio (OLIVEIRA, 2012).

Segundo Luz (2008), as argilas se caracterizam por constituírem grande parte de minerais específicos, que são os minerais de argilas ou argilominerais, ocorrendo normalmente, em caráter subordinado, outros materiais e minerais associados como o quartzo, feldspato, micas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, carbonatos, matéria orgânica e outros.

As argilas na presença de água, apresenta várias propriedades que são devido a presença dos argilosminerais, tais como: plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação, tixotropia e viscosidade de suspensões aquosas. Estas propriedades justificam a grande variedade de aplicação tecnologia (LUZ, 2008).

As argilas são constituídas essencialmente por partículas cristalinas extremamente pequenas de um número restrito de minerais que são os “argilominerais”. Quimicamente, os argilominerais são compostos por silicatos

hidratados de alumínio e ferro, contendo ainda, geralmente, certo teor de elementos alcalinos e alcalino-terrosos.

Os principais grupos de argilominerais são caulinita, illita, esmectitas ou montmorilonita, no qual a diferença entre estes está apenas na sua estrutura (LUZ, 2008).

A função da argila é fornecer as características plásticas nas peças verdes, ou seja, antes da serem sinterizadas, garantindo melhores propriedades durante a fase de compactação e maior resistência mecânica após a secagem (OLIVEIRA, 2012).

A plasticidade em argilas é resultante da atração entre as partículas de argilominerais e a ação lubrificante da água entre as partículas anisométricas lamelares. A plasticidade irá ocorrer quando a argila tem água suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais com uma película de “água rígida”, isto é, não orientada, que age como meio lubrificante facilitando o deslizamento das placas umas sobre as outras quando uma tensão tangencial for aplicada (SILVA. M, A, 2011).

Para produção de grês porcelanato as argilas geralmente são plásticas e compostas de caulinita e outros argilominerais subordinados como a illita e a esmectita, além de um variável conteúdo de quartzo, feldspato, mica e matéria orgânica (LUZ, 2008).

Para Oliveira (2012) as argilas utilizadas em massas cerâmicas para porcelanato necessitam apresentar características adicionais, além da plasticidade, como:

- aportar uma coloração clara na queima;
- aportar propriedades reológicas facilitando a fluidez;
- conferir com as próprias características fundentes uma boa densidade na queima;
- aportar características mecânicas ótimas nos queimados.

Entretanto para se conseguir atingir estas características descritas acima são utilizadas, freqüentemente misturadas entre si, argilas pouco plásticas, ricas

em caulinita, e argilas particularmente plásticas, mais ricas em illita e montmorilonita  $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$ .

### 3.8.2. Caulim

Caulim é um tipo de argila, porém este é o nome comercial dado a uma argila branca, ou quase branca constituído essencialmente de caulinita. Os caulins são silicatos cuja composição química aproxima-se de  $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O}$ , entretanto contem outros elementos como impurezas. O caulim cerâmico deve possuir um teor de caulinita entre 75 e 85% e não ter minerais que afetem a cor de queima, como o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , cujo teor deve ser menos que 0,9% de modo que a alvura após queima esteja na faixa de 85-92% (OLIVEIRA, 2012).

Segundo Luz (2008), o Caulim possui uma granulometria bem fina, boa inércia química e geralmente de cor branca. O mineral mais importante industrialmente do caulim é a caulinita no qual é formada por intemperismo ou alteração hidrotérmica. Os diferentes tipos de caulim se diferenciam pelas suas características físicas como: alvura, grau de cristalização, opacidade e viscosidade.

O caulim mesmo sendo caracterizado por apresentar cor branca, ele pode ter algumas impurezas coloridas que irá reduzir seu valor comercial como por exemplo a hematita (LUZ, 2008).

De acordo com Oliveira (2012) o caulim além de conferir cor branca à massa cerâmica, ele é um aportador fundamental de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o qual, durante a fase de vitrificação da peça regula a reação de equilíbrio. Na etapa de queima, em temperaturas superiores a 1000 °C, o caulim se converte para mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ), que, devido a sua estrutura acicular, atua como esqueleto contribuindo para o aumento da resistência mecânica, bem como reduzindo a deformação piropelástica da peça. Quando a necessidade de uma peça isenta de porosidade, pode-se usar somente o caulim, como a parte de argila necessária para a composição da massa. No entanto o caulim apresenta uma plasticidade reduzida quando comparada a outras argilas.

A cor clara nas peças de porcelanato é muito almejada não só pelo aspecto estético da peça em si, principalmente em porcelanatos polidos, como também

pela interação do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  com os elementos dos pigmentos e corantes resultando em desvio de tonalidades em peças esmaltadas (OLIVEIRA, 2012).

### 3.8.3. Quartzo

De acordo com Oliveira (2012) O quartzo é considerado uma substância, geralmente inerte, que é adicionado às massas cerâmicas de porcelanato favorecendo a formação de mulita durante a queima quando há a necessidade de equilibrar a relação  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ele é uma matéria prima usado em cerâmicas porosas com a função de tornar a massa menos plástica favorecendo a liberação de substâncias gasosas e a saída de água. Ele mantém a forma do pedaço de porcelana durante sinterização (SILVA. M, A, 2011).

O quartzo é encontrado na natureza sob as seguintes formas polimorfas: quartzo, tridimita e cristobalita. As transformações das fases ocorrem decorrente da variação da temperatura. O quartzo alfa é estável a temperatura ambiente, se transforma em beta a  $573^\circ\text{C}$  e em tridimita a  $870^\circ\text{C}$ . Já na temperatura de  $1470^\circ\text{C}$  ocorre a transformação na fase cristobalita até atingir o ponto de fusão a  $1713^\circ\text{C}$  (LUZ, 2008).

A presença do quartzo tanto nas massas cerâmicas brancas quanto nos materiais de revestimentos é fundamental, pois este ajuda no controle da dilatação e ajuste da viscosidade da fase líquida formada durante a sinterização da massa cerâmica além de facilitar a secagem e a liberação de gases.

A massa cerâmica que contem quartzo durante seu processo de sinterização pode ocorrer variação de tamanho dos seus grãos. Em torno de  $573^\circ\text{C}$  ele aumenta de tamanho com um aumento de volume superior a 3%. Durante esta transformação a taxa de aquecimento deve ser lenta para evitar trincas devida variação de volume. Já durante resfriamento entre  $1250^\circ\text{C}$  e  $1100^\circ\text{C}$  se mesmo for rápido, irá evitar a cristalização da cristobalita. O resfriamento rápido favorece o desenvolvimento de vidros transparentes e o resfriamento lento favorece a formação de cristais com efeito opacos (LUZ, 2008).

### 3.8.4. Feldspato

Os feldspatos são minerais presentes em rochas eruptivas como silico-aluminatos de metais alcalinos e alcalinos-terrosos. Eles são divididos em:

- Albita:  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$  feldspato sódico;
- Espodumênio:  $\text{Li}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$  feldspato lítico;
- Ortoclásio:  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$  feldspato potássico;
- Anortita:  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$  feldspato cálcico.

Segundo Oliveira (2012) a qualidade do feldspato é dada pela quantidade de ortoclásio e albita presentes nos feldspatos potássico e sódico.

O feldspato é caracterizado por apresentar as primeiras fases líquidas que aparecem durante a queima, desempenhando assim o papel de fundentes. Estas fases líquidas iram contornar as partículas mais refratárias, aproximando-as por forças de tensão superficial que são geradas por poros mais finos o que irá gerar contração na peça. Desta forma o feldspato se torna responsável inicialmente pelo processo de densificação, contribuindo pela densificação da peça (LUZ, 2008).

De acordo com Oliveira (2012) como as altas pressões de compactação utilizadas atualmente na fabricação de porcelanatos não são suficientes para eliminar a porosidade intergranular é necessário que durante a queima o preenchimento dos vazios intergranulares seja feito por um componente que esteja no estado líquido e que possua viscosidade adequada para que penetre nos capilares, e também, que possam dissolver os grãos refratários que não reagiram, por isso os fundentes são usados e os feldspatos são os fundentes mais comumente empregados na fabricação de porcelanatos.

Os feldspatos são divididos em três categoriais (LUZ, 2008):

- Para massa cerâmica ou corpo cerâmico;
- Para vidrados ou esmaltados;
- Para vidros.

A utilização do fundente é indispensável na fabricação de porcelanato. Contudo, no Brasil, existe uma acentuada escassez de feldspatos, principalmente junto às regiões sul e sudeste do país, principais pólos cerâmicos. A diminuição das reservas de matérias primas, associadas à grandes distâncias do local de utilização, vêm exercendo um aumento sobre os custos dos produtos finais (LUZ, 2008).

Já nos países industrializados os maiores produtores de feldspato que tem grande industrias cerâmicas e de vidrados são: Estados Unidos da América, Alemanha, França, Canada, Itália, República sul africana e outros (LUZ, 2008).

### **3.8.5. Talco**

O talco também é conhecido como esteatita ou esteatite. Ele é um mineral filossilicato no qual sua composição química é  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ .

Segundo Luz (2008), o talco se caracteriza por apresentar-se em massas fibrosas ou foliada, sua cor varia do branco ao cinza, verde-maça a amarelada. Ele também varia de translucido a opaco e apresenta risca branca e brilho vítreo.

O talco é um mineral de que apresenta uma dureza característica (1 na Escala Mohs), ou seja, dureza baixa e o seu peso específico está entre 2,7 a 2,8 no qual é usado na preparação de massa por via úmida com valor máximo de 5%.

## **3.9. ENSAIOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE CERÂMICOS**

Para Sliva et al (2015) é por meio do conhecimento das características específicas e assim das suas propriedades é que pode especificar o correto uso das placas cerâmicas.

A maioria das propriedades da cerâmica está relacionado a sua massa, outras são determinadas pelo esmalte. A massa, ou o corpo, influência diretamente na absorção de água, a expansão por umidade e a resistência ao

peso (mecânica) e ao gelo. Já o esmalte, deixa a placa resistente a abrasão (PEI), manchas e substâncias químicas. Nas placas de superfície lisa ele age garantindo um bom coeficiente de atrito, neste caso: antiderrapante (REBELO, 2010).

### 3.9.1. Absorção de água

A absorção de água é um parâmetro utilizado para medir a porosidade aberta de um material cerâmico e para avaliar a fundência deste material. É um valor em porcentagem da massa de água absorvida pelo corpo após a sinterização (MORAES, N.V.L.M ,2005).

Outras características como resistência mecânica, resistência ao impacto, resistência ao gelo, resistência química, entre outras, também estão associadas com a absorção de água (SILVA, 2015).

Neste procedimento, quanto menor for a absorção de água da peça maior será a sua densidade aparente, a sua retração de queima e a sua resistência mecânica de flexão, logo, quanto maior a porosidade de um revestimento, maior será a aderência à argamassa. Porém, o aumento da porosidade reduz a resistência mecânica (SILVA, 2015)

O procedimento para obtenção da absorção de água é segundo a norma ISO 10545-3:1995. Será determinado o peso da amostra seca ( $P_s$ ) e dos pesos úmidos ( $P_u$ ) e dos pesos imersos ( $P_i$ ) e o cálculo da absorção de água e de acordo com a equação 1 abaixo.

$$AA = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} * 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Para a determinação da pesagem dos corpos de prova cerâmicos, eles serão submetidos anteriormente a uma imersão em água fervente por duas horas e a realização do peso imerso é realizada pelo princípio de Arquimedes de deslocamento de fluido (MORAES, N.V.L.M ,2005).

### 3.9.2. Retração térmica linear

É uma característica que ocorre nos materiais devido a variação da temperatura resultando em uma variação dimensional. O material terá uma retração da sua dimensão quando ele sofre uma variação positiva no contrário ele terá uma expansão tendo sua temperatura elevada (MORAES, N.V.L.M, 2005).

Para Rebelo (2010) esta característica consiste no aumento das dimensões da placa cerâmica por absorção de água e/ou por aumento da temperatura. Ela geralmente ocorre em locais onde a placa cerâmica está sujeita a umidade e calor intenso, como fachadas, pisos externos, lareiras e churrasqueiras.

A variação dimensional de um material é caracterizada pelo coeficiente de expansão térmica que é expresso em  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Nos revestimentos cerâmicos como os pisos e azulejos expansão varia entre  $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  a  $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Logo, cada vez que a temperatura eleva  $1^{\circ}\text{C}$ , o comprimento da peça é acrescido de 4 a 8 centésimos de milímetros por metro do tamanho inicial.

Para determinação da retração linear dos corpos de prova, é realizado a medição dos comprimentos dos corpos de prova antes e após a sinterização com um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Para o cálculo da retração linear é utilizado a equação 2 (PUREZA, J.C.C, 2004)

$$RL = \frac{L_s - L_q}{L_s} * 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

RL= a retração linear de queima (%)

Ls = comprimento após a secagem (mm)

Lq = comprimento após a queima (mm)

### 3.9.3. Porosidade Aparente

O procedimento para realização de ensaio de porosidade aparente é baseado na ISO 10545-3 no qual será fornecido o provável percentual de poros abertos em relação ao seu volume total após a sinterização dos corpos de prova (MORAES, N.V.L.M ,2005).

Os corpos de prova serão pesados secos e úmidos da mesma forma que foram pesados no ensaio de absorção de água e também serão pesados imersos através do método da balança hidrostática. Após isso, será calculada a porosidade aparente pela equação 3 seguintes:

$$PA(\%) = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} * 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

PA = porosidade aparente

Mu = peso do corpo de prova úmido

Mq = peso do corpo de prova queimado

Mi = peso do corpo de prova imerso em água

### 3.9.4. Resistência à abrasão

Os ensaios de aspecto ambiental são realizados segundo as normas, NBR - 10.004, NBR – 10.005 e NBR – 10.006.

A resistência a abrasão é uma característica mecânica da superfície que representa a resistência ao desgaste causado pelo movimento. É o desgaste superficial do esmalte das placas cerâmicas causadas pelo atrito inerente ao piso (PINHEIRO, 2006).

Conforme Sliva et al (2015) a resistência à abrasão está relacionada ao desgaste superficial do material em devido ao trânsito de pessoas e do contato com objetos. A resistência à abrasão pode ser subdividida em: abrasão superficial (para produtos esmaltados) e em abrasão profunda (para produtos não esmaltados).

Para se avaliar a resistência à abrasão de materiais esmaltados é feito uma avaliação segundo o índice PEI.

O índice PEI - Porcelain Enamel Institut faz menção ao órgão americano que realizou os testes de abrasão pela primeira vez e que estabeleceu os critérios de classificação da cerâmica conforme a resistência do esmalte, conforme mostrado na tabela 5 (REBELO, 2010).

Para avaliar a resistência a abrasão dos materiais não-esmaltados é necessário fazer a medida do volume de material removido da superfície da peça, através da abrasão profunda que será submetida à ação de um disco rotativo de um material abrasivo específico (PINHEIRO, 2006).

**Tabela 5:** Classificação da resistência à abrasão – PEI (Cerâmica Portobello).

PEI	ABSORÇÃO	ORIENTAÇÕES PARA ESPECIFICAÇÃO
0	-	Somente paredes.
1	Muito leve	Paredes e detalhes de pisos com pouco uso.
2	Muito leve	Paredes e detalhes de pisos com pouco uso.
3	Leve	<u>Residencial:</u> pisos de banheiros e dormitórios, salas e varandas com pouco uso.
4	Moderado	<u>Residencial:</u> pisos de cozinhas e salas com saída para a rua, calçadas e garagens.

---

		<u>Comercial</u> : pisos de boutique, ambientes administrativos de empresas, escritórios, hotéis.
		bancos, supermercados, hospitais etc
		<hr/>
5	Intenso	<u>Comercial</u> : ambientes de atendimento ao público, praças e passeios públicos, cozinhas industriais, pisos de fábricas sem tráfego de veículos pesados.

---

Fonte: REBELO. C,R, 2010.

### 3.9.5. Módulo de resistência à flexão

Os porcelanatos possuem uma estrutura extremamente compacta, logo, são dotados de uma elevada resistência a flexão (PINHEIRO, 2006).

A resistência a flexão é uma medida que indica a capacidade da placa cerâmica em suportar esforços exercidos por cargas através do tráfego (de pessoas, objetos, moveis, equipamentos ou veículos), que possam levar a rupturas, esmagamentos e quebras (REBELO, 2010).

De acordo com Pinheiro (2006), os valores de carga a ruptura dos porcelanatos são na faixa de 200 a 250 Kg, isso para solicitações mecânicas já excessivas.

O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga  $P$  no centro de um corpo de prova específico que será apoiado em dois pontos. A carga inicialmente parte de zero e é aumentada lentamente até a ruptura do corpo de prova no qual o valor desta carga *versus* o deslocamento do ponto central é a resposta do ensaio de flexão. O ensaio pode ser em três pontos ou em quatro pontos. Conforme mostrado na figura 5 (GARCIA, A., SPIM, J.A, SANTOS, C.A, 2008).

**Figura 5:** Do lado esquerdo ensaio de flexão de três pontos e do lado direito ensaio de flexão de quatro pontos.



Fonte: Próprio autor.

O ensaio de flexão será realizado baseado na norma NBR 13818:1997 em uma máquina de ensaios universal. A resistência mecânica das peças medidas diante do ensaio de flexão em três pontos é dado pela equação 4 e resistência das peças medidas pelo ensaio de flexão em quatro pontos é dado pela equação 5.

$$TRF \left( \frac{kgf}{cm^2} \right) = \frac{3PL}{bh^2} \quad \text{Equação (4)}$$

$$\sigma = \frac{3}{2} * \frac{P*(L-l)}{b*d^2} \quad \text{Equação (5)}$$

Conforme ilustrado na tabela 6, do Centro Cerâmico do Brasil (CCB), pode-se observar que quanto maior o índice de resistência a flexão menor a absorção de água e quanto maior a espessura da placa (REBELO, 2010).

**Tabela 6:** Classificação da resistência à flexão das placas cerâmicas.

<b>Grupo Placas Prensadas</b>	<b>Resistência à Flexão (MPa)</b>	<b>Resistência à Flexão (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Nomenclatura</b>
B III b	14,71	150	Porosa
B II b	17,65	180	Semi porosa
B II a	21,57	220	Semi Grês
B I b	29,42	300	Grês
B I a	34,32	350	Porcelanato

Fonte: REBELO, 2010.

### **3.9.6. Resistência ao ataque químico**

As superfícies esmaltadas das cerâmicas da mesma forma que a sua massa, possuem níveis variados de tolerância a produtos químicos. Isso irá determinar a capacidade da superfície em manter seu aspecto original após serem submetidas a ataques químicos (REBELO, 2010).

A resistência ao ataque químico é dividida em 2 classes: a residencial (é a resistência a produtos domésticos), obrigatória a qualquer placa; e a industrial (é a resistência a ácidos fortes, concentrados e quentes) (SILVA et al. 2015).

A classificação é ilustrada na tabela 7 abaixo.

**Tabela 7:** Classificação da resistência ao ataque químico.

Agentes químicos		Níveis de resistência química		
		A	B	C
Ácidos e Álcalis	Alta concentração (H)	HA	HB	HC
	Baixa concentração (L)	LA	LB	LC
Produtos Domésticos e de piscinas		A	B	C
A = Alta   B = média   C = Baixa		-	-	-

Fonte: SILVA. et al, 2015.

### 3.9.7. Resistência a manchas

Para Sliva. et al (2015) a resistência a manchas demonstra a facilidade de limpeza da superfície da peça. Quanto mais lisa for a superfície da peça, mais fácil é a limpeza.

Esta propriedade irá determinar o quanto uma superfície poderá reter a sujeira e a sua respectiva facilidade de remoção de manchas quando submetidas a ação generalizada dos diversos produtos que estão sujeitos em seu ambiente (REBELO, 2010).

### 3.9.8. Resistência à gelo

Ocorrência observada quando as placas cerâmicas estão em locais de baixa temperatura, e a água que penetra nos poros da cerâmica pode congelar e, dessa forma, aumentar de volume causando certa patologia.

Se as placas escolhidas tiverem uma massa muito porosa e não suportarem essa pressão, todo o revestimento pode ser danificado, neste caso é importante usar placas cerâmicas que apresentem um baixo índice de absorção de água (REBELO, 2010).

### 3.10. RESÍDUOS DO POLIMENTO DO PORCELANATO

Segundo Santos (2014), o resíduo do polimento do porcelanato é gerado durante a etapa de tratamento superficial que é chamada de polimento do porcelanato bruto no qual cerca de 0,8 a 1 mm de espessura da camada é removida durante esta etapa.

Durante o polimento, o total de resíduo gerado é em torno de 13,3 tonelada por dia, ou seja, em média 400 toneladas por mês com umidade de 30%. Estes dados são referentes a fábrica da Cecrisa em Santa em Minas Gerais.

“A composição química do resíduo do porcelanato é, basicamente, constituída pela própria massa do porcelanato e pelos resíduos gerados pelos utensílios do polimento” (SOUZA, 2007; In: SANTOS, 2008).

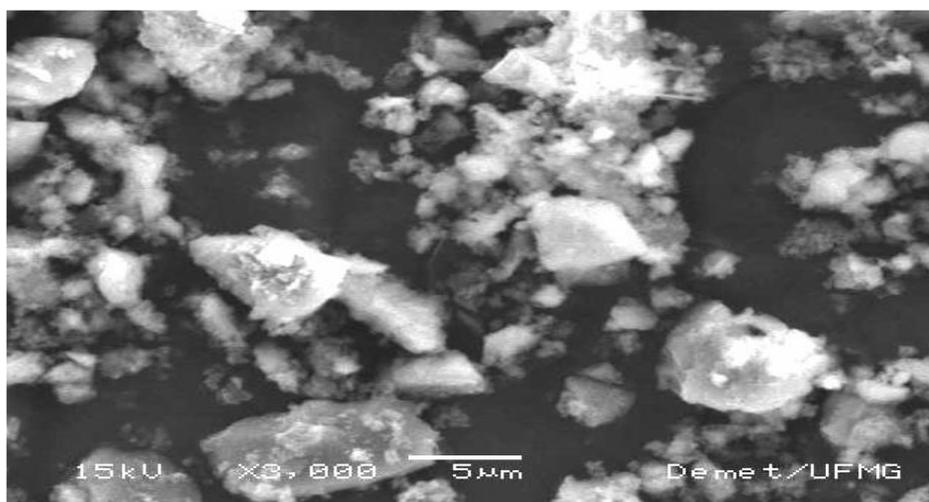
“A análise química apresentou teores altos de silício (Si) e oxigênio (O), médios de alumínio (Al) e zircônio (Zr), baixos de magnésio (Mg) e traços de ferro (Fe), cálcio (Ca), potássio (K), fósforo (P) e sódio (Na)” (SILVA, 2005, p. 68).

O resíduo do polimento do porcelanato apresenta granulometria fina e apresenta composição química variada (SOUZA, 2007, p. 11), e uma elevada taxa de concentração de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de magnésio (MgO) em sua composição (SILVA, 2005, p.68).

A mulita e o quartzo presentes têm como provável origem o porcelanato, já a presença do carbeta de silício e do óxido de magnésio no resíduo está relacionado ao abrasivo utilizado no processo de polimento (SANTOS, 2014). De acordo com Souza (2010) a sílica presente na composição do resíduo é oriunda do porcelanato e do abrasivo, a alumina advém do porcelanato, enquanto que o óxido de magnésio está associado ao cimento presente no abrasivo.

O emprego da microscopia eletrônica de varredura permite evidenciar a morfologia das partículas do resíduo de polimento do porcelanato, utilizando elétrons secundários, figura 6 (SILVA, 2005).

**Figura 6:** Morfologia do grão de RPP – elétrons retro-espalhados e aumento de 3000x.



Fonte: SILVA, 2005.

Após uma análise granulométrica Silva (2005, p. 73) chegou à conclusão que de acordo com o tamanho das partículas o sistema pode ser classificado como pó, que apresenta partículas de 1 a 44µm. As forças de superfície têm grande efeito, e dependendo do meio, o resíduo pode ser alterado por surfactantes.

A massa específica do resíduo do porcelanato obtida empregando a técnica de Picnometria a Hélio é de 2,49 g/cm<sup>3</sup>, já o resultado da Picnometria de Líquidos através de querosene apresentou uma massa específica de 2,48 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.11. ALTERNATIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO

Uma alternativa para a reutilização do resíduo do polimento do porcelanato, seria adicionando como matéria prima na produção de novos produtos cerâmicos, porém, a reutilização de resíduos como matéria prima secundária em diversos processos industriais, necessita de aplicação segura e viável desde resíduo para que se evite maiores importunos (PUREZA, 2004).

Segundo Pureza (2004), antes de se fazer a incorporação de resíduos em massa cerâmica, e preciso levar em consideração a compatibilidade existente entre os materiais envolvidos e a compatibilidade do produto obtido com o meio ambiente, ou seja, a adição do resíduo não pode comprometer a qualidade do produto final nem causar dano ambiental

Muitos outros estudos estão sendo realizados a fim de solucionar a questão do descarte, uma vertente realmente é a utilização do processo de reciclagem do resíduo do polimento do porcelanato (RPP).

A viabilidade da reciclagem do RPP depende de alguns fatores que são cruciais como (SILVA, G. J. B., 2005):

- Distância de onde é produzido o resíduo e o local do seu possível reaproveitamento;
- Custo de transporte dos resíduos;
- Volume total de resíduos disponíveis para o reprocessamento;
- Custo gasto com estocagem do resíduo no local de aproveitamento.

#### 3.11.1. Reutilização do resíduo do porcelanato no concreto.

O RPP vem sendo muito utilizado na indústria cimenteira, segundo Souza (2007) a reutilização do resíduo do pó do polimento no concreto revelou que a presença deste resíduo de porcelanato no concreto proporciona mudanças nas características do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

A utilização do resíduo do polimento do porcelanato no concreto proporciona grande benefício ambiental e ainda agrega melhorias no que se refere a sua resistência mecânica e durabilidade. A adição do resíduo do porcelanato em traços com aditivo plastificante propiciou, praticamente, um aumento considerável da resistência mecânica à compressão em comparação aos concretos comuns sem resíduo.

Com o aumento das concentrações de resíduos de porcelanato em concretos sem aditivo observou-se uma tendência das massas específicas real, saturada e seca aumentarem na mesma direção. Em traços com aditivos plastificantes, esses valores mantiveram-se basicamente constantes, com uma pequena tendência de queda à medida que aumenta a concentração de resíduo nos traços. A difusividade térmica também se manteve constante para todos os traços, ou seja, não há diferença na velocidade de propagação de calor com a utilização de resíduo na velocidade de propagação de calor com a utilização de resíduo de porcelanato em quantidades diferentes (SOUZA, 2007, p. 200-202).

De acordo com Silva (2005), a adição de RPP no concreto proporcionou ao mesmo uma melhor consistência, menor exsudação, aumento na coesão, aumentou na viscosidade do concreto no estado fresco, a sua resistência à compressão melhorou o desempenho do concreto e a porosidade do concreto diminuiu com o aumento do teor do resíduo.

O resíduo do polimento do porcelanato pode ser reaproveitado até 10% em peso na produção de concreto, acarretando assim melhorias em suas propriedades, ou seja, sem afetar sua durabilidade, propriedades mecânicas e ainda contribui para a preservação do meio ambiente (SILVA, 2005).

### **3.11.2. Reutilização do resíduo do porcelanato em massa cerâmica.**

De acordo com Marques et al. (2007), o resíduo possui grande potencial de reciclagem por meio da sua incorporação em massa de porcelanato. Esse procedimento além de minimizar o impacto ambiental, agrega valor ao resíduo

que está sendo descartado e irá reduzir custos nos processos de produção devido ao menor gasto no consumo de energia durante o processo de queima.

Segundo Kumer et al. (2007) do ponto de vista ambiental, o reaproveitamento do resíduo para produção de novos produtos cerâmicos é um método muito difundido e estudado, porém é necessário se tomar alguns cuidados, pois esses apesar de ser um método totalmente viável ele deve ser realizado de forma criteriosa para que o resíduo em questão não sobra lixiviação e/ou solubilização.

No trabalho em questão, está sendo proposto exatamente esta reutilização conforme mostrado por Santos (2014). No qual além de caracterizar previamente o resíduo gerado no polimento do porcelanato, será feita formulações específicas de RPP com o objetivo de se obter os materiais cerâmicos com as mesmas características mecânicas, físicas e de aspecto do produto comercial.

### **3.11.3. Reutilização do resíduo de baixa granulometria na produção de cerâmica tradicionais.**

A indústria de cerâmica tradicional tem consumido anualmente uma quantidade exuberante de recursos naturais não renováveis, e milhares de empresas como olarias e empresas cerâmicas tem consumido cerca de 15 mil toneladas de argila por ano (PUREZA, 2004).

Segundo Pureza (2004) as argilas que são usadas na produção de cerâmicas tradicionais, elas são caracterizadas por possuírem alguns óxidos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}$  além de terem uma baixa granulometria.

Devido ao grande número de argilas que vem sendo consumido nas indústrias de cerâmicas tradicionais e as características encontradas nas mesmas, foi visto um grande potencial de reutilização de resíduos de baixa granulometria na indústrias cerâmicas vendo assim a possibilidade de utilizar resíduo como matéria-prima.

Todos os resíduos de baixa granulometria como o pó de aciaria, resíduo do atomizador de indústria cerâmica e resíduo do polimento de grês porcelanato passaram a ser de interesse da indústria cerâmica. A baixa granulometria da

matéria-prima influência em várias propriedades como na plasticidade da massa, na taxa de sinterização, porosidade final e densidade, entretanto a redução da granulometria e uma etapa que encarece o processo produtivo (PUREZA, 2004).

#### Resíduo industrial siderúrgico:

Como a produção mundial do aço tem crescido muito nos últimos anos, processo de fabricação do aço tem gerado uma grande quantidade de resíduo industrial siderúrgico (pó de aciaria). O pó gerado é extremamente fino e em torno de 15 a 20Kg/ton do aço produzido. No Brasil chega a ser produzido cerca de 100.000 a 200.000 t ao ano (PUREZA, 2004).

A composição química do pó de aciaria depende das matérias primas empregadas e da qualidade do aço utilizado mais geralmente são encontrados óxidos ferro  $Fe_2O_4$ , óxido de cálcio e óxido de silício.

#### Resíduo do pó do atomizador:

Cerca de 60% da produção dos revestimentos cerâmicos e via moagem a úmido, ou seja, e atomizada. O tratamento por atomização melhora a qualidade do produto ao se compara com o tratamento a seco, facilitando o controle de gestão do processo. O objetivo dessa etapa e a obtenção da barbotina que apresenta um conteúdo de sólido em suspensão que varia entre 60% a 70%. No final do processo de atomização os grânulos serão descarregados e algumas frações granulométricas, muito finas, são arrastadas pela chaminé e se mistura com o ar quente. Atualmente a uma produção anual de 110.000 ton. de resíduo de pó de atomizador retido nos filtros (PUREZA, 2004).

#### Resíduo do polimento do grês porcelanato

Segundo Pureza (2004) foi na década de 80 que surgiu o grês porcelanato, um material que atualmente está na fronteira da tecnologia da indústria cerâmica. O grês porcelanato e caracterizado por ser um produto obtido por prensagem, ter absorção de água inferior a 0,5%, quando sinterizado, e ser um produto com superfície não esmaltada.

A etapa de polimento do grês porcelanato, confere ao mesmo um alto brilho e característica de que tornam possível o uso do grês em locais onde só eram possíveis a utilização de pedras naturais (PUREZA, 2004).

O grês pode ser obtido de formas diversas e com tratamentos específicos com o objetivo de se conferir efeitos especiais. Dessa forma os porcelanatos podem ser classificados como esmaltado ou técnico:

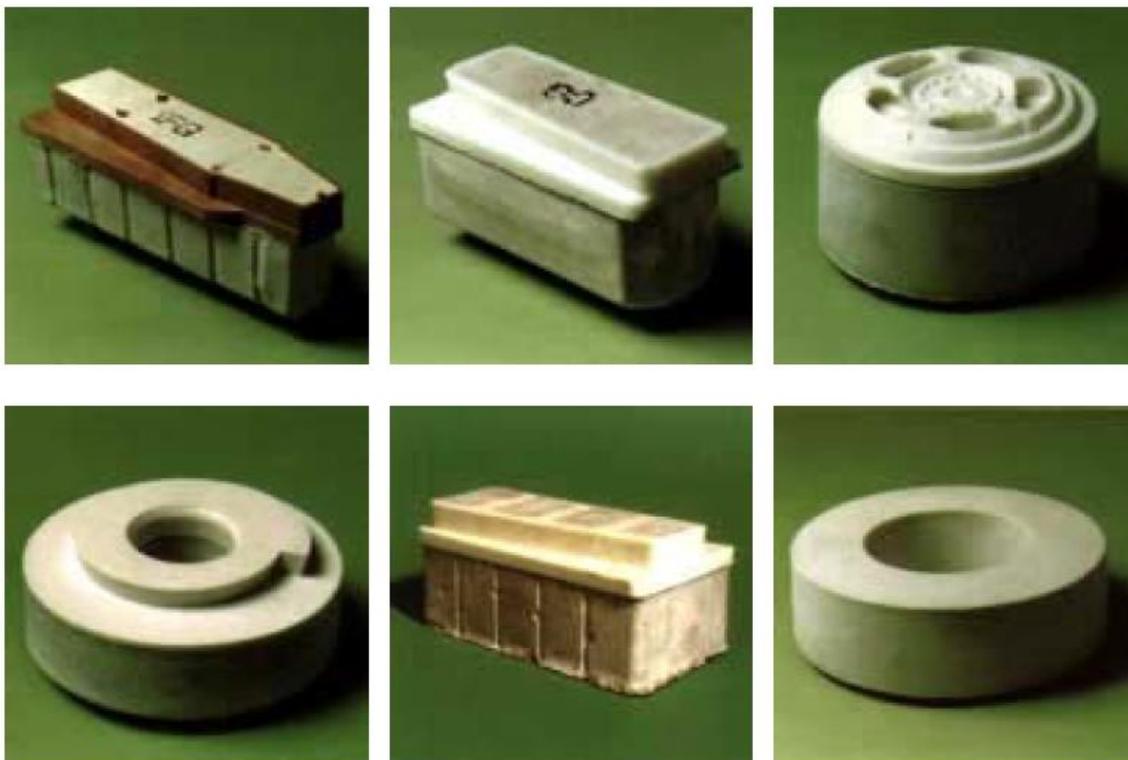
- Porcelanato esmaltado possui a base cerâmica porém com uma significativa camada de esmalte.
- Porcelanato Técnico possui o corpo cerâmico úmido.

Existem três tipos de tratamentos superficiais que podem ser feitos no porcelanato:

- Lapatura confere a peça cerâmica um efeito de envelhecimento (característica de peça desgastada).
- Levigatura confere a peça cerâmica a textura mate (sem brilho) a superfície da peça.
- Polimento é o processo que confere brilho a superfície da peça.

O polimento é realizado por um material abrasivo que geralmente é diamantado ou magnésiano com granulometria entre 100 a 3000 $\mu$ m, no qual se controla a velocidade de rotação e a quantidade de água. A figura 7 mostra alguns exemplos de abrasivos magnesianos sintéticos usados para realizar o polimento do grês porcelanato.

**Figura 7:** Abrasivos Magnesianos sintéticos.



Fonte: PUREZA ,2004.

Segundo Pureza (2004) o Brasil tem uma produção de cerca de 12 mil m<sup>2</sup> anuais de grês porcelanatos, no qual 40% deste é de porcelanato técnico.

Admitindo que 100% do porcelanato produzido é retificado e polido com isso é gerado uma grande quantidade de resíduo. Na retificação é gerado cerca de 2.760 t/ano na indústria brasileira e no polimento é gerado cerca de 25.000 t/ano com uma grande tendência ao crescimento. Logo, pode-se estimar uma produção de cerca de 35.000 ton de resíduos gerados nas etapas finais de produção de grês porcelanato. (PUREZA, 2004).

Na produção da cerâmica tradicional, foi misturada duas argilas com os três tipos de resíduos citados anteriormente, o pó de acabamento de grês porcelanato, pó de atomizado e o pó de aciaria proveniente do processo de produção do aço (PUREZA, 2004).

As matérias primas foram analisadas de acordo com as suas características físicas, composição química, propriedades mecânicas e composição mineralógica.

Pode-se concluir que é possível se obter cerâmicas tradicionais com a adição de resíduos de baixa granulometria como os citados acima, tendo uma baixa densificação, reduzindo a absorção de água e aumentando a retração linear. Observou-se um aumento da resistência mecânica em função da temperatura de queima, sendo maior a 1.100°C e os resíduos utilizados não sugerem um acréscimo de periculosidade às formulações com argilas.

#### 4. METODOLOGIA

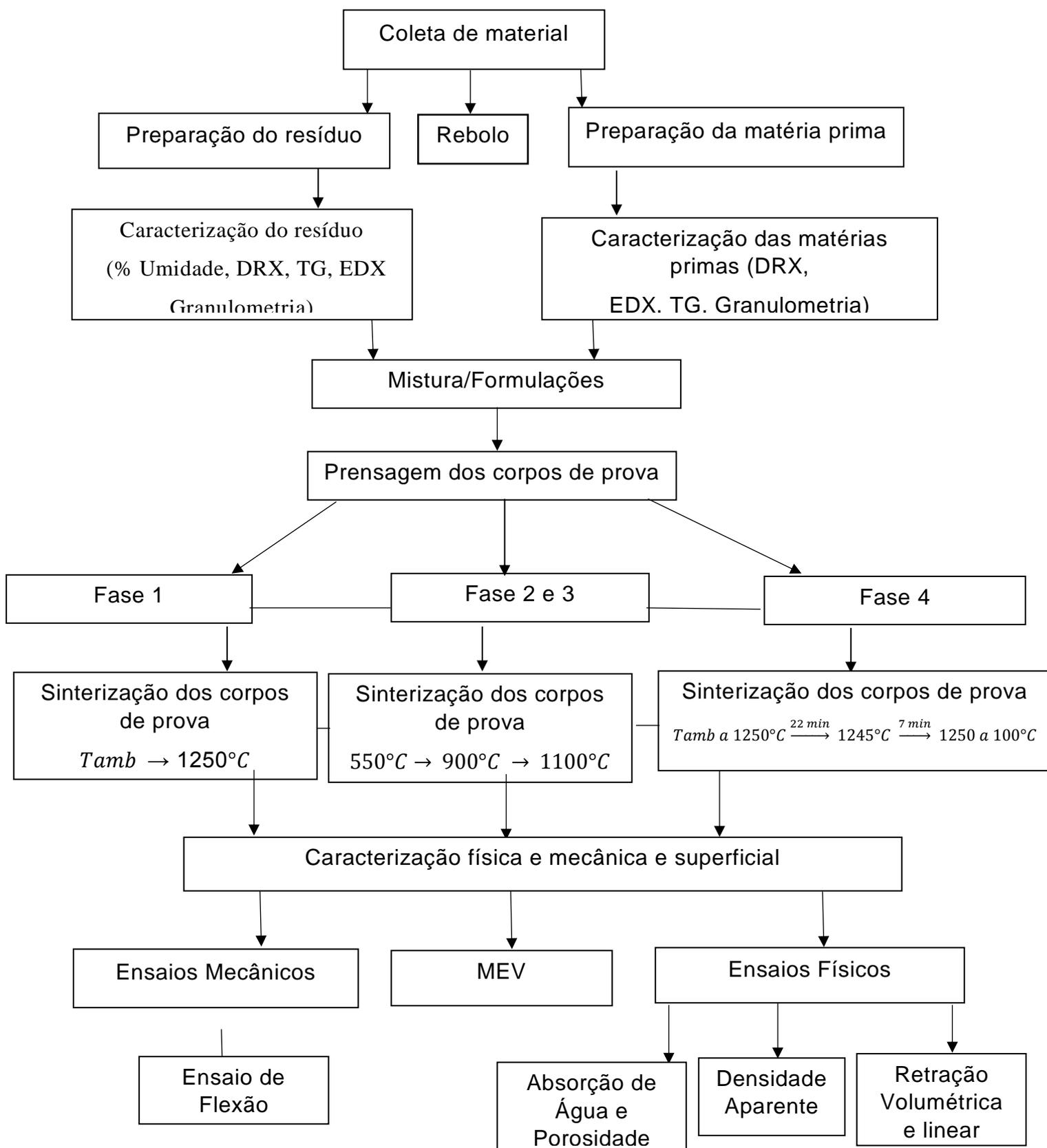
O presente capítulo irá apresentar os materiais e a metodologia utilizada, bem como os equipamentos e técnicas de caracterização necessários para tornar efetivo os objetivos propostos. Inicialmente foi realizada a caracterização físico-química do resíduo do polimento do porcelanato e também das materiais primas utilizadas na composição do mesmo.

O trabalho foi dividido em 4 fases distintas detalhadas abaixo:

- a) A fase 1 correspondeu ao levantamento de formulações de novas massas cerâmicas empregando ou não o resíduo obtido da etapa de polimento do porcelanato. Nesta fase foram propostas 3 formulações e preparados 14 corpos de prova para cada composição proposta.
- b) As fases 2 e 3 corresponderam a parte do trabalho que estudou mais detalhadamente formulações baseadas no porcelanato a partir de formulações de referência da literatura, mantendo o mesmo ciclo de queima da fase 1, com o objetivo de se obter melhores respostas na resistência a flexão e compará-las com as obtidas pelas formulações da fase 1. Na fase 2 foram propostas 14 formulações e na fase 3 foram propostas 8 formulações. Em ambas foram produzidos 15 corpos de prova para cada formulação.
- c) A fase 4 correspondeu a análise das formulações de melhor desempenho propostas na fase 1, 2 e 3, porém o ciclo de queima usado foi o mesmo empregado pela empresa visitada. Mantendo o mesmo número de corpos de prova por formulação.

Os fluxogramas da figura 8 apresentam as etapas de trabalho utilizadas na metodologia experimental visando uma melhor explicação dos procedimentos aplicados.

**Figura 8:** Fluxograma da metodologia experimental.



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

#### **4.1.PREPARAÇÃO DO RESÍDUO GERADO NO POLIMENTO DO PORCELANATO**

Para a realização deste trabalho, utilizou-se o resíduo obtido na etapa de polimento do porcelanato Cristal Polido, que será identificado neste trabalho pela sigla RPP coletado na CECRISA, o resíduo também é conhecido como torta. A amostra do RPP foi secada por 24 horas na estufa (Med Clave modelo 3) a 180°C, desaglomerada e quarteada manualmente, para garantir sua homogeneidade e uma comuição eficiente.

#### **4.2.PREPARAÇÃO DAS MATERIAIS PRIMAS**

As matérias primas utilizadas foram coletadas na empresa Cocrisa e todas fazem parte da composição de cerâmicas triaxiais.

As matérias primas foram previamente submetidas a secagem para retirada da umidade por 24 horas na estufa (Med Clave modelo 3) a 150°C, desaglomerada para garantir sua homogeneidade.

#### **4.3.CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO PORCELANATO (RPP), DAS MATERIAIS PRIMAS E DO REBOLO.**

Inicialmente foi realizado a determinação do teor de umidade do resíduo que consistiu em pesar aproximadamente 2g das amostras (balança - BEL Engineering) e secá-las em uma estufa da marca (Med Clave modelo 3) a 115°C durante uma hora, pesagem da amostra e repetição do procedimento acima até não se observar variações na massa.

A determinação da composição química do resíduo obtido na etapa de polimento do porcelanato, da massa atomizada, das materiais primas e do reboło (abrasivo utilizado para a realização do polimento do porcelanato) foram realizadas empregando-se a técnica de fluorescência de raios X no (Shimadzu, EDX-720) e a determinação das fases presentes dos mesmos e sua estrutura

cristalina foi realizada pela técnica de difração de raios X (Shimadzu, XRD - 7000). Estas análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização do departamento de Engenharia de Materiais, do CEFET-MG.

A estabilidade térmica e a temperatura inicial de decomposição de carvão de silício (SiC) do RPP foi determinada empregando-se a técnica termogravimétrica (TG) (Shimadzu, DTG-60H). Estas medidas foram realizadas no laboratório Caracterização de Materiais -TECMAT do departamento de química do CEFET-MG.

Foi realizada análise granulométrica do RPP e das materiais primas no aparelho de granulometria a laser da marca (Cilas 1090) (figura 9). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Cerâmicas Finas no Departamento de Engenharia de Materiais, do CEFET-MG.

**Figura 9:** Granulômetro.



Fonte: Produzida pelo próprio autor, 2016.

A determinação do teor de matéria orgânica (%*to*) presente no resíduo e no rebolo consistiu em pesar aproximadamente 1g da amostra do resíduo (balança - BEL Engineering) e colocá-los em 6 cadinhos para serem levados a mufla na temperatura fixa de 550°C. A cada intervalo de 10 minutos um (1) cadinho foi retirado da mufla, de forma que ao final de uma (1) hora todo o procedimento havia sido executado. Este procedimento teve como objetivo de determinar o

tempo de queima e o teor da matéria orgânica contida nas amostras. O teor de matéria orgânica foi determinado através da equação 6:

$$\% \text{ to} = \frac{(m_c - m_i)}{(m_f - m_i)} * 100 \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

mc: Massa de sinterização

mi: Massa inicial

mf: Massa final

Toda a matéria prima foi submetida ao ciclo de secagem a 150°C por 24 horas para retirada parcial da umidade.

#### **4.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

##### **4.4.1. Fluorescência de raios X (EDX)**

Esta técnica, neste trabalho, foi empregada na determinação da composição dos materiais ensaiados em termos de seus óxidos constituintes. Os materiais foram caracterizados no Laboratório de Caracterização do DEMAT/CEFET-MG por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX). Os ensaios foram realizados em um equipamento EDX – 720 SHIMADZU, nas seguintes condições de operação: ar sintético e colimador de 10mm.

##### **4.4.2. Difração de raios X (DRX)**

As análises por difração de raios X para as amostras estudadas neste trabalho, foram realizadas no Laboratório de Caracterização do DEMAT/CEFET-MG no Difratômetro de Raios X marca SHIMADZU XRD – modelo7000, usando radiação Cu ( $\lambda = 1,5418\text{\AA}$ ), produzidos sob condição 40kV e 30 mA. Os espectros de difração foram coletados varrendo no intervalo de  $2\theta$ , 4° - 80°, passo 0,02, velocidade de 2°/min. Banco de dados PDF/CDD2003.

#### **4.4.3. Termogravimetria (TG/DTA)**

Para o ensaio de termogravimetria (TG/DTA), as amostras foram analisadas no Laboratório de Análises Térmicas/CEFET-MG no analisador térmico da marca SHIMADZU DTG – 60H. Os parâmetros de ensaio foram: taxa de aquecimento 10°C/min, temperatura máxima 1300°C, atmosfera utilizada de ar nitrogênio, fluxo de gás 50ml/min. A massa utilizada variou de 5,5 a 5,8 mg.

#### **4.4.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Medidas do MEV foram obtidos com um microscópio eletrônico de varredura Hitachi (modelo -TM3000) com sputtering. O equipamento permite a visualização do material em estudo com uma ampliação nítida de até 30 mil, possui aceleração variável de 5Kv. Como o equipamento possui o modo de redução de carga (que utiliza pressão de câmara mais elevada) permitindo assim a obtenção de imagens de amostras não revestidas, o ensaio foi realizado sem a necessidade de revestimento das amostras.

#### **4.4.5. Granulômetro**

A medida da granulometria foi realizada no Cilas 1090 – Granulômetro a laser. O equipamento fornece a distribuição de tamanho de partículas de amostras em pós finos, na faixa de 0.04-500 µm. Medidas podem ser feitas a partir de dispersões líquidas ou do material a seco. A obscuração utilizada para análise foi de 14%.

#### **4.4.6. Moinho planetário**

As amostras foram moídas no moinho planetário FRITSCH (modelo – Pulverisette 5) operado com uma rotação de 300 rpm durante 3 ciclos de 10 minutos.

### **4.5. FORMULAÇÃO PRODUZIDAS**

Para a realização deste trabalho inicialmente foram analisadas quais matérias primas atenderiam aos requisitos e características essenciais para a produção de

porcelanatos. No qual as que se enquadraram dentro dos requisitos necessários para produção de porcelanatos estão detalhadas na tabela 8.

**Tabela 8:** Matérias primas analisadas para produção das formulações estudadas.

<b>MATERIAS PRIMAS</b>	<b>ORIGEM</b>	<b>FUNÇÃO</b>
Feldspato 2530	Cecrisa	Agentes fundentes e/ou geradores da fase líquida
Caulim CR	Cecrisa	Atribui cor branca na massa, Resistência mecânica a elevadas temperaturas
Argila HE90	Cecrisa	Plasticidade

Fonte: Produzida pelo próprio autor, 2016.

Após a seleção das matérias primas, foram preparadas formulações de acordo com cada fase, referenciada abaixo.

#### **4.5.1. FASE 1**

Foram propostas inicialmente 3 formulações distintas empregando como matérias-primas os materiais Caulim CR, Argila HE90, Feldspato 2530 e o resíduo obtido do polimento. As formulações propostas seguiram a metodologia de planejamento de misturas triaxiais de materiais cerâmicos e são apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9:** Formulações propostas.

<b>COMPOSTO</b>	<b>FORMULAÇÃO 1</b> (%)	<b>FORMULAÇÃO 2</b> (%)	<b>FORMULAÇÃO 3</b> (%)
Caulim CR	20	20	36
Argila HE90	35	40	24
Feldspato 2530	45	40	10
Resíduo	0	0	30

Fonte: Produzida pelo próprio autor, 2016.

Após o preparo das formulações as mesmas foram comuída em um moinho planetário de alto desempenho ilustrado na figura.

#### **4.5.2. FASE 2**

O ponto de partida para o delineamento da região das formulações foi composição C1, publicada por De Noni et al. (2011) e a composição padrão de grês porcelanato (STD), publicada por E. Sanchez et al (2001).

A composição de referência C1 neste trabalho será chamada de Massa base (Mb) e a composição padrão de grês porcelanato (STD) será chamada de Composição padrão base (Cpb). Sendo assim as composições testadas foram divididas em dois grupos distintos no qual cada grupo teve uma composição de referência.

Foram preparadas catorze composições de massa, no qual a metodologia utilizada foi com planejamento de misturas triaxiais.

As misturas das matérias primas foram primariamente, baseadas nas fases mineralógicas majoritárias do porcelanato que são: caulinita, quartzo e albita mostrados na tabela 10 (DE NONI, 2011).

Em cada grupo foram fixados os teores de alguns componentes para que fosse adicionado um teor de resíduo do polimento do porcelanato a fim de se verificar quais os efeitos desta matéria-prima nas condições de processamento e no desempenho mecânico do porcelanato.

**Tabela 10:** Formulações propostas para serie Mb e Cpb.

<b>COMPOSTO</b>	<b>CAULIM (%)</b>	<b>FELDSPATO (%)</b>	<b>SILICA (%)</b>	<b>QUARTZO (%)</b>	<b>RESÍDUO (%)</b>
<b>Mb</b>	40	50	10	00	00
<b>M1</b>	37	50	10	00	3
<b>M2</b>	35	50	10	00	5
<b>M3</b>	32	50	10	00	8
<b>M4</b>	30	50	10	00	10
<b>M5</b>	27	50	10	00	13
<b>M6</b>	25	50	10	00	15
<b>M7</b>	0	50	10	00	40
<b>Cpb</b>	70	20	00	10	00
<b>C1</b>	40	50	00	00	10
<b>C2</b>	30	50	00	10	10
<b>C3</b>	30	20	00	10	40
<b>C4</b>	00	25	00	32	43
<b>RPP</b>	00	00	00	00	100

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Após o preparo das formulações as mesmas foram comuída em um moinho planetário de alto desempenho ilustrado na figura 10 (FRHSCH – Pulveresette) por 3 ciclos de 10 minutos com rotação de 300 rpm conforme ilustrado na figura abaixo.

**Figura 10:** Moinho Planetário.



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

### **4.5.3. FASE 3**

Esta fase foi realizada baseando-se nos resultados das melhores formulações avaliadas nas fases 1 e 2. Foi avaliado inicialmente a resposta a resistência a flexão e as demais propriedades químicas e físicas dos corpos de prova.

A partir das formulações de melhor desempenho físico e mecânico foram propostas novas formulações que foram subdivididas em duas matrizes apresentadas nas tabelas 11 e 12.

**Tabela 11:** Formulações propostas para série C3.

	<b>CAULIM (%)</b>	<b>FELDSPATO (%)</b>	<b>QUARTZO (%)</b>	<b>RESÍDUO (%)</b>
<b>C3</b>	30	20	10	40
<b>C3A</b>	40	20	10	30
<b>C3B</b>	35	20	10	35
<b>C3C</b>	25	20	10	45
<b>C3D</b>	20	20	10	50

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

**Tabela 12:** Formulações propostas para série MR.

<b>COMPOSTO</b>	<b>CAULIM (%)</b>	<b>FELDSPATO (%)</b>	<b>SILICA (%)</b>	<b>QUARTZO (%)</b>	<b>RESÍDUO (%)</b>
<b>MR</b>	15	48	7	30	0
<b>MR1</b>	10	48	7	30	5
<b>MR2</b>	5	48	7	30	10
<b>MR3</b>	00	48	7	30	15

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Para cada formulação proposta, foram produzidos 15 corpos de prova de cada.

#### 4.5.4. FASE 4

As formulações que apresentaram os melhores resultados nas fases 2 e 3, conforme apresentado na tabela 13, foram submetidas a um novo ciclo de queima, de forma que foram formadas 3 matrizes distintas para cada referência estudada. Nesta última fase os corpos de prova após a etapa de prensagem foram submetidos ao processo de queima usado pela empresa CECRISA.

**Tabela 13:** Formulações propostas de melhor desempenho.

<b>COMPOSTO</b>	<b>CAULIM (%)</b>	<b>FELDSPATO (%)</b>	<b>SILICA (%)</b>	<b>QUARTZO (%)</b>	<b>RESÍDUO (%)</b>
<b>Cpb</b>	70	20	00	10	00
<b>C3</b>	30	20	00	10	40
<b>Mb</b>	40	50	10	00	00
<b>M1</b>	38	50	10	00	3
<b>MR</b>	15	48	07	30	00
<b>MR3</b>	0	48	7	30	15

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

#### 4.6. PRENSAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a prensagem dos corpos de prova, as amostras de cada formulação e da massa atomizada foram umidificadas e homogeneizadas manualmente com a finalidade de obter um teor de umidade de 6 % em peso para a conformação na prensagem. Foram produzidos 15 corpos de prova para cada formulação e para a massa comercial de referência (massa atomizada).

O molde utilizado para fabricação dos corpos de prova na prensa possui dimensão de 60 x 20mm (Figura 11). A carga da máquina de prensagem (EMIC

DL-30000), figura 12, utilizada para a prensagem foi de 6T (54MPa) e a velocidade foi de 1MPa/s. os corpos de prova foram prensados no laboratório de Estradas do CEFET- MG.

**Figura 11:** Molde do corpo de prova.



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

**Figura 12:** Máquina utilizada para prensagem dos corpos de prova (EMIC D30000).



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Após a confecção dos corpos de prova, as mesmas foram dimensionadas empregando-se um Paquímetro Mitutoyo (0,05mm).

#### **4.7.CICLO DE QUEIMA**

##### **4.7.1. FASE 1**

No ciclo de queima da fase 1, o aquecimento ocorreu da temperatura ambiente até 1250°C e o resfriamento dos corpos de prova foram dentro do forno lentamente.

Os corpos de prova foram submetidos a dois ciclos de queima distintos para avaliar os efeitos mecânicos e porosidade das formulações. No primeiro os corpos de prova foram sinterizados no forno de temperatura ambiente até 1250°C de acordo com a norma e com um patamar 10 minutos na temperatura máxima. No segundo ciclo foi mantida a mesma temperatura porém o patamar na temperatura máxima foi de 20 minutos e ambos com resfriamento por convecção dentro do próprio forno com o patamar de 100°C por minuto. O forno de sinterização utilizado foi o GRION do laboratório de cerâmicas finas do CEFET-MG conforme mostrado na figura 13.

**Figura 13:** Forno de sinterização.



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Após o término da sinterização, todas as amostras foram pesadas em uma balança analítica de marca BEL Engineering (0,0001g) e novamente dimensionadas

#### **4.7.2. FASE 2**

Após a moldagem dos corpos de prova os mesmos foram queimados em uma mufla conforme ilustrado na figura 14, modelo NOVUS N1040 no Laboratório de Materiais no Departamento de Química (301) em diferentes patamares de temperaturas conforme listado na tabela 14.

**Figura 14:** Mufla NOVUS N1040.

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

**Tabela 14:** Ciclo de queima da fase 2.

<b>TEMPO</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
30 minutos	550
1 hora	900
30 minutos	1100

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

### **4.7.3. FASE 3**

As formulações dos corpos de prova desta fase são apresentadas na tabela 11 e tabela 12, estes foram submetidos aos mesmo ciclo de queima da fase 2, tabela 14, a mufla utilizada nesta fase foi a modelo NOVUS N1040.

#### 4.7.4. FASE 4

A última fase corresponde ao uso das melhores formulações encontradas anteriormente, mas submetidas a um ciclo de queima do formo contínuo da empresa CECRISA, figura 15. A rampa de aquecimento adotada pela empresa está esquematizada na tabela 15.

**Figura 15:** Forno industrial.



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

O ciclo de queima utilizado foi de 48 min, onde o produto passa pelas etapas de aquecimento, queima e resfriamento. Na zona de queima o produto fica em torno de 5 a 7 minutos, na temperatura de queima os corpos de prova são condicionados a uma rampa de sete (7) minutos a temperatura de 1245°C.

**Tabela 15:** Ciclo de queima da fase 4.

ETAPA	TEMPO (m)	TEMPERATURA (°C)
Preparação	8	0 a 500
	8	500 a 800
	4	800 a 1050
	2	1050 a 1250
Queima	7	1245 a 1245
Resfriamento	3	1250 a 500
	16	500 a 100
Tempo do ciclo	48	-

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

#### 4.8. ENSAIOS MECÂNICOS

O ensaio de flexão das amostras seguiu a norma NBR 13818:1997. Nela as dimensões de larguras dos corpos de prova foram entre 16 e 48 mm e com número mínimo de 10 corpos de prova. A máquina utilizada no ensaio de flexão será a EMIC DL-30000 ilustrado na figura 16. A velocidade de aumento de carga será de  $1 \pm 0,2$  MPa/s e a distância entre apoios foi de 44mm, considerando a saliência fora do apoio de 5mm. O módulo de resistência à flexão, foi calculado de acordo com a equação 5.

##### 4.8.1. Tratamento Estatístico

As médias amostrais foram comparadas por meio do teste t bicaudal (= 0,05, pares de amostras) e por meio das análises de variância (ANOVA) com testes de

diferenciação de médias: Tukey ( $\alpha = 0,05$ , variâncias similares) e Games-Howell ( $\alpha = 0,05$ , variâncias discrepantes). Todos os processamentos de dados foram realizados no software Minitab® 17.3.1.

**Figura 16:** Máquina utilizada para prensagem dos corpos de prova (EMIC DL-30000).



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

#### 4.9. ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos foram realizados no laboratório de biomateriais no departamento de Engenharia de Matérias.

A figura 17 ilustra etapas dos processos dos ensaios físicos.

**Figura 17:** Sistema usado para medir a densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água das amostras.



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

#### 4.9.1. Densidade aparente

A densidade aparente (densidade bruta) corresponde ao volume ocupado por uma determinada massa de sólido (pó ou granulado), incluindo a sua porosidade (poros intragranulares).

Para a determinação da densidade aparente das peças cerâmicas foi utilizado um equipamento cujo método de medida se baseia no empuxo que a peça experimenta quando imersa em água, utilizando o princípio de Arquimedes. O aparelho consiste em um recipiente contendo água, uma balança digital com incremento de 0,0001g, uma haste e um elástico com a função de imergir a peça. Primeiramente as amostras foram pesadas e os dados foram devidamente anotados. A seguir, o recipiente contendo água foi colocado sobre a balança, descontando seu peso (tara). Então, os corpos-de-prova foram imersos, o que gerou um peso, que também foi anotado. Utilizando a expressão (B) abaixo se pode calcular a densidade aparente de cada peça:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_u - M_i} \times \text{Densidade da água} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

$D_{ap}$ : densidade aparente ( $\text{Kg/m}^3$ );

$M_s$ : massa da amostra seca (Kg);

$M_u$ : massa da amostra úmida (Kg)

$M_i$ : massa da amostra sob imersão (Kg);

Densidade da água:  $1000 \text{ Kg/m}^3$ .

#### **4.9.2. Porosidade aparente**

A porosidade Aparente é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. Sua medição é baseada na ISO 10545-3. Ela foi calculada de acordo com a equação 3.

#### **4.9.3. Absorção de água**

Este ensaio consiste em pesar as peças já queimadas e deixa-las em banho de água fervente ( $100^\circ\text{C}$ ) por duas horas. Ao término deste tempo, o aquecimento foi interrompido e as mesmas ficaram resfriando por 4 horas. As amostras foram então retiradas uma a uma, secadas superficialmente e pesadas novamente. O cálculo para os valores de absorção de água foi feito pela equação 1.

#### **4.9.4. Retração linear**

A expansão linear de queima das peças cerâmicas foi calculada pela diferença entre as medidas da peça queimada e da peça crua, como mostra a equação 2.

#### 4.9.5. Retração volumétrica

A retração volumétrica de queima das peças cerâmicas foi calculada pela diferença entre as medidas da peça queimada e da peça crua, como mostra a expressão (E) abaixo:

$$\%Ev = \frac{V_{inicial} - V_{final}}{V_{inicial}} \times 100 \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

$Ev$  = expansão volumétrica de queima (%);

$V_{final}$  = volume das amostras após a queima ( $m^3$ );

$V_{inicial}$  = volume das amostras antes da queima ( $m^3$ );

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização do resíduo

O teor de umidade encontrado para o resíduo foi de 1,8% em massa. A tabela 16 indica os resultados obtidos para a composição química do resíduo proveniente do polimento do porcelanato e da massa atomizada em termos de seus óxidos constituintes encontrados através da fluorescência de raios-x.

**Tabela 16:** Composição química (%em peso) da torta (resíduo do polimento do porcelanato), massa atomizada (porcelanato) e do Polidor (abrasivo).

<b>Composto</b>	<b>Torta</b>	<b>Porcelanato</b>	<b>Polidor</b>
	<b>%em peso</b>	<b>%em peso</b>	<b>% em peso</b>
<i>SiO<sub>2</sub></i>	66,1±0,2	68,2±0,2	22,13± 0,1
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	18,6±0,3	25,4±0,3	-
<i>ZrO<sub>2</sub></i>	1,3±0,0	-	-
<i>CaO</i>	2,3±0,0	1,5±0,0	2,31±0,0
<i>MgO</i>	3,8±0,0	-	44,71±0,0
<i>K<sub>2</sub>O</i>	3,4±0,0	2,3±0,0	0,18±0,1
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	1,4±0,0	1,0±0,0	4,91±0,2
<i>TiO<sub>2</sub></i>	0,7±0,0	0,8±0,0	-
<i>Cl</i>			22,83±0,7

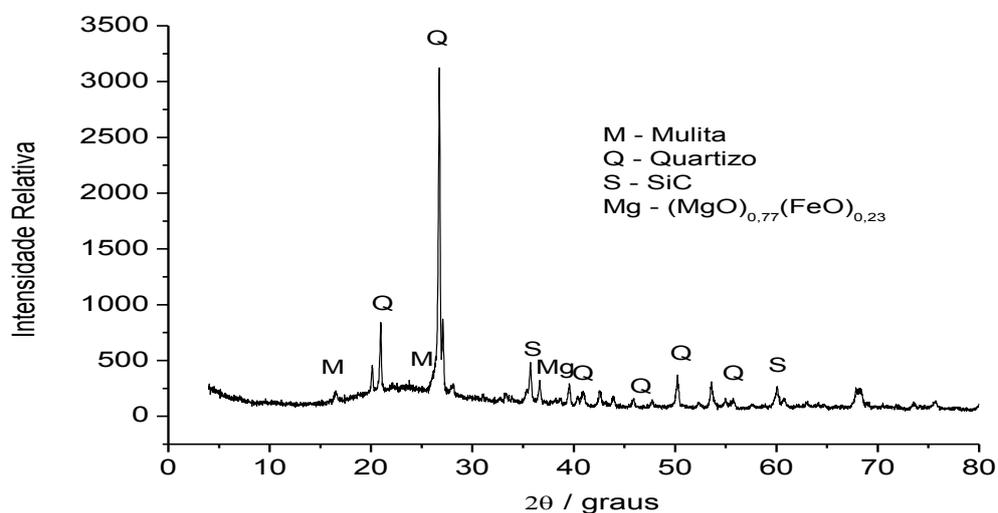
Fonte: Produzido pelo autor.

Pode se observar de acordo com a tabela 16 que o resíduo apresenta elevada quantidade de sílica, alumina e baixa quantidade de óxidos fundentes (CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> e K<sub>2</sub>O). Comparando a composição dos óxidos do resíduo com a do porcelanato, há grande semelhança na composição de ambos. Dessa forma, pode-se afirmar que o resíduo é composto principalmente em grande parte pela própria massa do porcelanato e pelo degaste da ferramenta de

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

A figura 18 mostra o difratograma da torta obtido durante o polimento do porcelanato.

**Figura 18:** Difratoograma do resíduo do polimento porcelanato (torta).



Fonte: Produzido pelo autor.

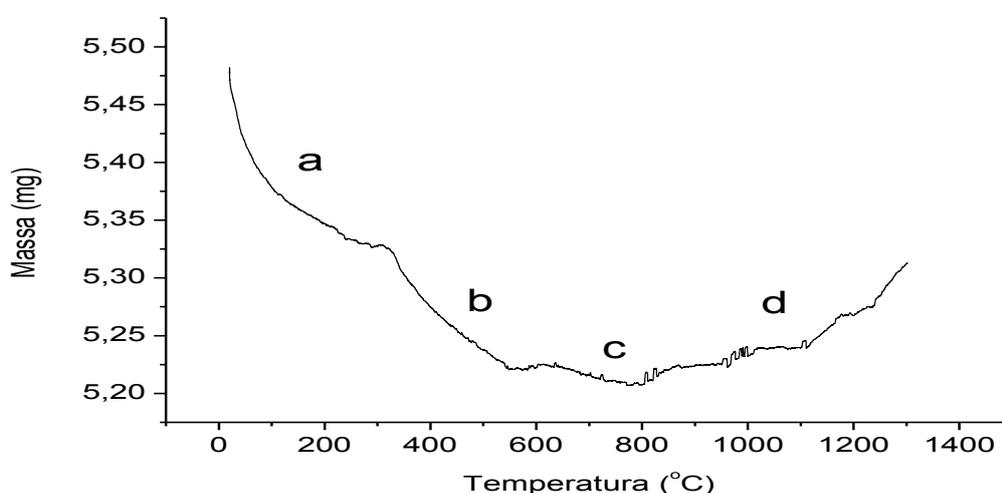
Analisando o difratograma acima, observa-se que o resíduo é formado por uma fase vítrea, evidenciada pela existência de um alargamento na linha base entre os ângulos  $15^\circ$  e  $35^\circ$  em  $2\theta$ , e fases cristalinas que foram identificadas como sendo a mulita, quartzo, carbeto de silício e uma mistura entre os óxidos de magnésio e ferro. Quando o porcelanato é queimado a partir de  $1200^\circ\text{C}$  forma-se a fase mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) no material, assim como mostrado por Oliveira (2012). Essa fase é formada a partir de espinélios e aluminossilicatos amorfos obtidos a  $980^\circ\text{C}$ , originada do feldspato e os argilominerais, uma vez que as argilas possuem como minerais argilosos a caulinita e a ilita, além de outros aluminossilicatos, essas transformações de fases são comuns durante a sinterização de massas cerâmicas triaxiais, conforme visto por Oliveira (2012).

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. A fase vítrea conterá os óxidos fundentes presentes no porcelanato ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) que em geral se concentram na fase vítrea após o processamento (Araújo, 2009)

Como o resíduo apresenta as mesmas fases do porcelanato, fase vítrea e fundentes, ele poderá ser usado como matéria prima na produção do porcelanato. Devido ao elevado teor de sílica existente no resíduo, será favorecida a formação de fases vítreas ricas em sílica, que possuem viscosidade mais elevada que aquelas com menores teores de sílica, o que possibilitará à minimização de efeitos de pirodeformação, que são geralmente observados em materiais submetidos a queima rápida e que possuem elevadas quantidades de fundentes em sua formulação conforme mostrado por Marques (2007). Confirmando então o potencial de utilização do resíduo na própria formulação de porcelanatos.

Pela análise da curva TG apresentada na figura 19, observa-se que o processo de decomposição do resíduo ocorre em quatro etapas distintas, identificadas por a, b, c e d, sendo que as três primeiras etapas, a, b e c, foram relacionadas à decomposição do resíduo, e a etapa d, foi relacionada à decomposição do carbetto de silício em óxido de silício, formando o resíduo final.

**Figura 19:** Curva termogravimétrica do resíduo de polimento do porcelanato.



Fonte: Produzido pelo autor.

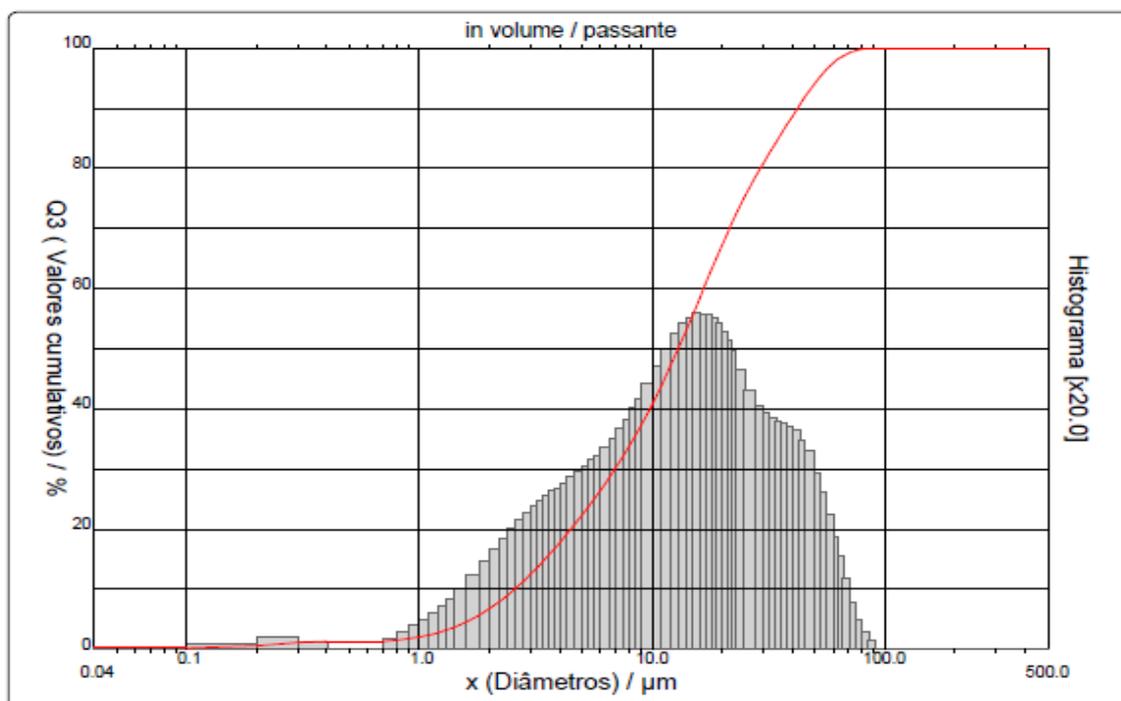
Na curva termogravimétrica, figura 19, a decomposição inicia-se à temperatura ambiente e termina à temperatura de 300,3°C, etapa a. Neste processo a amostra perde 2,74 % de sua massa. A etapa b inicia-se à temperatura de 300,3°C e termina à temperatura de 600,0°C, nesta faixa de temperatura foi observado uma perda de massa de 1,92 %. A terceira etapa, identificada como sendo a etapa c, ocorre na faixa de 600,0°C a 800,9°C, a amostra perde 0,28% em massa. A decomposição do carbeto de silício em óxido de silício ocorre na faixa de temperatura de 800,9°C a 1301,9°C, sendo observada um ganho de massa de 1,93%. O resíduo final representa 96,98% da massa do composto inicial. O processo de decomposição do carbeto de silício em óxido de silício pode ser representado por:



Devido à liberação de gás carbônico durante a etapa de decomposição do carbeto de silício em óxido de silício, a reutilização direta do resíduo do polimento de porcelanato deve ser avaliada de forma mais criteriosamente, e modificações na formulação da massa base e do ciclo de queima são necessárias. Para Rosso (2005), a reutilização direta do resíduo do polimento de porcelanato é inadequada.

Empregando-se a curva termogravimétrica, baseando-se nos dados da quarta etapa do processo de decomposição do resíduo do polimento do porcelanato, é possível avaliar o teor de carbeto de silício no resíduo que é de 3,8% em peso.

Na análise granulométrica do RPP (Figura 20), é possível identificar que 90% das partículas possui um diâmetro menor que 42,2 µm e um diâmetro médio de 17,90 µm. O resíduo apresentou uma distribuição monomodal de tamanho de partículas.

**Figura 20:** Distribuição Granulométrica do RPP.

Fonte: Produzido pelo autor.

## 5.2. Caracterização das matérias-primas para produção do porcelanato

### Fluorescência de raios X

A tabela 17 mostra os resultados encontrados para as materiais primas utilizadas na produção do porcelanato em termos de seus óxidos constituintes empregando a técnica de fluorescência de raios-x. Verifica-se que os materiais apresentam em torno de 80% a 90%, em massa, de óxido de alumínio e de silício, compostos que favorecem a formação de materiais cerâmicos, além do fato do óxido de silício ser o formador de rede (Kumer, 2007). Já o alto teor de álcalis presente no feldspato, aproximadamente 8,5%, em massa, confere a característica de fundente.

**Tabela 17:** Composição química (%em peso) das matérias primas.

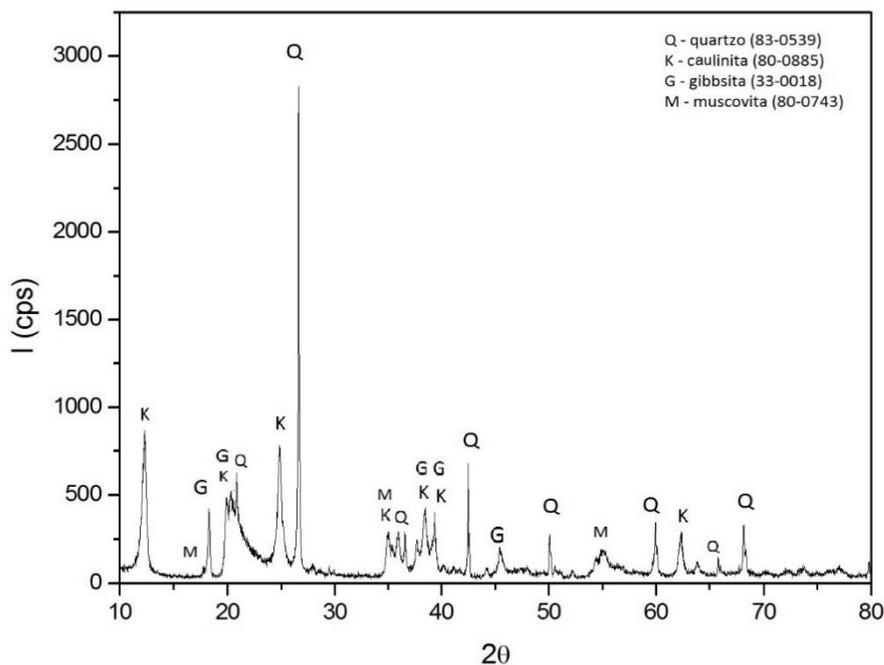
<b>Composto</b>	<b>Caulim CR</b>	<b>Argila HE90</b>	<b>Feldspato FTS 2530</b>
	<b>%em peso</b>	<b>%em peso</b>	<b>%em peso</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	56,6 ± 0,3	56,7 ± 0,3	67,7 ± 0,4
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	39,9 ± 0,6	36,0 ± 0,5	21,0 ± 0,6
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	-
<b>CaO</b>	-	0,1 ± 0,0	2,7 ± 0,0
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	0,8 ± 0,0	5,4 ± 0,0
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,9 ± 0,0	3,1 ± 0,0	2,6 ± 0,0
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,2 ± 0,0	2,9 ± 0,0	0,4 ± 0,0
<b>SrO</b>	-	-	0,1 ± 0,0

Fonte: Produzido pelo autor.

### Difração de raios X

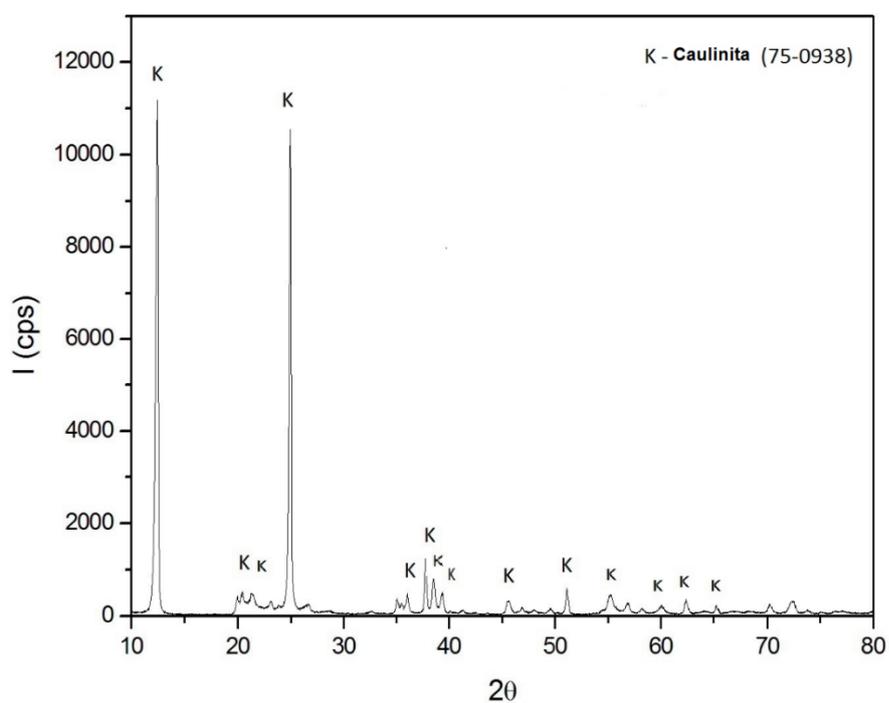
As características mineralógicas das matérias primas foram determinadas através da técnica de difração de raios X.

Pelo difratograma da Argila HE90 (figura 21), foi observado que o mesmo é constituído, basicamente, por quatro fases cristalinas: o quartzo, a caulinita, a gibbsita e a muscovita. Fases comuns em argilominerais naturais e que podem ser decorrentes do intemperismo do feldspato que decompõe o granito.

**Figura 21:** Difratograma da Argila HE90.

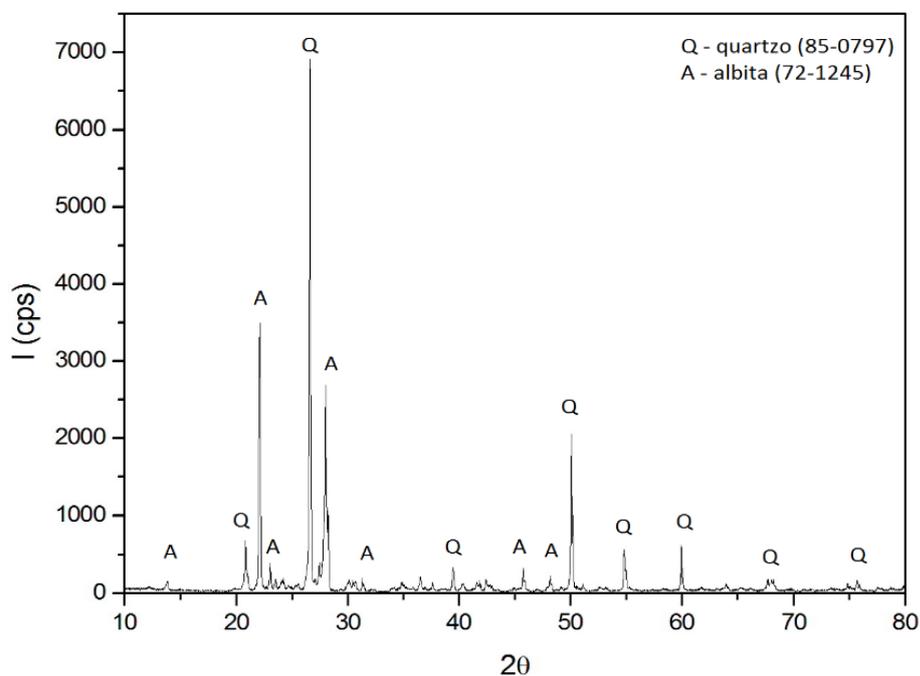
Fonte: Produzido pelo autor.

De acordo com o difratograma do Caulim CR (figura 22), observa-se que os picos das fases predominantes são associados a caulinita, principal argilomineral constituinte do caulim, confirmando os teores elevados de sílica (56,6% em peso) e de alumina (39,9% em peso), além da presença de menor intensidade de quartzo. Este resultado reforça que o caulim é constituído de caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}(\text{OH})_2$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Confirmando então o resultado da análise química.

**Figura 22:** Difratoograma do Caulim CR.

Fonte: Produzido pelo autor.

No difratograma do Feldspato FTS 2530 (figura 23), observa-se a presença de dois picos de cristalinos o de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e de albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), sendo este último em baixas proporções, e evidenciando o teor elevado de sílica (67,6% em peso).

**Figura 23:** Difratoograma da Feldspato FTS 2530.

Fonte: Produzido pelo autor.

### 5.3. Caracterização das formulações propostas

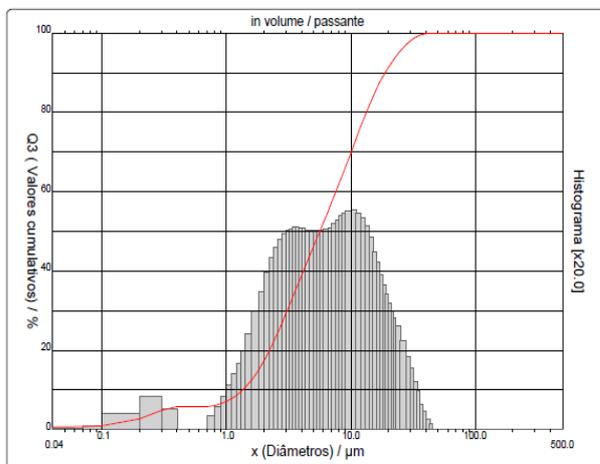
#### 5.3.1. FASE 1

##### Distribuição Granulométrica

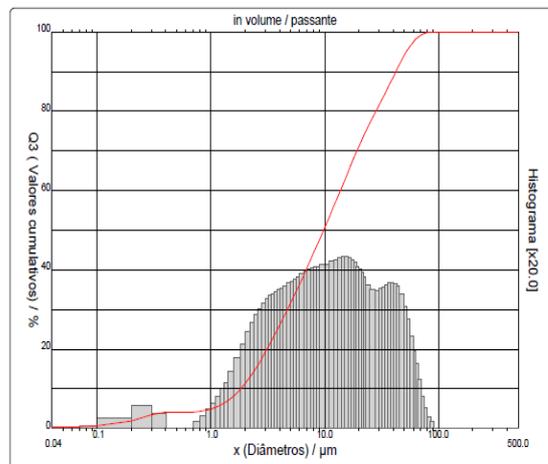
De acordo com a literatura, a granulometria do porcelanato deve apresentar uma média que varie entre 15 e 20  $\mu\text{m}$  para atender as especificações de conformação e sinterização das peças (ARAÚJO, 2009).

Na análise granulométrica da massa comercial atomizada, 90% das partículas estão abaixo de 18,87  $\mu\text{m}$  e apresentou um diâmetro médio ( $D_m$ ) de 8,18  $\mu\text{m}$ . Pode-se verificar que o diâmetro 50 ( $D_{50}$ ) corresponde a 5,63  $\mu\text{m}$ , diferindo do  $D_m$ , o que comprova que a distribuição é assimétrica (figura 24 a).

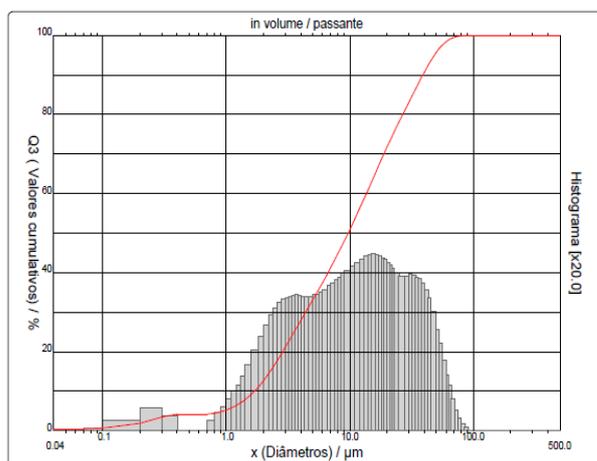
**Figura 24:** Distribuição Granulométrica: a) da massa comercial atomizada b) da Formulação 1 c) da Formulação 2 d) da Formulação 3.



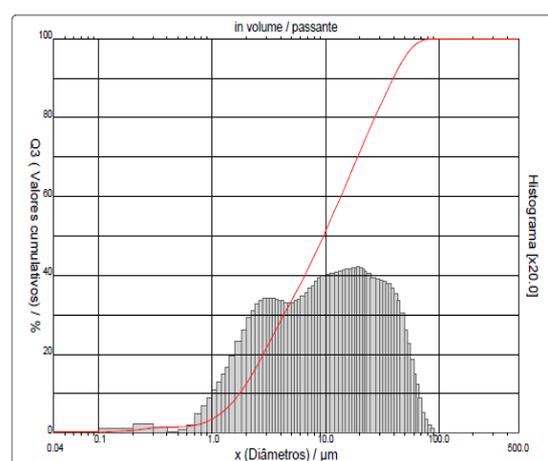
a)



b)



c)



d)

Fonte: Produzido pelo autor.

A análise granulométrica da formulação 1 apresentou, 90% das partículas estão abaixo de 42,23 $\mu\text{m}$  e apresentou um diâmetro médio ( $D_m$ ) de 16,20  $\mu\text{m}$  (Figura 24 b). O diâmetro 50 ( $D_{50}$ ) encontrado foi de 9,78 confirmando mais uma vez a assimetria da curva.

Já a formulação 2 apresentou, 90% das partículas abaixo de 41,92  $\mu\text{m}$  e apresentou um diâmetro médio ( $D_m$ ) de 15,99  $\mu\text{m}$  (Figura 24 c), já o diâmetro 50 ( $D_{50}$ ) encontrado foi de 9,76 mostrando que a assimetria da curva está para a esquerda.

Na formulação 3 é possível verificar que o diâmetro de, 90% das partículas estão abaixo de 39,63  $\mu\text{m}$  e apresenta um diâmetro médio ( $D_m$ ) de 15,56  $\mu\text{m}$  conforme mostrado na figura 24 d. Já o diâmetro 50 ( $D_{50}$ ) é de 9,58 confirmando que a distribuição de dados mais uma vez não é simétrica. Verificou-se que mesmos após as formulações terem passado pelo ciclo de moagem no moinho planetário, as formulações não alcançaram a mesma distribuição granulométrica que a massa atomizada comercial, porém as distribuições foram semelhantes. Estes resultados indicam que o moinho empregado na moagem das amostras não é adequado para a obtenção da distribuição granulométrica alcançada pela empresa.

### Caracterização Físico-Química e mecânica

Na tabela 18, são apresentados os resultados obtidos para a densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água e resistência a flexão das amostras sinterizadas.

**Tabela 18:** Valores de densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água (patamar 1 - 10 minutos na temperatura máxima).

Formulação	Densidade Aparente $\text{Kg m}^{-3}$	Abs. de água (%)	Por. Aparente (%)	Retração Linear (%)	Retração Vol. (%)
<b>Massa comercial</b>	2061±25	0,9±0,2	1,8±	4,3±0,5	9,7±0,6
<b>Formulação 3</b>	4717±64	2,0±0,1	9,6±0,6	6,5±0,2	14,3±2,6
<b>Formulação 2</b>	5919±96	2,4±0,2	14,3±0,9	7,8±1,2	22,4±1,9
<b>Formulação 1</b>	555678	3,2±0,3	18,1±1,3	7,9±0,1	19,8±2,4

Fonte: Produzido pelo autor

De acordo com os resultados apresentados na tabela acima, pode-se verificar que a massa comercial apresentou, dentre as formulações propostas, um menor valor nos teores de absorção de água, densidade, porosidade aparente, retração volumétrica e linear. Embora a massa comercial apresente a menor porosidade e teor de absorção de água, dentre as formulações propostas, ela apresentou o pior desempenho frente a resistência a flexão.

Pelos resultados encontrados para a formulação 3, observa-se um menor valor de absorção de água, menor porosidade e densidade aparente, em comparação com as formulações 1 e 2. Estes resultados podem ser justificados pelo fato de que ao adicionar o resíduo do polimento do porcelanato na formulação o mesmo agiu como um elemento com efeito filler (fechador de poros), aumentando o empacotamento e eliminando os poros abertos durante a prensagem, com isso a formulação apresentou melhor resistência mecânica do que a massa comercial.

As formulações 1, 2 e 3 apresentaram melhor resposta mecânica, maior densidade, retração linear e volumétrica em relação a massa comercial, estes resultados podem ser justificados pela fusão do feldspato presente, este processo ocorreu a 1170°C. Essa fusão leva a formação de fase vítrea que preenche os poros abertos aumentando a sua resistência mecânica.

Contudo a massa comercial apresentou menores de valores para a absorção de água e porosidade aparente. Estes resultados indicam que esta amostra apresenta uma quantidade menor de porosidade aberta.

Na tabela 19 estão apresentados os resultados dos valores de densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água e resistência a flexão das amostras sinterizadas com o ciclo de queima otimizado, patamar 2.

**Tabela 19:** Valores de densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água (patamar 2 - 20 minutos na temperatura máxima).

Formulação	Densidade Aparente Kg m <sup>-3</sup>	AA (%)	Por. Aparente (%)	Retração Linear (%)	Retração Vol. (%)
<b>Massa comercial</b>	4268±22	0,04±0,4	0,01±0,01	6,6±0,1	18,2±3,6
<b>Formulação 3</b>	4437±44	2,3±0,4	10,3±1,6	7,3±0,3	18,6±1,9
<b>Formulação 2</b>	5512,9±23,0	2,2±0,2	12,2±1,1	9,3±0,08	24,6±4,4
<b>Formulação 1</b>	5737±3	1,3±0,1	7,5±0,7	9,7±0,5	26,3±3,4

Fonte: Produzido pelo autor.

Pode se observar que a massa comercial foi a formulação que apresentou a menor porosidade aparente, a menor absorção de água, a menor retração linear e um aumento substancial da resistência na flexão. Para a massa comercial este novo ciclo de queima apresentou uma considerável otimização e melhoria das suas características físicas e mecânicas, sendo neste caso a mais adequada para esta formulação.

Já a formulação 3 que foi adicionada um teor de resíduo, ela obteve uma maior absorção de água e porosidade superficial, entretanto sua retração linear e volumétrica também foi maior, o que é provavelmente devido ao fato que o resíduo atuou como possível fechador de poros intergranular na estrutura do corpo de prova, aumentando o seu empacotamento e reduzindo assim os poros fechados presentes no seu interior.

O maior tempo de queima aumentou a capacidade de sinterabilidade do material, levando a maior difusão e formação de fase vítrea aumentando a resistência conforme mostra a tabela 20, fazendo com que as formulações obtivessem uma maior resistência mecânica que no ciclo anterior.

As amostras dos corpos de prova prensados após sinterização (ANEXO I,II, III e IV) foram sinterizados no forno GRION.

**Tabela 20:** Resistências na flexão da massa comercial e das formulações 1, 2 e 3 dos patamares 1 e 2.

Formulações	Patamar 1	Patamar 2
	Resistência na flexão (MPa)	Resistência na flexão (MPa)
	(Média ± desvio padrão)	(Média ± desvio padrão)**
Massa comercial	17,83 <sup>a,A</sup> ± 4,31	39,83 <sup>a,B</sup> ± 5,97
Formulação 1	21,77 <sup>a,A</sup> ± 3,54	26,67 <sup>a,B</sup> ± 1,00
Formulação 2	22,20 <sup>a,A</sup> ± 4,04	29,29 <sup>a,B</sup> ± 0,34
Formulação 3	22,16 <sup>a,A</sup> ± 3,65	27,80 <sup>a,B</sup> ± 1,01

\*Médias caracterizadas com a mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna, não diferem entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

\*\*Médias caracterizadas com a mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna, não diferem entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Games-Howell.

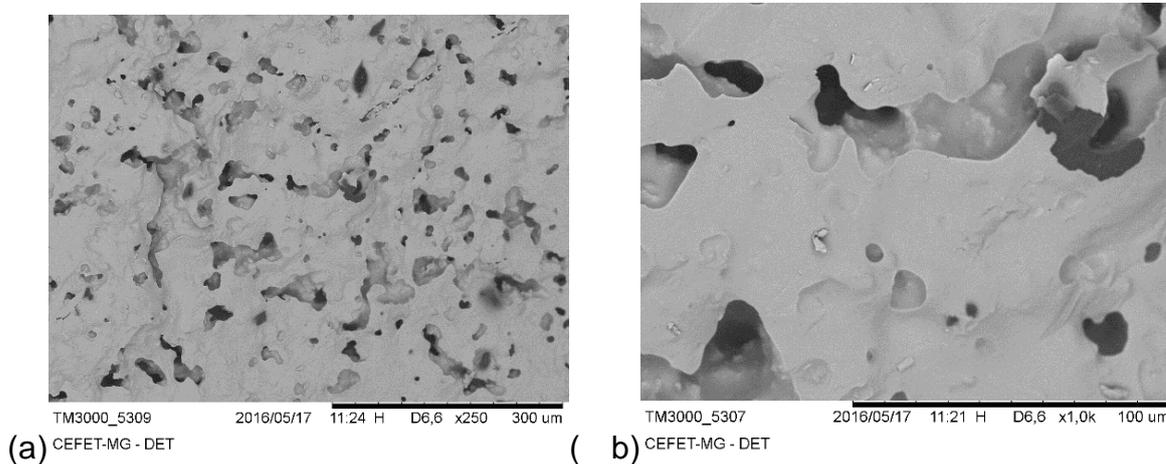
Médias caracterizadas com a mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste T.

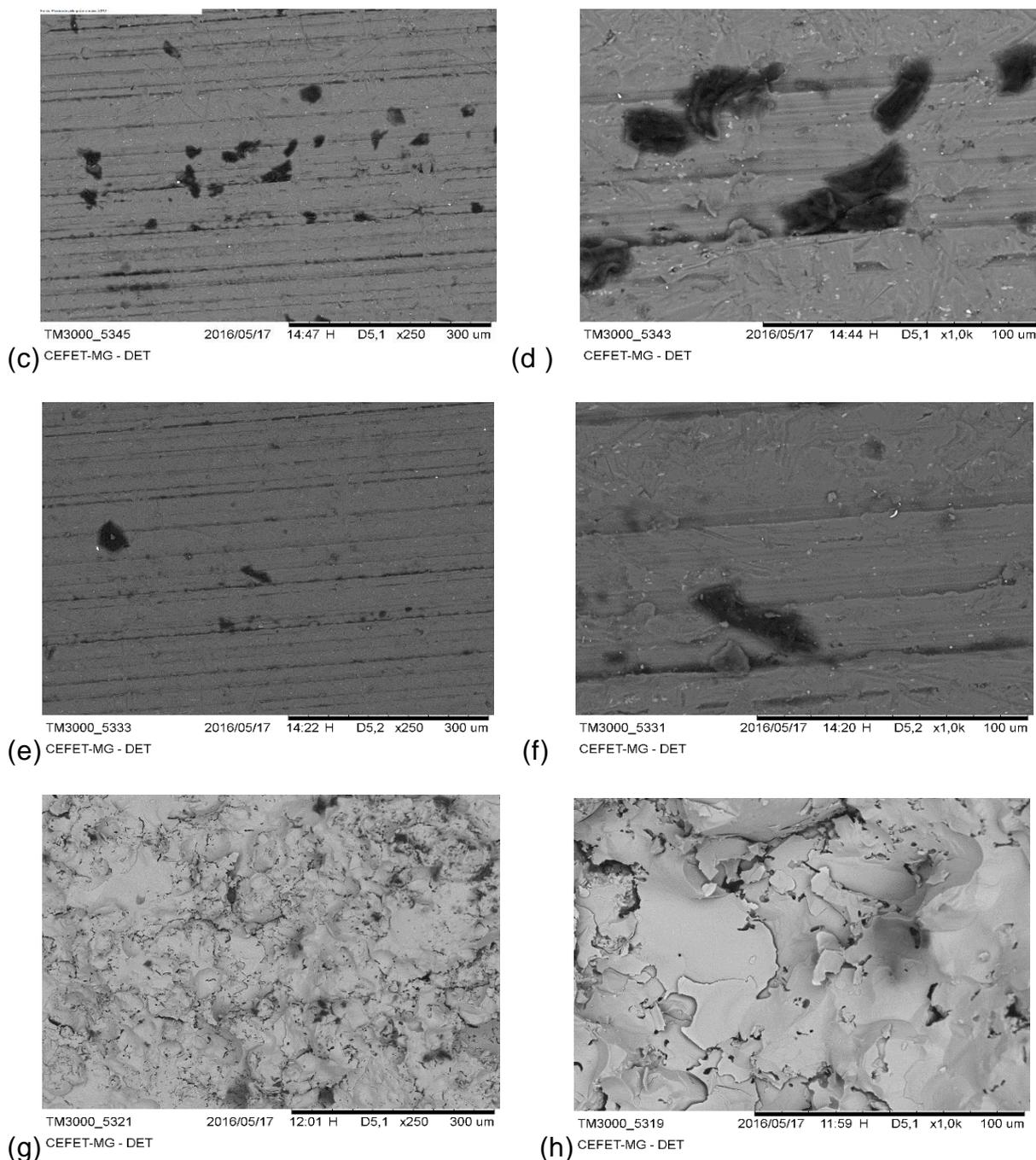
Fonte: produzida pela autora.

### Microscopia eletrônica de varredura

Após a realização do ensaio de ruptura por flexão, foi realizado a microscopia eletrônica de varredura (figura 25).

**Figura 25:** Microscopia eletrônica de varredura dos corpos de prova:(a) e (b) Massa comercial de referência (c) e (d) Formulação 1, (e) e (f) Formulação 3, (g) e (h) Formulação 2.





Fonte: Produzido pelo autor.

A análise foi realizada na região de ruptura do corpo de prova. Na análise comparativa entre as micrografias das formulações estudadas e da massa comercial submetidas ao ciclo de queima com patamar otimizado (patamar 2), é possível verificar que a massa comercial, apresentou um aspecto morfológico homogêneo sem a presença de outras fases em sua estrutura, contudo com um grande número de poros aparentemente fechados no seu interior, o que justifica

a baixa densidade aparente observada na amostra. Desta forma pode-se dizer que a massa comercial apresenta baixa porosidade aparente ou baixa porosidade aberta, contudo ela tem uma grande quantidade de porosidade fechada.

Na análise das demais formulações observa-se a presença de poros com possível interconectividade e uma estrutura aparentemente heterogênea. Outra característica importante que se nota nas formulações é a presença de fases distintas e também poros isolados.

Pelas micrografias observa-se que as formulações 1, 2 e 3, embora apresentem porosidade aparente maior do que a amostra comercial está porosidade é superficial, porosidade aberta, uma vez que o interior destas cerâmicas na região da fratura, a quantidade de porosidade fechada apresentada por estas amostras é inferior a observada para a massa comercial. Este resultado está de acordo com os resultados apresentados na tabela 18, onde embora a massa comercial apresente os menores valores de absorção de água e porosidade aparente, a retração linear, volumétrica e densidade aparente das formulações 1, 2 e 3 apresentaram maiores valores, indicando que provavelmente nestas condições experimentais sofreram maiores densificações.

Das três formulações propostas a identificada como formulação 3, a que leva em sua composição um percentual mássico de resíduo, foi a que apresentou no interior da cerâmica a menor quantidade de porosidade. Neste caso acredita-se que o resíduo agiu como um provável fechador de poros intergranular.

### **5.3.2. FASE 2**

As formulações estudadas se enquadram nas regiões de composições triaxiais da figura 3, elas compõem em termos de composição o padrão necessário para a produção de massas cerâmicas do tipo porcelanato (DE NONI 2007).

O anexo V, representa os corpos de prova já prensados para a realização dos ensaios preliminares.

### 5.3.2.1. Série M

Neta fase foram fixados o teor de feldspato entre em torno de 50%, estudos realizados por Sanchez (2001) indicam que o teor de feldspato não deve ultrapassar um valor entre 30 a 70% em peso e o teor de sílica deve ficar entre 0 a 10% em peso. O teor de caulim variou entre 25 a 70% em peso, na faixa limite utilizada por De Noni (2010). A fonte de albita e caulinita utilizada foi o feldspato e o caulim.

A tabela 21, mostra os resultados dos ensaios físicos e mecânicos para as formulações estudadas em relação a massa base (MB). A série M foi proposta para se avaliar o efeito da substituição do caulim pelo resíduo, obtido no processo de polimento do porcelanato, mantendo-se o teor de feldspato constante a 50% em peso e 10% em peso de sílica.

**Tabela 21:** Análises físicas e mecânicas das formulações da série M.

	Densidade aparente Kg m <sup>-3</sup>	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Retração Linear (%)	Retração volumétrica (%)
<b>MB</b>	4464,5±21,9	7,2±1,7	32,3±4,7	5,1±	16,7±0,9
<b>M1</b>	4617,4±87,2	6,7±0,8	30,7±2,1	5,1±0,4	15,2±3,5
<b>M2</b>	5050,2±9,1	2,9±0,7	14,5±	6,6±0,3	19,2±0,3
<b>M3</b>	4932,7±213,1	6,2±3,7	29,9±16,5	6,7±0,4	17,7±0,7
<b>M4</b>	5538,1±60,0	1,7±0,2	9,3±0,8	8,5±0,5	23,8±
<b>M5</b>	5204,1±267,5	4,6±1,6	23,4±5,0	6,2±1,1	15,1±3,6
<b>M6</b>	4122,5±406,4	8,9±2,7	36,2±7,6	3,5±1,5	13,1±
<b>M7</b>	2522,1±71,7	4,3±0,1	10,8±0,1	-1,9±0,1	-13,3±1,5

Fonte: Produzido pelo autor.

A medida que se substitui o caulim pelo resíduo nas formulações propostas se observa dois comportamentos distintos, em relação a massa comercial (MB), inicialmente verifica-se um aumento na resistência a flexão da formulação, até a

substituição de 10% em peso do resíduo em relação ao caulim, na amostra M4, em contrapartida teores mássicos acima de 10% reduz a resistência a flexão da formulação. Foi observado que os parâmetros de densidade aparente, absorção de água, porosidade aparente, retração linear e retração volumétrica seguiram esta tendência. Para os parâmetros de absorção de água, porosidade aparente, retração linear e retração volumétrica no teor de 10% em peso do resíduo representa um valor de mínimo, ao contrário do valor de densidade aparente que é um ponto de máximo.

A adição de 10% em peso do resíduo (M4), em substituição ao Caulim, produz um material cerâmico de melhor desempenho na série proposta, quando comparado a formulação de referência MB o valor de resistência a flexão é de aproximadamente 50% maior, 20,90 Mpa para MB e de 32,63 Mpa para M4, apresentando os menores teores de umidade (1,68%), e porosidade aparente (9,31%). Acredita-se que este melhor desempenho deve-se ao aumento de elementos fundentes na matéria-prima, que contribui para diminuição da porosidade, conseqüente redução da absorção de água durante a formação de fase líquida e aumento da densidade do corpo sinterizado (CAMARA, 2014) e pela adição da fase mulita, responsável pelo aumento da resistência mecânica da cerâmica, já pré-existente no resíduo, que advém de um porcelanato já queimado.

Para valores de teor de resíduo superiores a 10% em peso, amostras M5, M6 e M7, observa-se que o aumento do teor de resíduo reduz a resistência mecânica do corpo de prova sinterizado. Nestas amostras foi observado uma redução no valor da retração linear e aumentos nos valores de absorção de água, porosidade aparente acredita-se, neste caso, que o aumento do teor de resíduo aumenta o teor de carbeto de silício nas formulações, a sua decomposição gera uma quantidade maior de gases e bolhas durante a sinterização da peça. O aumento de porosidade aumenta o teor de absorção de água e diminui a densidade aparente e a resistência a flexão da amostra. (KUMMER, 2007).

**Tabela 22:** Resistência na flexão das formulações estudadas da série M em relação a massa base.

<b>Formulações</b>	<b>Resistência na flexão (MPa) (Média ± desvio padrão)*</b>
MB	19,69 <sup>b</sup> ± 1,92
M1	21,05 <sup>b</sup> ± 2,97
M2	21,11 <sup>b</sup> ± 0,87
M3	18,76 <sup>b</sup> ± 3,69
M4	29,70 <sup>a</sup> ± 5,97
M5	18,86 <sup>b</sup> ± 1,13
M6	12,62 <sup>b</sup> ± 7,21
M7	17,67 <sup>b</sup> ± 0,44

Fonte: Produzido pelo autor.

De acordo com os resultados encontrados para os teores de absorção de água, as formulações M4 e M2 podem ser classificadas como Grês, a M7 e M5 são semi-grês e as demais são materiais semi-porosos (SANTOS 2013).

As características mecânicas, analisadas pelo ensaio de flexão mostradas na tabela 22, observa-se que ao se fazer um balanceamento entre o caulim e o resíduo, tem-se que o caulim, durante etapa de queima em temperaturas superiores a 1000°C, irá se converter para mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), que, devido a sua estrutura acicular, atua como esqueleto contribuindo para o aumento da resistência mecânica, bem como reduzindo a deformação piropelástica da peça. Já o resíduo irá atuar agindo como um elemento com efeito filler (fechador de poros), aumentando o empacotamento e eliminando os poros abertos durante a prensagem e fornecedor de uma quantidade extra de fase mulita, já pré-existente.

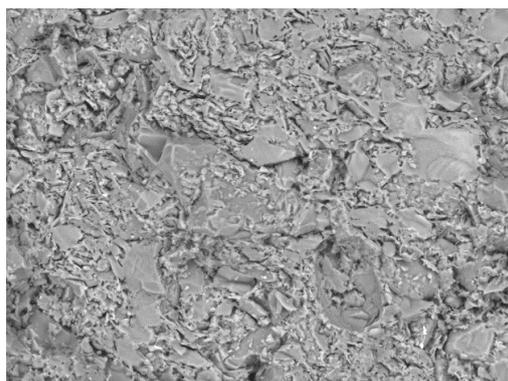
Assim verifica-se que a formulação M1, M2, M3 e M4 apresentam resistência na flexão superiores a massa comercial (MB).

## Microscopia eletrônica de varredura

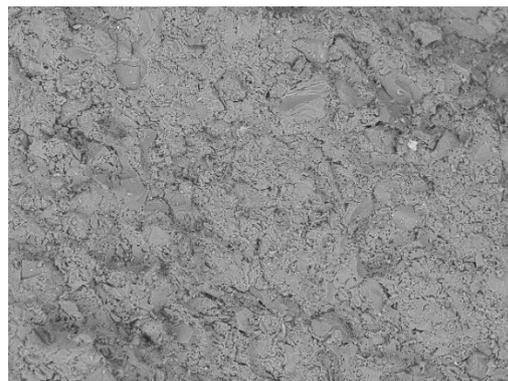
Foi realizado a análise da evolução microestrutural da região de fratura do ensaio de resistência a flexão dos corpos de prova já sinterizados. A figura 26, corresponde a microestrutura da superfície da amostra da formulação e referencia (MB), da amostra que apresentou maior densidade aparente e desempenho mecânico (M4) e da amostra de menos densidade aparente (M7).

As micrografias estão dispostas lado a lado levando em consideração o teor de resíduo de cada formulação.

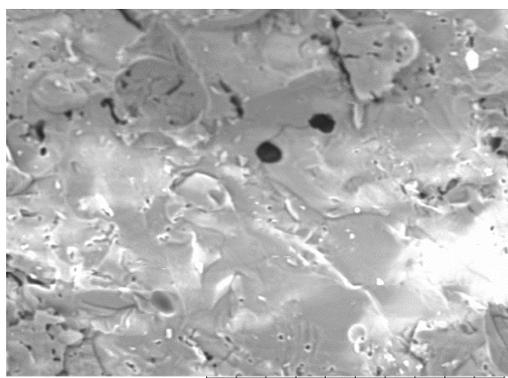
**Figura 26:** Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação de referência - MB (c) e (d) Formulação – M4, (e) e (f) Formulação – M7.



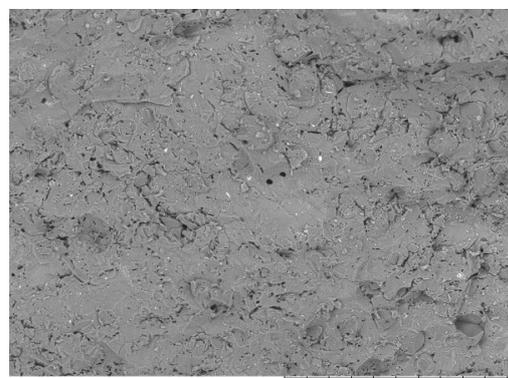
a)



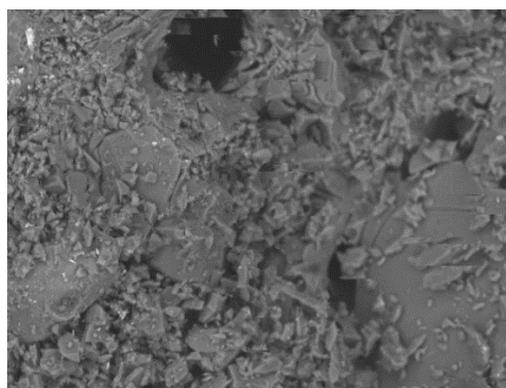
b)



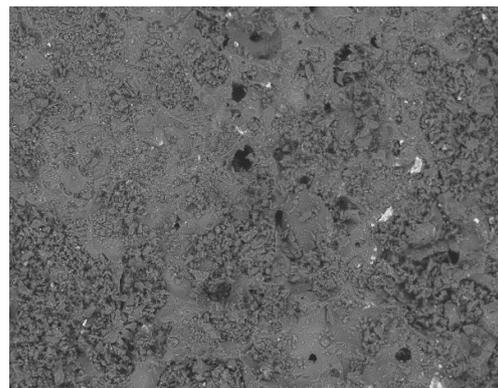
c)



d)



e)



f)

A formulação MB, apesar de ter apresentado uma aparência de elevada porosidade superficial (macroporos), na região da fratura foi observado que esta foi a que teve menos porosidade fechada em relação a formulação M4 e M7, ou seja, apresentou maior absorção de água (vide Tabela 20).

A formulação M4, apresentou sua superfície de fratura mais lisa, mesmo assim nota-se uma razoável porosidade. Seus poros apresentam um aspecto mais regular, entretanto com menos poros que a formulação M7, o que correspondente a uma maior densidade aparente e a menor absorção de água.

A menor quantidade de poros na amostra M4, figura 36 (c) e (d), pode ser justificada pelo resíduo que neste caso atuou como um elemento com efeito filler (fechador de poros), aumentando o empacotamento e eliminando os poros abertos durante a prensagem.

#### 5.3.2.2. Série C

A formulação identificada por C foi proposta mantendo-se os teores de argila e feldspato constantes, em 10% e 20 % em massa respectivamente, e a soma dos teores mássico de caulim e resíduo ficariam em 70% em massa, tabela 19, sendo que a amostra identificada como Cpb não apresente em sua composição teores de resíduo.

Já em relação aos dados obtidos para as formulações de acordo com a Cpb, observa-se a tabela 23.

**Tabela 23:** Análises físicas e mecânicas da série C.

	Densidade aparente Kg m <sup>-3</sup>	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Retração Linear (%)	Retração volumétrica (%)
<b>Cpb</b>	3727,1±22,5	15,6±0,4	58,1±1,3	2,1±0,1	6,5±1,6
<b>C1</b>	3839,9±35,6	12,9±3,0	48,7±6,9	1,8±1,4	5,6±3,0
<b>C2</b>	4786,6±52,8	6,8±1,3	32,4±4,6	5,4±0,2	13,3±1,9
<b>C3</b>	5592,8±135,3	1,4±0,1	8,1±1,0	9,4±0,7	24,3±2,8
<b>C4</b>	3727,1±26,4	15,6±0,6	58,1±1,6	2,1±0,2	6,5±1,8

Fonte: Produzido pelo autor.

As formulações C1 e C4, tiveram uma baixa densificação, resultando em uma menor redução da sua porosidade e absorção de água, assim como a Cpb. Entretanto a C2 e a C3 apresentaram uma densidade aparente maior que a Cpb, amostra de referência, o que pode ser explicado possivelmente pela presença do alto teor de caulim, pois, estes argilominerais apresentam as fases mais finas da composição das formulações, proporcionando assim plasticidade com adição de água e melhorando o empacotamento entre as partículas não-plásticas, conforme mostrado por Magagnin (2014).

**Tabela 24:** Resistência na flexão das formulações estudadas da série C em relação a massa base.

Formulações	Resistência na flexão (MPa) (Média ± desvio padrão)*
Cpb	8,15 <sup>c</sup> ± 1,37
C1	12,10 <sup>c</sup> ± 5,79
C2	18,98 <sup>b</sup> ± 1,75
C3	39,60 <sup>a</sup> ± 2,78
C4	19,52 <sup>b</sup> ± 2,53

Fonte: Produzido pelo autor.

A tabela 24 mostra os resultados mecânicos, no qual a formulações C3, apresentou o melhor resultado de resistência na flexão e valores de densidade aparente e absorção de água maiores que as demais amostras. Neste caso o resíduo adicionado agiu como um fechador de poros quando o feldspato que é um fundente abaixou a temperatura de queima diminuindo assim a absorção de água e aumentando a resistência mecânica. Além disso durante a etapa de queima o caulim em temperaturas superiores a 1000 °C, se converte para mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ). que contribui para o aumento da resistência mecânica, além de reduzir a deformação pirolástica da peça.

A medida que se aumenta o teor de caulim, observa-se um aumento na resistência mecânica. Entretanto o aumento do valor da resistência irá alcançar um valor máximo depois irá diminuir a medida que o teor de caulim chegar próximo de 40%. Até este valor máximo é observado que a tenacidade se torna maior à medida que aumenta a porcentagem de caulim, assim o tamanho do defeito crítico se mantém praticamente inalterado até no máximo de 50%, acima deste valor o defeito aumenta rapidamente, o que contrabalança o efeito da tenacidade e faz com que a resistência mecânica finalmente diminua. (SANCHEZ, 2001).

Pelo valor encontrado para porosidade aparente, da amostra C3, verifica-se que houve uma boa relação entre quantidade/viscosidade da fase líquida, diminuindo assim os poros abertos e conseqüentemente aumentando a densificação. O que também foi visto por Oliveira (2012) no qual ele também mostra que quanto mais baixa a absorção de água, menor é a porosidade e, maior é a compactação.

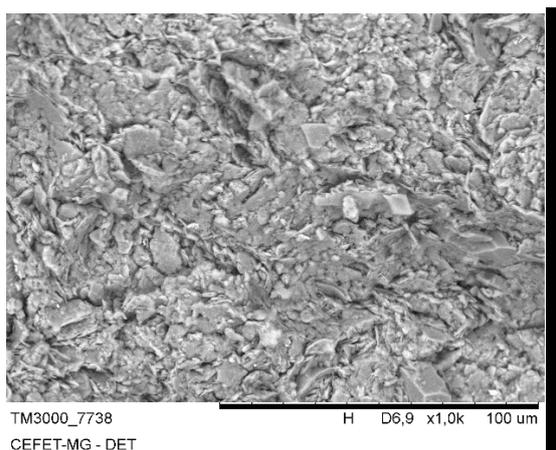
Como de acordo com a ISO 13006, os porcelanatos precisam ter a resistência à flexão igual ou maior que 35 MPa, logo, a única formulação que se enquadra como porcelanato e a C3, analisando somente o parâmetro de resistência mecânica.

## Microscopia eletrônica de varredura

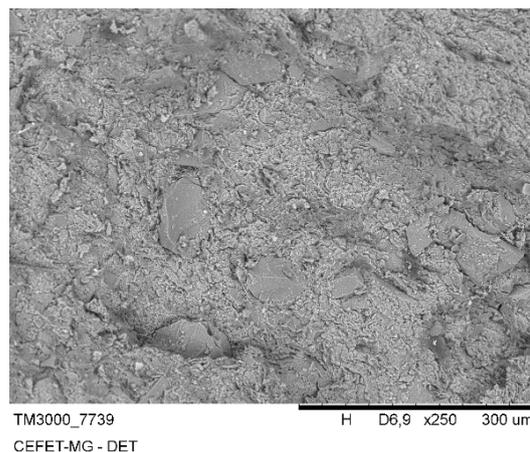
A análise microestrutural foi realizada na região de fratura dos corpos de prova já sinterizados. A figura 27 corresponde a microestrutura da superfície da amostra da formulação e referencia (Cpb), da amostra que apresentou maior densidade aparente e desempenho mecânico (C3) e da amostra de menor densidade aparente (C4).

As micrografias estão dispostas lado a lado levando em consideração o teor de resíduo de cada formulação.

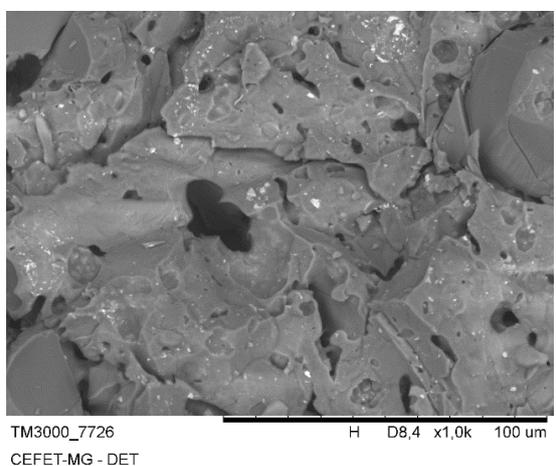
**Figura 27:** Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação de referência - Cpb (c) e (d) Formulação – C4, (e) e (f) Formulação – C3.



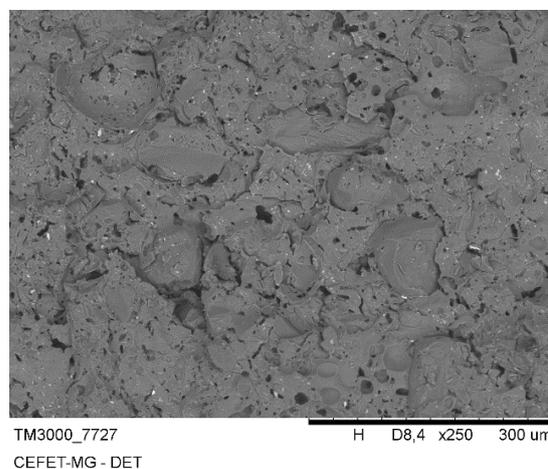
a)



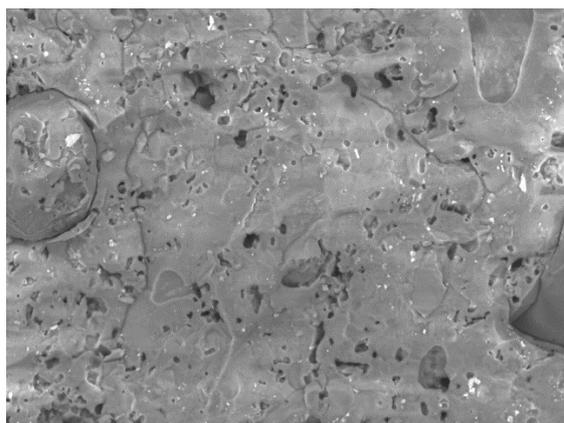
b)



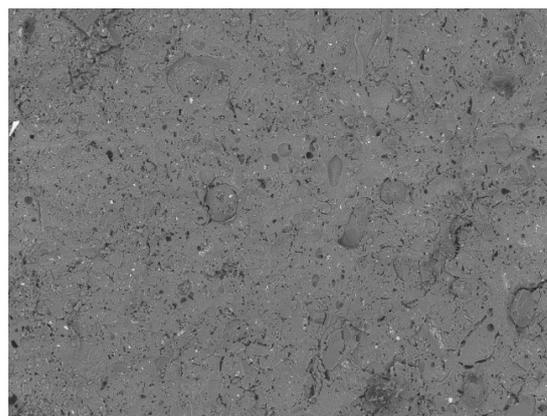
c)



d)



e)



f)

A formulação Cpb, que é a formulação de referência para esta série, apresentou alta porosidade superficial com maior absorção de água, ou seja, possuindo possivelmente menor quantidade de poros fechados, o que também se explica pela sua baixa densidade aparente.

Já a formulação C3 que foi a formulação de melhor desempenho da série, apresentou uma microestrutura com menor presença de porosidade que a formulação C4. Os seus poros são mais regulares devido ao melhor empacotamento que ocorreu na mesma nesta formulação.

### 5.3.3. FASE 3

O anexo VI, representa os corpos de prova já prensados para a realização dos ensaios preliminares.

#### 5.3.3.1. Série C3

Nesta série foram fixados os valores de feldspato em 20% em peso e o de argila em 10% em peso. O valor de caulim está compreendido de 20 a 50 % em massa conforme valores típicos de De Noni (2010). Os resultados encontrados são apresentados na tabela 25.

**Tabela 25:** Análises físicas e mecânicas da série C3.

	Densidade aparente Kg m <sup>-3</sup>	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Retração Linear (%)	Retração volumétrica (%)
<b>C3A</b>	5143,6±298.3	5,7±3,9	29,7±5,5	7,9±2,4	21,2±2,9
<b>C3B</b>	890,9±6,9	12,3±2,6	47,2±5,7	2,9±1,2	11,3±3,3
<b>C3C</b>	5230,9±22.3	1,7±0.4	8,6±1,3	9,1±2,1	25,4±1.3
<b>C3D</b>	4130,8±37,4	1,7±0,1	6,9±0,6	6,4±1,3	15,4±5,7

Fonte: Produzido pelo autor.

Nesta fase ocorreu variação no teor de caulim e de resíduo. No qual a medida que se observasse uma grande variação no teor de caulim, verifica se um ponto de resistência máxima e depois este valor começa a oscilar, uma vez que a tenacidade até um certo ponto é proporcional ao aumento do teor do caulim, porem chega um momento que quando o teor de caulim ultrapassa um determinado valor começou a ter um aumento do tamanho do defeito crítico fazendo que a tenacidade diminua rapidamente, conforme já foi discutido no item 6.3.2.

**Tabela 26:** Resistência na flexão das formulações estudadas em relação a massa base.

Formulações	Resistência na flexão (MPa) (Média ± desvio padrão)*
C3A	20,92 <sup>a,b</sup> ± 8,05
C3B	11,33 <sup>b</sup> ± 2,16
C3C	31,55 <sup>a</sup> ± 7,49
C3D	31,43 <sup>a</sup> ± 4,81

Fonte: Produzido pelo autor.

É observado que C3C e C3D possuem praticamente o mesmo valor de resistência mecânica com 95% de confiança e são maiores que as demais formulações. Entretanto o melhor desempenho é observado para a formulação

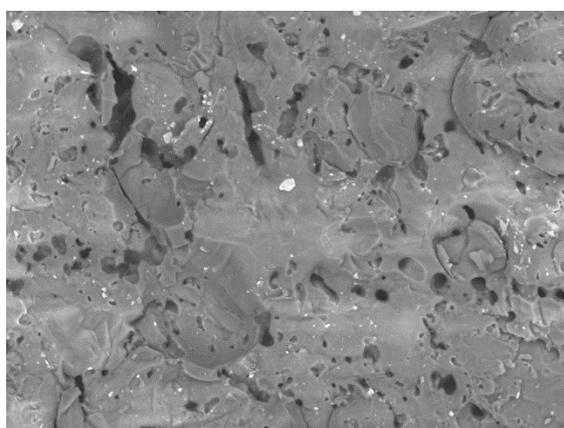
C3C (tabela 26), ponto de máximo, apresentando uma maior resistência mecânica e densidade aparente mais elevada, o que indica que houve um melhor empacotamento de partículas que além de contribuiu para uma maior densificação, o que que contribui para o aumento da resistência mecânica, após este valor observa-se uma redução na resistência a flexão, e aumento nos valores de absorção de água e redução na densidade aparente.

### Microscopia eletrônica de varredura

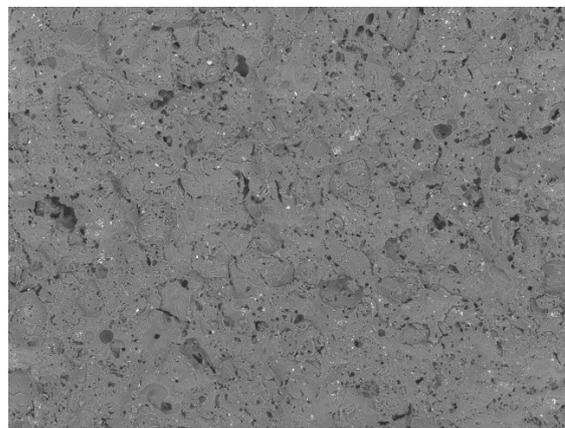
Na Figura 28 é apresentada, uma ampliação de 1000x e de 250x, a microscopia de fratura da superfície dos corpos de prova.

As micrografias estão dispostas lado a lado levando em consideração o teor de resíduo de cada formulação.

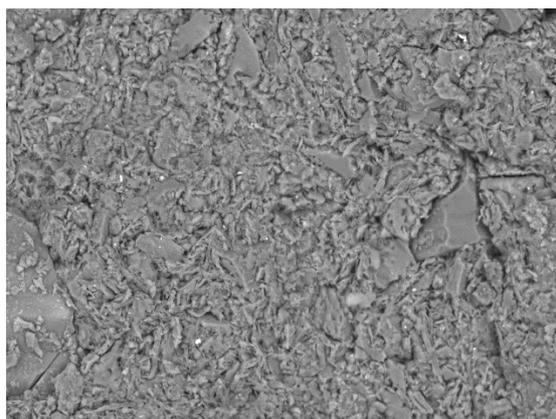
**Figura 28:** Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação – C3C (c) e (d) Formulação – C3D.



a)

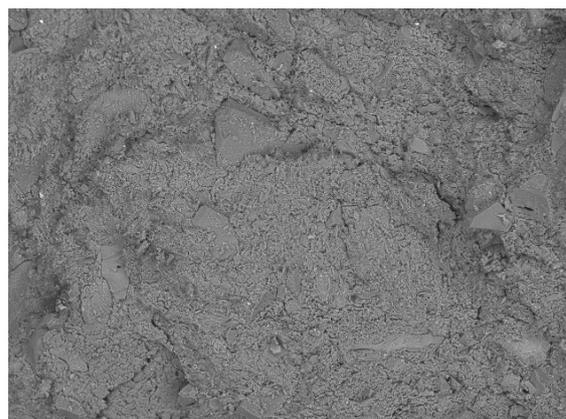


b)



TM3000\_7746  
CEFET-MG - DET

c)



TM3000\_7747  
CEFET-MG - DET

d)

Pelas micrografias observa-se que as formulações C3C e C3B, observa-se que a C3C, apresentou porosidade aparente menor do que a C3B, o que confirma o resultado da tabela 26. No interior da amostra C3C, na região da fratura, a quantidade de porosidade fechada apresentada por estas amostras é inferior a amostra C3B, no qual além de apresenta uma porosidade superficial maior tem uma maior densidade aparente.

Neste grupo, a formulação C3C, teve uma menor porosidade fechada devido ao fato do resíduo além de ter agido como efeito filler, nesta formulação houve um melhor empacotamento.

#### 5.3.3.2. Série MR

As amostras identificadas como MRs tiveram em sua formulação os teores de argila, sílica e feldspato mantidos constantes, os teores mássicos foram respectivamente 30,0%, 7,0% e 48,0%, os teores de caulim e resíduo variam até 15%. A amostra identificada por MR, amostra de referência, não apresenta em sua formulação o resíduo do polimento do porcelanato. Os resultados obtidos para as formulações MRs, estão demonstrados na tabela 27.

**Tabela 27:** Análises físicas e mecânicas da série MR.

	Densidade aparente Kg m <sup>-3</sup>	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Retração Linear (%)	Retração volumétrica (%)
<b>MR</b>	3884,6±54,7	11,4±0,5	44,2±1,21	0,8±0,1	5,1±6,0
<b>MR1</b>	3820,9±39,9	11,6±0,9	44,2±2,3	2,2±0,4	7,1±2,4
<b>MR2</b>	4181,1±194,1	8,2±1,3	34,1±3,8	4,2±0,4	11,2±2,4
<b>MR3</b>	4633,0±18,1	5,5±1,9	25,3±7,6	5,3±0,5	13,5±1,9

Fonte: Produzido pelo autor.

A medida que aumenta o teor de resíduo nas formulações, inicialmente verifica-se um aumento nítido do desempenho mecânico das formulações propostas. Observa-se também, em relação a MR, que a densidade aparente está aumentando, a porosidade aparente e a absorção de água estão diminuindo. Essa densificação é característica dos argilominerais caulim e da argila dando um maior empacotamento entre as partículas não-plásticas e o resíduo que mais uma vez realizou o efeito filler, aumentando o empacotamento e eliminando os poros abertos durante a prensagem (MAGAGNIN, 2014).

**Tabela 28:** Resistência na flexão das formulações estudadas em relação a massa base.

Formulações	Resistência na flexão (MPa) (Média ± desvio padrão)*
MR	4,45 <sup>b</sup> ± 0,45
MR1	6,58 <sup>b</sup> ± 1,90
MR2	8,77 <sup>a,b</sup> ± 3,40
MR3	12,46 <sup>a</sup> ± 1,19

Fonte: Produzido pelo autor

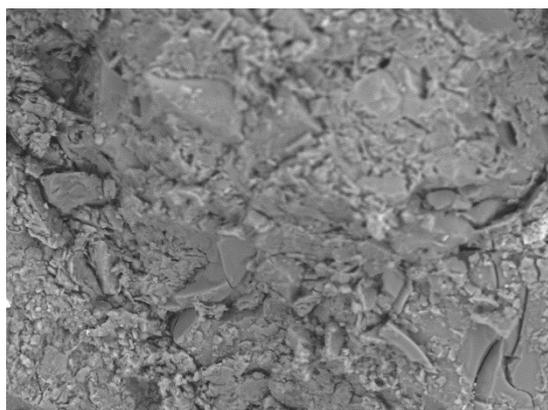
Ao analisar a tabela 28, observasse que MR2 tem um desvio padrão muito grande, sendo assim está formulação esta ao mesmo tempo sendo igualada a formulação MR1 e MR3, logo com 95% de confiança a MR3 nesta série proposta

apresentou o melhor desempenho mecânico com menor desvio padrão e baixa absorção de água.

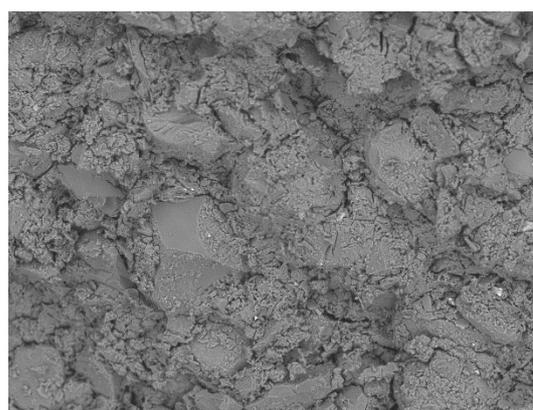
### Microscopia eletrônica de varredura

Foi realizado a análise microestrutural da região de fratura do ensaio de resistência a flexão dos corpos de prova já sinterizados. A figura 29, corresponde a microestrutura da superfície da amostra da formulação e referencia (MR), da amostra que apresentou maior densidade aparente e desempenho mecânico (MR3) e da amostra de menos densidade aparente (MR1).

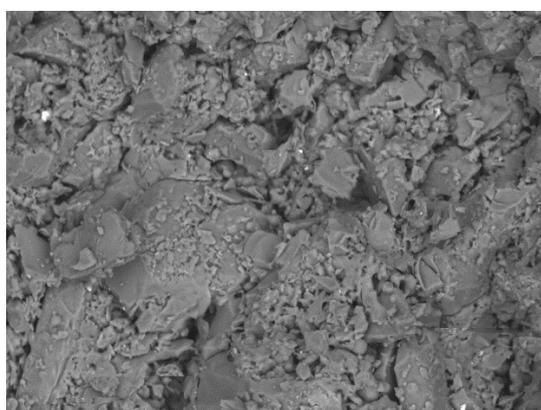
**Figura 29:** Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova:(a) e (b) Formulação de referência - MR (c) e (d) Formulação – MR1, (e) e (f) Formulação – MR3.



a)



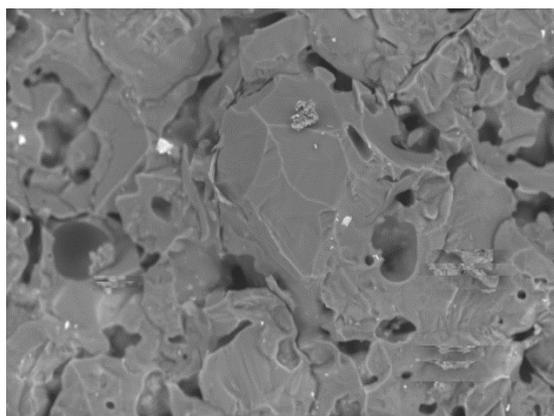
b)



c)

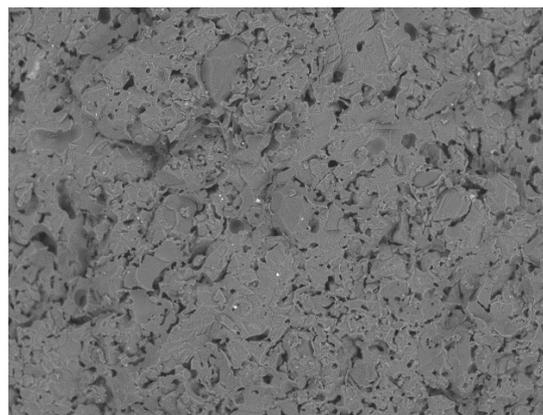


d)



TM3000\_7730  
CEFET-MG - DET

d)



TM3000\_7731  
CEFET-MG - DET

f)

De acordo com a análise das micrografias, observa-se que a amostra MR, apresentou uma microestrutura mais homogênea em relação as outras formulações da série. Já a formulação MR3, apresentou menor quantidade de poros que a formulação MR1, o que se explica provavelmente devido ao elevado teor de resíduo incorporado (efeito filler) e o alto teor de feldspato favorecendo a formação de fase vítrea.

Através das imagens obtidas, A amostra MR, apesar de ter alta porosidade aparente, ela tem uma estrutura mais homogênea em relação as outras estruturas e sua porosidade fechada e baixa o que justifica sua baixa densidade aparente. A formulação MR3, apresentou menos poros em sua estrutura que a formulação MR1 que é provavelmente devido ao teor de resíduo (fechador de poros) e o alto teor de feldspato favoreceu a formação de fase vítrea.

#### 5.3.4. FASE 4

Nesta última fase foram preparadas as formulações de melhor desempenho de cada série apresentada nos itens anteriores, as formulações analisadas foram divididas em 3 matrizes, no qual para cada uma foram fixados os valores de suas matérias primas.

- Matriz 1: feldspato em 20% em massa e o de argila em 10% em massa, caulim entre 30% a 70 % em massa

- Matriz 2: feldspato em 50% massa e o de sílica em 10% em massa, caulim foi de 40% em massa
- Matriz 3: feldspato em 48% em peso e o de argila em 30% em peso, caulim entre 0 a 15 % em peso, sílica com 7% em peso.

Em todas as formulações foram adicionadas um teor de resíduo que variou entre 0 a 40% em peso (DE NONI, 2010).

Os resultados dados encontrados para os valores de densidade aparente, absorção de água, porosidade aparente, retração linear, retração volumétrica são apresentados na tabela 29. Os corpos de prova estão apresentados no anexo VIII.

Os dados mostrados na tabela 29 mostrada abaixo foram analisados de acordo com a amostra de referência de cada matriz. Já os dados da resistência na flexão são mostrados na tabela 30.

Para cada amostra avaliada, foi preparada uma formulação de referência, nestas formulações não havia presença do resíduo.

Após todos os corpos de prova terem sido submetidos a um ciclo de queima industrial de 22 minutos de preparação, 7 minutos de queima e 19 minutos de resfriamento. A queima submetida foi de 1245°C a preparação e resfriamento foram padrão para o porcelanato técnico, e o resultado obtido foi melhor que o obtido na mufla convencional.

**Tabela 29:** Análises físicas e mecânicas das formulações de melhor desempenho.

	Densidade aparente Kg m <sup>-3</sup>	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Retração Linear (%)	Retração volumétrica (%)
<b>Cpb</b>	3893,1±1,1	13,6±0,2	52,8±0,5	2,9±0,2	22,9±3,1
<b>C3</b>	5427,7±24,0	2,6±0,2	14,1±1,1	7,1±0,1	28,1±5,1
<b>MB</b>	4359,8±31,5	7,5±0,2	32,8±0,8	3,0±0,2	20,5±2,8
<b>M1</b>	4116,4±38,4	8,07±0,8	33,17±2,4	2,8±0,2	17,4±0,8
<b>MR</b>	3881,7±59,4	9,95±0,9	38,54±2,2	1,3±0,2	27,67±3,3
<b>MR3</b>	4314,0±68,9	0,7±6,2	1,9±0,2	1,13±0,1	10,60±0,7

Fonte: Produzido pelo autor.

Na matriz 1, a formulação de referência Cpb, apresentou um alto valor de porosidade aparente em relação a formulação C3 e em contrapartida a formulação C3 apresentou uma melhor densificação devido a compactação se mais eficaz entre suas partículas além de apresentar uma baixa absorção de água e ter uma resistência mecânica maior. Com isso verifica-se que a porosidade influência de modo marcante as características técnicas das placas cerâmicas.

Na matriz 2, observa-se que a formulação M1 apresentou uma maior absorção de água e porosidade aparente que a MB e em contrapartida uma menor densidade aparente. Este fato possivelmente ocorreu por que ao adicionar o resíduo na formulação e levar a formulação ao ciclo de queima de 1245°C, o resíduo presente se transformou em carvão de silício, tendo assim quantidade maior de gases e bolhas durante a sinterização da peça.

Na matriz 3, a adição de 15% em massa de resíduo em substituição ao Caulim, em relação a MR, produziu um material cerâmico com baixa absorção de água e alta densidade aparente.

**Tabela 30:** Resistência na flexão das formulações estudadas em relação a massa base da fase 4.

<b>Formulações</b>	<b>Resistência na flexão (MPa) (Média ± desvio padrão)*</b>
Cpb	12,18 <sup>a,b</sup> ± 1,26
C3	13,09 <sup>a,b</sup> ± 1,97
MB	14,37 <sup>a</sup> ± 2,20
M	10,62 <sup>b</sup> ± 1,42
MR	5,13 <sup>c</sup> ± 0,68
MR3	5,75 <sup>c</sup> ± 0,53

A absorção de água fornece uma medida da porosidade: quanto mais baixa a absorção de água, menor é a porosidade e, maior é a compactação. O que justifica o a baixa absorção de água da M3.

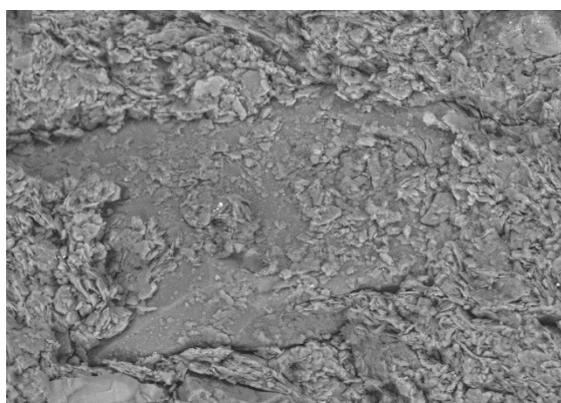
De acordo com a ABNT, norma NBR15463, M3 e a formulação que apresentou o menor valor de absorção de água. Seu valor está dentro do intervalo aceitável para produção de grês no qual a absorção de água está entre 0,5 e 3,0 %, referente ao grupo Blb, entretanto esta formulação apresentou uma resistência mecânica muito baixa (5,8Mpa) da especificada pela ABNT, para produção de produtos cerâmicos. M1, apresentou um valor de absorção de água no intervalo entre 6,0 a 10,0%, sendo classificado como semi-porosa, e a C3 é classificada como semi-grês por estar no intervalo de absorção de água entre 3,0 a 6,0%.

Pelos resultados encontrados pode-se afirmar que o ciclo de queima usado pela empresa é inadequado para a queima da cerâmica que entra em sua formulação o resíduo obtido do processo de polimento do porcelanato. Desta forma a reutilização do resíduo depende do ciclo de queima usado.

#### Microscopia eletrônica de varredura

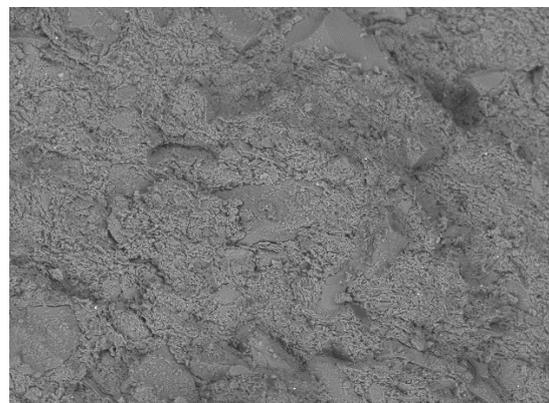
A análise microestrutural da região de fratura das formulações desta fase, estão dispostas lado a lado de acordo com cada matriz. As figuras 30, 31 e 32, correspondem a microestrutura da superfície da amostra da formulação de referências, e das amostras de melhor desempenho mecânico.

**Figura 30:** (a) – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova: (a) e (b) Formulação de referência - Cpb (c) e (d) Formulação – C3.



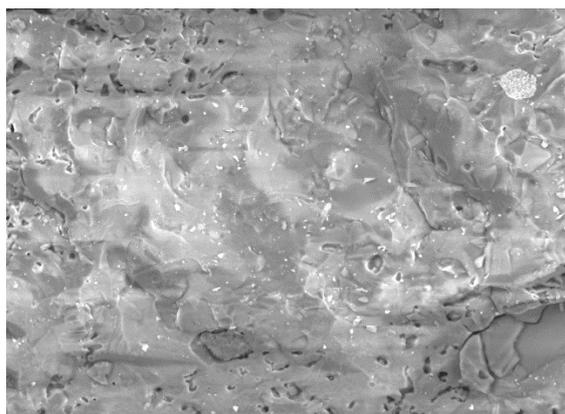
TM3000\_7714  
CEFET-MG - DET

a)

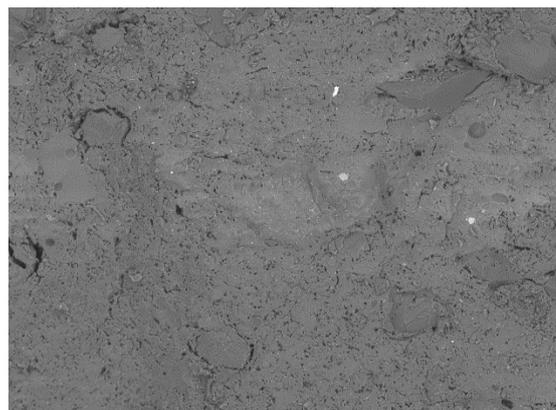


TM3000\_7715  
CEFET-MG - DET

b)



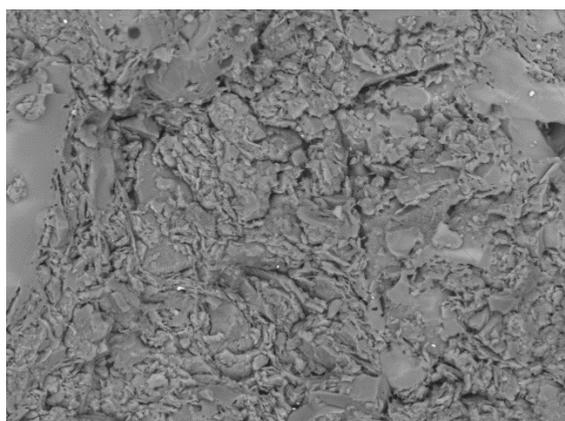
c)



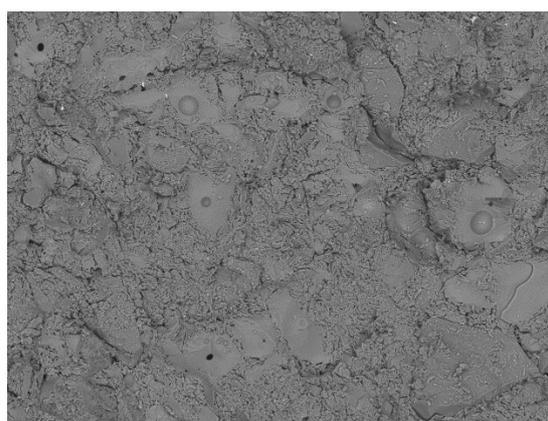
d)

De acordo com a análise das micrografias da figura 30, podemos ver que a amostra de referência Cpb aparentemente, apresentou menor porosidade fechada em sua estrutura, entretanto a sua porosidade aberta e alta, o contrário ocorre com a C3 tendo assim uma maior densidade aparente e menor absorção de água.

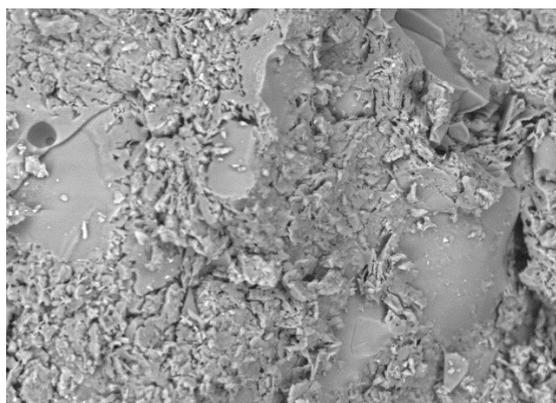
**Figura 31:** Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova: (e) e (f) Formulação de referência – MB, (g) e (h) Formulação – M1.



e)

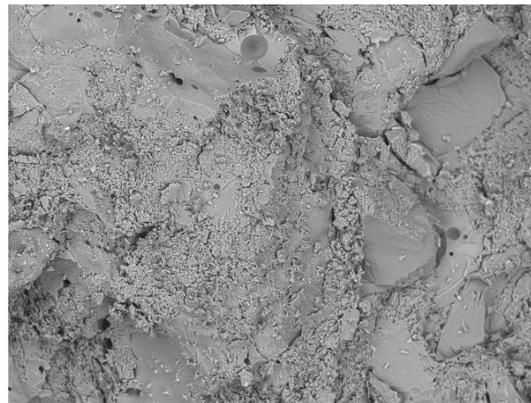


f)



TM3000\_7718  
CEFET-MG - DET

g)

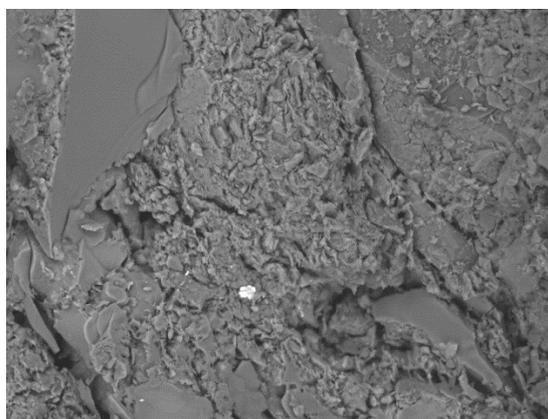


TM3000\_7719  
CEFET-MG - DET

h)

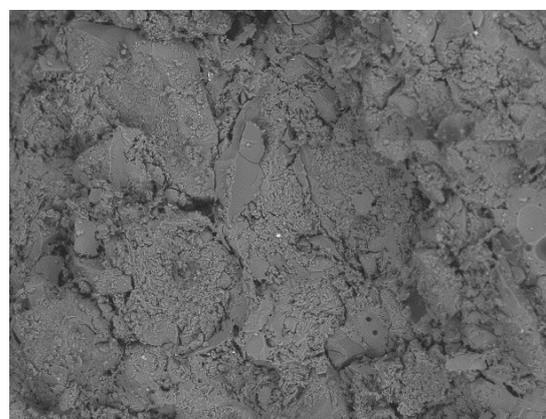
A amostra de referência MB e a amostra M1, apresentaram características bem similares. A MB apresentou uma estrutura mais homogênea e uniforme e com menos poros fechados.

**Figura 32:** (c) – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura dos corpos de prova: (i) e (j) Formulação de referência – MR, (e) e (f) Formulação – MR3 (k) e (l).



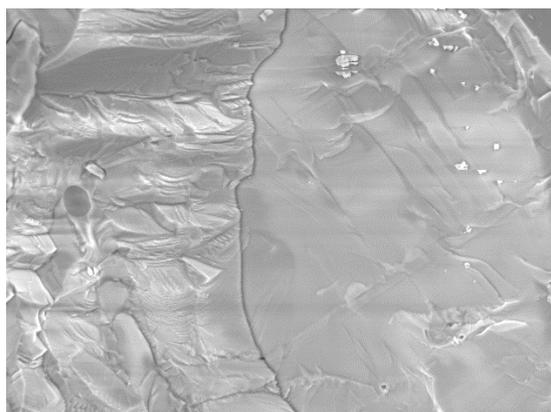
TM3000\_7742  
CEFET-MG - DET

i)



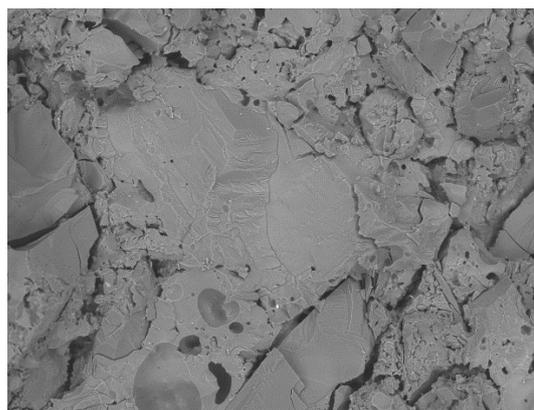
TM3000\_7743  
CEFET-MG - DET

j)



TM3000\_7720  
CEFET-MG - DET

k)



TM3000\_7721  
CEFET-MG - DET

l)

A amostra MR3, apresentou uma baixa porosidade fechada no seu interior e, entretanto, uma porosidade aberta maior na sua superfície, confirmada pela absorção Tabela.

## 6. CONCLUSÃO

Após a apresentação dos resultados e das discussões do capítulo 5, chega-se às seguintes conclusões:

1. A caracterização do resíduo do polimento do porcelanato mostrou que o mesmo apresenta composição química semelhante à da massa comercial do porcelanato, assegurando assim seu potencial para ser usado na formulação de novas massas cerâmicas.

2. As materiais primas utilizadas e que apontaram as fazes de interesse foram das cerâmicas triaxiais. No qual elas apresentam em torno de 80% a 90%, em massa, de óxido de alumínio e de silício, componentes que são favoráveis para a formação de materiais cerâmicos e o óxido de silício ajuda a abaixa o ponto de fusão da sílica.

3. As três formulações preliminares propostas na primeira fase (fase 1), apresentaram uma granulometria bastante assimétrica. Já em relação aos resultados dos ensaios físicos e mecânicos podem se observar que a massa comercial apresentou uma menor absorção de água e porosidade aparente do que as formulações testadas, entretanto uma menor resistência mecânica. Pelas imagens obtidas pelo MEV da região fraturada das amostras estudadas, observa-se que no interior da massa comercial a existência de uma maior quantidade de poros, provavelmente reduzindo a resistência na flexão. A formulação 3 classificada como semi-grês, foi a que teve um melhor desempenho mecânico, sendo justificado pelo resíduo adicionado em sua formulação.

4. Na série M pode se observar que a medida que se substitui o caulim pelo resíduo nas formulações propostas se observa inicialmente um aumento na resistência a flexão da formulação, até uma substituição de 10% em massa do resíduo em relação ao caulim, o que ocorreu na amostra M4. Para teores mássicos acima de 10%\_reduz a resistência a flexão da formulação. Nesta serie pode se produzir materiais cerâmicos como o grês (M4 e M2), semi-grês (M7 e M5) e também materiais semi-porosos.

5. A série C, observa-se que o resíduo realizou o efeito filler quando o feldspato que é um fundente abaixou a temperatura de queima diminuindo assim

a absorção de água e aumentando a resistência mecânica. Além disso durante a etapa de queima o caulim em temperaturas superiores a 1000 °C, se converte para mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), que, devido a sua estrutura acicular, atua como esqueleto contribuindo para o aumento da resistência mecânica, além de reduzir a deformação piropiástica da peça. Com isso nesta serie observasse produção de cerâmicas porosa (C1 e C4), semi-poroso (C2) e de grês (C3).

6. Já a série MR, foi observado nesta fase que a medida que se aumentava o teor de resíduo nas formulações, ocorria aumento nítido do desempenho mecânico das formulações propostas. Foram gerados materiais cerâmicos como o semi-grês (MR3), porosa (MR1) e semi-poroso (MR2).

7. Os resultados obtidos na fase 4, os valores obtidos de absorção de água e resistências a flexão apresentaram valor bem mais abaixo do que os valores obtidos nos ciclos de queima anteriores. Concluindo que o ciclo de queima influencia diretamente qualidade do material cerâmico obtido, e por isso ele interfere na possibilidade ou não de reutilização do resíduo gerado durante o processo de no polimento do porcelanato. Por isso, a utilização do resíduo obtido do polimento do porcelanato é possível e viável, contudo se devesse ajustar um novo ciclo de queima que otimize o desempenho do novo material cerâmico.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, concluímos que para trabalhos futuros devemos levar em consideração:

- Propor novos ciclos de queima que sejam mais adequados aos materiais cerâmicos que usam o resíduo em sua formulação como matéria prima
- Avalia as formulações que tiveram melhor desempenho ao ciclo de queima empregado na fase 1.
- Avaliar a substituição do resíduo pelo feldspato.
- Estudar a microestrutura do carbeto de silício (SiC) como agente de reforço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT NBR 15463:2007. **Placas Cerâmicas para Revestimento – Porcelanato**. 2007.
2. ALVES, H. J., et al. Polimento de peças de porcelanato: avaliação da porosidade final e da resistência ao manchamento. **Cerâmica industrial**, São Paulo, v. 15, n.02, p. 23-29, mar/abr 2010.
3. ARAUJO, P.A.S **Caracterização de matérias-primas regionais e desenvolvimento de formulações de massa cerâmicas para porcelanato**. Dissertação (mestrado). Natal-RN, 2009.
4. DE NONI JUNIOR, A. et al. Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part II: Mechanical properties and microscopic residual stress. **Materials Science And Engineering**, Espanha, v. 527, p.1736-1743, 25 mar. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509309011897>>.
5. DE NONI JUNIOR, A. et al.. Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part I: Microstructural characterization and developed phases after firing. **Materials Science And Engineering**, Espanha, v. 527, p.1730-1735, 25 mar. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509309011861>>. Acesso em: 08 ago. 2012.
6. DE NONI JUNIOR, A. et al.. Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part I: Microstructural characterization and developed phases after firing. **Materials Science And Engineering**, Espanha, v. 527, p.1730-1735, 25 mar. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509309011861>>.
7. DE NONI JUNIOR, A..**Estudo das Propriedades Mecânicas de Porcelanato através da Avaliação de Tensões Residuais Microscópicas e Macroscópicas Originadas Durante a Etapa de Resfriamento do Ciclo de Queima**. 2007. 125 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
8. GARCIA, A., SPIM, J.A, SANTOS, C.A. **Ensaio dos materiais**. 2008

9. HECK, C. Grês porcelanato. **Cerâmica industrial**, São Paulo, v. 01, n.4/5, p. 21-24, ago/dez, 1996. GARCIA, A., SPIM, J.A, SANTOS, C.A, 2008
10. INMETRO. **Revestimentos Cerâmicos** (pisos e azulejos). Disponível em:
11. KANE, D. **Análise da integridade superficial na retificação dupla face de anéis de pistão de aço inoxidável**. ISO 6621- 3 MC 66 nitretado. 2002. 130f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
12. KUMMER, E. et al. Reutilização dos resíduos de polimento de porcelanato e feldspato na fabricação de novo produto cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 3, p.34-38, maio/jun. 2007.
13. LUZ, J, C. **Desenvolvimento de formulações para produção de grês porcelanato a partir de matérias primas da região da bacia do Parnaíba**. Dissertação (mestrado). Natal-RN, março 2008.
14. MAGAGNIN, D. **Estudo do desempenho mecânico de formulações industriais de porcelanato submetido a resfriamento rápido**. Mestrado em ciência e engenharia de materiais. CRICIÚMA 2014.
15. MARQUES, L. N. et al. **Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.2.2, p.34-42, jul/ago, 2007.
16. MORAES, M. L. V. N. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
17. OLIVEIRA, A. P. N. Grês porcelanato: aspectos mercadológicos e tecnológicos. **Cerâmica industrial**, Florianópolis, v. 03, n. 3, p. 34 – 41, mai/jun, 1998.
18. OLIVEIRA, C.F. **Influência do Teor de Feldspato Espodumênio e Albita na Sinterização de Uma Massa Cerâmica Triaxial**. Pós-graduação em engenharia mecânica. São João del-Rei, 2012.
19. PINHEIRO, A. S. **Produção de grês porcelanato a partir de matérias-primas do Rio Grande do Norte e queima a gás natural**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, fev. 2006.

20. PUREZA, J. C. C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais.** Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
21. 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.** 2009. 104f. Dissertação (Mestrado) – Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
22. REIS, A.S. **Avaliação das características geométricas dos blocos cerâmicos**
23. RODRIGUEZ, A.M; PIANARO,S.A. Propriedades de Matérias-primas Seleccionadas para a Produção de Grês Porcelanato. **Cerâmica Industrial**, nº 9, pp.6, 2004.
24. ROSSO, J.; CUNHA, E.; ROJAS-RAMIREZ, R. Características técnicas e polimento de porcelanatos. **Cerâmica Industrial**, Florianópolis, v.10, n. 4, p. 11–14, jul/ago. 2005.
25. SANCHEZ, E.; ORTS, M. J.; GARCÍA-TEN, J.; CANTAVELLA, V. Efeito da composição das matérias-primas empregadas na fabricação de grês de porcelanato sobre as fases formadas durante a queima e as propriedades do produto final. **Cerâmica Industrial**, v.5, n.15-22, set./out. 2001
26. SANTOS, P. F; C. R. Calado, S. N. da Silva, I.P. Pinheiro, "**Reuse of Waste from Polish in the Production of Porcelain**", Materials Science Forum, Vols. 798 -799, pp. 317-322, 2014.
27. SCHULLER D., BIANCHI E. C., AGUIAR P. R. **Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas.** Cerâmica. Bauru, n. 54, p. 435-442, 2008.
28. SELLI, N, T. **Development of ANORTHITE based white porcelain stoneware tile compositions.** Ceramics International. 2015.
29. SILVA, A.L. **Conformação de porcelanatos de baixa espessura por prensagem e tape casting.** Dissertação - Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis 2012.

30. SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com adição a do resíduo de polimento do porcelanato**. 2005. 107f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
31. SILVA, J. R. R. **Caracterização físico-química de massas cerâmicas e suas influências nas propriedades finais dos revestimentos cerâmicos**. 2005. 66f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
32. SILVA, M.A., H.R. Paes Jr., J.N.F. Holanda. Reuse of ornamental rock-cutting waste in aluminous porcelain. 2011. **Journal of Environmental Management** 92 (2011) 936 e 940.
33. SILVA, M.N.P et al. **Revestimentos cerâmicos e suas aplicabilidades**. Maceió | v. 2 | n.3 | p. 87-97 | Maio 2015.
34. SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. 208 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós – Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
35. Torres. P et al. **Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations**. 2004 Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221903008483>. Acesso em: 20 abril 2016.
36. VENSON, I. **Abrasivos**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal – Universidade Federal do Paraná. Disponível em <[http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte\\_arquivos/Abrasivos.pdf](http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte_arquivos/Abrasivos.pdf)>. Acesso em: 01 nov. 2015.
37. VIDIGAL, R. N. **Reutilização do resíduo proveniente do polimento do porcelanato por meio de substituição do agente abrasivo presente no polidor**. 2013

## ANEXOS

**ANEXO I** – Corpos de prova prensados da massa comercial atomizada.



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

**ANEXO II** – Corpos de prova prensados para formulação 1.



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

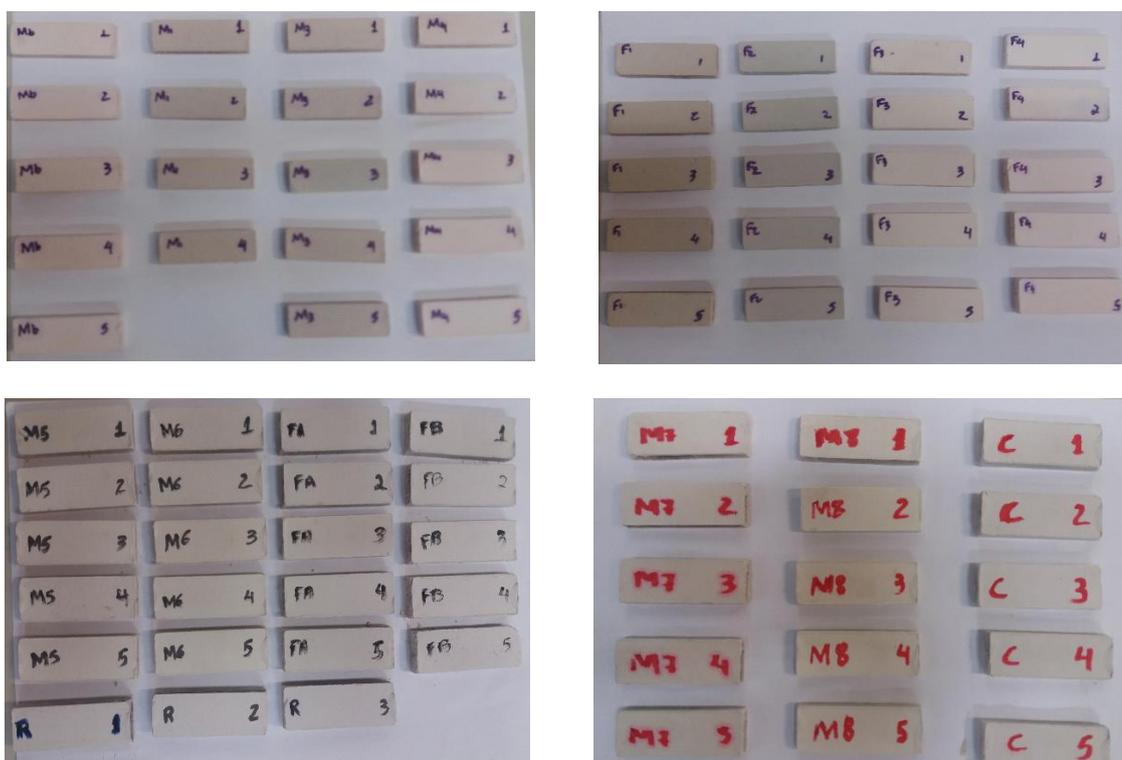
**ANEXO III**– Corpos de prova prensados para formulação 2.

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

**ANEXO IV**– Corpos de prova prensados para formulação 3.

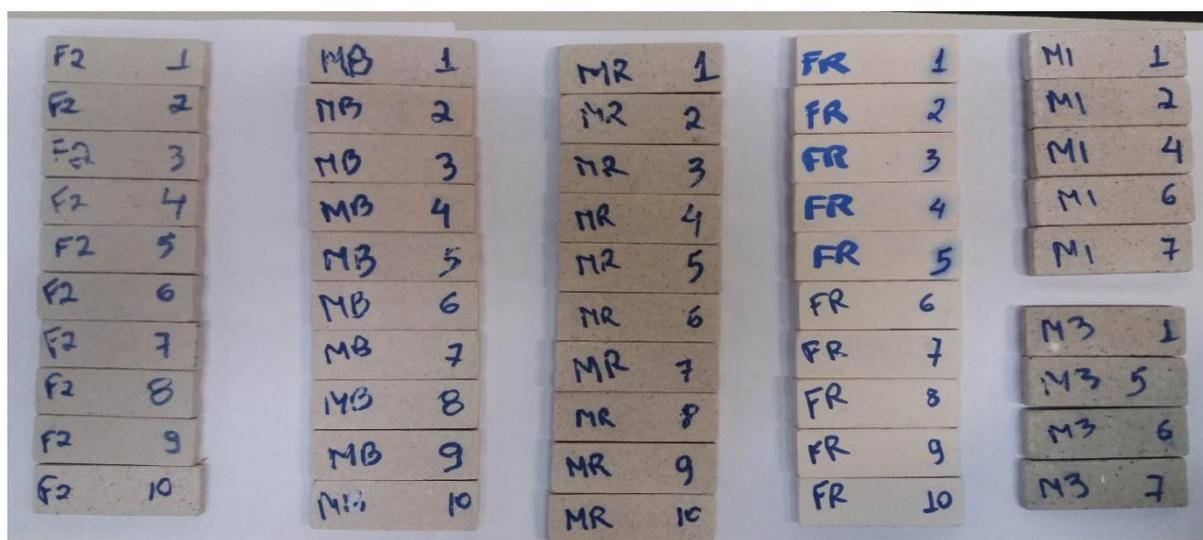
Fonte: Produzida pelo próprio autor.

### ANEXO V – Corpos de prova prensados fase 2



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

### ANEXO VI– Corpos de prova prensados fase 3



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

**ANEXO VII – Corpos de prova prensados fase 4**

Fonte: Produzida pelo próprio autor.