

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**OLAF GRAUPMANN**

**USO DA CINZA DE RESÍDUO URBANO EM CERÂMICAS VERMELHAS**

**TESE**

**CURITIBA**

**2022**

**OLAF GRAUPMANN**

**USO DA CINZA DE RESÍDUO URBANO EM CERÂMICAS VERMELHAS**

**Use o urban waste ash in red ceramics**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Vsévolod Mymrne, Ph.D.

**CURITIBA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



OLAF GRAUPMANN

**USO DA CINZA DE RESÍDUO URBANO EM CERÂMICAS VERMELHAS**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 24 de Março de 2022

Prof Vsevolod Mymrine, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Alfredo Iarozinski Neto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Luana Cechin, Doutorado - Universidade do Contestado (Unc)

Prof Luiz Carlos Weinschutz, Doutorado - Universidade do Contestado (Unc)

Prof Ronaldo Luis Dos Santos Izzo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/04/2022.

Dedico este trabalho a minha  
família, meu alicerce em tudo, gratidão.



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

A minha esposa Edilene H. Graupmann pelo apoio e estar junto sempre.

Aos meus filhos Susan e Arthur H. Graupmann pela compreensão e carinho nos momentos de ausência.

Ao meu orientador Prof. Vsévolod Mymrine, Ph.D pela confiança e aprendizado.

A UTFPR pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos.

Aos amigos pela valiosa colaboração na escrita da tese.

“A diferença entre o possível e o impossível  
está na vontade humana.” LOUIS PASTEUR.

## RESUMO

GRAUPMANN, Olaf. Uso da cinza de resíduo urbano em cerâmicas vermelhas. **TESE (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL) UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. CURITIBA, 2022.**

Na contemporaneidade, se produz um alto índice de resíduos sólidos urbanos, o qual traz consequências indesejadas para o ser humano, bem como a todo meio ambiente. Entende-se a necessidade de ser amenizada a quantidade de resíduos sólidos depositados na natureza, causam problemas ambientais, esse poderá passar por um processo de “queima” (gaseificado) transformado em cinza. Após este processo, pode-se utilizar na construção civil como componente para a confecção de novos produtos, ao substituir um percentual de determinadas matérias primas. O estudo tem por objetivo desenvolver produtos para a construção civil em cerâmicas que utiliza resíduos industriais tais como: resíduo de vidro, escória de alto forno, areia de fundição, cinza de resíduos sólidos urbanos e argila natural e, ao mesmo tempo em que atendam às propriedades dos produtos cerâmicos utilizados na construção civil. Para a realização da pesquisa foi utilizado o método de pesquisa experimental, nas quais foram realizados ensaios físicos, químicos e térmicos dentre os quais se destacam: FRX, DRX, MEV, EDS, e ensaios de resistência na flexo compressão. Após ser realizada a pesquisa com diferentes composições, com a utilização de resíduos, em cerâmicas, observou-se que a maiorias das composições testadas atingiram resultados satisfatórios, a composição que atingiu os melhores resultados foram à mistura com 75% de resíduos e somente 25% de argila natural. As composições que continham cinza tiveram um aumento na resistência e boa absorção de água.

**Palavras-chave:** 1. Construção civil 2. Rejeitos sólidos 3. Cerâmica 4. Cinzas.

## ABSTRACT

GRAUPMANN, Olaf. Use of urban waste ash in red ceramics. Thesis (Postgraduate Program in Civil Engineering) Federal Technological University of Paraná). Curitiba, 2022.

In contemporary times, a high rate of urban solid waste is produced, which brings unwanted consequences for the human being, as well as the entire environment. It is understood the need to mitigate the amount of solid waste deposited in nature, causing environmental problems, which may undergo a process of "burning" (gasified) turned into ash. After this process, it can be used in civil construction as a component for the manufacture of new products, by replacing a percentage of certain raw materials. The study aims to develop products for civil construction in ceramics that use industrial waste such as: waste glass, blast furnace slag, foundry sand, ash from urban solid waste and natural clay and, at the same time that they meet the properties of ceramic products used in civil construction. To carry out the research, the experimental research method was used, in which physical, chemical and thermal tests were carried out, among which: FRX, DRX, SEM, EDS, and resistance tests in flexural compression. After the research was carried out with different compositions, with the use of residues, in ceramics, it was observed that most of the compositions tested reached satisfactory results, the composition that reached the best results was the mixture with 75% of residues and only 25% of natural clay. Compositions containing ash had an increase in strength and good water absorption.

Keywords: 1. Civil construction 2. Solid waste 3. Ceramics 4. Ash.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Análise bibliométrica cerâmica e cinza.....	26
Figura 2 -	Análise bibliométrica de cerâmica, argila vermelha e cinza.....	28
Figura 3 -	Composições após a queima de 850°C antes do resfriamento..	41
Figura 4 -	Cinza de resíduos municipais.....	45
Figura 5 -	Distribuição granulométrica da cinza.....	46
Figura 6 -	Composição Mineral da cinza de lixo urbano pelo método DRX	49
Figura 7 -	Pontos analisados pelo EDS da cinza e resíduo após o processo de gaseificação.....	49
Figura 8 -	Mapeamento dos estados químicos individual de cada elemento químico encontrado na amostra de cinza de resíduos municipal o qual foi realizado por espectro de absorção de raio-x tomográfica.....	50
Figura 9 -	Imagem da amostra de argila natural.....	52
Figura 10 -	Difração de Raio-x ( DRX) da Argila Natural.....	54
Figura 11 -	MEV microimagem da argila natural.....	55
Figura 12 -	Micro imagem de EDS de argila com ampliação diferente.....	56
Figura 13 -	Mapeamento dos estados químicos individuais de cada elemento químico encontrado na amostra de argila utilizada, o qual foi realizado por espectro de absorção de raios-x tomográfica .....	57
Figura 14 -	Imagem da areia de fundição utilizada na pesquisa.....	58
Figura 15 -	Difração de raio-x (DRX) da escória de alto forno .....	60
Figura 16 -	MEV Microscopia de imagem da areia de fundição.....	61
Figura 17 -	Mapeamento dos estados químicos de um elemento dentro de uma amostra de areia de fundição (Usando espectroscópio de absorção de raio-x tomográfica).....	62
Figura 18 -	Imagem da amostra de escória de auto forno utilizada na pesquisa	63
Figura 19 -	Difração de raio-x (DRX) da escória de alto forno.....	65
Figura 20 -	MEV Microimagem da Escória de alto forno.....	66
Figura 21 -	Mapeamento dos estados químicos de um elemento dentro de uma amostra de escória de alto forno (usando o método de espectroscopia de absorção de raios-x tomográfica).....	68
Figura 22 -	Imagem do resíduo de vidro.....	69
Figura 23 -	Difração de raio-x ( DRX) da resíduos de vidro.....	71

Figura 24 - Imagem de resíduo de vidro pelos métodos de microimagem de varredura MEV.....	71
Figura 25 - Imagem de resíduo de vidro pelos métodos de microimagem de varredura MEV com aproximação de 600 vezes .....	72
Figura 26 - Composições após a queima de 850°C.....	76
Figura 27 - CP's após queima de 1025°C.....	77
Figura 28 - CP's da composição 09 e 31, após ensaio de resistência, queimado a 1000°C.....	79
Figura 29 -Composição mineral da amostra 09, temperatura 850°C por DRX	89
Figura 30 - Estrutura morfológica por MEV, amostra 09, temperatura 850°C..	90
Figura 31 - Pontos analisados pelo EDS da composição 09 após queima com temperatura 850°C.....	91
Figura 32 - Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico da amostra 09, temperatura 850°C.....	93
Figura 33 -Composição mineral da amostra 09, temperatura 1000°C por DRX	94
Figura 34 -Estrutura morfológica por MEV, composição 09, temperatura 1000°C	95
Figura 35 - Pontos analisados pelo EDS da composição 09 após queima com temperatura 1000°C.....	96
Figura 36 - Mapeamento de elementos químicos principais da amostra 09, temperatura 1000°C.....	98
Figura 37: Composição mineralógica da amostra 31 por DRX após de queima com temperatura 850°C .....	101
Figura 38 - Estrutura morfológica por MEV, amostra 31, temperatura 850°C	102
Figura 39 - Pontos analisados pelo EDS da composição 31 após queima com temperatura 850°C.....	103
Figura 40 - Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico da amostra 31, temperatura 850°C.....	104
Figura 41 -Composição mineral da amostra 31, temperatura 1000°C por DRX	105
Figura 42 -Estrutura morfológica por MEV, amostra 31, temperatura 1000°C	106
Figura 43 - Pontos analisados pelo EDS da composição 31 após queima com temperatura 1000°C.....	107
Figura 44 - Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico da amostra 31, temperatura 1000°C.....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria, densidade e umidade da cinza de resíduos urbano....	46
Tabela 2 - Óxidos presentes na cinza de resíduos municipal pelo método FRX..	47
Tabela 3 - Composição química pelo método de EDS da cinza de resíduo municipal.....	51
Tabela 4 - Granulometria da argila natural, densidade e umidade.....	52
Tabela 5 - Óxidos presentes na argila natural pelo método FRX.....	53
Tabela 6 - Composição química da argila pelo método de EDS.....	56
Tabela 7 - Granulometria, densidade e umidade da areia de fundição.....	58
Tabela 8 - Composição química da areia de fundição pelo método FRX em%....	59
Tabela 9 – Composição química da areia de fundição.....	61
Tabela 10 - Granulometria, densidade e umidade da escória de auto forno.....	64
Tabela 11 - Composição química da escória de alto forno pelo método FRX.....	64
Tabela 12 - Composição química pelo método de EDS da escória de alto forno utilizada.....	67
Tabela 13 - Granulometria densidade e Umidade do resíduo de vidro.....	69
Tabela 14 - Composição química do resíduo de vidro pelo método FRX.....	70
Tabela 15 - Composição química pelo método de EDS de resíduo de vidro.....	73
Tabela 16 - Resistência à flexão das cerâmicas após de queima com T°.....	75
Tabela 17 - - Retração linear (%) das cerâmicas T°C.....	80
Tabela 18 - Absorção de água das cerâmicas desenvolvidas nas diferentes temperaturas de queima (%).....	83
Tabela 19 - Densidade das composições moldadas (g/cm <sup>3</sup> ).....	86
Tabela 20: Composição Química pelo Método de EDS da amostra 09, temperatura 850°C.....	90
Tabela 21: Composição micro química de novas formações da composição 09.....	97
Tabela 22: Composição Química pelo Método de EDS da amostra 31, temperatura 850°C.....	103
Tabela 23: Composição Química pelo Método de EDS da amostra 31, temperatura 1000°C.....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS

FRX	Fluorescência de Raio X
DRX	Difração de Raio X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Mega Pascal (Unidade de Tenção)
EDS	Espectroscopia de raio-x de energia dispersiva
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Cp	Corpo-de-prova
Hrs	Horas
Kg	Quilograma
Kg/m <sup>3</sup>	Quilo grama por Metro Cúbico
LAMIR	Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – UFPR
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
mm	Milímetro
mA Mili	Ampere
NBR	Norma Brasileira
PR	Paraná
Ton	Tonelada
UFPR	Universidade Federal do Paraná
ES	Escória de auto forno
AF	Areia de fundição
VR	Vidro em pó
CM	Cinza de resíduo Municipal
AAN	Argila Arenosa Natural



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>19</b>
1.2	OBJETIVO GERAL .....	19
1.2.1	Objetivos específicos.....	19
1.3	JUSTIFICATIVA .....	19
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	20
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
2.1	USO DA CINZA.....	22
2.1.1	Formas de obtenção de cinza de resíduos urbanos.....	22
2.1.2	Uso de cinza em concretos e argamassas.....	23
2.1.3	Uso de cinza em cerâmicas.....	25
2.1.4	Uso de cinza em estradas.....	28
2.2	ESCÓRIA DE ALTO FORNO.....	29
2.2.1	Quanto à produção de materiais ligantes.....	29
2.2.2	Quanto à produção de concretos.....	30
2.2.3	Construção de estradas com escória de alto forno.....	31
2.2.4	Produção de cerâmicas com escórias.....	32
2.3	AREIA DE FUNDIÇÃO.....	33
2.3.1	Uso da areia de fundição no concreto.....	33
2.3.2	Utilização de areia de fundição para produção de blocos de cimento.....	34
2.3.3	Produção de cerâmicas com a utilização de areia de fundição.....	34
2.4	RESÍDUO DE VIDRO.....	35
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>44</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	44
4.1.1	Caracterização da Cinza de Resíduos Municipais (CM).....	44
4.1.2	Granulometria da cinza de resíduos sólidos urbanos.....	46
4.1.3	Composição química do (CM) pelo método FRX.....	47
4.1.4	Caracterização da cinza de resíduo municipal pelo método de DRX.....	48
4.1.5	Caracterização da cinza de resíduo municipal pelo método de MEV e EDS.....	49
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA NATURAL.....	52

4.2.1	Granulometria da argila natural utilizada.....	52
4.2.2	Caracterização da argila natural composição química pelo método de FRX.....	53
4.2.3	Caracterização da argila natural pelo método de DRX.....	53
4.2.4	Caracterização da argila natural pelo método MEV e EDS.....	54
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DE FUNDIÇÃO.....	58
4.3.1	Granulometria da Areia de Fundição utilizada.....	58
4.3.2	Caracterização da Areia de Fundição composição química pelo método de FRX.....	59
4.3.3	Caracterização da Areia de Fundição pelo método de DRX.....	59
4.3.4	Caracterização da Areia de Fundição pelo método MEV e EDS....	60
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE AUTO FORNO.....	63
4.4.1	Granulometria da escória de auto forno.....	63
4.4.2	Caracterização da escória de auto forno composição química pelo método de DRX.....	64
4.4.3	Caracterização da escória de auto forno pelo método MEV e EDS	65
4.4.4	Caracterização da escória de alto forno pelo método de DRX.....	65
4.5	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO.....	70
4.5.1	Granulometria de resíduo de vidro utilizada.....	70
4.5.2	Caracterização do resíduo de vidro pela composição química no método de FRX.....	71
4.5.3	Caracterização do resíduo de vidro pelo método de DRX.....	71
4.5.4	Caracterização de resíduo de vidro pelo método MEV e EDS.....	72
4.6	RESULTADOS E CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS DESENVOLVIDAS.....	74
4.7	RESISTÊNCIA A FLEXÃO DOS COMPÓSITOS DESENVOLVIDOS.....	75
4.8	RETRAÇÃO LINEAR DAS CERÂMICAS DESENVOLVIDAS.....	80
4.9	ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS CERÂMICAS DESENVOLVIDA.....	83
4.10	DENSIDADE DAS COMPOSIÇÕES.....	86
<b>5.</b>	<b>OS PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DE FORMAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CERÂMICAS DESENVOLVIDAS.....</b>	<b>89</b>
5.1	Os processos de formação da estrutura das cerâmicas da composição 09 após a queima com a temperatura de 850°C.....	89
5.1.1	Composição mineralógica da cerâmica da composição 09 após a queima com a temperatura de 850°C.....	90
5.1.2	Estrutura micro morfológica da cerâmica da composição 09 através do método MEV com temperatura de queima de 850°C.....	90

5.1.3	Composição microquímica pelo método EDS das novas formações da cerâmica da composição 09 após a queima em 850°C.....	91
5.1.4	Distribuição dos elementos químicos (mapeamento) nas novas formações da cerâmica da composição 9 após a queima e 850°C.....	93
5.2	OS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DAS CERÂMICAS DA COMPOSIÇÃO 09 APÓS A QUEIMA COM A TEMPERATURA DE 1000°C.....	94
5.2.1	Composição mineralógica da cerâmica da composição 09 após a queima com a temperatura de 1000°C.....	95
5.2.2	Estrutura micro morfológica da cerâmica da composição 09 através do método MEV com temperatura de queima de 1000°C.....	95
5.2.3	Composição microquímica pelo método EDS das novas formações da cerâmica da composição 09 após a queima em 1000°C.....	97
5.2.4	Distribuição dos elementos químicos (por mapeamento) nas novas formações da cerâmica da composição 9, após a queima com 1000°C.....	98
5.3	ANÁLISE COMPARATIVA DAS COMPOSIÇÃO 9 NAS TEMPERATURAS DE 850° E 1000° QUANDO ANALISADO OS RESULTADOS DO EDS, MEV RESISTÊNCIA, ABSORÇÃO DE ÁGUA DENSIDADE.....	99
5.4	OS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DAS CERÂMICAS DA COMPOSIÇÃO 31 APÓS A QUEIMA COM A TEMPERATURA DE 850°C.....	101
5.4.1	Composição mineralógica da cerâmica da composição 31 após a queima com a temperatura de 850°C.....	101
5.4.2	Estrutura micro morfológica da cerâmica da composição 31 através do método MEV com temperatura de queima de 850°C .....	102
5.4.3	Composição microquímica pelo método EDS de novas formações da cerâmica da composição 31 após a queima em 850°C.....	104
5.4.4	Distribuição dos elementos químicos (mapeamento), nas novas formações da cerâmica da composição 31 após a queima e 850°C..	105
5.5	OS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DAS CERÂMICAS DA COMPOSIÇÃO 31 APÓS A QUEIMA COM A TEMPERATURA DE 1000°C.....	106
5.5.1	Composição mineralógica da cerâmica da composição 31 após a queima com a temperatura de 1000°C.....	106
5.5.2	Estrutura micro morfológica da cerâmica da composição 31 através do método MEV com temperatura de queima de 1000°C.....	107
5.5.3	Composição microquímica pelo método EDS das novas formações da cerâmica da composição 31 após a queima em 1000°C.....	108
5.5.4	Distribuição dos elementos químicos, por mapeamento, nas novas formações da cerâmica da composição 31 após a queima e	

	1000°C.....	109
5.6	ANÁLISE COMPARATIVA DAS COMPOSIÇÃO 31 NAS TEMPERATURAS DE 850° E 1000° QUANDO ANALISADO OS RESULTADOS DO EDS, MEV RESISTÊNCIA, ABSORÇÃO DE ÁGUA DENSIDADE.....	111
6.	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>113</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>116</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, a construção civil é um dos setores estratégicos para a economia de qualquer país. Esse nicho de mercado engloba vários setores que podem criar grande número de postos de trabalho.

Infere-se que se está há produzir um alto índice de resíduo sólido urbano, o qual traz consequências indesejadas para o ser humano, bem como a todo meio ambiente.

Para que possa ser amenizada a quantidade de resíduos sólidos industriais, descartados na natureza, é necessário o estudo com ênfase em aproveitar esses recursos depositados na natureza e que podem levar a problemas ambientais ou gerar passivos ambientais de longa duração.

São extraídas toneladas de argila natural todos os anos para a produção de diversos tipos de cerâmicas, dentre elas, para produção de revestimento e blocos maciços ou vasados de cerâmica, com característica porosa ou não.

Tem-se como principal componente da cerâmica desenvolvida, a cinza, a qual é um produto resultante da gaseificação de resíduos sólidos urbanos coletados nas residências por empresas do ramo de coleta de lixo. Antes de ser realizada a gaseificação dos resíduos sólidos, é organizada a triagem dos materiais possíveis de reciclagem, tais como metais, plásticos e papéis.

A tecnologia cada vez mais avança para projetos de incineradores desses resíduos. Essas cinzas sólidas correspondem entre 10% a 30% da massa dos resíduos urbanos. Como esse resíduo é uma cinza sólida inerte, ela pode ser utilizada na fabricação de cimento, materiais de construção e produtos cerâmicos. (COUTINHO; VIEIRA, 2016).

Países desenvolvidos utilizam a incineração de resíduos para a redução desses resíduos, dessa forma ressalta-se que a cinza utilizada nessa pesquisa, demonstra a relação da quantidade de cinza que é produzida e a diminuição do seu volume. (HJELMAR, 1996).

Entretanto, na Cidade de Mafra Santa Catarina, foi desenvolvido trabalho no qual foi utilizado cinza proveniente da gaseificação de resíduos sólidos urbanos, sendo utilizado como substituto parcial do agregado miúdo na produção de concretos, ao apresentar resultado positivo nos ensaios de resistência a compressão. (GRAUPMANN et al. 2019).

Nesse contexto, para aproveitamento, tem-se a pesquisa apresentada por Mymrine et al. (2018) onde foi avaliado a resistência da cerâmica branca com o uso de caulim convencional, e adicionado 10% de lama de lavanderia ao atingir 12,52 Mpa de resistência, em comparação com 6,28 Mpa da cerâmica produzida somente com argila de caulim convencional ao produzir um importante produto para destinação correta da lama de lavanderia.

E ainda, na composição dos traços onde é utilizada escória de auto forno, material já difundido para produção de diversos tipos de materiais de construção, porém em sua maioria, onde ocorre a produção em volume médio de escória, normalmente é longe de grandes empresas de cimento, portanto inviabiliza a junção dessas matérias primas para a produção de novos materiais, e, assim este material acaba sendo depositado em aterros sanitários. Segundo Reuter et al. (2004) o volume produzido de escória de alto forno depende principalmente da extração de minério de ferro e outros minerais necessários para a fundição destes minérios.

Em relação a areia de fundição, este é um resíduo da indústria de peças, é utilizada na confecção de moldes com areia e outros ligantes, e na sequência despejado o metal líquido soldante, após é destruído o molde, moído até atingir a granulometria de areia e quando possível, repetido o processo de moldagem quando não é mais possível esta areia é descartada. Ao produzir volumes consideráveis de areia de fundição. Pode-se destacar que um dos maiores problemas para a reciclagem da areia de fundição é as condições que este material é submetido quando na moldagem das peças, portanto, sofre constantes choques térmicos ao alterar as propriedades da areia de fundição em comparação com a areia natural.

Outro componente, o pó de vidro, é um resíduo da indústria de vidro, quando do polimento ou do corte destes, para posterior processo de temperamento, pode ser utilizado na composição das cerâmicas, infere-se ser vantajoso, ao observar as propriedades químicas, serem compatíveis com a argila na qual, incorpora propriedades fundentes dentre outras vantagens.

Pretendeu-se com a tese desenvolver composições capazes de utilizar o máximo de rejeitos sólidos da indústria, com cinza de resíduos sólidos urbano e argila natural, para a produção de cerâmicas para diversas finalidades, nas quais, destaca-se cerâmicas para tijolos maciços, cerâmicas porosas e cerâmicas para pisos ou paredes esmaltadas ou não.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade para desenvolver produtos em cerâmicas que utilize resíduos industriais, cinza de resíduos sólidos urbanos bem como o único componente natural a argila, e ao mesmo tempo que atendam às propriedades dos produtos cerâmicos utilizados na construção civil.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os materiais utilizados nesta pesquisa;
- Desenvolver compósitos que atendam às Normas Brasileiras para materiais de construção;
- Estudar os processos físico-químicos, das amostras durante a queima;
- Conhecer a influência e a função de cada compósito das misturas;
- Explicar o significado e origem da formação de novas composições químicas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A relevância do presente estudo está em produzir novos materiais para a construção civil, utilizando rejeitos sólidos urbanos, sendo que estes, causam impacto negativo nos aterros sanitários, pois normalmente são descartados sem outra utilidade.

Com a investigação e experimentos em laboratório, pode-se atestar se determinado componente pode ser utilizado na confecção de novos produtos a partir da cinza oriunda da queima dos rejeitos. Essa viabilidade, poderá diminuir os rejeitos sólidos urbanos descartados pelas cidades e produzindo cerâmica vermelha para utilização comercial ou doméstica.

Nesta pesquisa experimental, comprovada sua eficiência, o produto final, pode vir a garantir um preço menor para o consumidor e resolvendo o problema ambiental do descarte dos resíduos sólidos tanto em aterros quanto descartados em locais impróprios.

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

Para organizar a tese, foi dividida nos seguintes capítulos:

1. Introdução - apresenta os aspectos gerais do tema abordado: uma breve introdução, os objetivos e a justificativa da pesquisa.
2. Revisão da literatura – com a descrição de trabalhos já realizados sobre o tema da tese, análises de trabalhos relevantes e materiais que estão sendo utilizados.
3. Metodologia – descreve os passos detalhadamente de como a pesquisa foi desenvolvida, com os equipamentos utilizados para identificar as características das matérias-primas utilizadas.
4. Os resultados e discussões com a caracterização dos resíduos e materiais que estão sendo utilizados na pesquisa.
5. Os processos físicos químicos de formação das estruturas de cerâmicas desenvolvidas com a caracterização das cerâmicas produzidas – identificação e análise das propriedades dos materiais que compõem as cerâmicas.
6. Conclusão – descrever as respostas às perguntas constantes nos objetivos e propor conclusões detalhadas sobre as etapas da pesquisa.
7. Referências utilizadas para a realização da pesquisa.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

A cinza utilizada é um produto resultante da queima de resíduos sólidos urbanos. A tecnologia cada vez mais avança para projetos de incineradores desses resíduos. Essas cinzas sólidas correspondem entre 10% a 30% da massa dos resíduos urbanos. Como esse resíduo é uma cinza sólida inerte, ela pode ser utilizada na fabricação de cimento, materiais de construção e produtos cerâmicos. (Reddy, 2011; Niessen, 2002).

Na literatura nacional e internacional, em que é abordado o uso de cinzas, cita-se com maior destaque: cinzas de madeira, sendo principal objetivo a ativação das propriedades pozolânicas desses materiais. Apresenta-se o trabalho de Ramos et al. (2013) que propõe traços de argamassa com cinzas de resíduos de madeira. Nesse trabalho, os autores concluem que o uso de cinza de madeira na composição de argamassa, na substituição parcial da parte pozolânica do cimento apresenta bons resultados, sendo possível o uso da cinza de madeira, pois, ela leva a maior resistência e contribui para que se possam ter edificações com foco na sustentabilidade. Infere-se que as composições químicas das cinzas de madeira, utilizados pelos autores possuem as seguintes composições químicas: SiO<sub>2</sub>, (73,01%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11,93%), as quais são as principais responsáveis pela ativação pozolânica da argamassa estudada.

Em artigo apresentado por Hable et. Al. (2019) no qual foi utilizado cinza da queima de madeira em caldeira de empresa de celulose, as composições foram expostas a altas temperaturas, a cinza foi utilizada em substituição ao agregado miúdo e apresentou uma boa capacidade pozolânica ao conferir no concreto maior resistência a compressão. Para os concretos que não foram expostos a elevadas temperaturas os melhores resultados foram quanto a substituição da areia por cinza, ficou entre 2% e 10 %, as composições com 5% de substituição da areia por cinza e submetidas a altas temperaturas apresentaram resistências próximas ao de concretos sem o uso de cinza.

Em trabalho apresentado por Itô (2014) os resíduos urbanos podem ser destinados de três maneiras, em aterros sanitários, controlados e lixões. Os lixões e aterros controlados apresentam problemas parecidos, porém com a única diferença em que os lixões ficam a céu aberto e os aterros controlados são cobertos por terra.

Hjelmar (1996) aponta que a incineração de resíduo urbano e a utilização de aterros sanitários são os principais métodos na gestão de resíduos no mundo.

## 2.1 USO DE CINZA

Em estudo apresentado por Ramos et al. (2013) indicou utilização de cinza de madeira que apresentada dois principais componentes químicos  $\text{SiO}_2$  (dióxido de silício) 73,01% e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio) 11,93%. A cinza foi aproveitada na produção de argamassa e substitui parcialmente o material pozolânico no cimento. Essa substituição manteve as características de resistência da argamassa, a melhorar a sua durabilidade e para contribuir com a questão da sustentabilidade na Construção Civil.

### 2.1.1 Formas de obtenção de cinza de resíduos urbanos

A cinza que foi utilizada na presente pesquisa é resíduo do processo de gaseificação de um gaseificador localizado na cidade de Mafra no Estado de Santa Catarina (o qual parou seu funcionamento em 2020). Segundo Lopes (2014) em um processo de gaseificação com processo de combustão na sequência pode liberar menores quantidade de poluentes se comparado ao processo de incineração comum ou com sistema de tratamento dos gases de combustão. No gaseificador utilizado para a geração da cinza utilizada na presente tese, o processo de gaseificação utiliza como gaseificante o ar atmosférico, com sistema de leito com grelas móveis, com câmeras unidas a um sistema de combustão torcional.

Lino; Ismail (2017) apontam que países da Ásia, América e Europa apresentam tratamento com resíduos urbanos ao utilizar como principal destino a compostagem, reciclagem ou incineração. Na Austrália, recicla ou faz compostagem de 59 % do seu resíduo, o Japão incinera 80%, e no Brasil 96,1% do resíduo vai para aterros sanitários.

Quando incinerado os resíduos urbanos podem ter uma redução de 90% de seu volume e de até 75% de seu peso, ainda pode-se utilizar em diversos tipos de empreendimentos, como por exemplo, em alguns países, a cinza ser utilizada em construção de estradas. (TABASOVÁ, 2012).

Em trabalho apresentado por Dovetail Partners (2010), aponta que incineradores modernos proporcionam combustão de forma completa, ao alcançar temperaturas de 1000°C a 2000°C, ao facilitar assim, a utilização deste calor e melhorar o controle dos gases emitidos.

Pesquisa de Coutinho; Vieira (2016) os principais componentes químicos da RSU (resíduos sólidos urbanos) quando incineradas entre as temperaturas de 1000°C e 1450°C são a Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ).

### 2.1.2 Uso de cinza em concretos e argamassas

O uso de cinza obtido a partir da gaseificação de resíduo urbano foi estudado por Hable et. Al. (2019), que obteve resultados de resistência do concreto, quando há substituição de areia natural por cinza da gaseificação de resíduo urbano. No trabalho foi realizada a substituição de 5%, 10% e 15% de cinza em relação a areia de rio, ao apontar que na composição com 5% de cinza em substituição da areia é o traço com melhores resultados (24,98 Mpa nos 21 dias), porém com resistência um pouco inferior em relação a resistência do traço padrão sem o uso de cinza o qual chegou a 29,35 Mpa aos 21 dias.

Após realizado um apanhado sobre a literatura nacional e internacional, em que é abordado sobre o uso de cinzas, obteve-se maior destaque, os com cinzas de madeira, sendo o principal objetivo a ativação das propriedades pozolânicas destes materiais. Pode-se citar Ramos et al. (2013) propõem traços de argamassa com cinzas de resíduos de madeira. Neste trabalho, os autores concluem que o uso de cinza de madeira na composição de argamassa, na substituição parcial da parte pozolânica do cimento, apresenta bons resultados, sendo possível o uso da cinza de madeira, pois, leva a maior resistência e contribui para que pudesse ter edificações com ênfase na sustentabilidade. Ressalta-se que as composições químicas das cinzas de madeira utilizadas pelos autores possuem as seguintes composições químicas:  $\text{SiO}_2$  (dióxido de silício) 73,01% e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio) 11,93%, os quais são as principais responsáveis pela ativação pozolânica da argamassa estudada.

Em estudo com cinza de madeira em concreto Siddique (2012), utilizou vários tipos de cinza de madeira que tinham elevado teor de  $\text{SiO}_2$  (8,1 – 50,7) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (7,5 - 17,1%) observa-se que com a utilização da cinza de madeira ocorria

uma ligeira diminuição nas propriedades de resistência do concreto, conforme era aumentado o teor de cinza de madeira, porém, também voltava a aumentar a resistência com a evolução da idade do concreto, devido a atividade pozolânica. Já quando da atividade pozolânica não é o objetivo principal o autor trata esta substituição da cinza em relação ao cimento.

Para Cheah; Ramli (2011) em seus estudos utilizaram cinza de madeira como substituição parcial do cimento em concreto, no qual também observaram a diminuição da resistência do concreto, porém, apontou que, quando a substituição é na proporção de 10% ou menos ocorre um aumento da resistência à compressão, infere-se que não parece ser muito vantajoso a substituição em pequenas proporções como até 10% do uso do cimento em misturas para concreto.

Em outra pesquisa, Cheah; Part (2015) apontaram que misturar cinza de madeira de alto cálcio, e cinzas de combustíveis pulverizados, pode ser empregado na fabricação de blocos de argamassa com resistências compatíveis das normas vigentes. Outro autor que estudou a utilização de cinza de madeira em concreto foi Chowdhury, Mishra, Suganya (2015) no qual os resultados foram semelhantes aos outros autores aqui já citados, em que com a adição de cinza de madeira verifica-se uma diminuição da resistência do concreto, bem como apresenta-se que: com o aumento da idade do concreto há um aumento da resistência. Em outro estudo apontou-se que para a produção de cimento é necessário a utilização de muita energia, sendo assim, o uso de cinza uma alternativa para a redução do consumo de cimento e conseqüentemente ao otimizar o uso de recursos naturais.

Alguns artigos apresentam o uso de cinza para a produção de blocos leves tendo em vista a baixa densidade de massa da cinza. Torkaman; Ashori; Momtazi (2014) elaboraram experimento em que utilizaram cinza de casca de arroz, resíduos de fibra de madeira e resíduos de calcário em pó, no qual concluíram que a porcentagem ideal na substituição de materiais tradicionais por resíduos que tenham boas características físicas e mecânicas é de 25%. Já em Yliniemi et al. (2016) apresentou pesquisa em que prova, que é possível aumentar a adição de cinza e obter produtos de boa qualidade com a graduação simultânea e ativação alcalina para produção de agregados leves.

Estudo apresentado por Hable et al. (2019) foi aproveitado a cinza resultante da queima de madeira por meio de uma caldeira. As composições, foram feitas a partir da substituição do agregado miúdo pela cinza e foram expostas a altas

temperaturas, assim apresentaram boa capacidade pozolânica ao conferir ao concreto maior resistência à compressão. Os concretos que não foram expostos a essas elevadas temperaturas, os melhores resultados foram com a substituição da areia por cinza ficaram entre 2% e 10 %. Quando analisadas com 5% de substituição da areia por cinza e submetida a altas temperaturas apresentaram resistências próximas ao de concretos com o uso apenas de material natural.

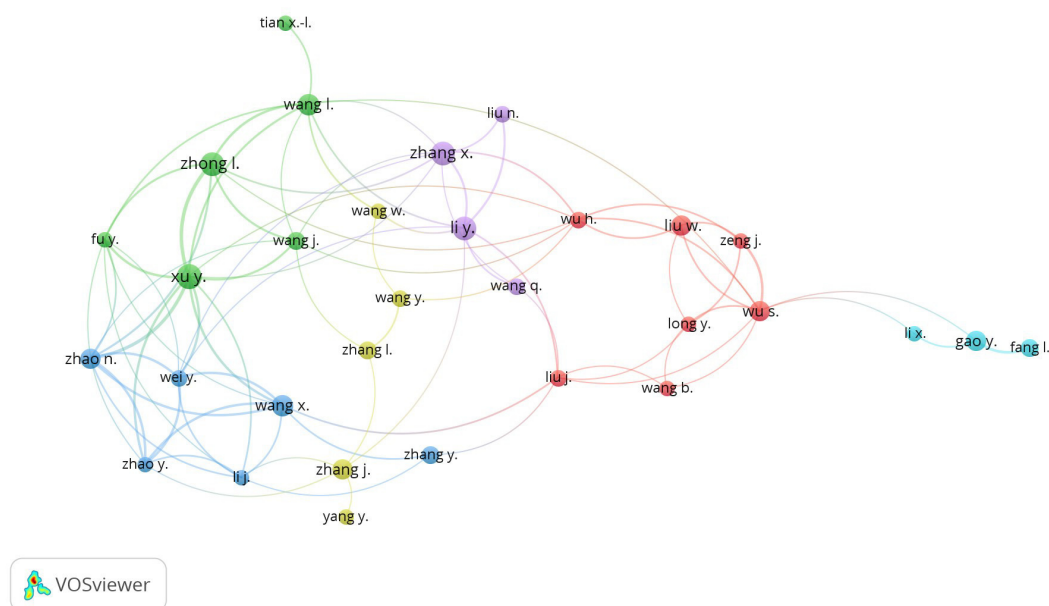
Bouzoubaa et al. (2002) utilizaram cinzas volantes com sílica e escória de alto forno, ao apresentar ganhos nas características do concreto. Bui, Hu, Stroeven (2005), apresentam que ao adicionar partículas finas junto da interface do agregado-matriz contribui para a diminuição da porosidade e por consequência aumenta a capacidade de os agregados se ligarem internamente, ao atribuir uma maior resistência ao concreto. Segundo Hertz (2003), o uso de materiais pozolânicos em concreto, os quais podem ser elevados a altas temperaturas, podem ocorrer problemas relacionados a densidade do concreto, ao fazer com que ele seja mais suscetível ao surgimento de fissuras ou trincas, ao acarretar em perda de resistência consideráveis.

Em trabalho apresentado por Graupmann et al. (2019) indica que a cinza de resíduos sólidos urbanos pode ser utilizada na substituição do agregado miúdo na proporção de até 5%, devido ao alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), quando em contato com hidróxido de cálcio contido do cimento aumenta a quantidade de silicato de cálcio hidratado ao contribuir com o aumento da resistência do concreto.

### 2.1.3 Uso de cinza em cerâmicas.

A cinza é um produto resultante da queima de resíduos sólidos urbanos. A tecnologia cada vez mais avança para projetos de incineradores desses resíduos. Essas cinzas sólidas correspondem entre 10% a 30% da massa dos resíduos urbanos. Como esse resíduo é uma cinza sólida inerte, ela pode ser utilizada na fabricação de cimento, materiais de construção e produtos cerâmicos. (REDDY, 2011; NIESSEN, 2002). Conforme figura abaixo, observa-se a solidez que vem ao acompanhar o grupo de pesquisa, o método de pesquisa bibliométrica foi coautoria de no mínimo 5 documentos por autor, quando a pesquisa é por cerâmica e cinza.

**Figura 01 – Análise bibliométrica cerâmica e cinza**



**Fonte: Autor, 2019**

A tendência no processo de fabricação de tijolos cerâmicos pode-se citar a utilização de resíduos pós-consumo. (SHAKIR, MOHAMMED, 2013). A argila utilizada no processo de fabricação dessas cerâmicas pode ser aproveitada para imobilizar íons de metais pesados que são prejudiciais. A argila pode também incorporar certa quantidade desses metais nas suas estruturas. Portanto, infere-se que a indústria cerâmica, pode usar grandes quantidades de resíduos industriais para a fabricação cerâmica, como as cinzas de combustão. (MYMRINE et al.,2014).

Observa-se em estudos de Wiemes et al. (2017), foi produzida cerâmica a partir de lamas residuais, resíduos de vidro, cinzas de madeira, argila vermelha e areia. Após serem realizadas com diferentes composições, observaram-se que a maioria das amostras testadas, atingiram o mínimo de resistência necessária, as melhores composições que atingiram os melhores resultados foi a mistura com 60% de resíduos. As amostras que continham cinza tiveram um aumento na resistência, já que ela tem boa absorção de água e porosidade constante e uniforme.

As cinzas da queima de carvão em centrais térmicas têm sido utilizadas para a fabricação de cerâmicas. Sua composição depende do material queimado e do seu armazenamento, mas pode conter até 20% de produtos orgânicos (VACLAVIKOVA, 2005). A adição dessa cinza com mais de 15% de matéria

orgânica não incinerada pode promover a cristalização heterogênea de cristais prismáticos. Essa cinza tem microelementos como alumínio, resíduo de carbono, quartzo e hematita sob a forma de microesferas, faz com que a utilização dessas cinzas de centrais térmicas para a fabricação de cerâmica, pode aumentar sua força e densidade e diminuir a absorção de água.

A cinza de carvão possui um alto teor de cálcio e, é utilizada com aditivo para matéria-prima de cerâmica, esse cálcio é um mineral importante na sua fabricação. Kaminskii; Selivanov; (2005), apresentaram diferentes combinações com cinza, para a fabricação de um tijolo com isolamento acústico foi utilizado 10% de cinza na sua composição e teve bons resultados.

Outro resíduo de cinza utilizado, é a queima de xisto combustível que contém carbonato de sódio, que teve uma boa absorção de água, e para esse produto, ele é suficiente, ao chegar à resistência de 15-20Mpa. (BOLTAKOVA et al. 2017).

A queima de lodo de esgoto resulta em cinzas, que foram estudadas por Princigallo (2003), para fabricação de tijolos. A cerâmica em seu processo de cristalização manteve os metais pesados presos em seu corpo, a fazer com que aumente sua força e reduza sua densidade.

Analizou-se a queima dos sedimentos de lodo ativo, com as quais foi possível a fabricação de blocos cerâmicos com argila, sedimentos do lodo e a cinza da queima do sedimento. Os resultados apresentaram melhoria na tecnologia de fabricação, baixo consumo de energia, redução da poluição ambiental e melhores propriedades do tijolo. (CASTÃO, 2017).

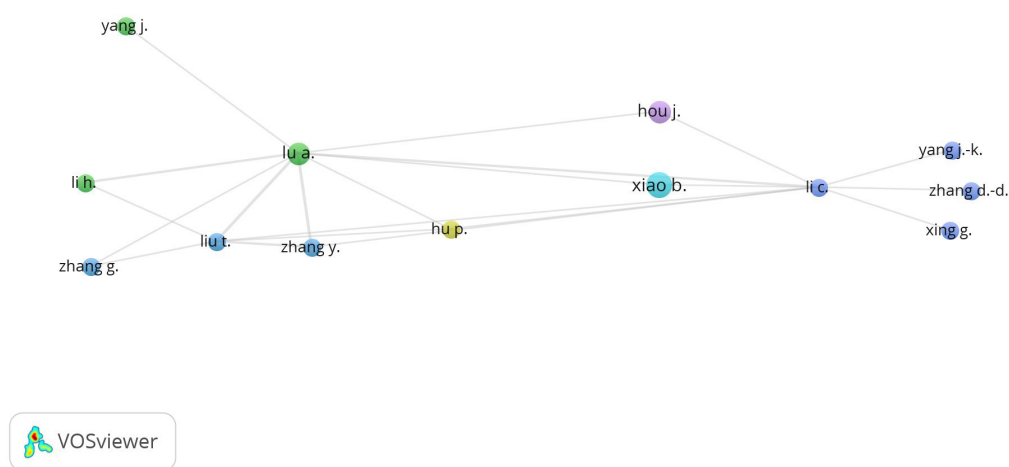
Em outro estudo próximo ao do lodo de esgoto, foi utilizada lama de resíduo de lavanderia, apresentado por Mymrine et al. (2018), essa lama foi queimada à 800°C, e cinza resultante, foi utilizada para a fabricação de cerâmica branca. Todas as amostras aumentaram a sua resistência com o aumento da temperatura. Algumas amostras com 10% de cinza da lama residual obtiveram resistência à flexão de até duas vezes maior que a amostras sem cinza.

Em pesquisa realizada com utilização da cinza de casca de arroz na produção de cerâmica vermelha, foram adicionados 10% de cinza nas composições testadas. Nas amostras queimadas acima de 850°C, apresentaram resultados satisfatórios, dentro dos limites estabelecidos. Em relação às amostras queimadas com temperatura menor, teve perda de resistência e maior absorção de água. Com

temperatura entre 900°C e 950°C, pode-se adicionar até 20% de cinza na sua composição. (QUINTANA et al., 1999).

Cinzas de incineração podem ser utilizadas como matéria-prima para a fabricação de telhas cerâmicas, mas devem ser extraídos os sais solúveis e outros componentes voláteis antes da sua fabricação, pois esses materiais podem causar problemas durante o processo. (WU et al., 2013). Pode-se analisar que o grupo de pesquisadores que abordam o uso de cinzas em cerâmicas vermelhas é coeso e percebe-se avanço e crescimento, conforme figura abaixo da análise bibliométrica sobre cerâmica, argila vermelha e cinza, a análise deu-se com base em autores que tiveram pelo menos 10 citações sobre o tema abordado.

**Figura 02 – Análise bibliométrica de cerâmica, argila vermelha e cinza**



**Fonte: Autor, 2019**

#### 2.1.4 Uso de cinza em estradas

A cinza de madeira é bastante utilizada em todo mundo, infere-se que sua utilização está atrelada a diferentes finalidades dentre elas destaca-se o uso de cinzas em estradas, solos e produção de Biodiesel. Uprety et al. (2016) usaram cinza de madeira como alternativa para químicos em obtenção de catalizadores



heterogêneos para a produção de biodiesel. Já Rey-Salgueiro et al. (2016) utilizaram a cinza de madeira no intuito de melhorar as características do solo.

Oburger et al. (2016), fizeram uso de cinza para a construção de estradas rurais sendo que a sua utilização foi acatada como apropriada, tendo em vista às propriedades tampão do solo na construção de estradas rurais.

Segundo Baldovino (2019), quando há adição de cinza de celulose e cal na composição com o solo silte amarelo da formação FG, observou-se aumento significativo na resistência de tração por compressão diametral na compressão simples. O estudo aponta que pode ser incluído no solo estudado até 15% de cinza de celulose.

## 2.2 ESCÓRIA DE ALTO FORNO

As escórias são produzidas por vários processos diferentes, portanto, existem diferentes tipos de escória. As principais diferenças consistem no tipo de fornalha utilizada, os diferentes tipos de matéria prima utilizado na composição do material a ser derretido, as diferentes composições químicas do minério utilizado no processo e como é feito a separação da escória do ferro.

As escórias de alto forno podem sofrer variações significativas ao se tratar da sua granulometria, forma, densidade. Podem-se ter problemas com escória de alto forno, se os pesquisadores não conhecerem completamente o processo em que foi obtida a escória, ao acarretar alguns erros como, por exemplo: o que chamam de escória granulada de material, no lugar de escória refrigerada a ar.

### 2.2.1. Quanto a produção de materiais ligantes

Em alguns estudos, foram encontrados pesquisadores que apresentam algumas concepções de uso de escória de alto-forno, como material aglomerante. Kumar et al (2008) indicou escória de cimento Portland, no qual foi utilizado clínquer ativado mecanicamente e escória, sendo que 85% do clínquer pode ser substituído por escória de alto forno, sem que fique prejudicado a resistência.

Também foi fundamentado que escória de alto-forno pode substituir o cimento, sendo apresentado estudo comparativo por Kim et al. (2013) com CaO Ca

(OH)<sub>2</sub> como potencial ativador para produção de ligantes não-cimentíceos, pois o uso de CaO resulta em resistências mecânicas mais elevadas que Ca(OH)<sub>2</sub>.

Segundo Lukowski; Salih (2015) a durabilidade de argamassas com solos granulados com escórias de alto forno em ambientes ácidos e sulfato adquirem mais lentamente o desenvolvimento das resistências, portanto, a resistência não é a única característica a ser observada.

Alguns autores apontam várias formas para o uso dos materiais como escória de alto forno. Em estudo de Jamshidi et al. (2015), destacaram que a produção de pasta de cimento, com a adição de escórias de alto forno com cimentos proporcionalmente, reduz a resistência à compressão aos 7 (sete) dias, na qual chegou à resistência de 40 Mpa na mistura com 50-70% de escória de alto forno. Porém quando realizado os ensaios de compressão aos 28 dias aumentou a resistência.

### 2.2.2. Quanto à produção de concretos

O concreto é um dos materiais mais importantes no mundo da construção civil, desta forma, ressalta-se que é contínuo seu estudo, com a intenção de procurar melhores formas de produção, na qual, obtenha produtos mais baratos e com melhores resultados nos quesitos preço, resistência dentre outros.

Os pesquisadores têm estudado com mais ênfase, as propriedades mecânicas do concreto, que foi produzido ao utilizar escórias de alto forno. Etxeberria et al. (2010) apontaram, que na produção de concretos que foram utilizados escória de alto forno, arco elétrico e escórias de forno na substituição e agregados graúdos, produz concretos com resistências superiores aos convencionais produzidos com materiais usuais da produção de concreto.

No trabalho de Lubeck et al. (2012), foi discutido que ao realizar as misturas 50-70% de cimento Portland Branco, sendo substituído por escórias de alto-forno, não foi observado diferenças significativas quando comparado a mistura de 100% de cimento Portland Branco. Assim, infere-se que pode ser substituído parcialmente o cimento Portland Branco por escória. Segundo Ozbay, Erdemir, Durmus (2016) quando utilizado escórias de alto forno graduada, observa-se aumento da resistência à compressão ao longo do tempo com melhoras significativas após 40 dias de cura.

Mauthoor; Mohee e Kowlessar (2016) apresentam em seus estudos que escórias de alto forno podem ser utilizadas como agregado e não somente como componente ativo, assim o arco elétrico preto, escória de alto forno quando resfriado naturalmente adquire melhores propriedades físicas em comparação com agregados naturais.

Estudos que apresentam tentativas de substituir parcialmente agregados naturais por escória de alto forno foi apresentada por Monosi; Ruello; Sani (2016) expuseram que ao realizar as substituições de componentes do concreto perceberam um aumento significativo da resistência à compressão do concreto, bem como não apresenta alterações na cura do concreto.

Quando utilizado cascalho natural de rio, se observou no estudo de Yeih et al. (2015), expuseram concreto que utilizou escória de alto forno com arrefecimento naturalmente no ambiente, apresenta resistências superiores em comparação quando utilizado areia de rio.

O concreto misturado, ao utilizar solo de escórias graduada de alto forno, casca de coco e areia de brita, foi estudada por Sekar et al. (2016), no qual apresentou resultados em que ao substituir 50% de cimento por escória, os resultados de resistência à compressão, foram de redução da resistência em 26%, 24%, 22%, respectivamente para as curas em água, vapor e câmara de cura.

### 2.2.3 Construção de estradas com escória de alto forno

A construção de estradas é uma das áreas que mais utilizam materiais naturais em suas diversas fases construtivas. Já há muito tempo é estudada a utilização de resíduos da indústria com a finalidade de empregar estes resíduos e/ou também baratear a construção de estradas. Dentre estes pesquisadores destacam-se os trabalhos de Mymrine; Ponte; Yamamoto (2003), esses apresentam diferentes produtos que podem ser produzidos com escórias de alto forno tais como: diques, lixeiras, telhas e tijolos.

O principal objetivo é ativar as propriedades ligantes da escória a melhorar os efeitos do CaO. Para melhorar a resistência, os autores apresentam que pode ser adicionado 2% de cimento Portland. Nos resultados apresentados, as amostras apresentaram resistência uniaxial após um ano de cura em 47,6 Mpa. Na pesquisa apresentada por Mymrine et al. (2005), apontaram que escórias de alto forno com

alto teor de CaO misturadas ao solo, tem ganhos durante o processo de hidratação do mesmo.

Para Pasetto, Baldo (2010), que utilizaram escória de aço de forno elétrico, possui 30% de Cao, apresentou resultados semelhantes quanto comparados ao uso de agregados de rochas naturais.

Mahieux; Aubert; Escadeillas (2009) buscaram uma forma de ativação de solos granulados, escória de alto forno com escória básica de fornalha de oxigênio, com o intuito de desenvolver ligante hidráulico para construção de rodovias. Segundo os estudos, com a mistura de 52,5% de escória graduada, 42,5% de escória de oxigênio com 5% de catalizador, chegou-se à resistência de 10 Mpa em 28 dias.

Chaurand et al. (2007), apresenta pesquisa quanto a questão ambiental, o qual apresentou resultados de lixiviação com resultados de baixa liberação de cromo e significativa lixiviação de vanádio.

#### 2.2.4 Produção de cerâmicas com escórias

Na literatura, encontraram-se pesquisas em que é apresentado o uso de escórias de alto forno na composição de cerâmicas, nas quais são moldados, queimados em altas temperaturas. Ozturk; Gultekin (2015) realizaram estudo na qual foi adicionado 33% de escória de alto forno em uma composição para produção de azulejos de parede no qual se obteve um aumento de 25% de aumento na resistência. Neste trabalho foi realizado quatro composições principais as quais continham argila, areia, pedra calcária, caulim e escória. No trabalho é apresentado que a escória de alto forno pode ser utilizada na produção de azulejos.

Ozdemir; Yilmaz (2007) buscavam verificar a produção de cerâmicas com a utilização de argila e escória de alto forno, obtida a temperaturas de 1150° C, 1175°C e 1200°C durante uma hora. Na pesquisa verificou-se que houve um aumento na absorção de água e na porosidade da cerâmica conforme era aumentada a quantidade de escória de alto forno, porém houve uma diminuição da retração das cerâmicas.

A utilização de escória de alto forno tem papel fundamental para o preenchimento dos vazios das cerâmicas, também pode ser utilizado o resíduo de vidro para a mesma finalidade. Segundo Ding et al. (2015) obtiveram espuma de

vidro e de cerâmica com o uso de escória de alto forno e resíduo de vidro tendo como resultados material com baixa densidade  $0,79\text{g} / \text{cm}^3$  e baixa absorção de água 2,71% bem como alta resistência à flexão 14,34 Mpa.

Estudos realizados por Francis; Rahman; Daoud (2013) apresentam que cerâmicas produzidas em baixas temperaturas, com a intenção de obter cerâmica de elevada porosidade, ao utilizar resíduos de vidro de escória de alto forno, obtiveram assim, cerâmicas vidro poroso.

Para finalizar, Wei et al (2014), apresentam uma cerâmica produzida com escórias de fornalhas de arco elétrico e sedimentos do porto de Taichung com as seguintes proporções dos compósitos 10/100-50/100 e em temperaturas de 950-1050° C e 1100° C.

## 2.3 AREIA DE FUNDIÇÃO

Identifica-se como areia de fundição ou também, como areia de moldagem o resíduo da produção de metais em que a areia é utilizada para confecção de moldes para produção de peças para as empresas de fundição. Essa areia depois de utilizada para a fundição possui as características de areia natural fino e resíduo dos materiais a que teve contato.

### 2.3.1 Uso da areia de fundição no concreto

Foram feitas tentativas para utilizar areia de fundição para a produção de concreto um deles foi Guney et al. (2010), no qual substituíram a areia de fundição por areia natural na proporção de até 15%. Os resultados obtidos com a substituição de 10% de areia de fundição chegaram a resultados que se assemelham ao do concreto convencional com areia natural.

Autores como Singh; Siddique (2012) apresentam, em que foi utilizada areia de fundição em substituição a areia natural, verificou-se que aos 28 dias a resistência à compressão de 8,3-17% e a resistência a tração por 3,6-10,4% e ainda ao mostrar uma melhora nas propriedades mecânicas com idades de 365 dias.

Siddique; Noumowe (2008) apresentaram resultados que, quando utilizado areia de fundição, pode ser produzidos materiais de concreto com boa qualidade. Chegaram a resultados em que: aumenta a resistência do concreto, com o aumento

do teor de areia de fundição, e também com o aumento da idade do concreto produzido com areia de fundição.

Para Prabhu; Hyun; Kim (2014) utilizou no preparo do concreto diferentes misturas, ao utilizar areia de fundição, areia e outros agregados finos. Nestes ensaios realizados, chegaram a resultados que: quando adicionado 20% de areia de fundição as propriedades de resistência do concreto ficam próximos ao concreto moldado sem o uso dela.

Na pesquisa de Pathak; Siddique (2012) foram moldados diferentes traços com o uso de cinzas volantes com areia de fundição nos quais se observou uma redução na resistência do concreto, porém, é viável a produção de concretos com resistências que variam de 19,75-30,69 Mpa aos 28 dias, 29,12 a 39,56 Mpa a 91 dias e 31,95-42,35 Mpa a 365 dias, há temperatura elevadas.

### 2.3.2 Utilização de areia de fundição para produção de blocos de cimento.

Estudos apontam que a areia de fundição, também pode ser utilizada para a produção de blocos de concreto, ao observar que, os concretos utilizados para produção de blocos, são semelhantes a produção de concreto normal.

Em pesquisa apresentada por Mastella et al. (2014) a areia de fundição pode ser utilizada para a produção de blocos para alvenaria e paver, pois, de acordo com os ensaios realizados, os blocos produzidos atendem as exigências de norma, tanto na resistência como sobre a lixiviação. No estudo os traços com 22% de cimento atingiram 35 Mpa de resistência à compressão em 28 dias, aos 56 dias o traço com 17% de cimento chegou a mesma resistência.

### 2.3.3 Produção de cerâmicas com a utilização de areia de fundição.

Para produzir cerâmicas é utilizada em primeiro lugar a argila, esta é o principal componente da cerâmica, em segundo lugar vem à areia, a que em alguns casos, não está na proporção correta para a produção de cerâmicas e em outros casos deve ser adicionado areia. Wymrin et al. (2014), apresentaram o uso de areia de fundição com vários outros resíduos industriais para a produção de cerâmicas. Neste experimento foi apresentado resultados que indicam a resistências a flexão de

até 14Mpa quando queimados a 950-1050 C° destaca-se nesta pesquisa que o produto obtido é ambientalmente correto.

Em pesquisa apresentada por Pytel (2014), mostrou a utilização de areia de fundição processada após ser desmanchado completamente, quando do processo de separação do metal na indústria de fundição, pode-se desta forma, empregar como componente no processo de fabricação de cerâmicas, para utilização na indústria da construção civil. Tanto Pytel como Mymrine (2014) apresentam resultados de lixiviação de metais pesados em que atestam que os materiais cerâmicos atendem as normas em vigor para serem utilizados comercialmente.

Corroborando, na pesquisa de Furlani et al. (2012) foi adicionado 10%, 20%, e 40% de areia de fundição com argila vermelha e amarela sendo feita a queima com duração de uma hora em temperaturas de 900°C a 1040°C. A areia de fundição pode acrescentar novas características além das características de uma areia comum apresentadas em cerâmicas com a adição de areia. Quando utilizado na produção de tijolos cerâmicos a areia de fundição na proporção de 30% nos estudos de Alonso-Santurde et al. (2011) apontaram que os elementos perigosos e nocivos para a saúde que são encontrados na areia de fundição, acabam a ficar inertes pelo processo de queima nas temperaturas já mencionadas anteriormente. Assim o tijolo produzido com areia de fundição pode ser considerado ambientalmente correto.

## 2.4 RESÍDUO DE VIDRO

O pó de vidro ou resíduo de vidro pode ser basicamente reutilizado de duas maneiras: uma delas é para a produção de produtos cerâmicos com queima, a outra é na produção de argamassa de cimento ou bloco de cimento.

Inicia-se com apresentação do método de preparo do vidro, para ser aproveitado na produção de cerâmicas. O principal objetivo da adição de vidro na composição das cerâmicas é a diminuição da temperatura para a queima no preparo da cerâmica. Phonphuak; Kanyakan; Chindaprasirt et al (2016), apontam que ao se adicionar 10% de resíduo de vidro na composição de cerâmicas, pode ser diminuído 100° C na temperatura de queima da cerâmica, ao viabilizar a diminuição no custo de fabricação das cerâmicas.

Infere-se que, na fabricação de tijolos com resíduo de vidro nas proporções já mencionadas, podem ser produzidos à temperatura de 900°C e não mais em

1000° C, os quais mantiveram as mesmas propriedades. Na mesma linha de pesquisa Wei; Cheng; Ko (2016) produziram agregados leves de resíduos de vidro juntamente com cinzas volantes de carvão. Também utilizaram pó de vidro o qual reduziu o tempo de sintetização para 10 minutos. Em trabalho apresentado por Schwarz-Tatarin; Freyburg (2010) descreveram a composição mineralógica de cerâmicas com pó de vidro.

Identificaram-se trabalhos que utilizaram diferentes tipos de resíduo de vidro em pó dos quais se pode exemplificar o trabalho de Kim; Kim; Hwang (2015) que foi realizada a substituição de feldspato por pó de vidro, oriundo de visor de cristal líquido na composição da produção de porcelanas de produto sanitários. Ao depender da temperatura de sintetização na qual foram produzidas as porcelanas, pode ser feita substituição completa e obter bons resultados. Também foi realizado pesquisas ao conseguir a substituição de resíduo de vidro como material de fluxo para substituir feldspato na produção de azulejos de cerâmica. Kim; Kim; Hwang (2015), nos resultados observaram vantagem do vidro em relação ao feldspato, porém constatou-se nesse trabalho que este processo de reciclagem do vidro de cristal líquido que foram produzidos depois de 2010, não possui alto teor de elementos tóxicos.

O vidro não é o principal componente responsável pela origem de elementos tóxicos, mas, há outros materiais que dependem da adição de vidro para neutralizar os elementos tóxicos nele encontrados. Ye et al. (2015), cita como responsáveis pelos estudos de tratamento do rejeito do ouro e o método Cooper, para sintetizar vidro em cerâmica. Nestas composições foram adicionados até 77,6% de rejeitos e somente 22,4% de vidro na composição, mesmo com poucos vidros, os resultados de força na flexão chegaram a resultados de 209,6 Mpa de resistência.

Aponta-se que, foi misturado lama de produção de papel com resíduo de vidro, com o objetivo de obter amostras com estruturas vítreas, nas quais em baixas temperaturas de sintetização obteve um material com características ambientalmente corretas (MYMRINE et al. 2015).

Na literatura internacional têm-se trabalhos que abordam a produção de cerâmicas de espuma. Bai et al. (2014), apresentaram a produção de espuma ao utilizarem resíduo de vidro com cinzas volantes, ao demonstrarem espumas de vidro com densidade aparente de 0,267g / cm<sup>3</sup>, e ao chegar a resistência de compressão de 0,98 Mpa e porosidade de 81,55%.



Seguindo o mesmo princípio, Zhu et al. (2016) apresentaram estudo ao utilizar resíduo de vidro, cinza volante de carvão, Carbonato de cálcio e Bórax, para formar assim, o que chamaram de vidro espumas cerâmicas, ao apresentar baixa densidade aparente e pouca condutividade térmica.

A razão de estudar formas de utilização de resíduos de vidro fora apontada por Gong et al. (2016), pois, o resíduo de vidro âmbar são eliminados principalmente em aterros sanitários sendo uma pequena parte reaproveitada. Desta forma, a espuma de vidro pode ser reaproveitada, ao colaborar para que esse resíduo não seja destinado a aterros sanitários.

Pode-se apontar a utilização de resíduos de vidro para a produção de materiais ligantes. Ling; Poon; Wong (2013) demonstraram que o resíduo de vidro pode ser utilizado em diferentes tipos de concreto tais como: blocos de concreto; concreto auto adensável; como para produção de diferentes tipos de argamassa como a arquitetônica. Em outra pesquisa desenvolvida por Jani; Hogland (2014) o resíduo de vidro pode ser utilizado na produção de concreto e cimento, porém o tamanho das partículas de vidro é responsável na reação álcali-sílica e podem prejudicar o concreto em suas características de resistência.

Na produção de produtos de cimentação para argamassas, foi estudada a adição de até 25% de diversos tipos de resíduo de vidro, ao analisar a composição química deles, chega-se à conclusão que as reações pozolânicas e álcali-sílica têm relação expressiva com a composição química do vidro utilizado na mistura (BIGNOZZI et al. 2015). Avila-López; Almanza-Robles; Escalante-García (2015) os quais estudaram a utilização de resíduo de pedra calcária e resíduo de vidro para a produção de pasta de argamassa.

Os resíduos de pó de vidro segundo Torres-Carrasco; Puertas (2015) podem ser utilizados como ativador alcalino, por polímeros ao usar como base em cinzas volantes. Em resultados descritos em seu trabalho, afirmam que o vidro pode ser um substituto para resíduos de hidrato de silicato de sódio comercial. Os mesmos autores apresentam estudo no qual analisaram a substituição do cimento Portland por materiais alcalinos ativados tais como: resíduos de vidro.

Em estudos com polímeros, ao invés de ligantes, pode-se citar Bobirică et al. (2015) os quais estudaram polímeros inorgânicos, obtidos das lâmpadas fluorescentes com cinzas volantes e escória de alto forno. Eles apresentaram a

importância da relação de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ao explicitar os pontos positivos e negativos do uso de vidro e dos pontos positivos do uso da escória.

O vidro foi analisado também por Rashad (2014) o qual apresenta a possibilidade do uso de resíduo de vidro como material inerte em traços de material de cimento na substituição de agregado fino, para chegar a resultados em que, com o aumento da quantidade de areia de vidro nos traços, proporcionou a diminuição da retração do material produzido, como também, em alguns estudos foi relatado à influência negativa da areia de vidro quando analisado a resistência por abrasão dos produtos cimentícios produzidos.

### 3 METODOLOGIA

Para a pesquisa foram utilizados materiais que normalmente são descartados em aterros sanitários, sendo eles (ES) Escória de alto forno, (AF) Areia de fundição, tanto a areia de fundição quanto a escória tendem a não absorver água e tornar a mistura flexível, sendo prudente não utilizar mais que 30% destes materiais, (VR) Vidro em pó oriundo de empresa de produção de vidro temperado, (CM) cinza do resíduo Municipal foi o foco da pesquisa e (AAN) Argila Arenosa Natural que tem a função de ligante nas misturas.

Para a elaboração da tese, foram realizados primeiramente estudos e análises sobre as matérias-primas e após a realização dos corpos de provas foram selecionados alguns para realizar ensaios com eles prontos, os quais estão relacionados abaixo.

Para o ensaio de distribuição granulométrica da argila foi utilizado jogo de peneiras normatizadas bem como para o ensaio de sedimentação conforme NBR 7181 de 2018. Para determinação de densidade compactada de amostras moídas é colocada dentro de recipiente pré-determinado e compactado apenas com a vibração sem qualquer esforço extra. Esses ensaios foram realizados apenas para as amostras das matérias primas.

O ensaio de FRX (floreescência de raio-X) foi realizado para as amostras e para os corpos de prova de algumas composições, primeiramente a trituração da amostra durante 30 segundos, para utilizar 7 gramas de cada amostra e 1,4 gramas de cera orgânica e homogeneizado. A amostra é pressionada pelo equipamento que tem o formato de disco e, posteriormente esse disco é colocado no equipamento Philips/ Panalytical 2400 para a análise.

Para o ensaio de DRX foi utilizado o equipamento Philips, modelo PW 1830, Os parâmetros de ensaio foram: ângulo de 5° a 70° passo de 0,02° e velocidade de varredura de 2°/min. A análise dos resultados foi realizada com auxílio do software X'Pert Highscore Plus com um banco de dados cristalográfico do ICDD (International Centre for Diffraction Data) de 2003. Esse ensaio foi realizado para as amostras e para corpos de prova selecionados.

Já para os ensaios de EDS, MEV, Difração de Raio-X e mapeamento com a finalidade de obtenção dos principais componentes químicos as matérias primas e composições principais da pesquisa foi realizada a simples moagem do material até

que passasse pela peneira 200mm, quando chegava na granulometria correta, as amostras eram colocadas nos equipamentos de varredura microscopia eletrônica, sendo utilizado o equipamento Jeol JSM-6360 LV para fazer as varreduras necessárias para a obtenção dos resultados. Para o ensaio de EDS foi utilizado 7 pontos diferentes de análise. Todos esses ensaios apresentados acima foram realizados para as amostras das materiais primas e para os corpos de provas selecionados.

Com os ensaios das materiais primas realizados e as amostras caracterizadas, foram desenvolvidos 31 traços (composições) que variavam de 100% de argila a 25% de argila, de 0% a 15 % de (CM), de 0% a 30% de (ES), de 0% a 20% de areia de fundição, se atendo, que a areia já é presente na argila utilizada optou-se por utilizar menos, de 0% a 30% de (VR) a qual tem a função de aditivo.

Depois de separados, os materiais foram misturados até a homogeneização da mistura, após foi adicionada água que variou de 8 a 10%. Foram pesadas 20 gramas da mistura úmida e acondicionada em um molde com dimensões de 60x20x10mm sendo o último a espessura de cada amostra. As amostras foram compactadas a uma pressão de 4 Mpa para poder assim, variar a espessura das amostras ente 7mm e 10mm.

A umidade de 8 a 10% foi considerada ótima, pois quando as composições eram compactadas dentro do molde, ficavam soltas do molde, porém consistentes, quando tinha água em excesso às amostras ficavam “moles” e perderam a consistência, dessa forma não sendo possível ter os corpos de prova, assim como quando havia pouca água as amostras não se chegam a ter “liga” e na hora de desmoldar elas se soltavam e caíam do corpo de prova, sem ter a forma necessária, portanto para todas as amostras de todas as composições seguiu-se a mesma quantidade de água definida. O cálculo do teor de umidade foi definido pelo material molhado, quando estava em ponto ideal de consistência pela sua massa seca, definido em porcentagem.

Dessa forma foi realizado 5 amostras de cada uma das 31 composições, sendo as 5 amostras de todas as composições para cada temperatura, foram escolhidas 8 temperaturas de queima, dessa forma realizados 1.240 corpos de prova, após os corpos de prova prontos, foi realizado a queima das amostras. Foi realizada em um forno marca Jung modelo LF04213 capacidade 70 litros,

temperatura máxima 1300°C, N° de série 9106 no qual foram acondicionadas todas as amostras para serem queimadas, ao queimar sempre cinco amostras de cada composição para cada temperatura escolhida, as quais foram: 700°C, 800°C, 850°C, 900°C, 975°C, 1000°C, 1025°C e 1050°C. No forno foi utilizado um aparato que impedia a influência direta do calor nas amostras, das que estavam nas laterais, para que não houvesse contato de calor direto, para não “queimar” as composições na saída de calor do forno, a ficar assim as amostras com o calor bem distribuído superiormente.

O forno foi configurado para que aumentasse a temperatura em 5°C por minuto, e após atingir a temperatura, esta ficou por 3 horas para que o calor queimasse por igual as composições e não queimasse somente a superfície dos corpos de prova. Passado o tempo de queima, o forno foi desligado e aguardou-se que esfriasse, de modo natural, de modo que fosse possível o manuseio dos corpos de prova sem a possibilidade de ocorrer o choque térmico. Conforme figura abaixo, pode-se observar como ficavam as composições logo após a queima, antes do resfriamento.

**Figura 03 – Composições após a queima de 850°C antes do resfriamento**



**Fonte: Autor, 2019**

Concluída a etapa de queima das composições, foi realizado as medições de cada uma das composições para determinar as características abaixo descritas e também os ensaios supracitado no início desse capítulo.

- Resistência à flexão-compressão com ensaio de três pontos, feito da seguinte forma:

Para a resistência à flexão de cada uma das composições foi empregada a seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}$$

Em que:

$\sigma$  = é a resistência à flexão (MPa);

F = é a força no ponto de ruptura (N);

L = é a distância entre os dois pinos inferiores do equipamento utilizado;

B = medida da largura do corpo de prova;

D = medida da espessura da amostra.

A prensa foi regulada para manter o teste até a perda total da resistência ao ocorrer à ruptura total da amostra a ficar dividida em duas partes. A velocidade de carregamento da prensa foi de 0,5 mm por minuto. Para ensaio à resistência a flexão em três pontos ao utilizar a prensa DL- 10 EMIC.

- Densidade, analisado da seguinte forma:

O cálculo da densidade das composições foi realizado com o uso da fórmula abaixo:

$$Densidade = \frac{M_{p.a.q}}{a \times b \times c}$$

Que:

$M_{p.a.q}$  = é o peso da amostra depois de queimada no forno,

a = é o comprimento da amostra,

b = é a largura da amostra,

c = é a espessura da amostra.

- Retração linear, ensaiado da seguinte forma:

A determinação da contração linear é realizada com o auxílio da fórmula abaixo:

$$Cl = \frac{L_{c.a.d}}{L_{c.a.a}} * 100\%$$

Na qual:

CI = é a contração linear.

$L_{C.a.d}$  = é o comprimento da amostra após a queima no forno,

$L_{C.a.a}$  = é o comprimento da amostra antes do processo de queima no forno.

- Absorção de água;

Para determinação da absorção de água de cada corpo de prova foi calculada a utilizar a equação abaixo:

$$W_a = \frac{A_h - A_s}{A_s} * 100$$

Na qual:

$W_a$  = é taxa de absorção de água;

$A_h$  = peso da amostra úmida após permanecer 24 horas na água;

$A_s$  = peso do corpo de prova seco antes da imersão em água.

Obs: depois de retirada a água, os corpos de prova são cuidadosamente enxugados com material absorvente com o objetivo de retirar as gotas de água que permanecem no envolto do corpo de prova.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise dos resultados foi levado em consideração as normativas dos ensaios conforme descrito no capítulo de matérias e métodos, ao analisar as propriedades físicas e químicas principalmente das matérias primas, para compreender as interações dos componentes.

Dos corpos de provas desenvolvidos analisaram-se as reações físicas como principal método de análise e posteriormente a suas interações químicas, conforme será descrito a seguir.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Para a caracterização das materiais primas analisou-se a granulometria, densidade e perca ao fogo dos materiais, assim como se analisou os ensaios de DRX, FRX, EDS, MEV e mapeamento tomográfico.

#### 4.1.1 Caracterização da Cinza de Resíduos Municipais (CM)

A empresa responsável pelo recolhimento dos resíduos sólidos programou uma unidade de gaseificação experimental com a capacidade de gaseificação de 3 toneladas de resíduos por hora, a qual resulta 10% de cinza útil para produção de cerâmica, material que acaba sendo levado para o aterro sanitário por não ser utilizado atualmente. O Gaseificador tem capacidade de produzir 2.5 megawatts por hora em energia bruta

Segundo o portal de notícias RBS TV (2017) “a cinza de lixo urbano é um resíduo proveniente da gaseificação do resíduo urbano recolhido de 24 Cidades as quais encaminham os resíduos até a cidade de Mafra” (p. 01). O volume total de resíduo chega a sete mil toneladas ao mês. O total de resíduo acumulado nos últimos 14 anos chega a uma altura que equivale um prédio de 15 andares e é gasto aproximadamente quinze milhões de reais por ano, para depositar o resíduo em aterro sanitário.

O procedimento experimental adotado pela empresa de limpeza urbana de Mafra consiste em depositar os resíduos recolhidos na unidade. Depois de efetuada a descarga do material das residências das 24 cidades, com o auxílio de uma garra



mecânica é levantado o material até uma esteira, onde se encontra um “rasga sacola”, o resíduo a ficar totalmente descompactado, em seguida ele é agitado em uma grelha para que os resíduos orgânicos sejam separados o máximo possível. A esteira leva o resíduo até um funil que é o ponto inicial da câmara de gaseificação, depois de vencido todo o processo de gaseificação, o resíduo é separado em dois caminhos, os com granulometria de cinza são conduzidos para a direita do gaseificador e acondicionados em uma caçamba para que seja encaminhado para o aterro sanitário.

No lado esquerdo do gaseificador são acondicionados os resíduos que ainda ficaram na parte superior das grelhas (“peneiras”), pois são materiais que por vários motivos não foram totalmente Gaseificados (“queimados”), sendo metais, louças, cerâmicas e outros materiais que são dispensados junto com o resíduo urbano, os quais são separados os metais e o restante são encaminhados ao aterro sanitário.

Os gases liberados durante o processo de gaseificação são encaminhados para outra câmara na qual são queimados e fornecem energia calórica para um processo de geração de energia elétrica.

Apresenta-se abaixo a granulometria do CM, os resultados dos ensaios de FRX, DRX, MEV e EDS.

A figura abaixo tem por objetivo demonstrar como é encontrada a cinza visualmente as características visuais da M.

**Figura 4: Cinza de resíduos municipais**



**Fonte: autor 2019**

#### 4.1.2 Granulometria da cinza de resíduos sólidos urbanos.

A curva granulométrica da cinza de resíduos sólidos urbano é apresentada na tabela 01, pode-se observar que em sua maioria a granulometria da cinza ficou entre 0,60-1,19mm com 32,16%.

**Tabela 1 - Granulometria, densidade e umidade da cinza de resíduos urbano.**

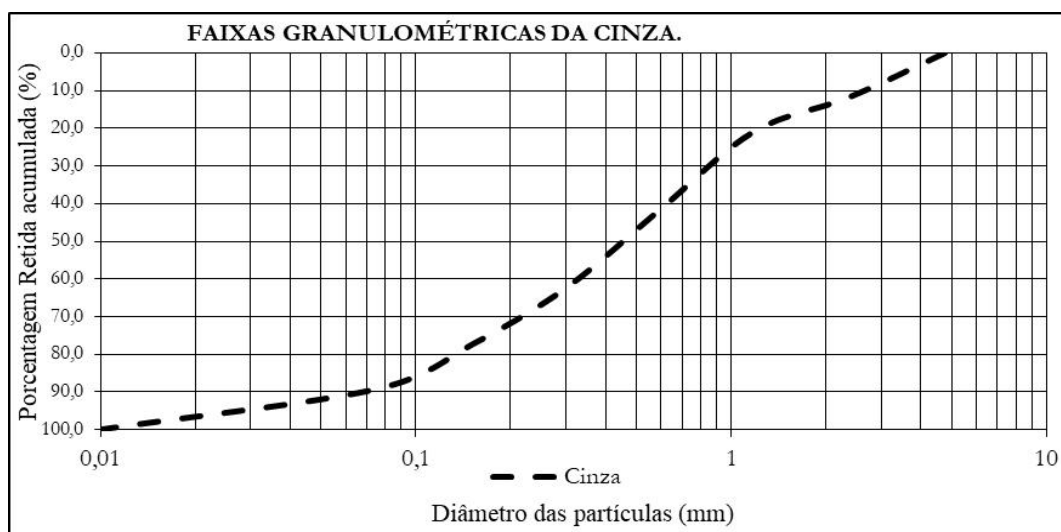
tamanho (milímetro)	Mais que 1,20	1,19-0,60	0,59-0,30	0,29-0,15	0,149-0,075	0,075-0,0	Densidade testada (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)
(% em peso)	3,63	32,16	23,02	16,6	12,85	11,74	1,95	0

**Fonte: Autor 2019 (adaptado GRAUPMANN, ET, AL 2019).**

Pouco material apresenta granulometria maior que 1,20mm, sendo sua granulometria espalhada, a variar principalmente entre 0,075-1,19, isso se deve pela quantidade de materiais diferentes, por se tratar de resíduo urbano, que compõe a cinza. Ressalta-se a densidade da cinza sendo 1,95 g/cm<sup>3</sup>, conforme apresentado na tabela acima.

Assim como já demonstrado na tabela acima, pode ser observado na figura 05 abaixo, a distribuição granulométrica, observa-se que a maior quantidade se encontra na faixa de 0,01 a 1mm, confirma-se a tabela acima.

**Figura 5 - Distribuição granulométrica da cinza**



**Fonte: Autor 2019**

A cinza apresenta uma granulometria bem distribuída com maior concentração nos diâmetros entre (1,19-0,60) 32,16% e nas granulometrias mais finas com concentração de 24,59%, a considerar neste último, as concentrações das granulometrias abaixo de 0,149. A densidade da cinza de resíduos sólidos urbanos se assemelha a densidade da areia de fundição, bem próximo da densidade da argila. A umidade da cinza é 0,0, pois ao passar pelo processo de gaseificação, ele é extraído do equipamento em temperatura elevada.

#### 4.1.3 Composição química do (CM) pelo método FRX

Na tabela 02, destaca-se dentre outros, a composição química da CM do qual se pode verificar os seguintes componentes químicos- o SiO<sub>2</sub> (35,30%), o qual tem maior percentual dentre os componentes químicos que compõem a CM o dióxido de silício que pode se apresentado como sílica cristalina, sílica vítreas e sílica amorfa. O segundo com maior concentração e o CaO (óxido de cálcio) 16,20%, o qual tem propriedades fundentes, como material fundente temos também o Na<sub>2</sub>O (2,50%), pode-se destacar uma sequência de metais pesados, porém em quantidades insuficientes para ser prejudicial de alguma forma e dessa forma não extrapolam os limites previstos em normas.

**Tabela 2 - Óxidos presentes na cinza de resíduos municipal pelo método FRX**

Óxidos presentes nas matérias primas (em %)																			
Óxidos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	CuO	Cl	PbO	SrO	Perda ao Fogo	Total
Valores (%)	6	35,3	0,7	9,5	16,2	3,7	2,5	1,5	0,1	1,4	2,6	0,1	1	0,3	1,1	0,3	0,1	17,6	100

Fonte: autor 2019

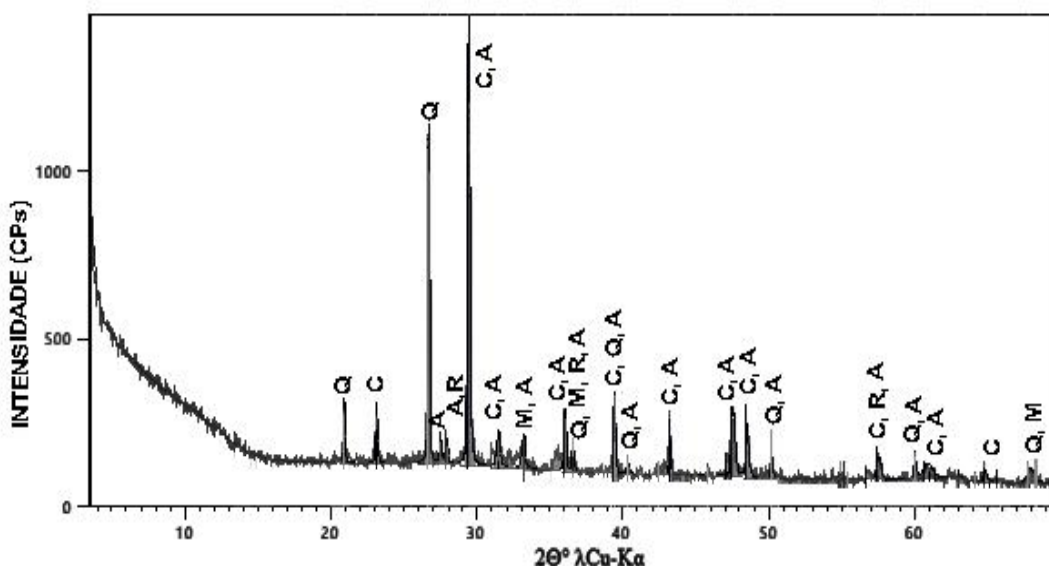
A cinza de resíduos municipais tem grande perda ao fogo (17,60%), fato que pode ser atribuído a grandes quantidades de material orgânico presente no resíduo sólido urbano, esses materiais orgânicos acabam a permanecer misturados ainda nos resíduos mesmo que ocorra o processo de separação antes da gaseificação. Esta grande concentração de perda ao fogo pode trazer problemas para as cerâmicas, pois é formada basicamente de material orgânico que quando aquecida forma bolhas no material.

#### 4.1.4 Caracterização da cinza de resíduo municipal pelo método de DRX

A composição das matérias-primas apresentadas na pesquisa foi determinada ao utilizar o pó das matérias-primas e analisadas com um difractômetro de raio-x com radiação  $\lambda\text{Cu-K}\alpha$ . Para a realização da difractograma foi utilizado a base de dados do programa High Score PDF-2.

Abaixo se apresenta os picos e componentes químicos que compõem a cinza de resíduos urbanos coletados na Cidade de Mafra - Santa Catarina em um gaseificador.

**Figura 6 - Composição Mineral da cinza de resíduo municipal pelo método DRX**



Nota: "A" Albite high ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), "C" Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), "M" Magnesite ( $\text{MgCO}_3$ ), "Q" Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), "R" Rutile ( $\text{TiO}_2$ ).

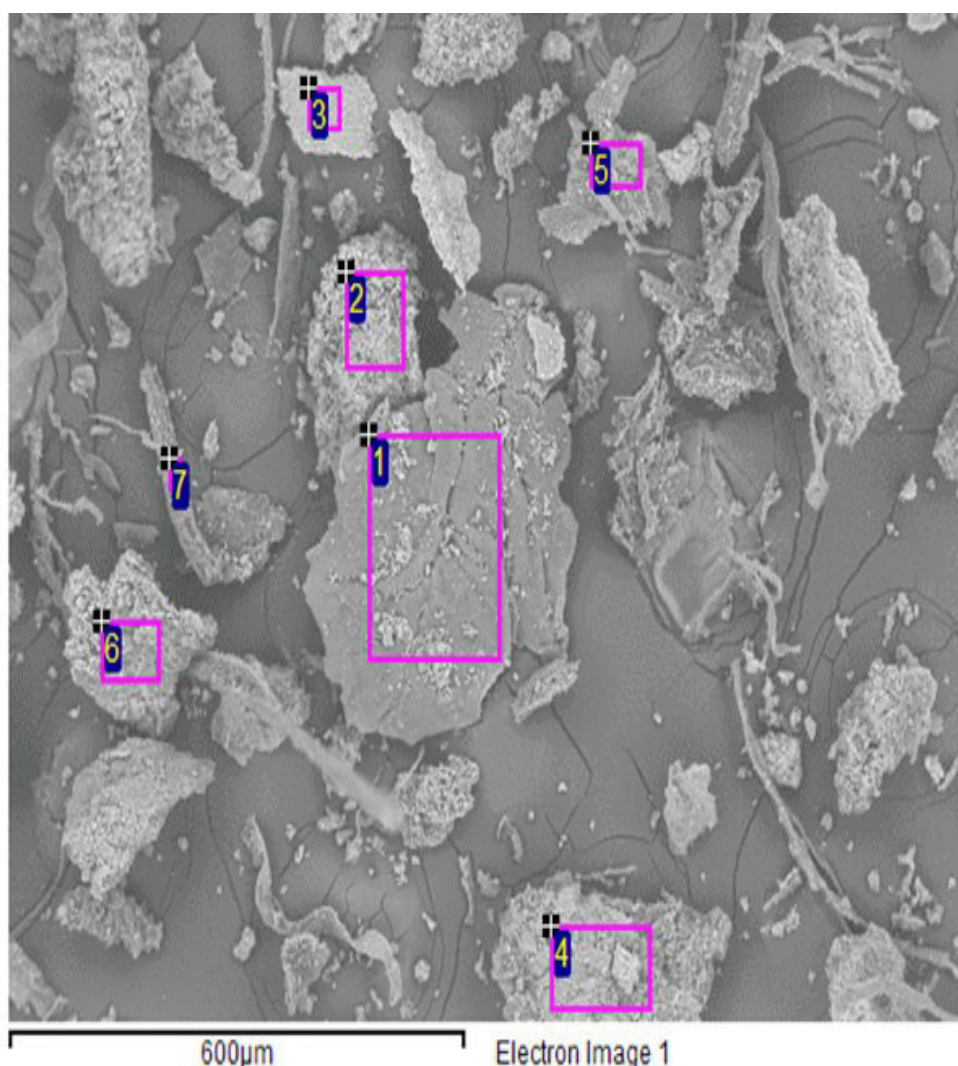
Fonte: Autor 2019

Na figura 6, apresenta-se as principais composições mineralógicas da cinza de resíduos municipais CM o componente com maior pico é o quartzo  $\text{SiO}_2$ , com 35,30% no FRX, seguido do calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) e Albitite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ). Na sequência estes mesmos componentes se apresentam com intensidades menores. Os elementos químicos apresentados neste DRX podem ser confirmados na composição de FRX apresentado na Tabela 02. O raio-x de fundo é bem baixo ao apresentar vários picos com intensidades entre 100 e 200 contagens por segundo.

#### 4.1.5 Caracterização da cinza de resíduo municipal pelo método de MEV e EDS

Na figura 07 abaixo, identifica-se diversos tamanhos de partículas com vários formatos comuns a elementos amorfos. A grande variedade de formas das partículas é comum em cinzas de resíduos sólidos urbanos, observa-se a grande variedade de materiais que as compõem.

**Figura 7 - Pontos analisados pelo EDS da cinza de resíduo após o processo de gaseificação**

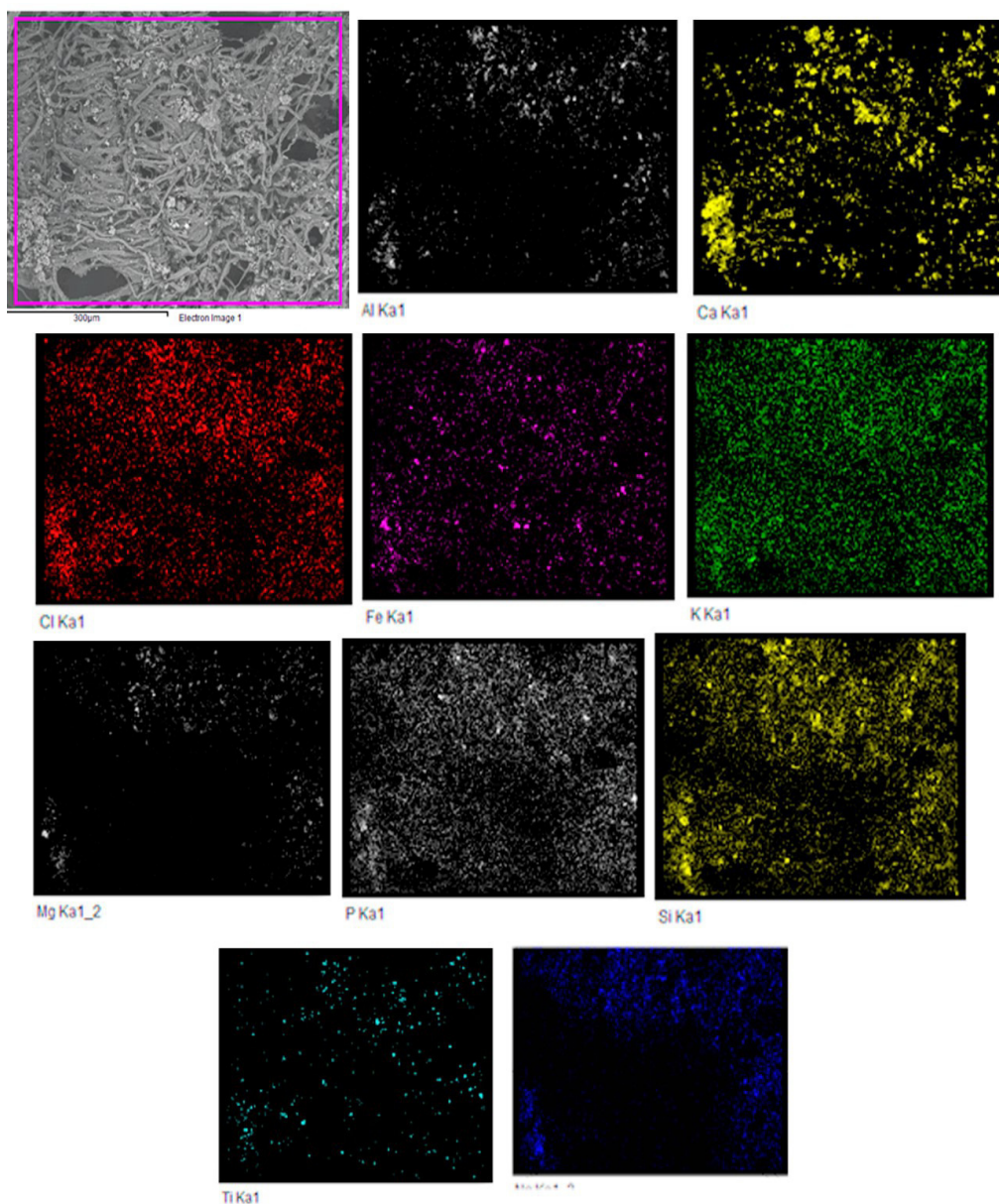


Fonte: autor 2019

Na figura acima apresenta-se sete pontos distintos as quais apresentam uma variedade de formas, quando comparada com outras imagens já apresentadas. É possível notar as composições orgânicas e fibrosas do material. A porosidade do material apresentado pode ser a razão da elevada absorção de água.

Nos resultados da figura 8 abaixo, observa-se uma coloração basicamente uniforme sem a formação de aglutinações ou separações muito elevadas, este aspecto pode ter relação com a forma amorfa do material. Verifica-se uma concentração grande em três pontos da imagem do cálcio (Ca). Todos os componentes amorfos e não cristalinos têm uma distribuição bem uniforme

**Figura 8 - Mapeamento dos estados químicos individual de cada elemento químico encontrado na amostra de cinza de resíduos municipal o qual foi realizado por espectro de absorção de raio-x tomográfica**



Fonte: Autor 2019



Na tabela 3 apresentam-se os principais elementos químicos encontrados na cinza de resíduos urbanos. Para obtenção dos resultados, foi utilizado o método de EDS por espectroscopia de absorção de raio-x tomográfica.

**Tabela 3 - Composição química pelo método de EDS da cinza de resíduo municipal**

Pontos	Al	Ca	Cl	Cr	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Ti	Total
1	7,47	49,5	3,77		4,5	2,21	4,37		2,85	4,33	10,36	10,64	100
2	16,4	10,65	2,6		11,17	3,72	3,07		1,94		47,22	3,23	100
3	20,56	45,08	2,43		0,93	0,4	2,07		2,39		25,31	0,83	100
4	5,86	40,35	3,41		15,13	1,44	14,13	0,57	1,83		14,33	2,95	100
5	7,48	44,19	7,31	1,04	5,02	2,66	5,4		4,81	5,67	8,85	7,57	100
6	8,46	32,7	2,88		9,81	2,67	4,2		2,47		19,58	17,23	100
7	4,11	70,39	4,17			3,6	3,31		4,11		8,46	1,85	100
Max	20,56	70,39	7,31	1,04	15,13	3,72	14,13	0,57	4,81	5,67	47,22	17,23	
Min	4,11	10,65	2,43	1,04	0,93	0,4	2,07	0,57	1,83	4,33	8,46	0,83	

Fonte: Autor 2019

Verifica-se na Tabela 03 que o conteúdo de Ca no ponto 07 é o com maior proporção, o ponto com menor concentração no ponto 07 é o Al com 4,11. O conteúdo com menor concentração é Mn com apenas 0,57 só foi encontrado no ponto 04. Também se podem verificar que se tem oito diferentes conteúdos que são encontrados em todos os pontos estudados, nos quais verifica-se os pontos de máximo e mínimo, no qual demonstra-se a seguir: Al tem o ponto máximo de 20,56 e de mínimo em 4,11, o Ca tem seu máximo de 70,39 e o mínimo de 10,65: na sequência apresenta-se o Cl com 7,31 de máximo e 2,43 de mínimo, o K é o com menor concentração, ou seja, um mínimo de 0,4 e um máximo de 3,72.

Na sequência o Mg que apresentou um máximo de 14,13 e um mínimo de 2,07, na sequência foi apresentado o Na com máximo de 4,81 e mínimo de 1,83 o qual tem a menor variação entre o máximo e mínimo encontrado nos pontos estudados sendo assim um dos componentes com distribuição praticamente uniforme entre os pontos estudados, o Si apresentou um máximo de 47,22 e um mínimo de 8,46, por fim o Ti que tem seu máximo em 17,23 e o mínimo em 0,83 que é o segundo com menor concentração juntamente com o K que é o com menor concentração 0,4 e os dois foram identificados no ponto 03.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA NATURAL

A argila natural utilizada foi extraída de uma olaria na Cidade de Mafra-SC, a qual foi seca em estufa a 105°C, destorroada e peneirada até chegar a granulometria desejada a ficar conforme figura abaixo.

**Figura 9 - imagem da amostra de argila natural**



**Fonte: autor 2019**

### 4.2.1 Granulometria da argila natural utilizada

Pode-se observar na tabela 04 abaixo, que a argila utilizada é a com granulometria com maior concentração entre os diâmetros de 1,20 com 39,01% e 1,19-0,60 com 37,80% do total da amostra, esta granulometria pode ser explicada pois o peneiramento foi feito após o destorroamento, o qual foi realizado após o material ter sido seco em estufa por 24h a 110°C.

A argila natural tem densidade igual a 2,14 (g/cm<sup>3</sup>) e umidade quando retirada da natureza de 2,40%, na época da extração da argila, a região de Mafra - SC passou por um período longo de estiagem.

**Tabela 4 - Granulometria da argila natural, densidade e umidade.**

Granulometria da Argila Natural							Densidade testada (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)
tamanho (milímetro)	Mais que 1,20	1,19-0,60	0,59-0,30	0,29-0,15	0,149-0,07	0,075-0,0		
(% em peso)	39,01	37,8	6,13	5,32	8,5	3,24	2,14	2,4

**Fonte: Alekseev, 2017**



Para o preparo do solo foram realizados os ensaios, a secagem em estufa a 110°C, sendo realizado o destorroamento e determinado a umidade hidrocópica conforme prevê a NBR 6457/1986.

#### 4.2.2 Caracterização da argila natural composição química pelo método de FRX.

Para produção de diferentes cerâmicas é utilizado argila natural, as quais são normalmente confeccionadas por empresas de fabricação de tijolo. No presente estudo foi utilizada argila que é usada em escala industrial de uma indústria de fabricação de tijolos cerâmicos comuns. Conforme se observa na tabela abaixo os óxidos presentes na argila.

**Tabela 5 - Óxidos presentes na argila natural pelo método FRX**

Óxidos presentes nas matérias primas (em %)																		
Óxidos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	ZnO	ZrO <sub>2</sub>	Perda ao Fogo	Total
Valores (%)	6,10	53,30	0,10	24,70	0,40	0,70	0,10	1,00	0,10	1,40	0,10	<0,1	<0,1	0,10	<0,1	0,10	11,50	100,00

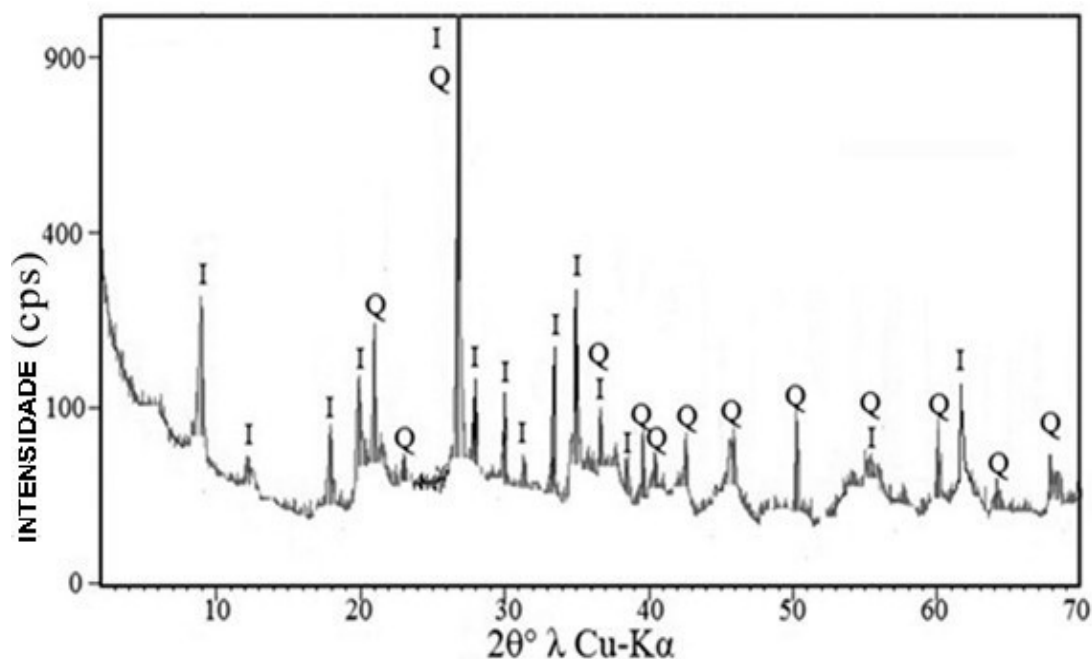
**Fonte: autor 2019**

Na tabela acima, apresenta-se a composição química da argila, na qual se tem 53,3% de SiO<sub>2</sub>, 24,7% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 6,1% de (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Quanto a perda de fogo foi verificada a presença de 11,5% de perda ao fogo, o qual pode ter origem das partículas orgânicas contidas na argila.

#### 4.2.3 Caracterização da argila natural pelo método de DRX.

As intensidades de fundo de raios-X também apresentam intensidades altas em quase toda a curva do gráfico, que pode ser observado na figura 07 abaixo, o que é característico de materiais naturais, principalmente as compostas por argila com conteúdo amorfo. Também apresenta picos relativamente uniformes entre as composições químicas I Illite (KAl(Si, Al)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub> nHO<sub>2</sub>), Q Quartz (SiO<sub>2</sub>).

Figura 10 - Difração de Raio-x ( DRX) da Argila Natural



Nota: I Illite ( $KAl(Si, Al)_2(OH)_2 nHO_2$ ), Q Quartz ( $SiO_2$ )

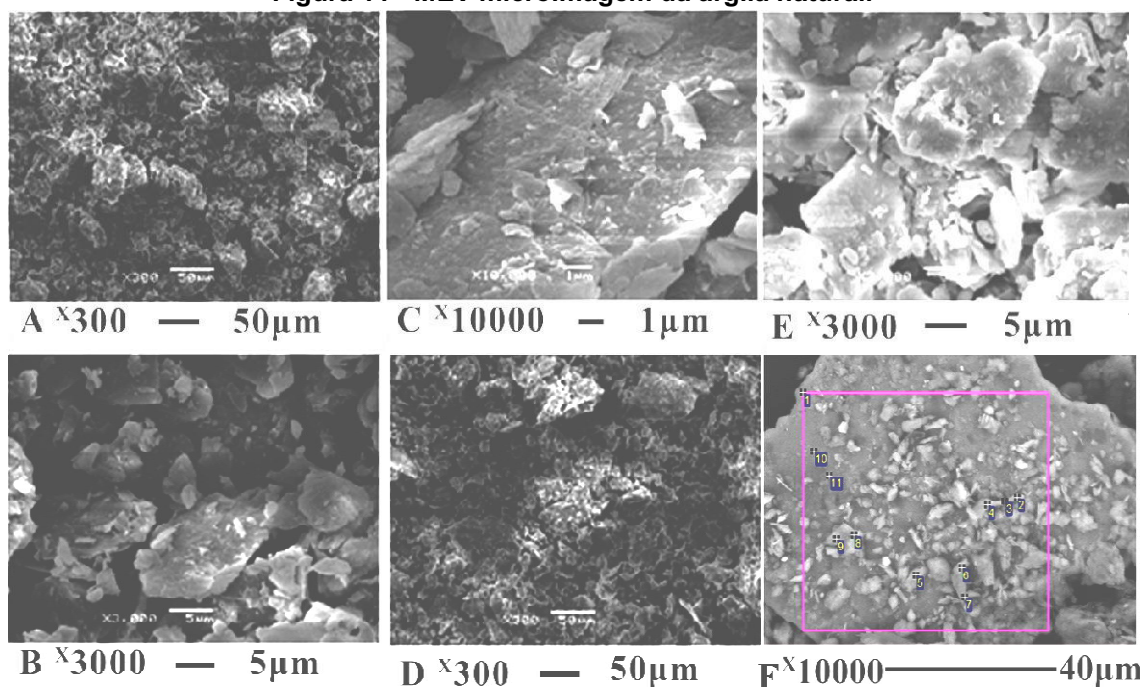
Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

A argila natural que foi utilizada na pesquisa, foi coletada em empresa do ramo de tijolos, possui a composição mineralógica conforme apresentado na Tabela 05 na qual se destaca 2 minerais a Illite ( $KAl(Si, Al)_2(OH)_2 nHO_2$ ), e o Quartzo ( $SiO_2$ ), que são confirmados ao comparar com o DRX apresentado na figura 10 acima.

#### 4.2.4 Caracterização da argila natural pelo método MEV e EDS

Nas composições produzidas com o traço padrão, não foram identificadas alterações ou características especiais. As partículas das cerâmicas têm uma variação significativa e normal, como pode ser observado na figura abaixo.

**Figura 11 - MEV microimagem da argila natural.**

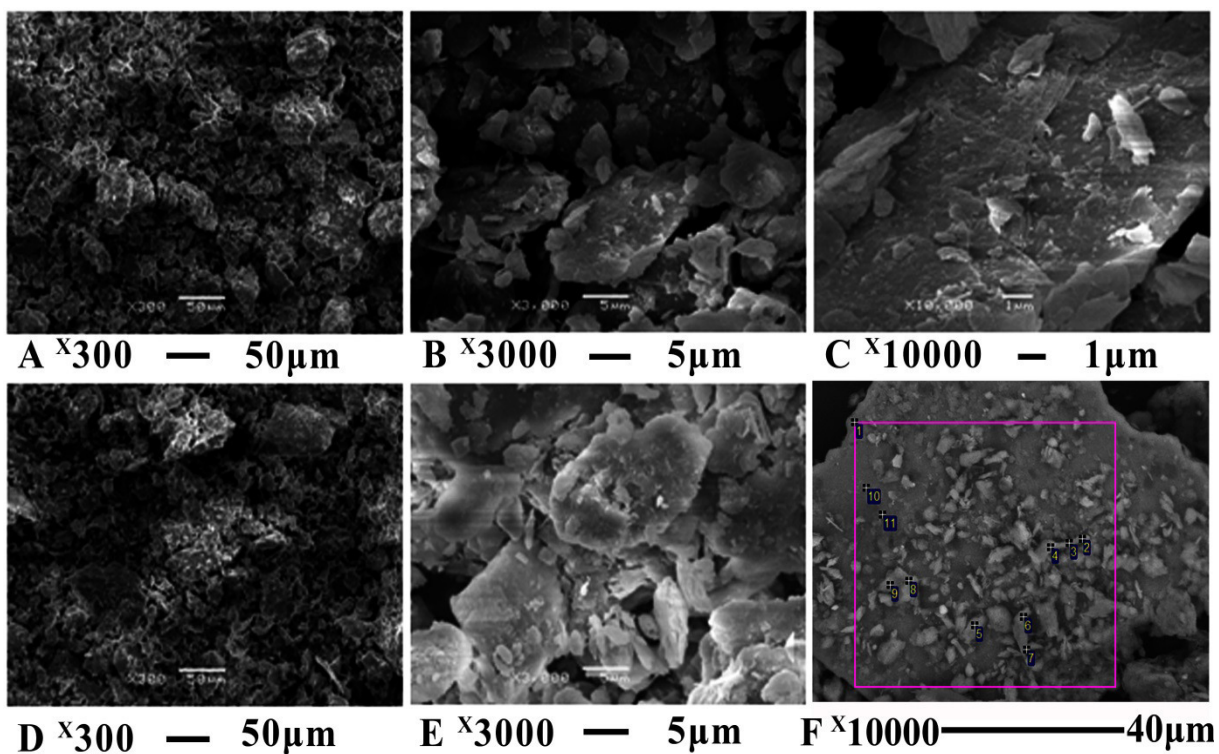


Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

Quando comparado os resultados pelo método de FRX apresentados na tabela 05 os minerais de Quartzo e ilite são os compósitos com maiores picos no DRX. As partículas com aparência maciças podem ser relacionadas às de quartzo. A argila possui diferentes formas, sendo principalmente ovais e arredondadas, tipicamente de substâncias amorfas.

Nas análises dos resultados químicos apresentados na tabela 06 (abaixo), infere-se que existem diferenças expressivas entre a quantidade de cada componente químico, entre eles, o Si é o componente com maior concentração em todos os pontos estudados, como observa-se no ensaio FRX da tabela 05 que o  $\text{SiO}_2$  se apresenta com 53,30%.

**Figura 12** – Micro imagem de EDS de argila com ampliação diferente



Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

**Tabela 6** - Composição química da argila pelo método de EDS

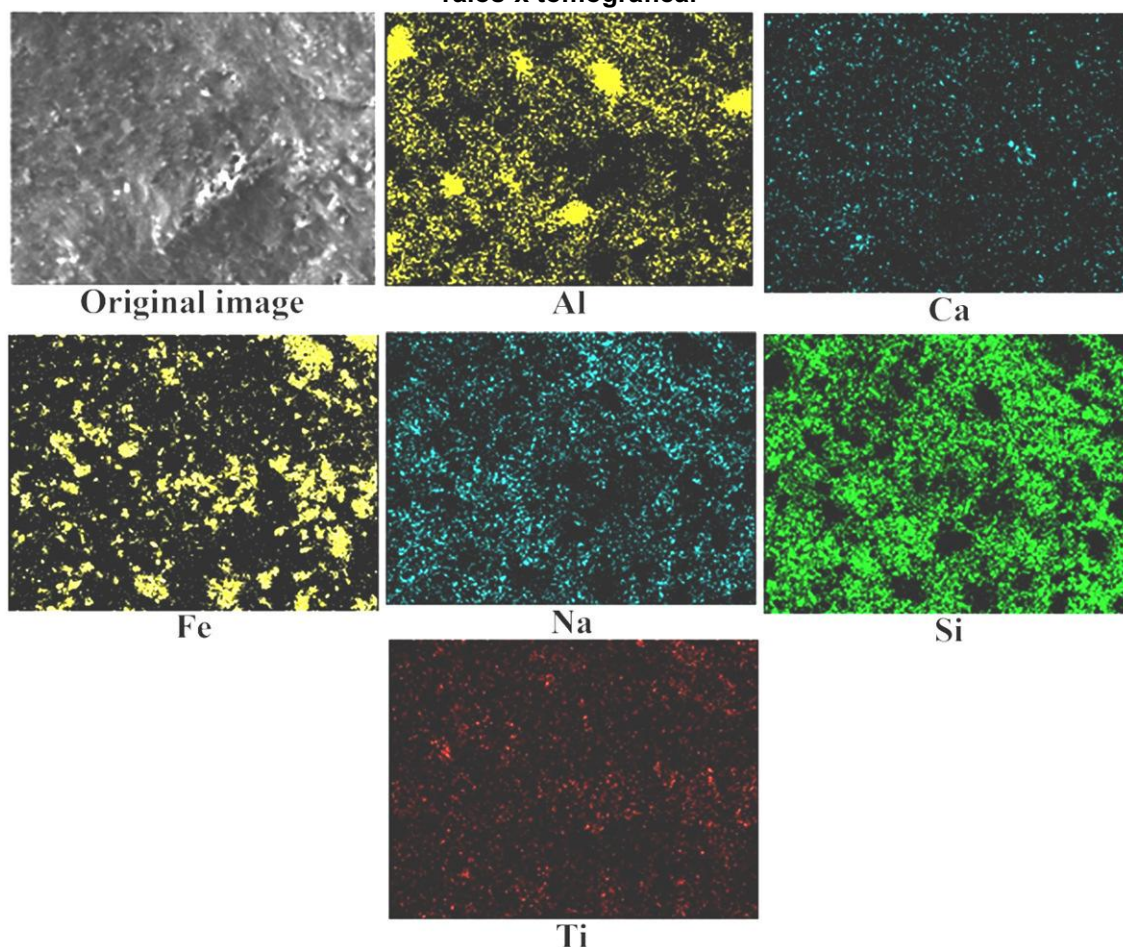
Pontos	Al	Ca	Fe	K	Mg	Ti	Si	Total
1	7,9	0,00	2,26	0,57	0,00	0,00	89,27	100,0
2	9,79	0,40	2,94	0,00	0,56	0,00	86,31	100,0
3	8,63	0,00	2,95	0,00	0,00	0,00	88,42	100,0
4	8,67	0,00	2,65	0,00	0,00	0,00	88,68	100,0
5	17,34	0,00	5,15	0,00	0,56	0,58	76,37	100,0
6	19,52	0,00	4,27	0,00	0,44	0,56	75,21	100,0
7	2,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,78	100,0
8	14,7	0,00	4,95	0,00	0,00	0,67	79,68	100,0
9	16,21	0,00	4,61	1,11	0,00	0,00	78,07	100,0
10	2,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,79	100,0
11	2,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,85	100,0
Max.	19,52	0,40	5,15	1,11	0,56	0,67	97,85	
Min.	2,15	0,40	2,26	0,57	0,44	0,56	75,21	

Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

O componente Ca é o com menor concentração e foi encontrado em apenas um dos pontos pesquisados, ou seja, no ponto 02.

Ao verificar as imagens da figura 13, abaixo na qual se observa a posição de cada elemento químico na área estudada, a utilizar o método de tomografia de raio x e espectro de absorção ele confirma a alta concentração de Si (53,30%) seguido pelo elemento químico Al (24,7%) e com uma concentração mais baixa de Fe (6,10%) o qual tem concentração suficiente para atribuir a coloração avermelhada à cerâmica.

**Figura 13 - Mapeamento dos estados químicos individuais de cada elemento químico encontrado na amostra de argila utilizada, o qual foi realizado por espectro de absorção de raios-x tomográfica.**



**Fonte:** Adaptado Alekseev, 2017

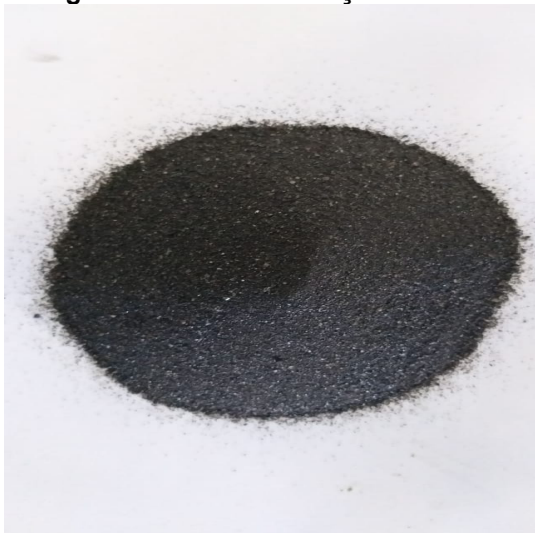
Os outros elementos químicos apresentam relativamente pouca concentração, como por exemplo, o Ca (cálcio) e o Ti (titânio). O composto Fe apresenta aglutinações bem distribuídas, característica comum para o Fe. O elemento Ti apesar de baixa concentração é o que apresenta a distribuição mais uniforme, esse metal não é um bom condutor térmico, por isso é bastante utilizado em materiais refratários, como por exemplo, cerâmica.



### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DE FUNDIÇÃO

A areia de fundição utilizada na pesquisa foi coletada em uma indústria de fabricação de peças automotivas. Abaixo, na figura 14 pode-se visualizar a imagem da areia de fundição utilizada.

**Figura 14 - imagem da areia de fundição utilizada na pesquisa:**



**Fonte: autor 2019**

#### 4.3.1 Granulometria da Areia de Fundição utilizada.

Observa-se, nos resultados obtidos, pela tabela 07 abaixo, que a areia de fundição é a matéria prima utilizada com a distribuição granulométrica mais uniforme 85,17% das partículas com tamanho de 0,59 a 0,30mm, e a quantidade de finos com granulometria entre 0,075 e 0,00 é 0,08, ou seja, praticamente 0,0.

**Tabela 7 - Granulometria, densidade e umidade da areia de fundição.**

Tamanho (milímetro)	Mais que 1,20	1,19-0,60	0,59-0,30	0,29-0,15	0,149-0,075	0,075-0,0	Densidade testada (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)
(% em peso)	0	0,26	85,17	13,86	0,62	0,08	1,59	1,3

**Fonte:** Adaptado Alekseev, 2017

A densidade apresentada na tabela 7 da areia de fundição foi determinada 1,59 (g/cm<sup>3</sup>) e a umidade das composições quando coletadas na indústria de fundição é de 1,30%. Esta areia de fundição encontrava-se acondicionada em

tambores previamente encaminhadas para o armazenamento da areia de fundição dentro da própria indústria e posterior transporte para a cidade de Mafra, Estado de Santa Catarina.

#### 4.3.2 Caracterização da Areia de Fundição composição química pelo método de FRX

Para a caracterização da areia de fundição é preparado uma pequena quantidade do material do qual é obtido os resultados apresentados na tabela 8.

**Tabela 8 - Composição química da areia de fundição pelo método FRX em %**

Óxidos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Perda ao Fogo	Total
Valores (%)	1,2	91,2	0,7	2,3	0,1	0,2	0,3	0,1	3,7	100

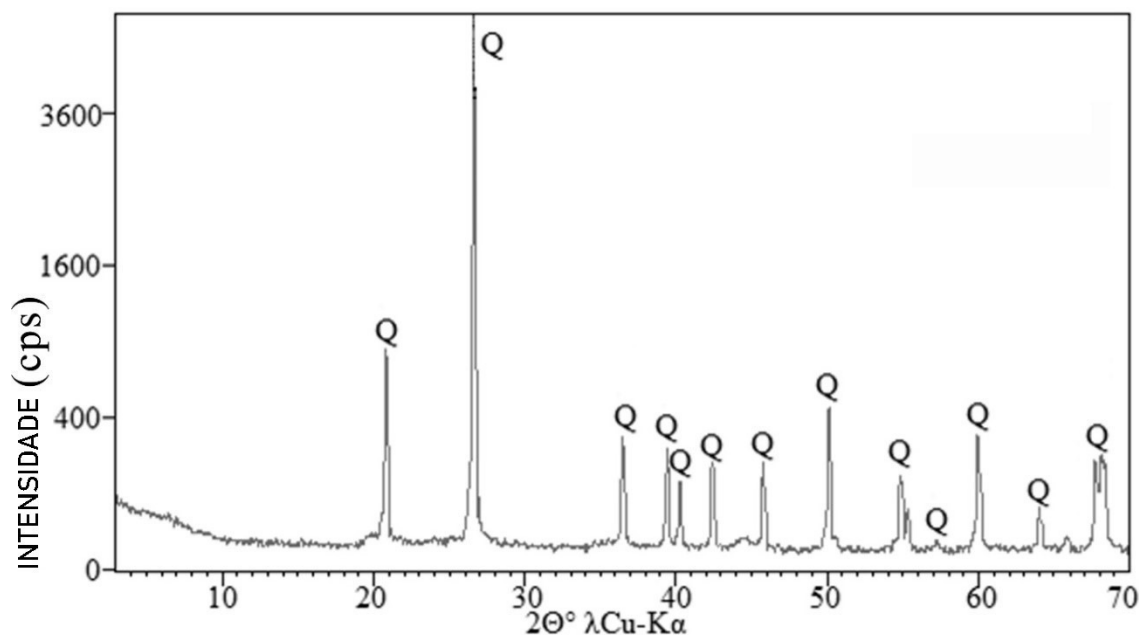
**Fonte:** Adaptado Alekseev, 2017

A areia de fundição é um dos materiais mais simples, ao observar a composição química, pois conforme exposto na tabela 08, a areia de fundição é composta principalmente de SiO<sub>2</sub> (91,20%) com uma pequena parte de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,3%) a qual pode ocorrer devido ao contato da areia com o molde de argila no processo de fabricação.

Também se verifica uma pequena quantidade de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,2%) a qual pode ocorrer devido a uma pequena camada de areia que se encontra na superfície. Encontram-se outros óxidos com teores entre 0,1% e 0,3%. A perda ao fogo na proporção de 3,70% pode ser explicada devido a forma de estocagem da areia dentro da indústria onde pode-se ser contaminada por pequenas quantidades de material orgânico.

#### 4.3.3 Caracterização da Areia de Fundição pelo método de DRX.

Apresenta-se, na tabela 08 a composição mineralógica da areia de fundição a qual contém (91,20%) de SiO<sub>2</sub>, sendo representado por um único mineral o quartzo cristalino. Também apresenta outros produtos químicos em pequena quantidade (8,80%) conforme se pode verificar no DRX, apresentado, pela figura abaixo, em que estes componentes têm picos bastante reduzidos.

**Figura 15 - Difração de raio-x (DRX) da escória de alto forno**

Nota: Q Quartz ( $\text{SiO}_2$ )

Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

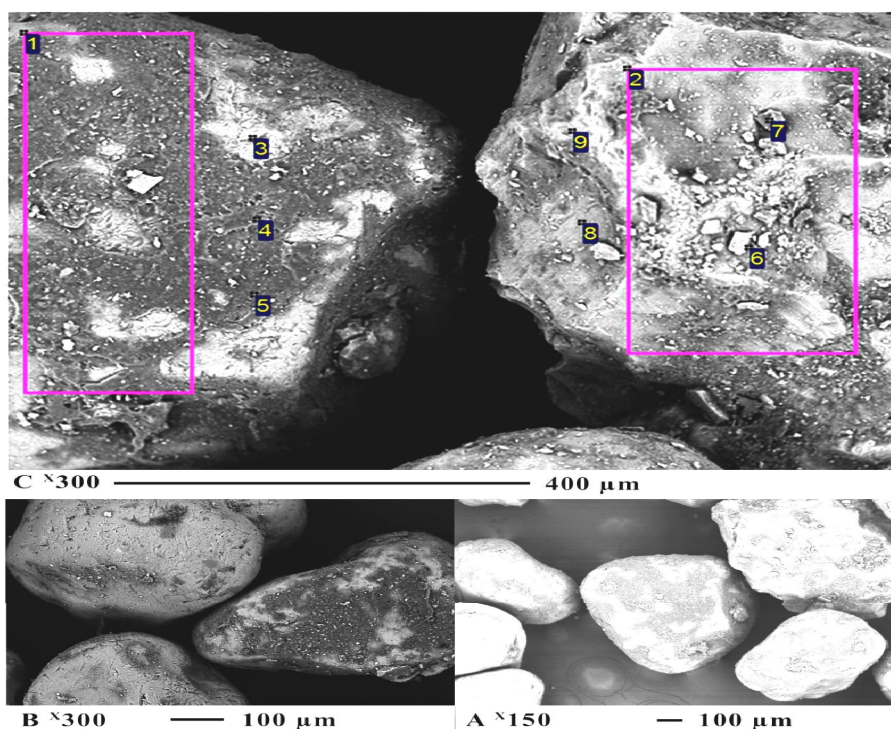
Pode-se destacar que, grande parte do material é perda ao fogo (3,70%) tabela 8, descontados o percentual que é  $\text{SiO}_2$ . O material que compõem o percentual de perda ao fogo pode ser Hidratos e/ou carbonatos, que quando submetidos ao processo de queima das cerâmicas devem se degradar.

#### 4.3.4 Caracterização da Areia de Fundição pelo método MEV e EDS

Com o estudo das imagens apresentadas na figura 15 as quais foram obtidas pelo método de MEV, infere-se que os tamanhos das partículas da areia de fundição foi entre 100 e 300  $\mu\text{m}$ , pela granulometria, portanto pela imagem do MEV que foi ampliada em 300 vezes pode-se verificar que não houve alterações significativas na superfície das partículas sendo possível verificar as estruturas morfológicas delas, conforme se observa na figura 16 abaixo.



Figura 16 - MEV Microscopia de imagem da areia de fundição.



Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

A areia de fundição sofre um choque térmico expressivo em torno de 1300°C na moldagem de peças, sendo assim inevitáveis as alterações estruturais da areia, pode-se ficar invisível no interior das partículas. Nos casos em que a areia for utilizada uma ou duas vezes pode não ser visível superficialmente as alterações provocadas pelos choques térmicos.

Tabela 9 - Composição química da areia de fundição

Pontos	Al	Fe	Na	Si	Total
1-área	2,71	5,43	0	91,86	100
2-área	0,89	1,25	2,68	95,18	100
3	0,49	0	0	99,51	100
4	2,44	5,08	0	92,48	100
5	10,22	9,2	0	80,58	100
6	0	0	2,24	97,76	100
7	3,99	0	5,92	90,09	100
8	6,52	11,28	0	82,2	100
9	3,95	0	0	96,05	100
Min	0,49	1,25	2,24	80,58	
Max	10,22	11,28	5,92	99,51	

Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

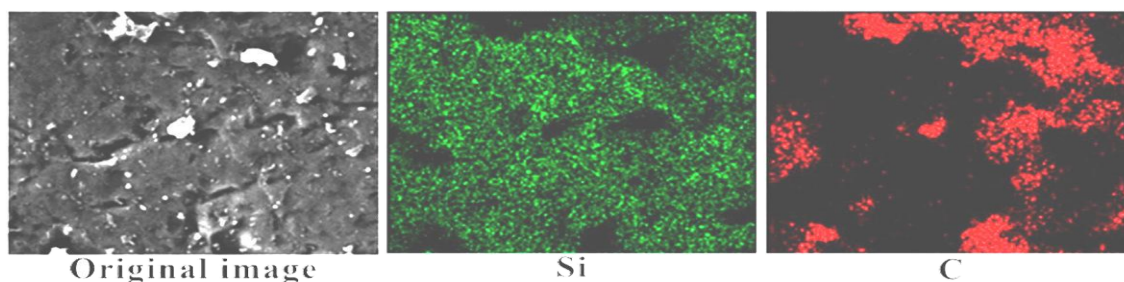
Nas imagens da figura 16, pode-se verificar que mesmo sendo apresentada na tabela 9 a existência de quatro componentes químicos é predominante Si e C na composição da areia de fundição utilizada na tese.

No método de MEV foram identificados os componentes Fe, Al e Na, porém, no método de mapeamento não foi possível serem encontrados. Já o componente C foi encontrado no método de mapeamento e pelo método de EDS e FRX não foi identificado. Essa diferença pode ser explicada pela diferença de abordagens de um ensaio para outro. Quanto à presença do componente C em um dos métodos, pode ser explicado pois ocorre um processo de queima na superfície das partículas da areia juntamente com o choque térmico do metal com a areia que constitui a forma.

Na análise microquímica pelo método de EDS, conforme figura 16 e a tabela 09 acima, foi possível encontrar somente quatro elementos químicos, sendo o principal deles o Si o qual tem uma variação de ponto a ponto de 80,58 a 99,51% já o com menor teor foi o Fe com 1,25 – 11,28% acompanhado pelo Al com 0,49-10,22%. O componente com menor variação é o Na 2,24 – 5,92 entre o máximo e mínimo.

A areia de fundição não é um material puro, pois além da areia, é misturada argila natural, na moldagem dos moldes das peças a serem fundidas. Depois de realizada a moldagem do molde, esse material entra em contato com o metal líquido o qual pode entrar em contato com micro-poluentes, desta forma, ocorrer o surgimento destes na composição microquímica analisada. Chama-se de micropoluentes as seguintes partículas: aditivo de formação da mistura das formas; partículas de argila; folhas de óxidos de ferro localizada na superfície das partículas de areia entre outros.

**Figura 17 - Mapeamento dos estados químicos de um elemento dentro de uma amostra de areia de fundição (Usando espectroscópio de absorção de raio-x tomográfica).**



Nos ensaios de FRX tabela 9 e os resultados de DRX apresentado na figura 17 verificam-se que a areia de fundição se apresenta com pureza elevada, porém, quando foi realizada a análise dos microelementos, foi encontrado alguns elementos em quantidades bem reduzidas.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE AUTO FORNO

A escória de alto forno foi recolhida de uma indústria de fundição de peças para veículos da região de Curitiba (PR). Esse material é armazenado pela própria indústria, dentro do seu pátio, por não ter uma destinação para uso, e é descartado em aterros sanitários, a fazer com que mesmo que haja um controle para mitigar a poluição, ainda acaba sendo prejudicial ao meio ambiente. Portanto a inclusão desse material e dos demais em processos de fabricação de novos materiais se tornam imprescindíveis.

**Figura 18 - Imagem da amostra de escória de auto forno utilizada na pesquisa.**



**Fonte: autor 2019**

##### 4.4.1 Granulometria da escória de auto forno

A escória de alto forno apresentou a maior concentração das partículas 66,39% entre os tamanhos de 0,29-0,15mm. É o resíduo com maior densidade entre os resíduos utilizados na tese, isso se justifica pelo alto teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (62,10%), segundo ensaios de FRX. Já a umidade apresentada foi de 1,10%, esta umidade foi aferida após ter sido acondicionado em tambores e estocado na indústria de fundição, conforme se observa na tabela abaixo.

**Tabela 10 - granulometria, densidade e umidade da escória de auto forno.**

tamanho (milímetro)	Mais que 1,20	1,19-0,60	0,59-0,30	0,29-0,15	0,149-0,075	0,075-0,0	Densidade testada (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade ( % )
(% em peso)	0	0	14,78	66,39	17,63	1,35	2,75	1,1

Fonte: autor 2019

A granulometria da escória de alto forno foi realizada conforme prescreve a NBR 248:2003 na qual a maior parcela da escória se classificou no tamanho entre 0,29-0,15 milímetros.

#### 4.4.2 Caracterização da escória de auto forno composição química pelo método de FRX

A escória de alto forno utilizada possui elevados níveis de óxidos ferrosos, os quais chegam a 62,10% tabela 11. A escória ainda possui outros óxidos com porcentagens que se demonstra na tabela 11 e aqui indicados na ordem decrescente cada óxido: 13,8% de SiO<sub>2</sub>, 10,0% de SO<sub>3</sub>, 2,6 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2,50% de CaO, conforme apresentado, ainda se tem outros óxidos que não representam mais que 1% da massa da escória utilizada.

**Tabela 11 - Composição química da escória de alto forno pelo método FRX.**

Óxidos presentes nas matérias primas (em %)																					
Óxidos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	SnO <sub>2</sub>	ZnO	CuO	ZrO <sub>2</sub>	MoO <sub>3</sub>	Perda ao Fogo	Total
Valores (%)	62,10	13,8	10,0	2,6	2,5	0,3	0,9	0,4	0,6	0,4	4,50	0,3	0,0	0,2	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	1,7	100

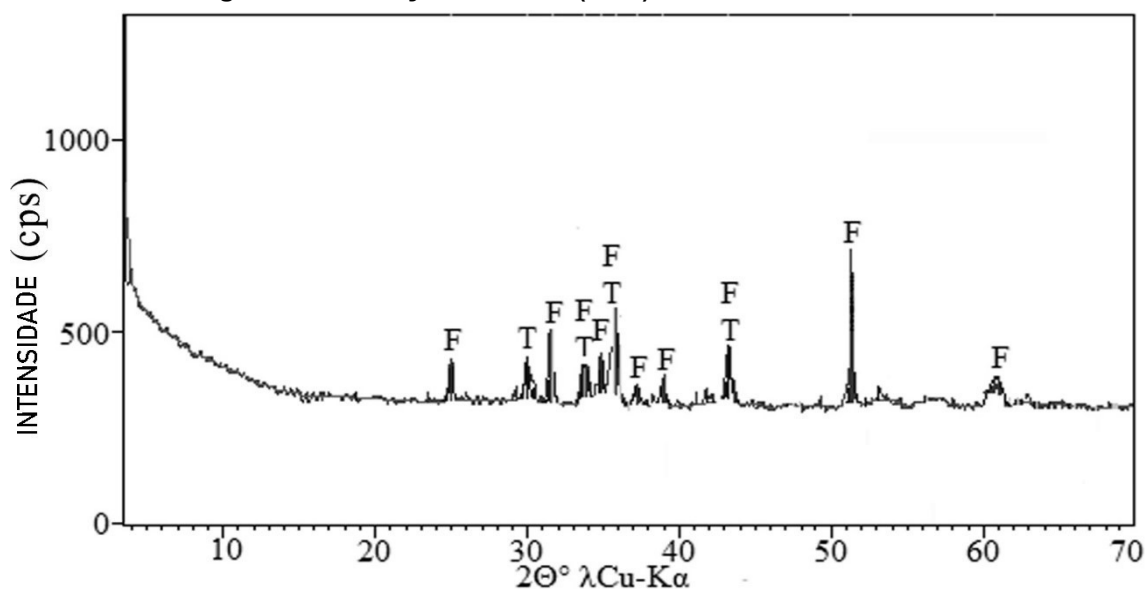
Fonte: autor 2019

Nos resíduos provenientes da produção de metalurgia são comuns possuir teores elevados de SO<sub>3</sub>, bem como, nestes casos, ter baixa perda ao fogo o qual se indica na pesquisa que é de 1,7%. As escórias de alto forno possuem tais características devido a forma de produção a qual se utiliza temperaturas acima de (1500°C). Na composição das cerâmicas o teor de escória utilizado é baixo, sendo assim, os óxidos com menos de 1% não são relevantes na formação da cerâmica, ou seja, não influenciam nas propriedades das cerâmicas desenvolvidas.

#### 4.4.3 Caracterização da escória de alto forno pelo método de DRX.

Na figura 19, apresenta-se a composição química da escória de alto forno, utilizada como matéria prima na presente tese. A escória tem elevado teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (63,60%), óxido de ferro, bem como (13,80%) de  $\text{SiO}_2$  e (10,00%) de  $\text{SO}_3$  os quais somados chegam a (87,40%) do total de óxidos de ferro.

Figura 19 - Difração de raio-x (DRX) da escória de alto forno



Nota: Fayalite – ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), Troilite – ( $\text{FeS}$ ).  
 Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

Na figura 19 apresenta-se duas principais composições mineralógicas da escória de alto forno, dentre as três apresentadas anteriormente sendo elas Fayalite – ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) e Troilite –  $\text{FeS}$ . Essas duas composições mineralógicas são as que apresentam maiores picos, a razão para estes picos é a estrutura amorfa do material vítreo, que acaba a se formar quando o material foi submetido a altas temperaturas que podem chegar a  $1500^\circ\text{C}$  no do processo de fusão.

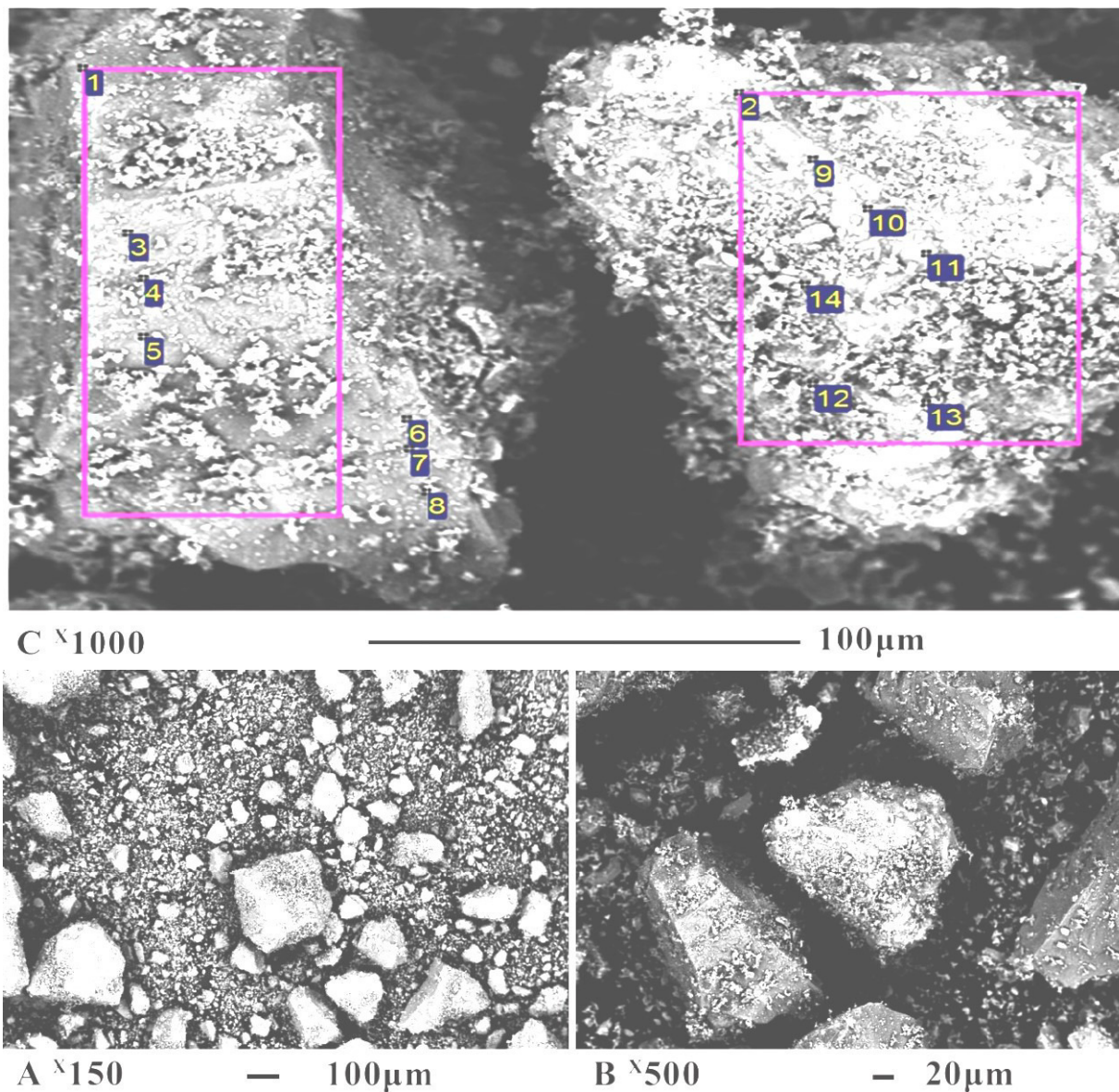
#### 4.4.4 Caracterização da escória de auto forno pelo método MEV e EDS

Conforme imagem apresentada na figura 19, à escória de alto forno apresenta uma variedade enorme de tamanho e formas das suas partículas. Pode-se observar na figura abaixo, que a maioria das partículas possui tamanhos entre



extremamente pequenas. Este tipo de material tem a característica de possuir forma afiada.

**Figura 20 - MEV Microimagem da Escória de alto forno.**



**Fonte:** Adaptado Alekseev, 2017

A forma afiada das partículas é ocasionada pela maneira de preparação pois, neste processo, a escória é moída e esmagada mecanicamente como também não tem influência nesse processo de preparação das composições com temperaturas elevadas ou ácidos.

Na tabela 12, apresenta-se a caracterização química das partículas que compõem a escória de alto forno utilizada na tese a qual demonstra que não foram encontradas características químicas comuns.

**Tabela 12 - Composição química pelo método de EDS da escória de alto forno utilizada**

Pontos	Na	al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	mg	Pb	BA	Total
1-área	2,48	2,15	13,51	8,49	0,94	0,75	2,99	0,94	67,76	0	0	0	100
2-área	1,77	1,52	5,24	19,83	0,82	0,55	1,27	69	0	0	0	0	100
3	0	0	15,04	3,15	0	0	1,97	1,38	77,75	0,71	0	0	100
4	0	0,96	1,46	1,37	0	0,3	4,01	1,38	90,52	0	0	0	100
5	0,84	0,93	7,18	4,01	0	0	2,33	0,97	68,46	0	15,28	0	100
6	0	0,84	16,48	1,31	0	0	2,45	1,29	76,79	0,85	0	0	100
7	5,24	11,75	27,04	2,29	1,45	9,09	6,09	0	34,39	0	0	2,66	100
8	0,87	0,86	4,48	20,81	0	0	1,19	0	71,8	0	0	0	100
9	1,51	0,54	1,9	24,9	0,69	0	0,47	0	70	0	0	0	100
10	3,16	1,04	10,13	10,37	1,35	0	1,91	0,81	71,23	0	0	0	100
11	1,44	0,7	1,1	2,59	0	0	0	0	94,17	0	0	0	100
12	0	2,1	4,65	3,51	0	0	0,8	0	88,94	0	0	0	100
13	1,12	1,13	4,95	26,69	0,96	0,7	1,49	0	62,97	0	0	0	100
14	0	0,95	3,24	3,98	0	0	0,81	0	90,52	0	0,5	0	100
Min	0,84	0,54	1,1	1,37	0,69	0,55	0,47	0,81	62,97	0,71	0,5	0	
Max	5,24	11,75	27,04	26,69	1,45	9,09	6,09	69	94,17	0,85	15,28	2,66	

**Fonte:** Adaptado Alekseev, 2017

Na tabela 12 têm-se duas áreas descritas, em ambas o conteúdo de Mn é: na primeira área de 0,94% e na segunda área é de 69,00%, sendo uma diferença significativa da quantidade de manganês (Mn) entre as duas áreas estudadas. Também se pode verificar uma diferença significativa na proporção de Fe (ferro) pois na primeira área temos 67,76% e na segunda não temos este metal. Também se podem observar diferenças significativas quando verificado os pontos de máximo e mínimo de cada componente como, por exemplo: o Si que é de 1,10% de mínimo e de 27,04 de máximo; já o componente S tem seu mínimo em 1,37% e seu máximo de 26,69%; o (Ca) Cálcio tem o seu mínimo em 0,47% no ponto 09 e seu máximo de 6,09% no ponto 07; para Pb também tem-se uma diferença significativa, pois tem seu mínimo em 0,50% e seu máximo de 15,28% assim sucessivamente pode-se demonstrar os outros componentes químicos encontrados na amostra de escória de fundição.

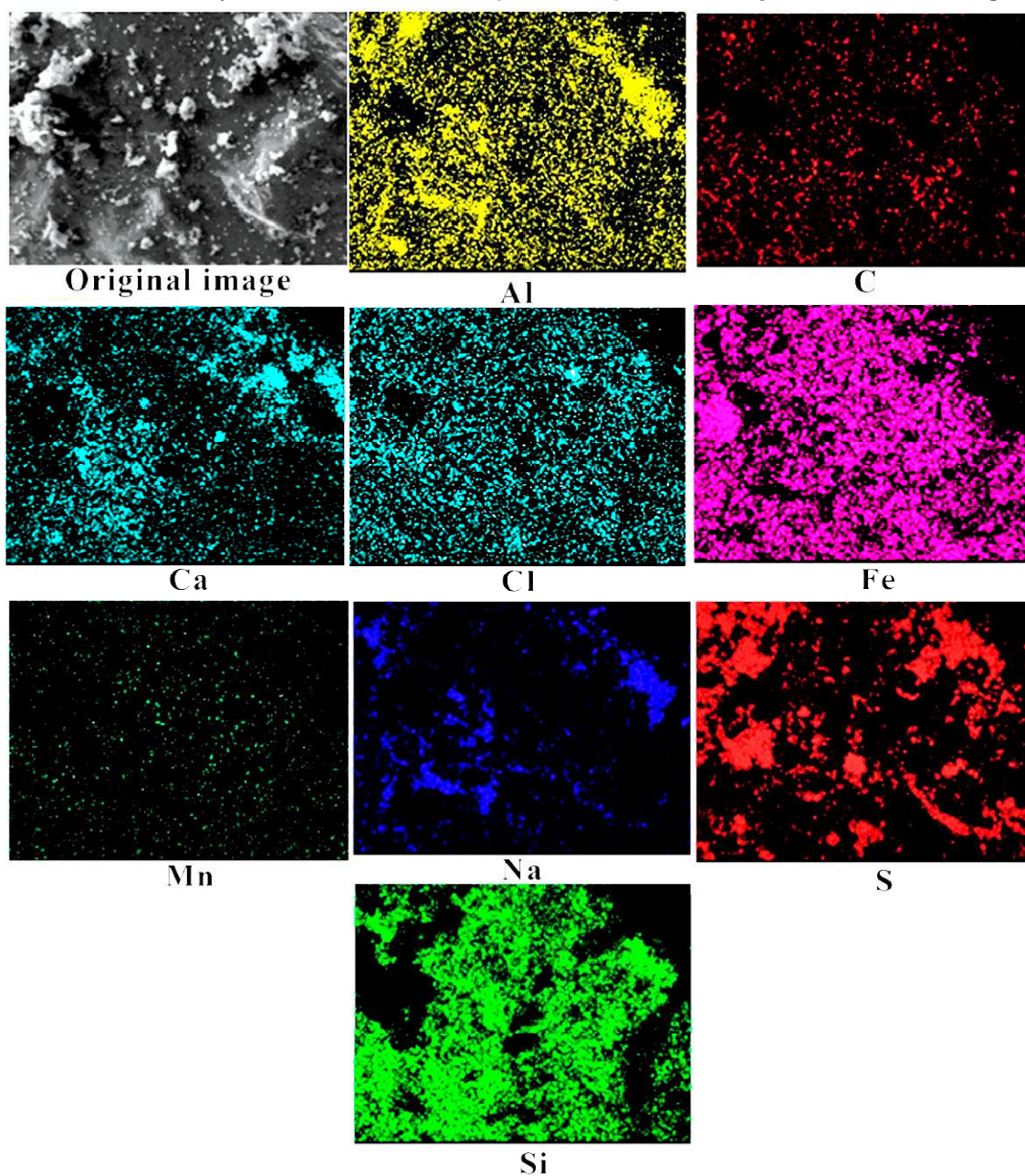
Para que ocorram tais variações de porcentagens de cada componente químico das composições, é possível que em virtude das variações térmicas que a escória suporta para o seu resfriamento, para chegar ao ponto de fusão o minério chega a 1500°C. Pode-se atribuir a mudança repentina da temperatura a estrutura cristalina encontrada na escória de alto forno estudada, no qual se pode visualizar



na figura 19 em que se apresentam os resultados do DRX da escória de auto forno, pois como não houve tempo suficiente para a formação de cristais, desta forma, o surgimento de quantidades significativas de material amorfo.

Estudou-se na figura 20 os elementos químicos da escória de auto forno, a análise foi realizada ao utilizar o método de mapeamento por espectroscopia de absorção de raio-x tomográfica.

**Figura 21 - Mapeamento dos estados químicos de um elemento dentro de uma amostra de escória de alto forno (usando o método de espectroscopia de absorção de raios-x tomográfica)**



Fonte: Adaptado Alekseev, 2017.

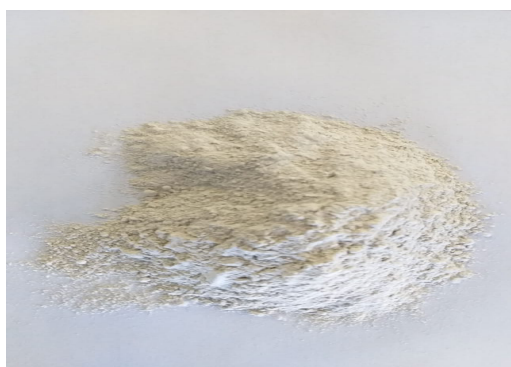


Nas imagens verifica-se que não tem variações significativas da coloração dos elementos químicos, não ocorreu coágulos separados, fato este, que pode ser explicado pela predominância da forma amorfa no material. A imagem de Fe possui uma grande quantidade de pontos devido ao seu conteúdo serem de 62,10%, assim como observado também no EDS que na maioria dos seus pontos de análise apresentam alta quantidade de Fe na escória de alto forno. Com menor densidade é o Mn, no qual o conteúdo é de somente 0,6%. Nos casos dos componentes S e Si a coloração é menos uniforme.

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO.

O resíduo de vidro foi coletado em indústrias de produção de vidro temperado da cidade de Mafra – SC, na qual o material é estocado e entregue para empresas especializadas em seu descarte.

**Figura 22 - Imagem do resíduo de vidro.**



**Fonte:** autor 2019

##### 4.5.1 Granulometria de resíduo de vidro utilizada.

Ressalta-se que 18,78% do pó de vidro encontra-se em granulometria inferior ao diâmetro de 0,074mm, este fato decorre pelo processo de polimento do vidro, conforme observa-se na tabela abaixo.

**Tabela 13 - Granulometria densidade e Umidade do resíduo de vidro**

Resíduo de Vidro							Densidade testada (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)
tamanho (milímetro)	Mais que	1,19-0,60	0,59-0,30	0,29-0,15	0,149-0,07	0,075-0,0		
(% em peso)	0	0	23,29	18,55	39,38	18,78	0,99	1,4

**Fonte:** Autor 2019

A granulometria do vidro foi realizada conforme prevê a NBR 7181/2018 sendo retida a maior porcentagem nos tamanhos de 0,59-0,30 (23,29%) e na granulometria de 0,29-0,15 (18,55%).

#### 4.5.2 Caracterização do resíduo de vidro pela composição química no método de FRX

Na tabela 14 apresenta-se a composição química do resíduo de vidro obtido pelo método FRX. Sendo apresentada também a perda ao fogo do material, característica importante, pois, quanto maior for este resultado maior é a possibilidade de deformações da cerâmica e formação de bolhas.

**Tabela 14 - Composição química do resíduo de vidro pelo método FRX**

Óxidos presentes nas matérias primas (em %)												
Óxidos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Perda ao Fogo	Total
Valores (%)	0,8	75,2	0,2	0,8	8,3	3,2	10	0,3	0,3	0,9	0,3	100

**Fonte:** Adaptado Alekseev, 2017

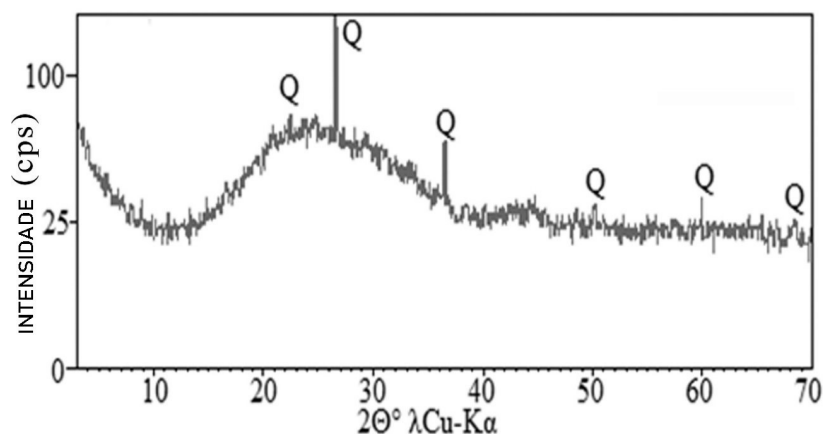
Foi indicado na tabela 14 os componentes químicos do resíduo de vidro nos quais se pode destacar a SiO<sub>2</sub> (75,20%), Na<sub>2</sub>O (10,7%) e CaO (8,3%). Pode-se ressaltar que o resíduo de vidro é o componente com menor perda ao fogo (0,3%). A pequena quantidade de perda ao fogo do resíduo de vidro é importante, pois não provoca alterações nas propriedades da cerâmica desenvolvida.

O resíduo de vidro foi utilizado na composição da cerâmica, pois é comum estes materiais apresentarem a composição química observada a qual tem a finalidade de diminuir o ponto de fusão das cerâmicas desenvolvidas.

#### 4.5.3 Caracterização do resíduo de vidro pelo método de DRX.

O resíduo de vidro é basicamente composto de quartzo conforme se verifica na figura 23, porém, com uma intensidade baixa com aproximadamente 100 contagens por segundo. Identifica-se um nível de raios-x bastante elevados se comparados com os picos de quartzo.

Figura 23 - Difração de raio-x ( DRX) da resíduos de vidro.



Nota: Q – (SiO<sub>2</sub>)

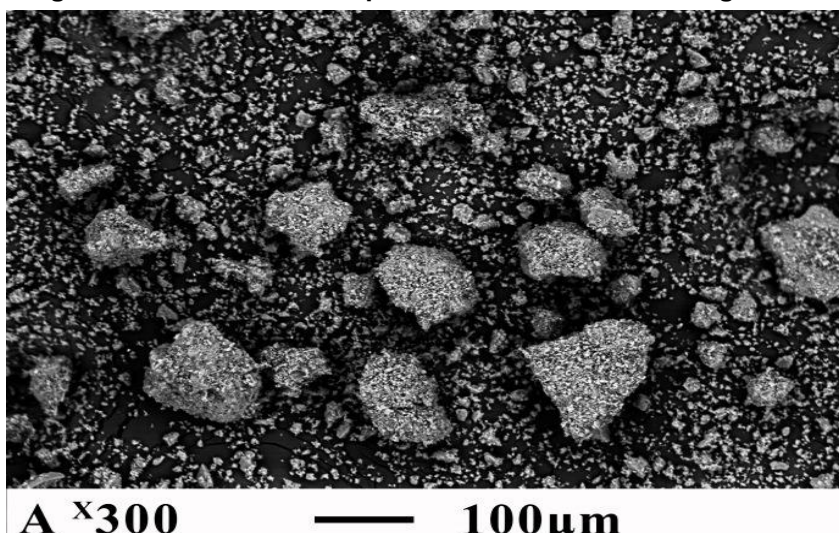
Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

Destaca-se que praticamente a curva toda representada na figura 23 apresenta o pó de vidro com características amorfas com homogeneidade entre 12° e 38° de  $2\theta = 26.63^\circ \lambda\text{Cu-K}\alpha$ , o pico de quartzo mais elevado é de mais de 100 contagens por segundo  $2\theta = 26.63^\circ \lambda\text{Cu-K}\alpha$  a ficar ainda com intensidade menor que o comprimento da curva até o início do DRX.

#### 4.5.4 Caracterização de resíduo de vidro pelo método MEV e EDS.

Na figura 24, observou-se, que quando utilizado o método MEV que as partículas possuem formas irregulares e bordas arredondadas.

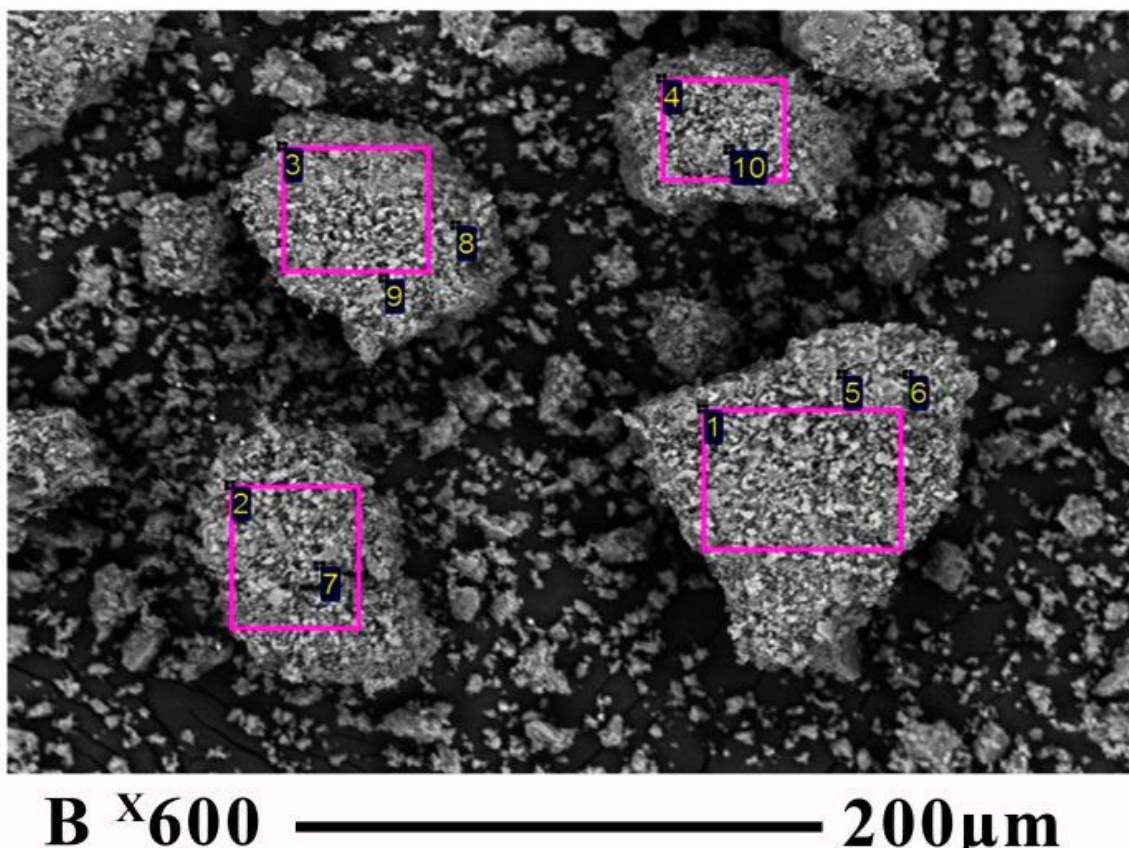
Figura 24 - Imagem de resíduo de vidro pelos métodos de microimagem de varredura MEV.



Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

A figura 25 abaixo, é a mesma da imagem superior, porém, com ampliação de 600 vezes na qual é identificado 10 pontos em quatro quadros distintos, dos quais são identificadas as composições químicas de cada ponto ou quadro.

**Figura 25 - Imagem de resíduo de vidro pelos métodos de microimagem de varredura MEV com aproximação de 600 vezes.**



Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

Na imagem da figura 25, pode-se visualizar que, todas têm suas bordas arredondadas, porém, todas as partículas são irregulares. Outra particularidade é que todas as partículas não têm aparência de vidro quebrado, pois no processo de polimento do vidro, do qual resulta este material, a principal função é justamente deixar remover as partes afiadas do vidro a fazer com que o rejeito deste processo assim também fique.

Pela tabela 15 abaixo pode-se verificar que a maior concentração no resíduo de vidro é o elemento Si com 69,69% e Ca com 61,82% e a menor concentração é o elemento K.

**Tabela 15 - Composição química pelo método de EDS de resíduo de vidro**

Áreas	Pontos	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	Si	Total
Área 01	1	1,01	18,66	0	0,55	3,62	13,27	62,89	100
	5	0,89	20,09	1,54	0,7	3,53	10,63	62,62	100
	6	1,28	35,1	4,68	0	2,23	5,88	50,83	100
Área 2	2	1,13	19,56	0	0	3,47	11,49	64,35	100
	7	1,38	16,94	0	0,83	2,71	8,45	69,69	100
Área 3	3	0,86	20,56	0	0	3,68	13,24	61,66	100
	8	1,08	61,83	0	0	1,36	5,72	30,01	100
	9	0,91	28,38	0	0,63	3,12	9,41	57,55	100
Área 4	4	1,09	14,96	0,59	0,54	3,95	13,96	64,91	100
	10	0,86	25	0	0	3,91	11,18	59,05	100
Min		0,86	14,96	0,59	0,54	1,36	5,72	30,01	
Max		1,38	61,82	4,68	0,83	3,95	13,96	69,69	

Fonte: Adaptado Alekseev, 2017

Inferese-se que o Si e o Ca, são em sua maioria de quantidades uniformes em todos os pontos analisados, diferentemente do Fe e o K que possuem 0,0% desse elemento em alguns pontos analisados. Os demais elementos também se mantem uniformes nos pontos analisados, porém em menor quantidade.

#### 4.6 RESULTADOS E CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS DESENVOLVIDAS

Depois de desenvolvida os corpos de provas das cerâmicas e passado pelo processo da queima, foi realizado ensaios para determinar suas características, como resistência, densidade, taxa de absorção de água e retração linear.

Quando realizado as análises de todos os corpos de provas, foram selecionadas algumas composições específicas para análises físico-químicas desses traços, portanto foram selecionados dois traços e duas temperaturas, para estas análises. Foi levada em conta a utilização de 05% de cinza que é a menor quantidade de cinza utilizada com a menor quantidade de argila natural, sendo a composição 09.

A composição 31 foi escolhida para realização desses ensaios, pois tem a maior quantidade de cinza no traço, sendo assim o compósito com maior importância, pois utiliza a menor quantidade de argila natural, o qual é o único componente que é extraído diretamente da natureza.

#### 4.7 RESISTÊNCIA A FLEXÃO DOS COMPÓSITOS DESENVOLVIDOS.

Na tabela 16, apresentam-se os resultados, os quais foram calculados ao utilizar os três melhores resultados, ao considerar que os piores resultados podem ser atribuídos a falhas na moldagem e/ou manuseio.

Os resultados são obtidos após a queima dos CP's em suas respectivas temperaturas. Foram preparados 5 CP's para cada uma das 31 composições e para cada uma das 9 temperaturas (colunas) testadas, a totalizar 1395 CP's.

**Tabela 16 - Resistência à flexão das cerâmicas após de queima com T°C**

n° compos.	Componentes, %					Resistencia à flexão (MPa) apos de queima com T°C								
	CM	ES	AF	VR	AAN	700	800	850	900	950	975	1000	1025	1050
1	0	0	0	0	100	4,88	8,07	7,57	12,07	13,30	14,75	14,28	13,70	13,24
2		20	20	10	50	1,57	1,90	2,31	3,04	3,42	3,50	4,53	5,36	DR
3		30	10	20	40	2,12	3,46	4,34	5,18	5,87	7,42	10,08	D	DR
4		20	20	30	30	1,06	2,59	3,33	3,34	4,20	4,77	7,97	D	DR
5		10	20	30	40	0,93	1,56	2,62	3,20	3,41	3,44	4,08	5,95	D
6		20	10	30	40	1,72	2,41	3,27	3,65	4,51	5,61	11,19	D	DR
7	5	20	20	10	45	2,29	2,17	4,12	4,26	4,29	4,82	5,29	7,04	DR
8		30	10	20	35	1,73	2,60	2,66	2,77	3,87	4,83	8,48	D	DR
9		20	20	30	25	1,15	2,58	2,94	3,54	5,17	7,86	10,21	0,00	DR
10		10	20	30	35	0,89	1,80	1,81	2,75	3,07	3,85	7,37	D	DR
11		20	10	30	35	1,46	2,60	2,97	3,60	4,51	8,15	14,24	DR	DR
12	7	20	20	10	43	0,96	1,65	1,66	1,86	1,86	1,92	3,64	6,97	DR
13		30	10	20	33	1,06	1,57	1,76	1,88	2,97	4,79	11,36	D	DR
14		20	20	30	23	1,21	2,64	2,72	3,66	5,25	9,82	DR	DR	DR
15		10	20	30	33	0,95	1,54	1,99	2,42	3,28	3,78	7,68	D	DR
16		20	10	30	33	1,23	3,35	3,39	3,40	5,45	7,50	14,96	DR	DR
17	10	20	20	10	40	0,93	1,10	1,36	1,62	2,82	2,84	3,22	DR	DR
18		30	10	20	30	1,45	1,70	1,70	2,21	3,42	6,81	D	DR	DR
19		20	20	30	20	2,03	2,69	2,81	3,66	5,41	8,63	DR	DR	DR
20		10	20	30	30	0,94	1,50	1,80	2,26	2,58	3,34	6,32	D	DR
21		20	10	30	30	1,42	2,71	2,77	2,96	4,89	6,35	15,80	D	DR
22	13	20	20	10	37	0,57	0,71	0,77	0,93	1,06	1,08	1,95	DR	DR
23		30	10	20	27	0,86	0,92	1,07	1,14	2,20	4,13	10,75	DR	DR
24		20	20	30	17	1,14	2,30	2,37	2,95	4,97	8,26	0,00	D	DR
25		10	20	30	27	0,69	1,16	1,40	1,70	1,95	2,65	5,43	D	DR
26		20	10	30	27	0,93	1,97	2,23	2,67	3,35	5,82	12,50	D	DR
27	15	20	20	10	35	0,54	0,58	0,60	0,82	0,83	0,90	1,78	6,82	DR
28		30	10	20	25	1,36	1,59	1,62	1,64	3,44	6,59	D	0,00	DR
29		20	20	30	15	1,61	2,36	2,91	3,67	5,82	10,48	D	0,00	DR
30		10	20	30	25	1,38	2,53	2,63	3,54	5,75	8,49	D	DR	DR
31		20	10	30	25	0,87	1,49	1,70	1,90	2,56	4,61	12,40	D	DR

Nota: CM – cinza de resíduos sólidos urbanos, ES – Escória de alto Forno, AF – Areia de Fundição, VR – resíduo de vidro, AAN- Argila e Areia Natural, D – Deformado, DR – derretido.

Fonte: autor 2019.

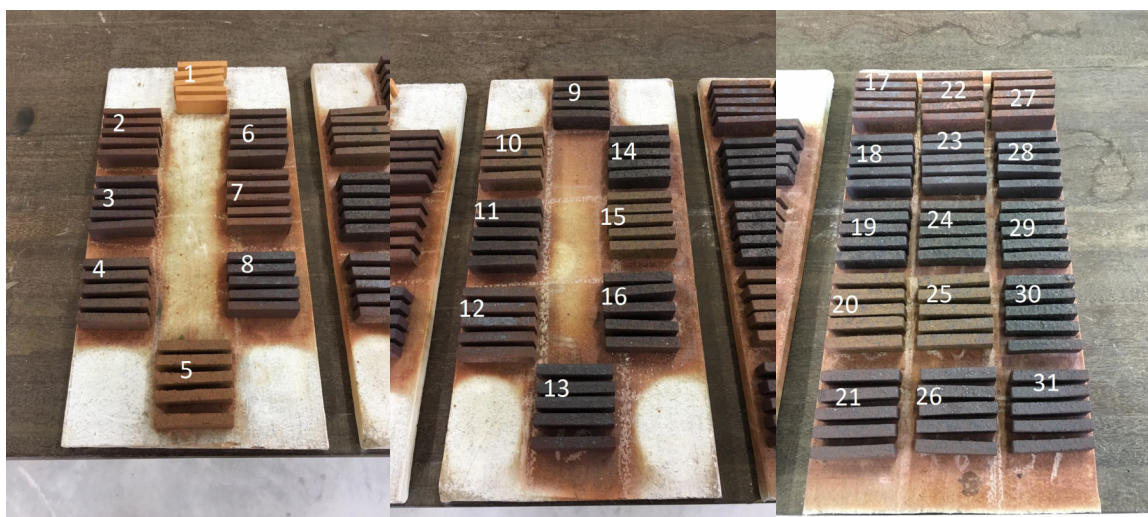
Foi desenvolvido um traço somente com argila natural com o objetivo de servir de parâmetro para as análises e comparações de resistência com os outros



compósitos desenvolvidos, os quais são compostos por resíduos industriais e a cinza de resíduos municipais (CM).

O traço desenvolvido somente de argila é o que mais se assemelha as cerâmicas que compõem os tijolos produzidos com a mesma argila. Observa-se que na temperatura de 1000°C teve as melhores resistências e poucos traços que ocorreram deformação ou derretimento. Em 850°C obteve-se em praticamente todas as composições resistências mínimas para a fabricação de tijolos maciços, abaixo imagem após a queima em 850°C.

**Figura 26 – Composições após a queima de 850°C**



**Fonte: Autor, 2019**

A classificação da NBR 13813 (ABNT, 1997) Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios na qual classifica placas cerâmicas quando a resistência a compressão for superior a 12 Mpa.

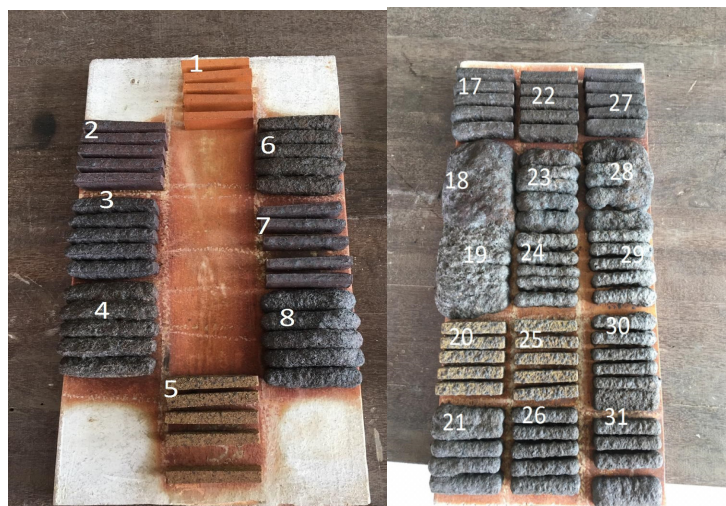
Na tabela 16 tem-se a composição de um único componente a argila natural a qual contém Illite, um mineral principal ( $KAl(Si, Al)_2(OH)_2 nH_2O$ ) e o quartzo ( $SiO_2$ ) os quais são apresentados na figura 7. Esta composição é típica de argilas utilizadas na produção de cerâmicas e a composição química é apresentada na tabela 6.

Em relação à resistência a flexão dos CP's moldados com somente argila, verifica-se aumento de resistência até a temperatura de 975°C com 14,75 MPa após esta temperatura houve uma redução da resistência. O aumento da resistência com o aumento da temperatura é devido ao processo de sintetização.



O crescimento de resistências foi verificado quando atingido principalmente as temperaturas de 975°C e 1000°C. Na temperatura de 1025°C já ocorreu de algumas composições ficarem danificadas ou totalmente destruídos, conforme figura abaixo. Já nas temperaturas entre 975°C e 1025°C, teve-se picos de resistências variando ente 10,48 e 14,96 MPa.

**Figura 27 – CP's após queima de 1025°C**



**Fonte: Autor, 2019**

Em todas as composições, nas quais foi possível realizar medições, verificou-se que não houve perda das bordas afiadas, ou seja, elas não derreteram.

Entre as temperaturas de 975°C e 1000°C obtiveram-se os melhores picos de resistências. Na temperatura de 1025°C somente seis, dos trinta e um traços, tiveram ganho de resistência, os outros 25 traços foram derretidos ou danificados durante o processo de queima, fato este, que pode ser explicado pela sintetização excessiva das composições destruídas pelo aumento da temperatura, conforme mostra a figura acima.

Em temperaturas mais altas maiores que 950°C obtêm-se resistências mais altas, isso ocorre, pois em quase todas as composições existem maiores quantidades de escoria de alto forno e pó de vidro, em sua maioria sendo 50%, os quais tem em sua composição principalmente SiO<sub>2</sub>, sendo respectivamente 62,70% e 75,20%, esse elemento tem ponto de fusão mais alto, o que faz com que em altas temperaturas faz com que tenha uma melhor fusão, tendo uma melhor eficácia e

interação entre as suas partículas, ao promover uma formação cristalina melhor e conseqüentemente a melhorar sua resistência.

Observa-se que entre as composições 07 e 11 sempre que diminui a quantidade de argila houve uma melhora a resistência à flexão das composições. Com a diminuição da quantidade de argila aumenta-se a quantidade de areia de fundição, escória e pó de vidro. A cinza não tem variação nessas composições, portanto não ocorre interferência.

Pode-se observar que as composições que contém maiores quantidade de cinza e areia de fundição associadas, ocorre em uma diminuição da resistência, pois os dois materiais são relativamente inertes e dessa forma não formam ligações químicas eficientes, portanto a combinação do seu aumento na mesma amostra ocorre a diminuição da resistência.

Infere-se que a utilização de escória juntamente com o pó de vidro em maiores quantidades resulta em efeitos positivos para a fabricação das cerâmicas, principalmente quando há maior concentração de pó de vidro em relação aos dois materiais, pois aumentam sua resistência, como se pode ser comparado nas composições 03 onde é composto por 30% de escória e 20% de pó de vidro e 40% de argila para chegar a resistência de 10,08 MPa, enquanto a composição 05 com 10% de escória e 30% de pó de vidro, com os mesmos 40% de argila natural, chega a apenas 4,08 MPa.

Pode ser observado o mesmo resultado descrito acima quando comparado as composições 22 com 20% de escória e 10% de pó de vidro chegou a 1,95 MPa, porem nesse traço ocorre uma maior quantidade de argila, já na composição 23 com 30% de escoria e 20% de pó de vidro, chega a 10,75 MPa, porém com 27% de argila, sendo 10% a menos do que na composição 22.

Observa-se também que a composição 31 a qual tem em sua composição 75% de resíduos, chegou as melhores resistências, a poder inclusive ser utilizada como cerâmicas de revestimento que precisam chegar entre 12 a 15 MPa de resistência para cerâmicas prensadas, conforme prevê em norma NBR ISO 13006/20.

Conforme a norma para cerâmicas de revestimentos, existem 5 composições que podem ser utilizadas para cerâmicas de revestimentos que precisam ter entre 12 – 15 MPa, conforme norma já supracitada, sendo elas as composições 11, 16, 21, 26 e 31, infere-se que em todas as composições

apresentadas possuem quantidade de cinza. Em todas essas composições possuem no máximo apenas 35% de material natural.

As composições 09 e 31, em 1000°C atingiram boas resistências, bem próximas a resistência da composição 01, apenas argila natural, sendo elas respectivamente, 10,21 MPa, 12,40 MPa e 14,25 MPa, observa-se que as duas composições continham apenas 25% de argila em sua composição, ou seja, 75% da sua composição é resíduos, salienta-se ainda que o traço 31 que atingiu melhor resistência entre as duas, já continha 15% de cinza em sua composição, sendo 10% a mais do que na composição 09. Na figura abaixo, mostra-se as composições após o ensaio de resistência, da composição 09 e 31 queimadas em 1000°C.

**Figura 28 – CP's da composição 09 e 31, após ensaio de resistência, queimado a 1000°C.**

**Composição 09**



**Composição 31**



**Fonte: Autor, 2019**

#### 4.8 RETRAÇÃO LINEAR DAS CERÂMICAS DESENVOLVIDAS

Na tabela 17, apresentam-se os resultados da contração linear que é uma das características importantes ao se tratar de cerâmicas. Essa característica sofre

alterações ao depender da composição de cada amostra e a temperatura de queima utilizada.

**Tabela 17 - Retração linear (%) das cerâmicas T°C**

n° compos.	Componentes (% de peso)									Retração (%) após de queima com T°C				
	CM	ES	AF	RV	AAN	700	800	850	900	950	975	1000	1025	1050
1		0	0	0	100	0,57	5,62	6,14	7,52	9,39	9,93	10,59	11,08	11,92
2		20	20	10	50	0,60	2,86	2,82	2,84	2,49	2,63	3,57	4,23	
3		30	10	20	40	0,89	2,84	2,93	2,63	2,31	2,78	2,77		
4		20	20	30	30	0,99	3,42	3,50	3,56	3,41	3,45	4,25		
5		10	20	30	40	0,85	3,21	3,21	3,86	3,96	4,01	4,26	4,52	
6		20	10	30	40	1,41	3,49	3,70	4,40	4,04	4,12	4,70		
7		20	20	10	45	1,15	4,10	3,97	4,00	4,54	4,25	4,76	4,99	
8		30	10	20	35	1,55	4,14	2,90	3,31	3,43	3,55	4,21		
9	5	20	20	30	25	1,45	3,65	3,90	4,42	4,26	5,29	5,33		
10		10	20	30	35	1,77	4,16	4,91	4,61	4,84	5,01	5,34		
11		20	10	30	35	2,14	4,33	4,44	4,84	4,44	5,20	5,35		
12		20	20	10	43	0,72	3,30	2,83	3,32	3,49	3,56	3,94	4,81	
13		30	10	20	33	1,22	2,60	3,49	3,52	3,73	3,98	4,47		
14	7	20	20	30	23	1,77	3,92	3,89	4,34	4,65	6,10			
15		10	20	30	33	1,79	3,94	4,45	4,48	4,81	4,56	4,82		
16		20	10	30	33	1,90	4,66	4,55	4,79	4,65	5,31	5,86		
17		20	20	10	40	0,65	2,75	4,28	4,02	4,32	4,88	5,26		
18		30	10	20	30	2,10	3,21	4,11	4,26	4,43	4,98			
19	10	20	20	30	20	2,18	3,63	4,13	4,53	5,02	6,34			
20		10	20	30	30	2,97	3,96	4,31	4,29	4,45	4,54	5,48		
21		20	10	30	30	2,25	4,31	4,27	4,33	4,43	5,10	7,36		
22		20	20	10	37	1,63	5,39	4,32	3,26	3,35	3,78	4,26	4,65	
23		30	10	20	27	1,53	3,08	2,37	3,42	3,64	3,98	6,13		
24	13	20	20	30	17	2,75	3,17	3,26	3,73	4,96	6,34			
25		10	20	30	27	3,51	3,98	3,91	3,69	4,47	4,46	5,38		
26		20	10	30	27	1,87	3,93	4,10	4,24	4,44	5,19	7,89		
27		20	20	10	35	1,89	2,70	2,50	2,61	2,74	2,99	3,02	3,27	
28		30	10	20	25	1,61	2,79	2,88	3,06	3,77	5,07			
29	15	20	20	30	15	2,13	3,20	3,55	3,74	5,40	7,88			
30		10	20	30	25	2,22	3,24	3,75	3,57	5,23	7,05			
31		20	10	30	25	1,60	3,91	4,12	3,75	4,24	4,61	7,46		

Nota: CM – cinza de resíduos sólidos urbanos, ES – Escória de alto Forno, AF – Areia de Fundição, VR – resíduo de vidro, AAN- Argila e Areia Natural.

Fonte: autor 2019

As cerâmicas podem ser utilizadas tanto para produção de telhas ou para produção de tijolos, o que diferencia a utilização para um ou para outro, é a retração linear e as composições adequadas para cada uma delas.

Para determinação da retração linear foi calculado o comprimento das composições, após a queima com o comprimento inicial, antes da queima estes resultados foram apresentados na tabela 17.

A composição 01 apresenta retração linear baixa, na temperatura 700°C, é de 0,57%, já na temperatura de 800°C a retração linear é considerada alta, pois é de 5,62%. Grande parte das composições desenvolvidas tem retração linear parecidas em altas temperaturas, 975-1050°C. A maior contração linear é verificada na temperatura de 1050°C com 11,92%, verificada na composição 01. Essa contração linear pode ser explicada pela decomposição da formação dos cristais de quartzo e ilite conforme se pode verificar nos resultados de DRX.

Ao analisar os resultados de retração linear da composição 01, com relação a composição 09, a semelhança entre os dois é o aumento da retração com o aumento da temperatura de queima, na composição 01 em 700°C atinge 0,56% sendo que na composição 09, o valor é de 1,45%. Quando se analisa na temperatura de 1000°C ocorre inversão, a composição 09 tem uma retração muito menor que a composição 01, a ficar em 5,33% -10,59 respectivamente. A diferença entre as duas composições ocorre, pois, um dos compósitos tem elementos termicamente instáveis, o outro compósito tem alto teor de carbonatos, hidratos e elementos orgânicos em sua composição.

A composição 09 é a que possui menor quantidade de argila sendo assim possui menor quantidade de componente característicos da argila tais como: ilite em contrapartida, possui componentes minerais como hematite e magnetite que se fundem em altas temperaturas como 1000°C, provocando elevada contração linear.

Na comparação da composição 09 com a composição 31 em 1000°C as quais são objeto de estudo da tese, por atingirem maiores resistências, observa-se que a proporção de escória, resíduo de vidro e argila são iguais, na proporção de areia de fundição é a metade da utilizada na composição 09. Já a proporção de cinza de resíduos sólidos urbanos é 5% na composição 09 e 15% na composição 31, a maior retração ocorre onde há maior quantidade de cinza, pois na cinza mesmo que haja o cuidado para retirar o máximo de matérias orgânicas, ainda fica presente esses resíduos no processo da gaseificação, portanto na queima dos

corpos de prova, tende a ter maior retração por ocorrer a “queima” desses materiais orgânicos.

A areia de fundição contribui para o aumento do encolhimento dos CPs no caso da composição 09. O encolhimento na temperatura de 1000° foi de 5,33% com 20% de areia de fundição e 5% de cinza (CM), já na composição 31 a proporção de areia de fundição é menor a ficar em 10%, porém a proporção de cinza (CM) foi de 15% neste caso, tem a contribuição da cinza para o aumento do encolhimento a ficar em 7,46% na temperatura de 1000°C.

Pode-se observar que a areia de fundição pelo ensaio de FRX que é composto principalmente por Si (sílica), esse elemento é considerado um semimetal, muito parecido com o carbono e é um material inerte, portanto não reagem quimicamente, dessa forma os demais materiais como Al (alumínio) com 10,22% que tem um baixo ponto de fusão, acarreta em aumento da retração linear, pelo fato de ter maior quantidade de areia de fundição.

#### 4.9 ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS CERÂMICAS DESENVOLVIDAS

A absorção de água é a capacidade que o material tem de acumular água em sua massa, sendo assim, uma característica importante para as cerâmicas. As normas brasileiras determinam limites de absorção de água para os materiais cerâmicos empregados na construção civil. Pode-se exemplificar o caso de telhas de cerâmicas, pois quando a absorção de água é elevada pode provocar a percolação de água a ocasionar goteiras além de aumentarem demasiadamente a sua massa e provocar sobrecarga na estrutura do telhado.

A porosidade está relacionada a formação de poros provocada pela má formação vítrea na superfície das composições ao apresentar bolhas ou fissuras em sua superfície. Percebe-se que com o aumento da temperatura ocorre a diminuição da porosidade devido ao processo de sintetização conforme demonstra na tabela 18 abaixo.

**Tabela 18 - Absorção de água das cerâmicas desenvolvidas nas diferentes temperaturas de queima (%)**

n° linha	Componentes %					Retração (%) apos de queima com T°C								
	CM	ES	AF	VR	AAN	700°C	800°C	850°C	900°C	950°C	975°C	1000°C	1025°C	1050°C
1	0	0	0	0	100	22,17	22,05	17,01	19,13	17,78	15,80	14,08	12,15	10,25
2		20	20	10	50	14,59	12,61	12,65	7,73	13,30	14,31	13,44	13,49	0,00
3		30	10	20	40	14,21	11,89	13,42	13,44	13,96	13,17	10,76	0,00	0,00
4		20	20	30	30	17,43	13,98	14,31	13,70	13,71	13,41	9,72	0,00	0,00
5		10	20	30	40	17,37	15,02	14,89	14,12	14,66	15,34	14,72	15,26	0,00
6		20	10	30	40	16,05	13,40	13,97	14,20	14,78	14,79	9,70	0,00	0,00
7	5	20	20	10	45	15,54	15,80	10,96	12,50	14,00	13,76	14,50	10,90	0,00
8		30	10	20	35	14,89	12,93	17,31	14,51	16,20	16,26	12,51	0,00	0,00
9		20	20	30	25	18,28	15,40	15,73	15,13	14,23	11,37	3,60	0,00	0,00
10		10	20	30	35	21,54	16,83	18,21	16,96	17,74	16,50	10,37	0,00	0,00
11		20	10	30	35	19,24	15,98	17,76	15,49	16,33	13,53	3,92	0,00	0,00
12	7	20	20	10	43	17,71	14,73	18,31	16,14	17,51	17,87	18,31	11,26	0,00
13		30	10	20	33	17,44	15,59	16,20	21,23	18,34	17,36	13,00	0,00	0,00
14		20	20	30	23	12,38	16,26	16,59	15,39	13,64	8,84	0,00	0,00	0,00
15		10	20	30	33	20,74	17,19	17,13	18,05	17,96	16,69	10,59	0,00	0,00
16		20	10	30	33	19,96	15,78	16,79	18,09	17,49	14,56	4,76	0,00	0,00
17	10	20	20	10	40	18,56	16,41	17,26	18,60	18,81	18,80	17,03	10,16	0,00
18		30	10	20	30	18,24	17,03	13,39	17,77	18,11	14,79	0,00	0,00	0,00
19		20	20	30	20	18,13	17,69	20,16	18,97	14,05	8,86	0,00	0,00	0,00
20		10	20	30	30	21,99	19,31	19,67	20,56	18,98	17,89	12,98	0,00	0,00
21		20	10	30	30	20,86	17,82	18,80	18,62	16,55	15,33	0,00	0,00	0,00
22	13	20	20	10	37	20,93	19,08	20,00	19,89	21,90	21,89	20,77	9,60	0,00
23		30	10	20	27	20,15	19,46	19,86	19,94	20,43	16,48	11,99	0,00	0,00
24		20	20	30	17	20,56	20,20	20,23	20,19	16,47	13,24	5,18	0,00	0,00
25		10	20	30	27	25,19	22,10	22,66	20,87	21,81	20,89	14,88	0,00	0,00
26		20	10	30	27	23,25	21,48	21,62	21,30	21,14	17,87	6,28	0,00	0,00
27	15	20	20	10	35	18,93	17,56	17,93	18,28	19,95	20,29	18,30	11,30	0,00
28		30	10	20	25	19,75	18,96	19,32	20,19	18,80	15,24	0,00	0,00	0,00
29		20	20	30	15	20,94	20,81	20,85	19,99	14,27	8,90	0,00	0,00	0,00
30		10	20	30	25	21,37	20,47	20,54	19,60	15,38	10,24	0,00	0,00	0,00
31		20	10	30	25	24,29	22,17	22,84	22,32	21,19	19,02	8,60	0,00	0,00

Nota: CM – cinza de resíduos sólidos urbanos, ES – Escória de alto Forno, AF – Areia de Fundição, VR – resíduo de vidro, AAN- Argila e Areia Natural.

Fonte: autor 2019

A absorção de água da composição 01, a qual é somente argila, inicia com 22,17 na temperatura de 700°C, e diminuiu para 10,25 na temperatura de 1050°C. A diminuição pode ser explicada pela interação entre as partículas que as compõem.

Na composição 09, ocorreu uma diminuição acentuada da absorção de água ao iniciar em 18,28% a 700°C, e ao chegar a apenas 3,60% na temperatura de 1000°C. Neste caso, a retração linear foi de 5,33% e a composição com maior resistência à flexão, atribuindo ótimas características para a composição.

Na composição 31, na qual a principal alteração em relação a composição do traço 09, é a diminuição da proporção da areia de fundição, a qual é 50% menor do que a quantidade utilizada na composição 09.

Outro fato, é a proporção de cinza utilizada na composição 31 que, é 15% enquanto apenas 5% da composição 09. Com essas diferenças a composição 31 inicia com 24,29% na temperatura de 700°C e 8,60% na temperatura de 1000°C. Esse aumento da absorção de água tem relação com a diminuição de areia de fundição associada ao aumento da quantidade de cinza.

A cinza apresenta um pouco de matéria orgânica e a torna com maior absorção de água em relação a areia de fundição que é composta em sua maioria por Si, já que esse material é cristalino e pouco solúvel.

Para cerâmicas pode-se considerar segundo a norma NBR ISO 13006/20, referente a taxa de absorção das cerâmicas:

- 3-6% - Semi-Grés;
- 6-10% - Semi – poroso;
- >10% - Poroso/Azulejo/Azulejo – fino.

Portanto, em sua maioria as composições se enquadram em porosas, podem ser utilizadas principalmente como azulejos. Poucos se enquadrariam em demais tipos, apenas ao observar a taxa de absorção, como a 16 que pode ser enquadrada como semi-grés. Em nenhuma das composições poderiam se enquadrar em porcelanatos onde precisaria ter taxa de absorção menor que 0,5%.

Ao utilizar nas composições desenvolvidas a escória de alto forno, pretende-se aproveitar a característica de influenciar positivamente na diminuição da absorção de água, pois auxilia na formação vítrea na superfície da cerâmica devido a composição amorfa desses materiais.

Foi acrescido resíduo de vidro em todas as composições, pois, pretende-se aproveitar as características de diminuir a absorção de água das cerâmicas. Pois o pó de vidro contém em sua composição em sua maioria o Si, que é um material pouco



solúvel. O vidro por si só é um material amorfo, sólido e impermeável, possui em sua composição também o Ca (cálcio), esse material é alcalino-terroso, com ponto de fusão baixa, a fazer com que sintetize melhor com os demais materiais.

#### 4.10 DENSIDADE DAS COMPOSIÇÕES

Para realizar o cálculo de densidade das composições, foi utilizado o peso dividido pelo seu volume, nos quais foram utilizadas as três dimensões de cada uma das composições. Para representar os resultados na tabela 19 abaixo, foi realizada uma média das inteiras e possíveis de serem medidas e pesadas. Para obtenção dos resultados de densidade, não há influência dos componentes inicialmente utilizados, sendo assim, não provoca alteração na densidade das composições. Já as bolhas e fissuras que possivelmente ocorreram influenciaram nos resultados da densidade.

Tabela 19 - Densidade das composições moldadas (g/cm<sup>3</sup>)

		Componentes %				Retração (%) após de queima com T°C								
nº linha	CM	ES	AF	VR	AAN	700°C	800°C	850°C	900°C	950°C	975°C	1000°C	1025°C	1050°C
1		0	0	0	100	1,61	1,69	1,71	1,69	1,74	1,78	1,85	1,90	1,93
2		20	20	10	50	1,90	1,94	1,91	1,95	1,86	1,82	1,85	1,77	
3		30	10	20	40	1,91	1,92	1,83	1,87	1,81	1,80	1,81		
4		20	20	30	30	1,78	1,85	1,84	1,85	1,80	1,78	1,79		
5		10	20	30	40	1,73	1,78	1,75	1,79	1,72	1,67	1,67	1,56	
6	0	20	10	30	40	1,80	1,94	1,82	1,82	1,74	1,71	1,73		
7		20	20	10	45	1,88	1,82	1,92	1,86	1,88	1,87	1,91	1,81	
8		30	10	20	35	1,90	1,94	1,78	1,85	1,76	1,76	1,80		
9		20	20	30	25	1,75	1,78	1,79	1,80	1,78	1,80	1,52		
10		10	20	30	35	1,66	1,69	1,72	1,70	1,62	1,59	1,59		
11	5	20	10	30	35	1,74	1,76	1,75	1,77	1,67	1,66	1,51		
12		20	20	10	43	1,80	1,84	1,78	1,78	1,76	1,73	1,71	1,63	
13		30	10	20	33	1,79	1,85	1,83	1,73	1,71	1,69	1,76		
14		20	20	30	23	1,71	1,43	1,75	1,80	1,77	1,82			
15		10	20	30	33	1,58	1,71	1,70	1,69	1,64	1,62	1,57		
16	7	20	10	30	33	1,68	1,80	1,76	1,70	1,66	1,68	1,54		
17		20	20	10	40	1,77	1,77	1,74	1,71	1,69	1,67	1,72		
18		30	10	20	30	1,81	1,76	1,74	1,78	1,71	1,72			
19		20	20	30	20	1,70	1,74	1,73	1,68	1,74	1,83			
20		10	20	30	30	1,59	1,62	1,73	1,63	1,58	1,60	1,63	1,55	
21	10	20	10	30	30	1,66	1,70	1,72	1,70	1,72	1,70			
22		20	20	10	37	1,67	1,71	1,72	1,68	1,61	1,60	1,60		
23		30	10	20	27	1,72	1,72	1,73	1,71	1,66	1,70	1,77		
24		20	20	30	17	1,63	1,64	1,66	1,61	1,69	1,78			
25		10	20	30	27	1,52	1,60	1,57	1,59	1,55	1,56	1,55		
26	13	20	10	30	27	1,60	1,66	1,64	1,64	1,61	1,63	1,70		
27		20	20	10	35	1,72	1,76	1,74	1,75	1,69	1,66	1,65	1,71	
28		30	10	20	25	1,71	1,73	1,72	1,71	1,71	1,76			
29		20	20	30	15	1,62	1,63	1,62	1,64	1,73	1,84			
30		10	20	30	25	1,60	1,65	1,63	1,65	1,70	1,79			
31	15	20	10	30	25	1,58	1,63	1,62	1,61	1,69	1,64	1,69		

Nota: CM – cinza de resíduos sólidos urbanos, ES – Escória de alto Forno, AF – Areia de Fundição, VR – resíduo de vidro, AAN- Argila e Areia Natural.

Fonte: autor 2019

Ao analisar primeiramente o traço da composição 01 na tabela 19, a qual é composta somente de argila, identifica-se que a densidade em geral aumenta com o aumento da temperatura de queima, ao iniciar com 1,61 g/cm<sup>3</sup> na temperatura de 700°C, e chegando a 1,93 g/cm<sup>3</sup> quando chega à temperatura de 1050°C. O aumento da densidade tem relação com a sintetização completa das composições desenvolvidas.

A composição 09, iniciou com densidade de  $1,75 \text{ g/cm}^3$  aos  $700^\circ\text{C}$  ao aumentar lentamente até a temperatura de  $1000^\circ\text{C}$ , chegando a  $1,81 \text{ g/cm}^3$  densidade, esta que não variou muito em relação a composição 01.

A composição 31 que possui 10% a mais de cinza e 10% a menos de areia de fundição em relação a composição 09, apresentou densidade inicial e final menores que a composição 09 de  $1,58 \text{ g/cm}^3$  a  $700^\circ\text{C}$  e  $1,69^\circ \text{ g/cm}^3$  a  $1000^\circ\text{C}$ . Essa diferença de densidade é em virtude da densidade menor da cinza em relação à areia de fundição.

## 5. OS PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DE FORMAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CERÂMICAS DESENVOLVIDAS

Os processos físico-químicas de formação das estruturas de cerâmicas desenvolvidas foram pesquisados através de aplicação de métodos: DRX, MEV, EDS, distribuição de elementos químicos (mapeamento). A seleção das composições para esta pesquisa foi realizada pela menor temperatura possível onde já atingissem resultados suficientes para a sua utilização comercial, ao seguir as normas da ABNT e na temperatura que atingiram os melhores resultados, para entender a influência que os materiais tem nessas temperaturas, dessa forma as composições escolhidas foram:

1. Composição 09 onde continha 5% de cinza, 20% de escória de alto forno, 20% de areia de fundição, 30% de pó de vidro e 25% de argila natural.
2. Composição 31, onde continham 15% de cinza, 20% de escória de alto forno, 10% de areia de fundição, 30% de pó de vidro e 25% de argila natural.

Portanto, a diferença entre as composições é a relação entre quantidade de cinza e areia de fundição, quando aumentado, mais 10% de cinza na amostra 31 diminuiu-se 10% da quantidade de areia de fundição delas. Já sua similaridade é a quantidade mínima de argila, portanto um teor ínfimo de matéria prima natural.

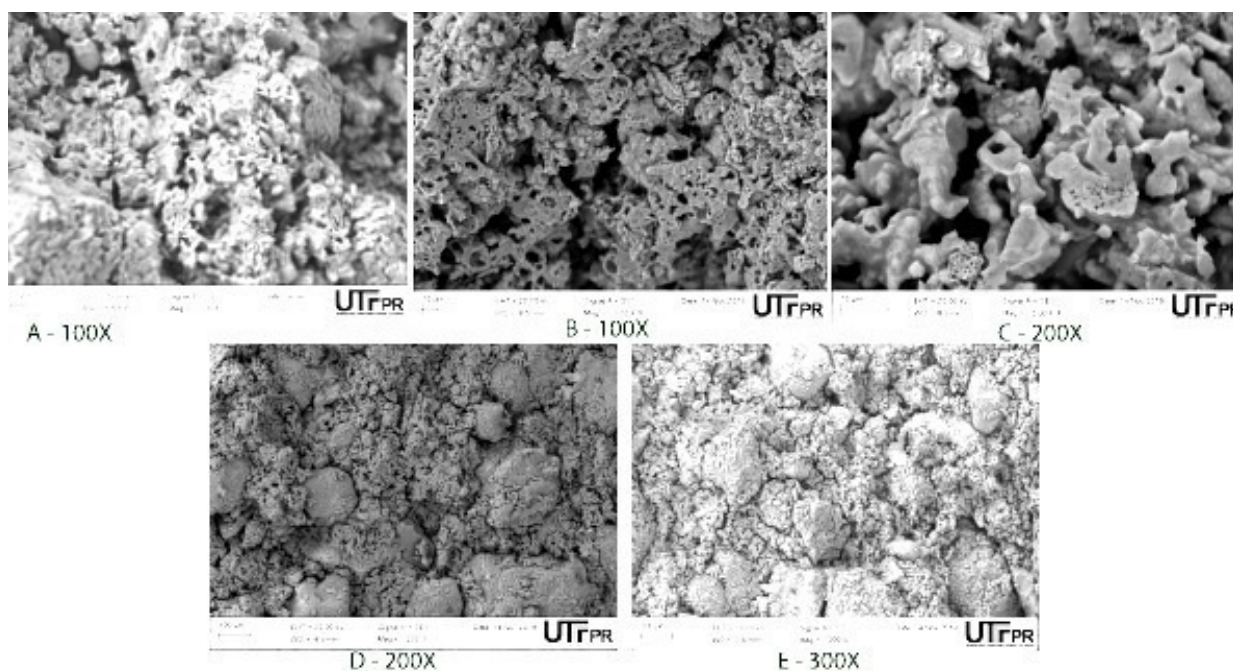
A composição 09 começa com resistências mais altas em relação as resistências da composição 31, porém ao final a 31 atingiu melhores resistências. Dessa forma essa composição corrobora com os objetivos da pesquisa ao usar a maior quantidade de cinza possível, a atingir bons resultados e ao usar esse material e demais que seriam descartados no meio ambiente.

### 5.1. OS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DAS CERÂMICAS DA COMPOSIÇÃO 09 APÓS A QUEIMA COM A TEMPERATURA DE 850°C

Abaixo apresenta-se os resultados dos ensaios de DRX, MEV, EDS e Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico quando da queima em 850° C da composição 09.



**Figura 30: estrutura morfológica por MEV, amostra 09, temperatura 850°C**



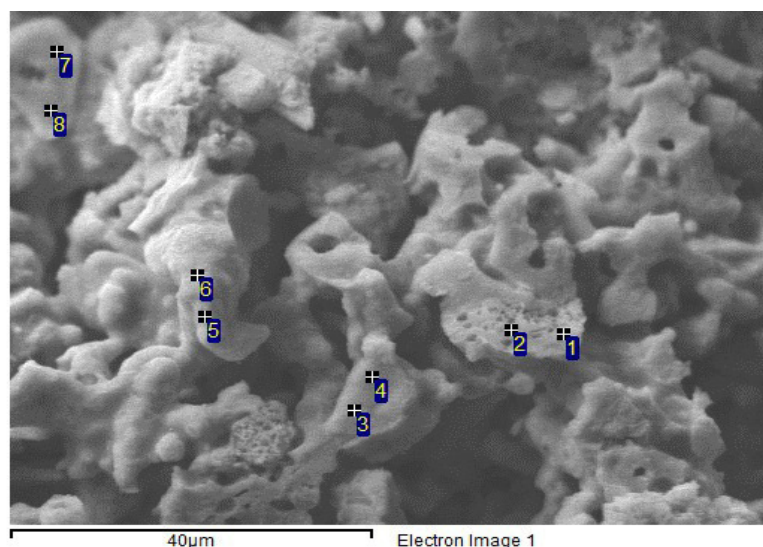
**Fonte: Autor, 2019**

Apresenta-se pontos de distintas formações cristalina, onde apresentam uma variedade de formas, tamanhos, arestas agudas entre as faces dos cristais, sendo um material irregular, os formatos mais arredondados a mostrar uma fusão parcial das partículas.

Observou-se que em 850°C essa composição não sintetiza o suficiente, tendo novas combinações que ocorre após a queima, onde essas novas estruturas, ocasionam o aumento da resistência, porem os grandes espaços vazios, causados pela não sintetização, explica ainda a baixa resistência sendo 9,4 Mpa mesmo que inicialmente ela apresentou boas características. A retração linear é de 3,90% e a absorção de água de 15,73%, ocorrendo tais características pelo fato de que pela imagem 29 apresenta grandes quantidades de poros, esses poros são responsáveis pela grande absorção de água.

5.1.3 Composição microquímica pelo método EDS das novas formações da cerâmica da composição 09 após a queima em 850°C

**Figura 31:** Pontos analisados pelo EDS da composição 09 após queima com temperatura 850°C



Fonte: Autor, 2019

Pela tabela 20 abaixo, observa-se a análise da composição química, dos pontos apresentados na figura 30.

Observa-se maior quantidade em Si com 58,93 no ponto máximo, e o C com 31,39 no ponto máximo, sendo o ponto 03. O carbono é um elemento que tem afinidade para se ligar quimicamente aos demais, permitindo inúmeras formas e ligações.

**Tabela 20:** Composição Química pelo Método de EDS da amostra 09, temperatura 850°C

Spectrum	C	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Total
1		5.41	1.30	7.87	44.57	2.15	12.32		26.36	100.00
2		9.88	0.57	21.61	51.47	2.61	4.76	1.30	7.80	100.00
3	31.39		0.90	0.47	33.25		13.32		20.66	100.00
4	28.62	0.43	0.91	0.50	42.26		15.91		11.36	100.00
5		3.35	2.59	2.60	52.35	1.45	14.17		23.50	100.00
6		3.24	2.79	2.40	58.93	1.08	13.00		18.56	100.00
7		3.41	2.80	3.04	53.61	1.19	15.66		20.29	100.00
8		4.65	1.70	6.58	58.54	4.51	7.46	0.56	16.00	100.00
Max.	31.39	9.88	2.80	21.61	58.93	4.51	15.91	1.30	26.36	
Min.	28.62	0.43	0.57	0.47	33.25	1.08	4.76	0.56	7.80	

Fonte: Autor, 2019

Outro elemento com quantidade alta, é o Fe com 26,36% no ponto 01, o qual teve uma interação menor entre os elementos. O ferro é um metal que tem o ponto de fusão mais alto, isso aliado a temperatura de queima mais baixa em 850°C, fez com que ocorresse uma menor interação química entre os elementos.

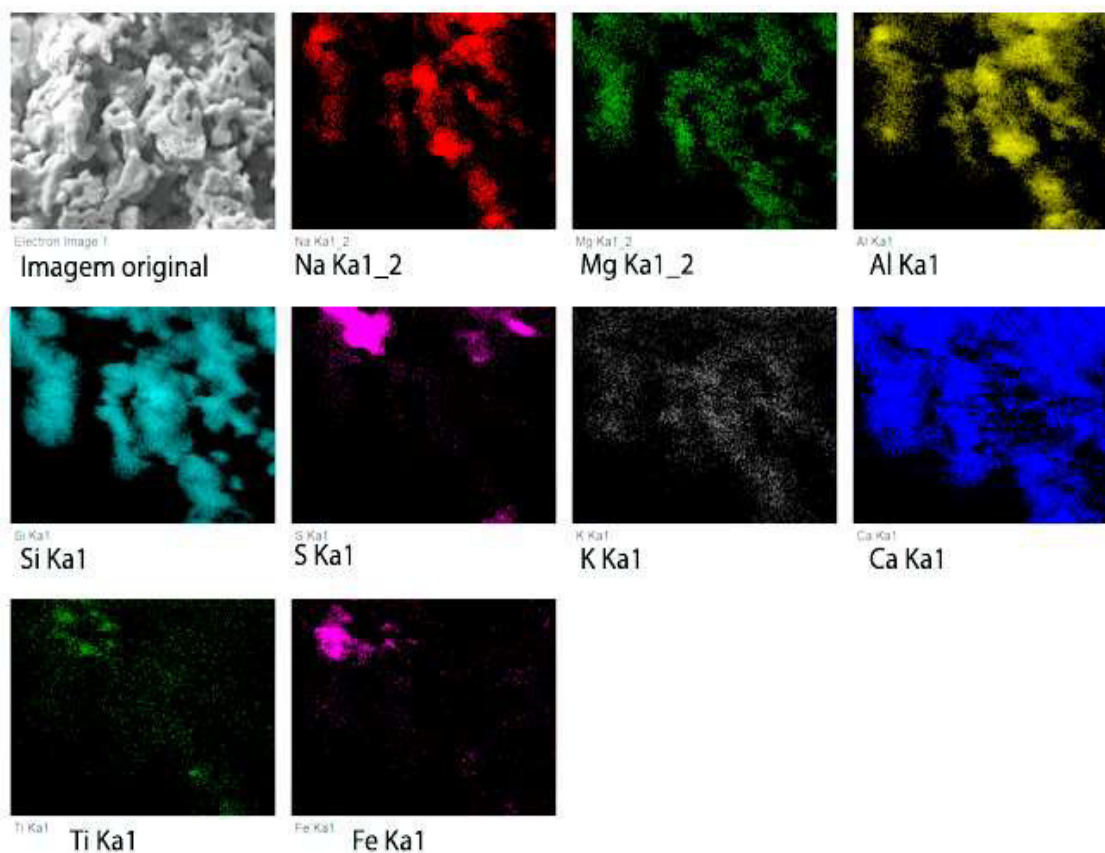
Observa-se que ao analisar os pontos mínimos e máximos de cada elemento as suas proporções são muito desiguais assim como a proporção de cada elemento nos pontos, essa desigualdade representa a não formação de cristais, dessa forma sendo um material amorfo.

#### 5.1.4 Distribuição dos elementos químicos (mapeamento) nas novas formações da cerâmica da composição 9 após a queima e 850°C

Analisou-se pelo método de mapeamento durante estudos de micro-morfologia em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os pontos coloridos brilhantes indicam a localização das micropartículas dos elementos químicos correspondentes e indicados logo abaixo das imagens. Os espaços negros das imagens indicam poros mais aprofundados e/ou deformações das composições que o equipamento não realiza a leitura das imagens os quais indica que estes poros são profundos é impossibilita a determinação dos elementos ali presentes mesmo que existam.



**Figura 32:** Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico da amostra 09, temperatura 850°C



Fonte: autor 2019

Observou-se boa distribuição do Ca (cálcio), ao indicar que nos pontos analisados no ensaio de EDS, não é o elemento de maior quantidade, pelo ensaio de fluorescência apresenta uma boa distribuição. Já os elementos K e Ti além de terem pouca concentração estão mal distribuídos. A sílica um dos elementos de maior quantidade apresentada no EDS, na tabela 21 também está bem distribuída conforme podemos verificar na figura 32.

O alumínio pela tabela 20 apresenta boa quantidade, apesar de não ser grande, mas ainda é um dos elementos com maior concentração e também com uma melhor distribuição pelas imagens de fluorescência.

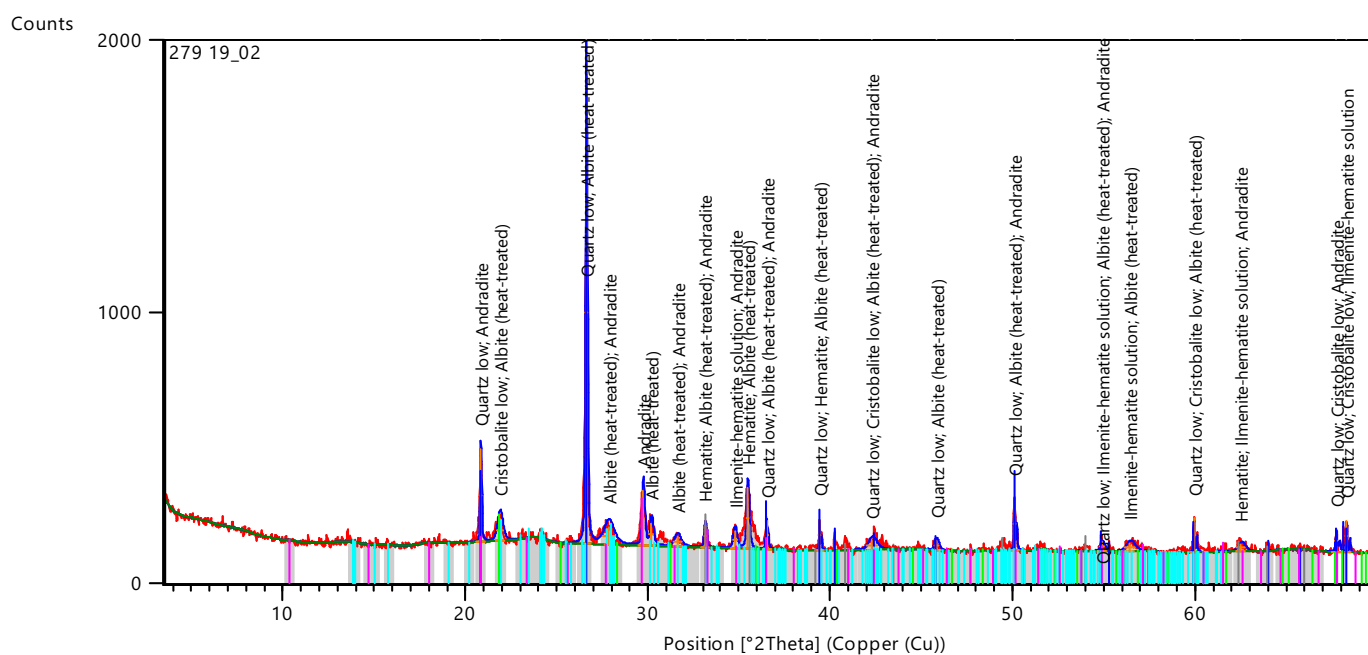
## 5.2. OS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DAS CERÂMICAS DA COMPOSIÇÃO 09 APÓS A QUEIMA COM A TEMPERATURA DE 1000°C

Abaixo apresenta-se os resultados dos ensaios de DRX, MEV, EDS e Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico quando da queima em 1000° C da composição 31.

### 5.2.1 Composição mineralógica da cerâmica da composição 09 após a queima com a temperatura de 1000°C

Para a amostra 9 em 1000°C de temperatura de queima, observa-se pelo DRX, imagem abaixo, que os picos cristalinos apresentam maior quantidade de picos cristalinos, porém a maior quantidade e os maiores picos são com o mineral quartzo, Albite e Hematita, os quais são elementos amorfos.

**Figura 33:** Composição mineral da amostra 09, temperatura 1000°C por DRX



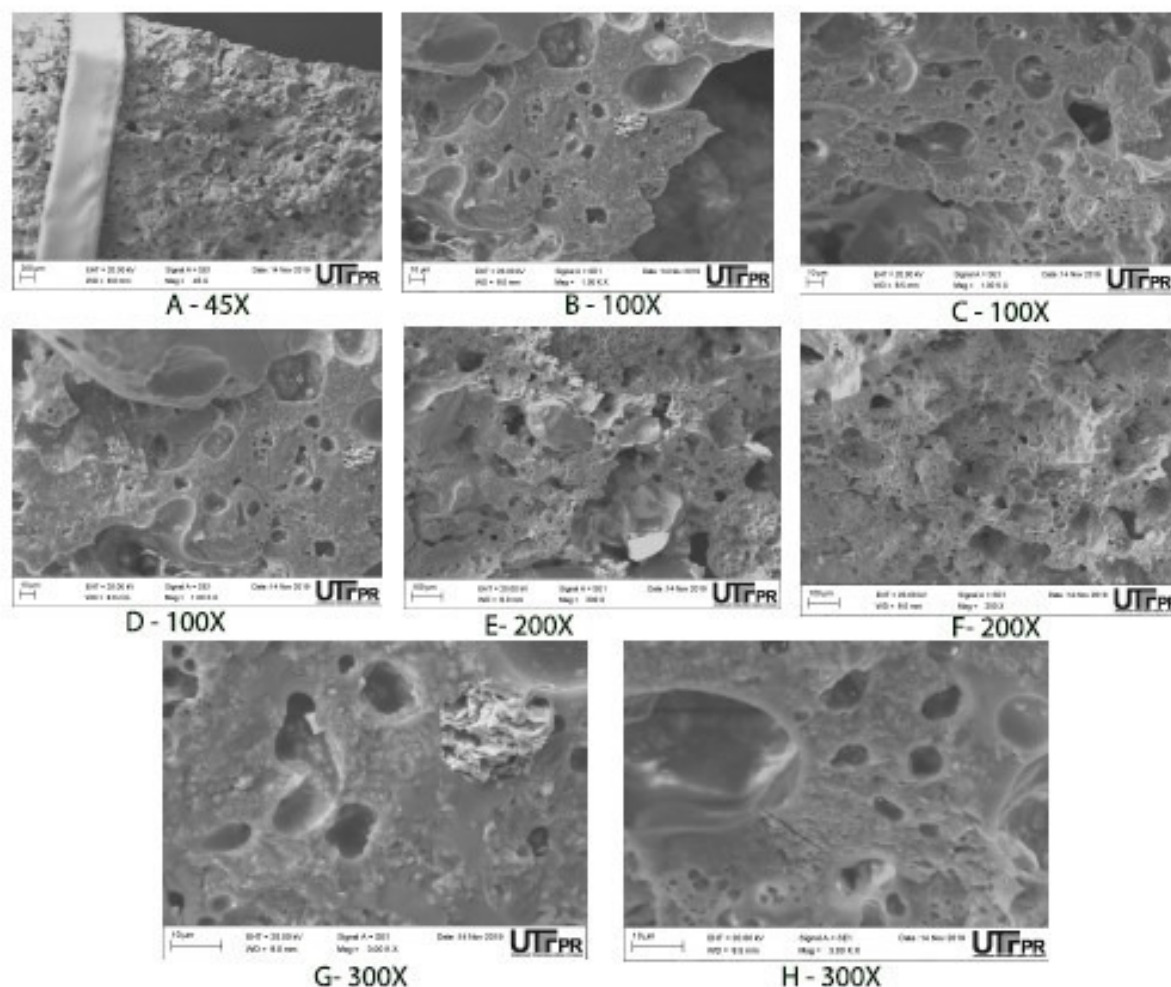
**Fonte: autor 2019**

### 5.2.2 Estrutura micro morfológica da cerâmica da composição 09 através do método MEV com temperatura de queima de 1000°C

Observou-se pelo ensaio de MEV, que esse compósito quando queimado em 1000°C, apresenta bolhas, aparecimento de poros, porém, tem boa interação

química, ao aparentar estar os elementos combinado em um maciço, conforme figura 34 abaixo.

**Figura 34:** Estrutura morfológica por MEV, composição 09, temperatura 1000°C



**Fonte:** Autor, 2019

Pode-se observar que na figura 34 apresenta grande quantidade de bolhas e poros, porém uma boa influência mútua dos elementos de forma positiva, pois estão todos a formar um “maciço” sem a ocorrência de elementos “soltos”, portanto ocorreu a fusão dos elementos, ao apresentar assim a maior resistência.

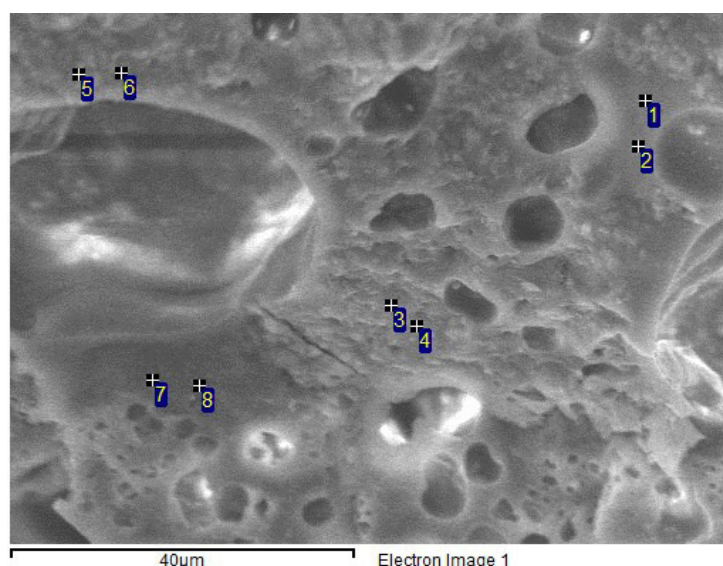
Ao observar uma interação química, com os elementos ligados quimicamente, com uma formação cristalina espessa, com o aparecimento de poros maiores. Observa-se que a superfície do material é relativamente lisa e agrupado, ocorrido pelo seu derretimento e posterior resfriamento, ao aparentar ser ferro proveniente da areia de fundição. Nesta composição com esta temperatura pode-se verificar que a

resistência aumentou de 2,94 para 10,21 Mpa, já na próxima temperatura de 1025° as peças se fundiram inutilizando-as conforme pode ser verificado nas figura 26. Verifica-se que a retração linear desta composição ficou em 5,33% a qual é um pouco maior que quando da queima em 850°, explicitado pela melhor fundição dos componentes ao diminuir os espaços vazios entre eles. Quando se analisa a absorção de água deste CP verificamos uma grande diminuição ao ficar em 3,60%, pode-se ser explicado pelos mesmos motivos da retração linear porém com efeitos inversos.

### 5.2.3 Composição microquímica pelo método EDS das novas formações da cerâmica da composição 09 após a queima em 1000°C

Pelo ensaio de EDS, tabela abaixo, pode-se observar que no ponto 08 ocorre a maior concentração de Fe, encontrado no compósito, assim como boa quantidade de Si. Apresenta-se no ensaio de DRX os maiores picos cristalinos são de quartzo, pode-se observar pela imagem do MEV figura 35, que apresenta em alguns pontos pontiagudos, sendo uma formação natural do quartzo.

**Figura 35:** Pontos analisados pelo EDS da composição 09 após queima com temperatura 1000°C



Fonte: Autor, 2019

**Tabela 21:** Composição micro química de novas formações da composição 09.

Spectrum	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Cu	Total
1	5.02		10.00	66.84	0.44	3.03	2.89	0.61	11.17		100.00
2	4.88	0.79	9.03	63.15		2.65	4.44	0.75	14.31		100.00
3	2.06	3.76	5.54	52.93		1.41	13.27	0.59	19.64	0.79	100.00
4	2.44	4.93	4.83	50.09		1.14	15.27	0.54	20.75		100.00
5	1.45	5.26	3.42	49.37		1.07	16.11	0.45	22.87		100.00
6	2.54	1.20	7.38	58.12		2.91	6.67	0.84	20.34		100.00
7	3.75	0.50	7.66	49.51		1.90	3.79	1.44	31.45		100.00
8	7.16		14.03	55.69		1.17	6.48	0.91	14.55		100.00
Max.	7.16	5.26	14.03	66.84	0.44	3.03	16.11	1.44	31.45	0.79	
Min.	1.45	0.50	3.42	49.37	0.44	1.07	2.89	0.45	11.17	0.79	

**Fonte: Autor, 2019**

Pode-se observar que o ponto 01 apresentou maior quantidade de Si com 66,84% do compósito. O ponto 7 apresentou maior quantidade de Fe com 31,45% e uma quantidade grande de Si sendo 49,51% o que comprova boa interação dos elementos em uma temperatura mais alta, pois ocorre a fusão dos elementos que apresentam a maioria da composição.

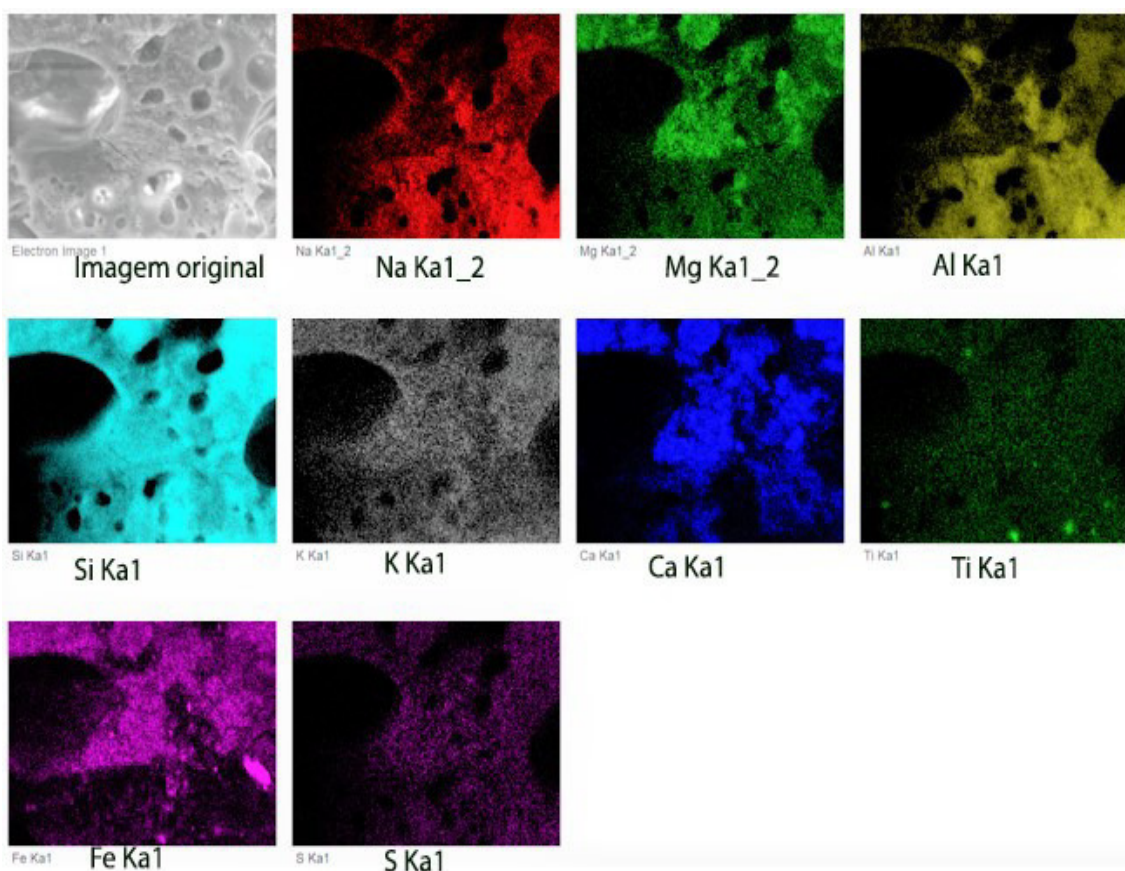
A diferença de quantidade encontrada desses elementos dos diferentes pontos e a heterogeneidade de cada ponto, representa um material amorfo.

#### 5.2.4 Distribuição dos elementos químicos (por mapeamento) nas novas formações da cerâmica da composição 9 após a queima com 1000°C

Pelo ensaio aponta-se que os materiais têm boa distribuição no ponto analisado, visto que por menor que seja a quantidade tem concentração uniforme por toda a amostra.



**Figura 36:** Mapeamento de elementos químicos principais da amostra 09, temperatura 1000°C



**Fonte: Autor, 2019**

A sílica e o ferro que são os elementos mais presentes na composição, se apresentam bem distribuídos, porém a sílica mais superficialmente, enquanto o ferro é encontrado nos poros também.

**5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS COMPOSIÇÃO 9 NAS TEMPERATURAS DE 850° E 1000° QUANDO ANALISADO OS RESULTADOS DO EDS, MEV RESISTÊNCIA, ABSORÇÃO DE ÁGUA DENSIDADE.**

Em análise comparativa entre as temperaturas de queima da composição 09 para entender os processos que ocorreram para o aumento da resistência e demais mudanças físicas das composições, com as matérias primas em seu estado natural, tem-se as análises. Pela análise do EDS, observa-se que em 850°C a composição 09 apresenta como principais componentes com maior quantidade Si com 58,93% seguido do C com 31,39%, Fe com 26,36% e Ca com 15,91%, desse modo, quando comparado com a mesma composição a 1000°C se observa o aumento de Si que

passou para 66,84% ao aparecer em todos os pontos de análise e de forma uniforme e constante, ocorreu o desaparecimento de carbono, o que pode indicar a melhor interação dos componentes, acarretando na formação de elementos químicos mais eficazes, pois o carbono tem fácil interação química com demais componentes e elementos. Observa-se também o aumento do Fe para 31,45% ao aparecer em todos os pontos de análise, porém de forma mais desuniforme.

Quando comparado as duas temperaturas com as materiais primas originais, com a de maior quantidade dentro da composição que é o resíduo de vidro com 30%, esse material apresenta em sua composição o Si com 69,69%, porém de forma não tão uniforme assim como o Ca com 61,82%. Observa-se que em ambas as temperaturas as reações químicas fizeram com que "sumisse" o Ca, deixando-o com pouca quantidade nas duas temperaturas de queima.

Do mesmo modo quando comparado a argila onde continha 25% desse material nas composições, apresenta maior quantidade de Si com 97,85% de forma uniforme, o Si teve um aumento da sua quantidade conforme aumentou a temperatura, assim como houve nas composições após a queima o aumento de Fe, o que pode ser explicado pela melhor sintetização da escória de fundição em temperaturas mais altas, o que justifica o aumento da resistência a 1000°C, já que em seu estado natural a escória apresenta 94,17% de ferro em sua composição, sendo apresentado em todos os pontos de forma quase uniforme.

Outro fato que justifica o aumento da resistência que passou de 2,94Mpa em 850°C para 10,21Mpa em 1000°C, é o aumento da quantidade de Si, pois ele em combinação com o oxigênio, se transforma em Quartzo, o qual tem boa resistência e acarreta no aumento da resistência final da composição.

Observa-se também que ocorreu a variação da densidade, sendo sua massa final, das temperaturas 850°C e 1000°C onde variou de 1,79 para 1,51, tendo a perda de peso de 15%, o qual, o processo que ocorre em 1000°C e a transformação suave da recuperação de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> para Fe com a variação de temperatura de 850°C a 1000°C, pois em 1000°C ocorre o aparecimento maior de Fe. (BROWN, 2011).

Quando analisado o ensaio MEV das duas temperaturas de queima, observa-se que a quantidade de poros diminui significativamente quando observado as figuras 30 e 34. Observa-se também que em 1000°C algumas partículas começam a se fundir e ao ocorrer também o aparecimento de partículas mais agregadas, ocorre

a melhor fusão, a fazer com que ocorra além do aumento da temperatura, a diminuição da taxa de absorção de água de 15,73% em 850°C para 3,60% em 1000°C, sendo uma diminuição da absorção de 77,00%.

#### 5.4 OS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DAS CERÂMICAS DA COMPOSIÇÃO 31 APÓS A QUEIMA COM A TEMPERATURA DE 850°C

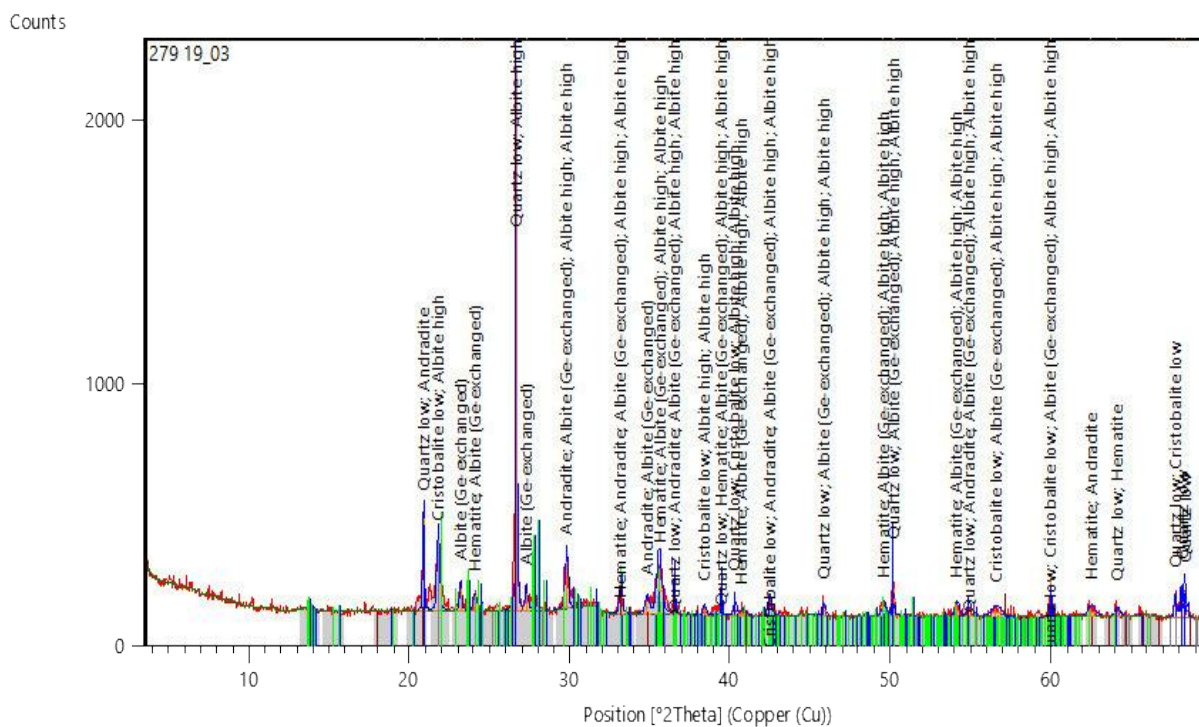
Abaixo apresenta-se os resultados dos ensaios de DRX, MEV, EDS e Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico quando da queima em 850° C da composição 31.

##### 5.4.1 Composição mineralógica da cerâmica da composição 31 após a queima com a temperatura de 850°C

Observa-se na composição 31 composta principalmente por argila, pó de vidro e maior concentração de cinza com 15% em 850°C de queima, onde atinge resultados de resistências relativamente baixos nessa temperatura e alta absorção de água, observa-se pelo ensaio de DRX abaixo, que existe uma maior variedade de picos cristalinos com variedade de minerais, proveniente da maior quantidade de cinza que tem uma maior quantidade de materiais diferentes em sua composição.



**Figura 37:** Composição mineralógica da amostra 31 por DRX após de queima com temperatura 850°C



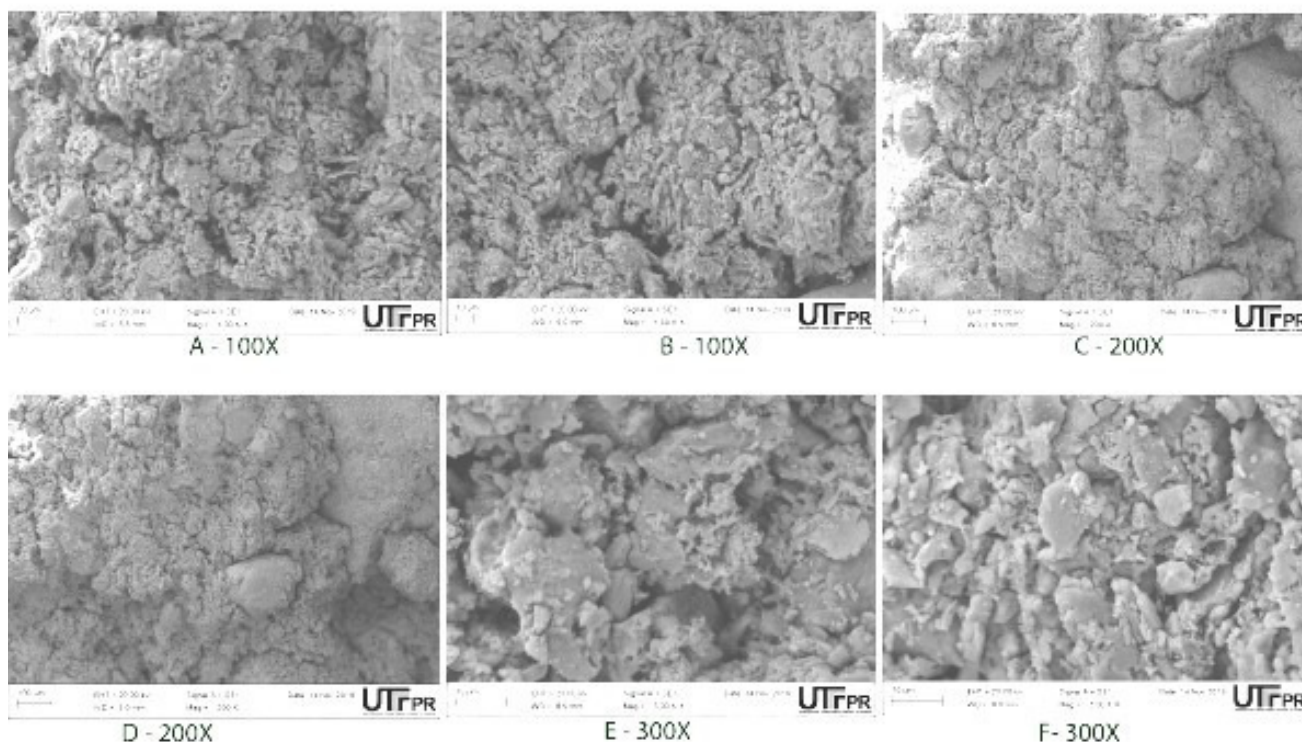
Fonte: Autor, 2019

Os maiores picos continuam sendo com Quartzo com a junção de albite, sendo esse mineral proveniente do Sódio (Na), sendo materiais amorfos.

#### 5.4.2 Estrutura micro morfológica da cerâmica da composição 31 através do método MEV com temperatura de queima de 850°C

Pelo ensaio de MEV, na figura abaixo, observa-se que o compósito apresenta maior quantidade de bolhas e espaços “vazios” em sua superfície mais irregular, ao apresentar pouca interação e fusão entre os elementos. Com essa formação irregular o compósito apresenta uma maior absorção de água.

**Figura 38:** Estrutura morfológica por MEV, amostra 31, temperatura 850°C



**Fonte:** Autor, 2019

Observa-se uma superfície irregular, formas arredondadas, grande quantidade de poros, uma baixa interação entre as partículas e um aparecimento maior de bolhas, ao mostrar o escape de gases que surgem ao longo do processo da queima.

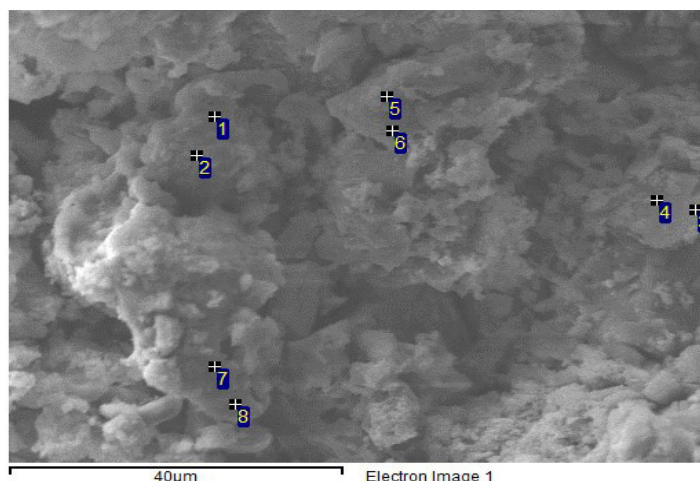
Apresenta partículas mais agrupadas, ao mostrar uma melhor interação entre as partículas, superfícies mais lisas, poucos elementos espalhados, grandes espaços vazios, que apesar da melhora da interação entre os elementos em alguns pontos, ainda é uma interação baixa.

Com o aumento de 5% para 15% de cinza, nesta temperatura tivemos uma diminuição da resistência a flexo-compressão de 2,94 para 1,70Mpa, bem como um aumento da retração linear e um aumento da absorção de água de 15,73% para 22,84% este aumento da absorção de água se deve ao aumento da porosidade como podemos verificar na figura 39, na imagem E com aproximação de 300x, pode-se observar a grande quantidade de poros.

### 5.4.3 Composição microquímica pelo método EDS de novas formações da cerâmica da composição 31 após a queima em 850°C

Observa-se pelo ensaio de FRX que no ponto 03, existe uma concentração de 31,56% de C (carbono) que favorece as interações químicas com os demais elementos. Já no ponto 02 apresenta 60,62% de Si e 15,95% de Fe, que precisa de temperaturas mais altas para uma melhor interação, assim como a presença de Ca com 15,11%, esse elemento é um metal alcalino-terroso relativamente mole. Tabela 22 de ensaio de EDS abaixo.

**Figura 39:** Pontos analisados pelo EDS da composição 31 após queima com temperatura 850°C



Fonte: Autor, 2019

**Tabela 22:** Composição Química pelo Método de EDS da amostra 31, temperatura 850°C

Spectrum	C	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Total
1		1.48	2.75	2.09	59.73		0.63	15.04	0.52	17.76	100.00
2		2.54	2.70	2.61	60.16		0.92	15.11		15.95	100.00
3	31.56	3.31	1.01	5.00	29.22		2.36	6.10	2.50	18.93	100.00
4		8.45	1.57	13.68	35.02		1.89	4.61	8.91	25.88	100.00
5		1.27	3.33	3.02	59.15		0.49	22.41		10.32	100.00
6		1.43	4.66	2.09	57.93			23.58		10.32	100.00
7		1.96	1.04	3.25	30.85		2.42	18.94		41.54	100.00
8		2.35	1.41	2.95	22.11	13.32	1.61	38.43	1.09	16.73	100.00
Max.	31.56	8.45	4.66	13.68	60.16	13.32	2.42	38.43	8.91	41.54	
Min.	31.56	1.27	1.01	2.09	22.11	13.32	0.49	4.61	0.52	10.32	

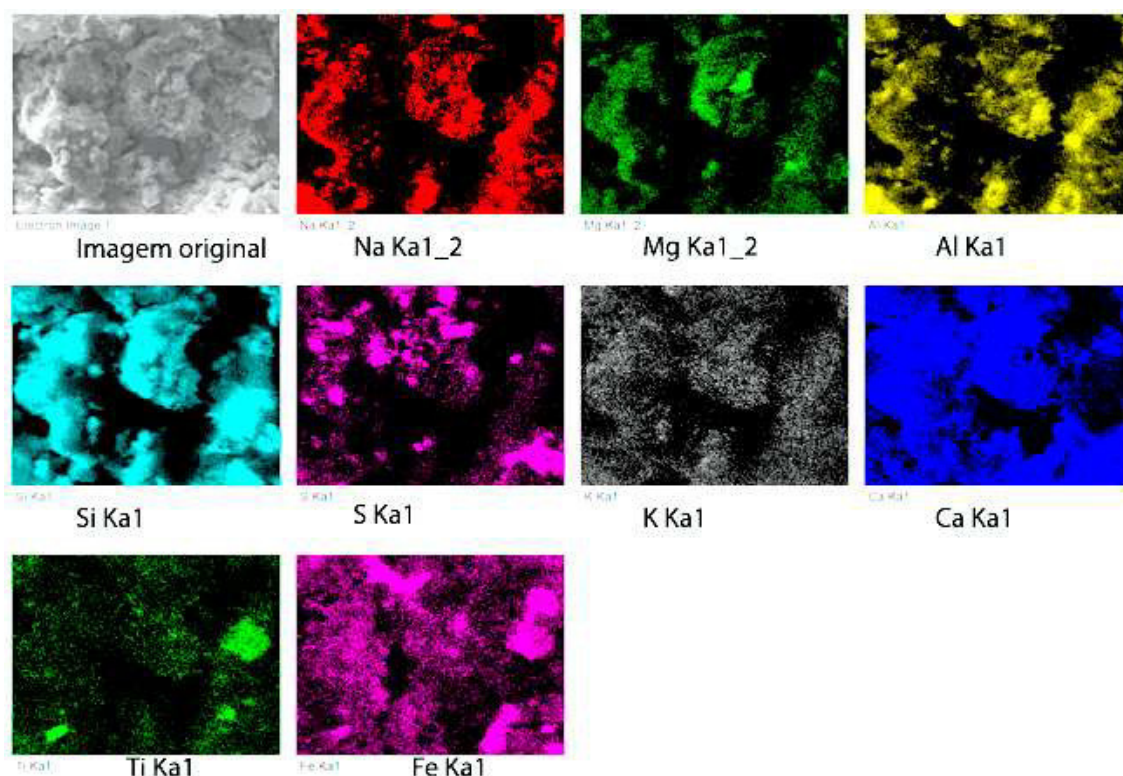
Fonte: Autor, 2019

Observa-se uma maior distribuição dos elementos, pois são encontrados em quase todos os pontos, porém a diferença entre as quantidades encontradas, ainda representa materiais amorfos.

#### 5.4.4 Distribuição dos elementos químicos (mapeamento), nas novas formações da cerâmica da composição 31 após a queima e 850°C

Verifica-se na figura 40 a aglutinação dos elementos de Ca e de Si bem como uma dispersão do elemento Ti, os demais elementos verifica-se pouca uniformidade da coloração dos elementos ao demonstrar na avaliação pouca homogeneização da superfície analisada.

**Figura 40:** Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico da amostra 31, temperatura 850°C



Fonte: Autor, 2019

Pelo ensaio de Raio-X de fluorescência apresenta todos os materiais bem distribuídos, indiferente da quantidade eles estão presentes em toda a amostra analisada.



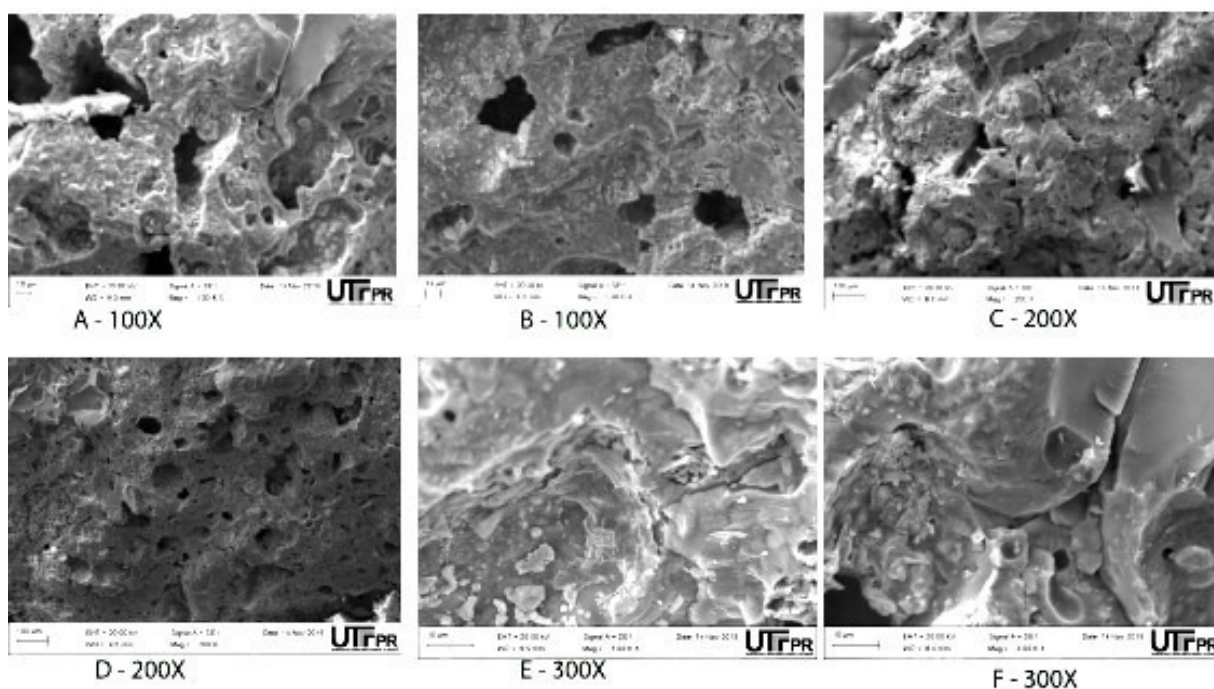


O quartzo apresenta formas maciças e compactas e um nível de dureza alto, assim como estabilidade química e térmica, ao cooperar para quando ligado com outros bons materiais, conseguem atingir resistências melhores.

### 5.5.2 Estrutura micro morfológica da cerâmica da composição 31 através do método MEV com temperatura de queima de 1000°C

O ensaio de MEV, apresenta superfície em sua maioria lisas, forma mais compacta e maciça, poucas bolhas e poucos espaços vazios. Algumas pontas pontiagudas, e leve aparição de bolhas ao possibilitar assim menor absorção de água.

**Figura 42:** Estrutura morfológica por MEV, amostra 31, temperatura 1000°C



**Fonte:** Autor, 2019

Apresenta uma morfologia bem conglomerada, ao observar boa interação juntamente com a sintetização de todos os materiais ao formar uma boa composição.

Verifica-se na tabela 16, que esta composição é a que utiliza a maior quantidade de cinza 15%, uma das menores quantidades de argila natural 25%, e 30% de pó de vidro, 10% de areia de fundição e 20 % de escória.

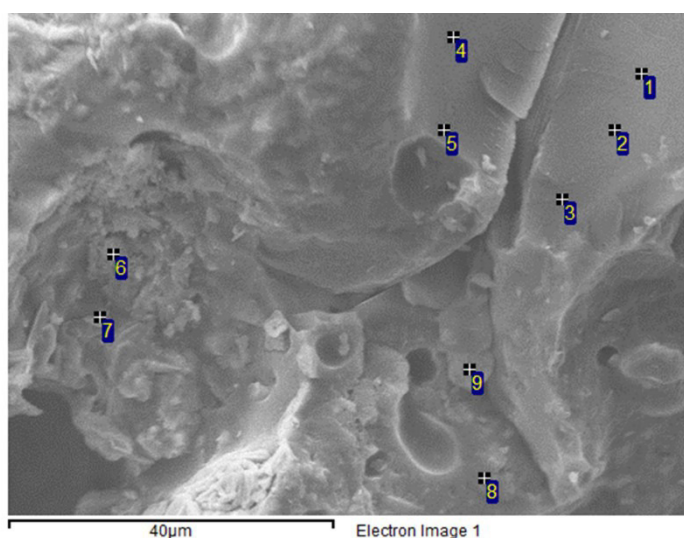
Neste sentido apresentou a maior resistência a flexo-compressão 12,40 Mpa, baixa retração linear 7,46% e baixa absorção de água 8,60 % tais resultados podem ser explicados pela fusão, que pode-se verificar nas imagens da figura 44 com maior relevância na figura identificada com F-300x.

Pode-se observar também que ocorreu a melhor interação entre os elementos e materiais, pois verifica-se o surgimento de bolhas onde ocorreu o escape de gases, que são provenientes pela interação entre os materiais.

### 5.5.3 Composição microquímica pelo método EDS das novas formações da cerâmica da composição 31 após a queima em 1000°C

Aponta-se que nessa composição obtiveram grandes quantidades de carbono, sílica e ferro, conforme ensaio FRX abaixo, esses elementos em altas temperaturas colaboram com a sintetização de todas os componentes presentes na amostra.

**Figura 43:** Pontos analisados pelo EDS da composição 31 após queima com temperatura 1000°C



Fonte: Autor, 2019

Observa-se que esse compósito apresentou em pontos máximos 49,02% de C (carbono), 89,70% de Si (sílica) e 87,67% de Fe (ferro), conforme tabela abaixo.

**Tabela 23:** Composição Química pelo Método de EDS da amostra 31, temperatura 1000°C

Spectrum	C	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total
1	40.39				59.08						0.52	100.00
2	40.47				59.01						0.52	100.00
3	39.15				60.22						0.63	100.00
4	49.02			0.73	42.78						7.47	100.00
5	44.09			0.85	43.23			1.11			10.73	100.00
6		2.02		0.92	4.79	19.47	0.86	47.42			24.52	100.00
7		1.66		0.71	3.52	2.33	0.24	2.76	0.56	0.56	87.67	100.00
8		1.71	1.07	3.39	37.79		1.52	11.69	0.78		42.06	100.00
9		1.26		2.14	89.70		0.79	0.92			5.19	100.00
Max.	49.02	2.02	1.07	3.39	89.70	19.47	1.52	47.42	0.78	0.56	87.67	
Min.	39.15	1.26	1.07	0.71	3.52	2.33	0.24	0.92	0.56	0.56	0.52	

**Fonte: Autor, 2019**

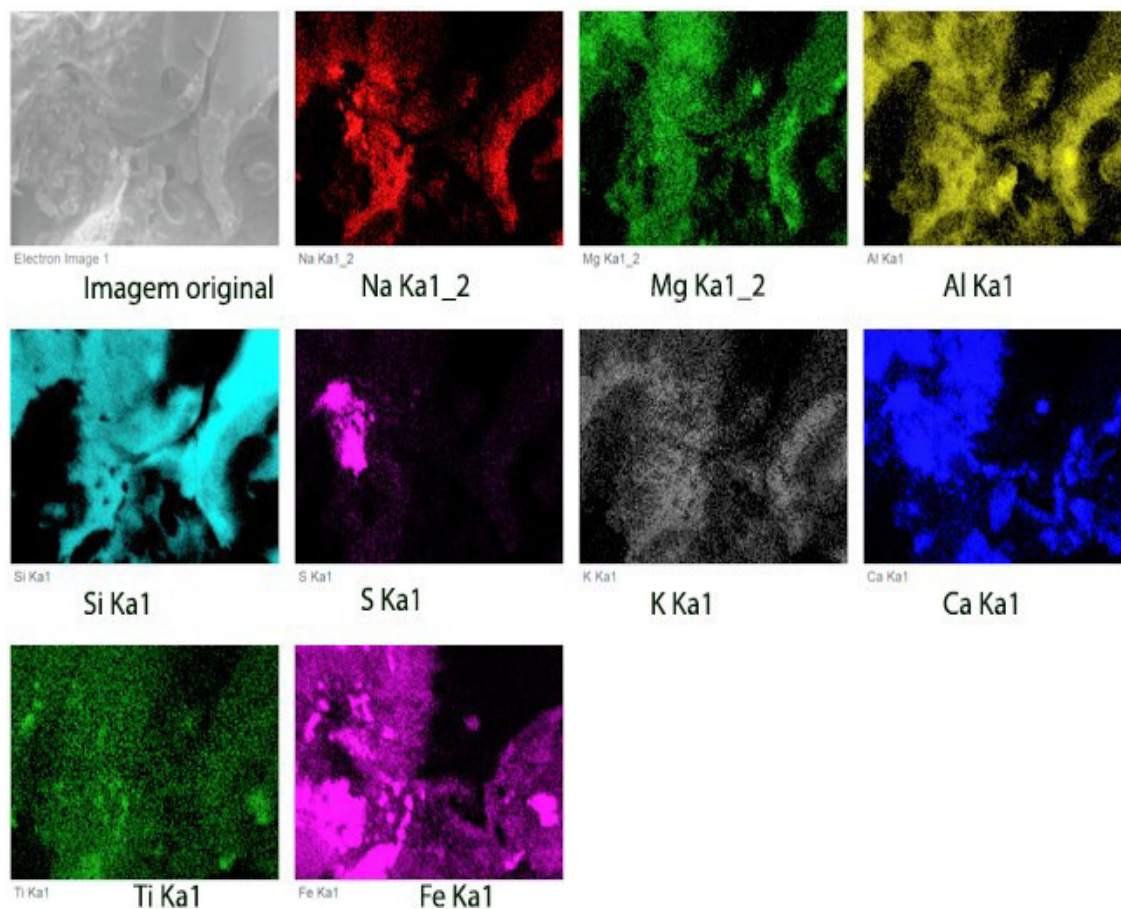
O carbono é um elemento que tem uma facilidade de interação química com os demais minerais, 43,23% de sílica, como apresentado no ensaio DRX se trata de quartzo, um elemento duro e de boa interação também e 10,73% de Fe, outro material com boa capacidade de fundição.

#### 5.5.4 Distribuição dos elementos químicos, por mapeamento, nas novas formações da cerâmica da composição 31 após a queima e 1000°C

Observa-se pelo ensaio de raio-x de fluorescência que a sílica, ferro e o cálcio que são os elementos de maiores quantidades no compósito não são tão uniformes em sua distribuição quanto o Mg que apesar de sua pequena quantidade tem uma boa distribuição em toda a amostra.



**Figura 44:** Mapeamento de elementos químicos por Raio-X tomográfico da amostra 31, temperatura 1000°C



Fonte: Autor, 2019

Em sua maioria os elementos têm boa distribuição, apenas alguns pontos não são bem distribuídos, ao mostrar a homogeneidade das composições.

Na “imagem original” da figura 44 podemos verificar os pontos onde ocorreu melhor fusão e interação entre os elementos e materiais utilizados na composição bem como a fixação da maioria dos componentes químicos que são apresentados na figura 47, onde pode-se observar que ocorre uma boa distribuição desses elementos em toda a superfície.

Mesmo nos elementos que tem menor quantidade apresentada pela tabela 23, apresentam boa distribuição igualmente as que tem maior quantidade como por exemplo o Fe com 87,67% no ensaio de EDS e o Ti com 0,78%, apresentam distribuição pelo ensaio de fluorescência semelhantes.

## 5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DAS COMPOSIÇÃO 31 NAS TEMPERATURAS DE 850° E 1000° QUANDO ANALISADO OS RESULTADOS DO EDS, MEV RESISTÊNCIA, ABSORÇÃO DE ÁGUA DENSIDADE.

Em 850°C a composição 31 apresenta como principais componentes com maior quantidade Si, porém de forma desuniforme pois a sua variação ocorre entre 22,11% até 60,16% nos pontos de maiores quantidades, seguido da variação desuniforme do Fe, onde varia de 10,32% até 41,54%, ao apresentar o Ca com variação entre 4,61% até 38,43% e por fim um único ponto de C com 31,56%,desse modo quando comparado com a mesma composição a 1000°C se observa que o C passou a aparecer em vez de um ponto em 5 pontos com quantidade bem uniforme com variação apenas de 39,15% até 49,02%, o Si apesar do seu aumento significativo passou a variar de 3,52% até 89,70%.

Observa-se também o aumento do Fe que dobrou a sua quantidade a chegar até 89,70%, porém de forma desigual nos seus pontos, e o Ca que teve pouco aumento, porém grande variação de quantidade nos pontos, a alterar de 0,92% até 47,42%.

Quando comparado as duas temperaturas com as suas materiais primas originais, com a de maior quantidade dentro da composição continua sendo o resíduo de vidro com 30%, porém nessa composição ocorreu o aumento de 10% da quantidade de cinza e a diminuição de 10% de areia de fundição, o pó de vidro tem em sua composição as maiores quantidade de Si e Ca, já na cinza ocorre o aparecimento de Fe com 15,13% e a areia de fundição o qual tem sua quantidade reduzida também apresenta uma grande variação de Si ao chegar no ponto máximo 99,51%.

Dessa forma, analisa-se que ocorreu o surgimento em 1000°C do elemento C em quantidades significativas e o aumento da quantidade de Fe, Si e Ca, sendo o Fe e o Si de formas mais expressivas, o que representa uma maior sintetização dos elementos que apresentam o Fe, ao explicar o aumento da resistência em temperaturas mais altas, já que o ocorre a fusão do Fe entre todos os materiais da composição.

Outro fato que justifica o aumento da resistência que passou de 1,70Mpa em 850°C para 12,40Mpa em 1000°C, sendo um aumento de 86,00% da resistência, é o

aumento da quantidade de Si, mesmo que de forma irregular, já que ele em combinação com o oxigênio, se transforma em Quartzo, o qual tem boa resistência e acarreta no aumento da resistência final da composição, assim como o aumento expressivo do Fe, que como pode ser observado pelo MEV, onde representa bem a fusão e melhor interação dos elementos quando comparado o MEV de queima de 850°C figura 38 e o MEV de queima a 1000°C, figura 42.

Em comparação dos ensaios MEV, pode-se observar que na queima de 1000°C aparece a fusão e derretimento dos materiais, o que comprova a melhor interação deles para o aumento da resistência, assim como mostra a diminuição de poros e diminuição da absorção de água, que era 22,84% em 850°C e passa a ser apenas 8,60% em 1000°C. A taxa de absorção de água quando comparado a composição 09 e a composição 31, pode-se ser justificada pelo aumento de matéria orgânica, pelo aumento da quantidade de cinza, o qual aumentou em 10% e a taxa de matéria orgânica desse material é 17,60%.

## 6. CONCLUSÃO

Na pesquisa elaborada foram desenvolvidas 31 (trinta e uma) composições nas quais foram utilizados resíduos industriais, como escória de alto forno, areia de fundição, pó de vidro, cinza de resíduos municipais e argila natural. A maioria das cerâmicas desenvolvidas atende as normas técnicas brasileiras utilizadas na construção civil, citam-se as cerâmicas usadas em pisos e paredes, tijolos cerâmicos maciços e com furos, telhas cerâmicas e blocos porosos para isolamento térmico e acústico.

Foram selecionadas duas composições para análise dos processos físico-químicos da formação das estruturas, e das propriedades das cerâmicas desenvolvidas:

- 1- A composição 09 que é composta por 5% de cinza, 20% de escória, 20% de areia de fundição, 30% de pó de vidro e 25% de argila natural;
- 2- A composição 31, que é composta por 15% de cinza, 20% de escória, 10% de areia de fundição, 30% de pó de vidro e 25% de argila.

A diferença entre as duas composições é a proporção entre a cinza e areia de fundição. Essas composições foram as quais apresentaram a menor quantidade de uso de argila natural e ao mesmo tempo apresentaram maior resistência.

Em 850°C, temperatura escolhida pois nas melhores composição de resistência, a essa temperatura já se obtinha resistência mínima para blocos cerâmicos, conforme normas, portanto as duas composições escolhidas apresentaram as seguintes características para essa temperatura:

a) composição 01, totalmente composta por argila natural, apenas utilizada para comparação, obteve resistência a flexão 7,57 MPa, retração linear 6,14%, absorção de água 17,01% e densidade 1,71 g/cm<sup>3</sup>.

b) A composição 09, resistência à flexão 2,94 MPa, retração linear 3,90%, absorção de água, 15,73% densidade 1,79 g/cm<sup>3</sup>

c) A composição 31, resistências a flexão 1,70 MPa, retração linear 4,12%, absorção de água, 22,84% e densidade 1,63 g/cm<sup>3</sup>

Já em 1000°C, a temperatura máxima a ser atingida, pois acima dela a maioria das composições deformavam ou derretiam temos as seguintes características:

a) composição 01, totalmente composta por argila natural, apenas utilizada para comparação, obteve resistência a flexão 14,28 Mpa, retração linear 10,59%, absorção de água 14,08% e densidade 1,85 g/cm<sup>3</sup>.

b) A composição 09, resistência à flexão 10,21 Mpa, retração linear 5,33%, absorção de água, 3,60% densidade 1,52 g/cm<sup>3</sup>

c) A composição 31 resistências a flexão 12,40 Mpa, retração linear 7,46%, absorção de água, 8,60% e densidade 1,69 g/cm<sup>3</sup>

Dessa forma pode-se observar a composição 31 as suas utilizações sendo:

- 1) Pode ser utilizada com a queima de temperatura de 1000°C, para placas cerâmicas, pois possui absorção de água acima de 8,60% e 12,40 MPa de resistência, dessa forma atende a norma estabelecido pela NBR 13818 (ABNT, 1997), a qual indica que a taxa de absorção de água mínima é de 8,00% e resistência mínima de 12,00 Mpa.

Quanto à análise de correlação dos índices físicos e mecânicos foi observado que:

1. A partir de 975°C de queima, quase todas as composições, as taxas de absorção de água começam a diminuir, ou seja, em 950°C é o pico de absorção de água em sua maioria

2. Quanto maior o módulo de resistência à flexão maior era a retração linear das composições;

3. O aumento da resistência a flexão é constante até o seu início de derretimento, assim como a retração linear.

4. A partir de 900°C de queima, quase todas as composições, as densidades das amostras aumentam, a partir dessa temperatura começam a decair a densidade, ou seja, em 900°C é o pico de maior densidade em sua maioria

5. Para a composição mineralógica constatou-se que, tanto para a temperatura de 850°C como para a de 1000°C, a maioria dos picos cristalinos, são heterogêneos e dessa forma representam materiais amorfos, e ainda pode ser

observado um aumento nos picos cristalinos na temperatura de 1000°C, quando comparado com a temperatura de 850°C

Portanto, quando analisado o aspecto sustentável, onde grande parte desses resíduos que seriam descartados na natureza, pode ser reaproveitada em linhas de produção de produtos para a construção civil e ainda ao atingir bons resultados físicos e químicos para a sua real utilização no mercado.

Recomendações para estudos futuros:

- Estudar a utilização das composições para a produção de telhas cerâmicas;
- Analisar a possibilidade de produção de cerâmicas esmaltadas de baixa resistência;
- Realizar o estudo com o objetivo de excluir o uso de pó de vidro da composição;
- Apresentar estudo da viabilidade econômica para a produção de blocos cerâmicos ao levar em consideração o deslocamento dos diversos resíduos utilizados na pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ALEKSEEV, Kirill. **Resíduos perigosos**: bauxita, escória de alto forno, fundição areia, aplicação como o principal componentes para produção de cerâmica vermelha ecológico. Tese Doutorado. UTFPR. Curitiba 2017.

ALONSO-SANTURDE, R. et al. **Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks**. Journal of Environmental Management, v. 92, n. 3, p. 994-1002, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**. granulométrica, solo–análise. 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270**: Partes 1 e 2, Componentes Cerâmicos – Blocos e Tijolos para Alvenaria. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270: 3/05**: Componentes Cerâmicos-Parte 3: Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural e de Vedação-Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 13006/20**: Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação. 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:2003** . Agregados - Determinação da composição granulométrica. 2003.

AVILA-LÓPEZ, U.; ALMANZA-ROBLES, J. M.; ESCALANTE-GARCÍA, J. I. **Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods**. Construction and Building Materials, v. 82, p. 296-303, 2015.

BAI, Jianguang et al. **Preparation of foam glass from waste glass and fly ash**. Materials Letters, v. 136, p. 52-54, 2014.

BALDOVINO, Jair de Jesús Arrieta, et al. **Uso Sustentável de Resíduo da Indústria da Celulose e Papel na Estabilização de um Solo Expansivo**. XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul GEOSUL 2019 – 17 a 19 de Outubro, Joinville, Santa Catarina, Brasil. Disponível em: <https://conferencias.ufsc.br/index.php/geosul2019/2019geosul/paper/view/115/198> Acesso em 05 de nov de 2019.

BIGNOZZI, M. C. et al. **Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition**. Cement and Concrete Composites, v. 55, p. 45-52, 2015.

BOBIRICĂ, Constantin et al. **Influence of waste glass on the microstructure and strength of inorganic polymers**. Ceramics International, v. 41, n. 10, p. 13638-13649, 2015.

BOUZOUBAA, Nabil et al. **Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cement produced in cement plant.** Materials Journal, v. 99, n. 6, pp. 560-567, 2002.

BOLTAKOVA, N. V. et al. **Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics.** Review of Russian experience for the years 2000-2015. Journal Waste Management. Vol. 60, pg. 230-246. Fevereiro, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16306663> Acesso em: 01 de out 2019.

BROWN, Michael E .; GALLAGHER, Patrick K. **Manual de análise térmica e calorimetria: avanços recentes, técnicas e aplicações.** Elsevier, 2011.

BUI, D. D.; HU, Jing; STROEVEN, Piet. **Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete.** Cement and concrete composites, v. 27, n. 3, pp. 357-366, 2005.

CASTÃO, Edvan Silva. Et al. **I-533 - Reúso de lodo de estação de tratamento de água (e.t.a.) na fabricação de tijolos cerâmicos.** ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabes. Congresso 2017. Disponível em: <https://saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2019/01/II-533.pdf>. Acesso em 30/04/2021.

CHAURAND, Perrine et al. **Environmental impacts of steel slag reused in road construction: A crystallographic and molecular (XANES) approach.** Journal of Hazardous Materials, v. 139, n. 3, p. 537-542, 2007.

CHEAH, Chee Ban; PART, Wei Ken; RAMLI, Mahyuddin. **The hybridizations of coal fly ash and wood ash for the fabrication of low alkalinity geopolymer load bearing block cured at ambient temperature.** Construction and Building Materials, v. 88, p. 41-55, 2015.

CHEAH, Chee Ban; RAMLI, Mahyuddin. **The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview.** Resources, Conservation and Recycling, v. 55, n. 7, p. 669-685, 2011.

CHOWDHURY, Swaptik; MISHRA, Mihir; SUGANYA, Om. **The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview.** Ain Shams Engineering Journal, v. 6, n. 2, p. 429-437, 2015.

COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F. **Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha.** Cerâmica vol.62 no.363 São Paulo July/Sept. 2016. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132016000300249](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132016000300249). Acesso em 25/10/2019.



DING, Linfeng et al. **Preparation and characterization of glass–ceramic foams from blast furnace slag and waste glass**. *Materials Letters*, v. 141, p. 327-329, 2015.

DOVETAIL PARTNERS, I. **Plasma gasification: An examination of health, safety, and environmental records of established facilities**. City of Palisade, EUA, 2010.

ETXEBERRIA, M. et al. **Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates**. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 9, p. 1594-1600, 2010.

FRANCIS, A. A.; RAHMAN, MK Abdel; DAOUD, A. **Processing, structures and compressive properties of porous glass-ceramic composites prepared from secondary by-product materials**. *Ceramics International*, v. 39, n. 6, p. 7089-7095, 2013.

FURLANI, E. et al. **Preparation and characterization of sintered ceramics made with spent foundry olivine sand and clay**. *Ceramics International*, v. 38, n. 4, p. 2619-2625, 2012.

GONG, Y. et al. **Recycling of waste amber glass and porcine bone into fast sintered and high strength glass foams**. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4534-4539, 2016.

GRAUPMANN, Olaf. Et al. **Análise da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de aterro sanitário**. *Revista Matéria*. v.24, n.2, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufri.br/index.php/rm/article/view/28987/16215> Acesso em 01 de nov. 2019.

GUNEY, Yucel et al. **Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete**. *Waste Management*, v. 30, n. 8, p. 1705-1713, 2010.

HABLE, Marlon; GRAUPMANN, Olaf; GRAUPMANN, Susan. **Estudo da resistência do concreto em altas temperaturas utilizando cinza da queima de madeira**. *International Journal of development research*. Vol 9. Agosto, 2019.

HERTZ, Kristian Dahl. **Limits of spalling of fire-exposed concrete**. *Fire safety journal*, v. 38, n. 2, pp. 103-116, 2003.

HJELMAR, OLE. **Disposal strategies for municipal solid waste incineration residues**. *Journal of hazardous materials*, v. 47, n. 1-3, p. 345-368, 1996.

ITÔ, L. C. M. **Geração de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos**. São Carlos, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014

JAMSHIDI, Ali et al. **Analysis of structural performance and sustainability of airport concrete pavements incorporating blast furnace slag**. *Journal of Cleaner Production*, v. 90, p. 195-210, 2015.

JANI, Yahya; HOGGLAND, William. **Waste glass in the production of cement and concrete** – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 2, n. 3, p. 1767-1775, 2014.

KAMINSKII, A. A; SELIVANOV , M.F. **An approach to the determination of the deformation characteristics of viscoelastic materials**. *International Applied Mechanics*. Kluwer Academic Publishers-Consultants Bureau.2005. Disponível em: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ru&user=5qv3QA4AAAJ&citation\\_for\\_view=5qv3QA4AAAJ:eQOLeE2rZwMC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=5qv3QA4AAAJ&citation_for_view=5qv3QA4AAAJ:eQOLeE2rZwMC). Acesso em 30/04/2020.

KIM, Kidong; KIM, Kicheol; HWANG, Jonghee. **LCD waste glass as a substitute for feldspar in the porcelain sanitary ware production**. *Ceramics International*, v. 41, n. 5, p. 7097-7102, 2015.

KUMAR, Sanjay et al. **Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement**. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 8, p. 679-685, 2008.

LING, Tung-Chai; POON, Chi-Sun; WONG, Hau-Wing. **Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 70, p. 25-31, 2013.

LINO, F. A. M., ISMAIL, K. A. R. **Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil**, *Sustainable Cities and Society*, v. 35, pp. 752-757, 2017.

LOPES, Evandro José. **Desenvolvimento de sistema de gaseificação via análise de emissões atmosféricas**. Curitiba, 2014 Tese de doutorado. Disponível em: <http://mixologynews.com.br/wp-content/uploads/2020/08/DESENVOLVIMENTO-DE-SISTEMA-DE-GASEIFICA%C3%87AO.pdf> Acesso em 25 jul 2019.

LUBECK, A. et al. **Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag**. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 3, p. 392-399, 2012.

LUKOWSKI, Paweł; SALIH, Ali. **Durability of mortars containing ground granulated blast-furnace slag in acid and sulphate environment**. *Procedia Engineering*, v. 108, p. 47-54, 2015.

MAHIEUX, P.-Y.; AUBERT, J.-E.; ESCADEILLAS, G. Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 742-747, 2009.

MASTELLA, Miguel Angelo et al. **Mechanical and toxicological evaluation of concrete artifacts containing waste foundry sand**. *Waste management*, v. 34, n. 8, p. 1495-1500, 2014.

MAUTHOOR, Sumayya; MOHEE, Romeela; KOWLESSER, Prakash. **Characterisation of electric arc furnace slags as concrete aggregate in a small**

**island developing state:** A preliminary study. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 459-464, 2016.

MONOSI, Saveria; RUELLO, Maria Letizia; SANI, Daniela. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. **Cement and Concrete Composites**, v. 66, p. 66-72, 2016.

MYMRINE, Vsévolod; PONTE, Haroldo A.; YAMAMOTO, Carlos I. **Synthesis of new colloidal formations during the strengthening of different activated hydrated metallurgical slags**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 220, n. 1, p. 211-221, 2003.

MYMRINE, V. A. et al. **Structure formation of slag-soil construction materials**. *Materials and structures*, v. 38, n. 1, p. 107-113, 2005.

MYMRINE, Vsévolod et al. **Environment friendly ceramics from hazardous industrial wastes**. *Ceramics International*, v. 40, n. 7, p. 9427-9437, 2014.

MYMRINE, Vsévolod et al. **Red clay application in the utilization of paper production sludge and scrap glass to fabricate ceramic materials**. *Applied Clay Science*, v. 107, p. 28-35, 2015.

MYMRINE, Vsévolod et al. **Influence of kaolin clay on mechanical properties and on the structure formation processes of white ceramics with inclusion of hazardous laundry sewage sludge**. *Applied Clay Science* Volume 155, April 2018, Pages 95-102 . Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131718300127> . Acesso em 25/10/2019.

NIESSEN, W. R. **Combustion and incineration processes** (3rd ed.). New York: Marcel Dekker, Inc. 2002.

OBURGER, Eva et al. **Environmental impact assessment of wood ash utilization in forest road construction and maintenance - A field study**. *Science of the Total Environment*, v. 544, p. 711-721, 2016.

OZBAY, Erdoğan; ERDEMİR, Mustafa; DURMUŞ, Halil İbrahim. **Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties –A review**. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 423-434, 2016.

OZDEMİR, İlker; YILMAZ, Senol. **Processing of unglazed ceramic tiles from blast furnace slag**. *Journal of materials processing technology*, v. 183, n. 1, p. 13-17, 2007.

OZTURK, Zahide Bayer; GULTEKIN, Elif Eren. **Preparation of ceramic wall tiling derived from blast furnace slag**. *Ceramics International*, v. 41, n. 9, p. 12020-12026, 2015.

PATHAK, Neelam; SIDDIQUE, Rafat. Effects of elevated temperatures on properties of self-compacting-concrete containing fly ash and spent foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 512-521, 2012.

PASETTO, Marco; BALDO, Nicola. **Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags**. Journal of Hazardous Materials, v. 181, n. 1, p. 938-948, 2010.

PHONPHUAK, Nonthaphong; KANYAKAM, Siwadol; CHINDAPRASIRT, Prinya. **Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick**. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 3057-3062, 2016.

PRABHU, G. Ganesh; HYUN, Jung Hwan; KIM, Yun Yong. **Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production**. Construction and Building Materials, v. 70, p. 514-521, 2014.

PRINCIGALLO, Antonio. Et. Al. **Early development of properties in a cement paste: A numerical and experimental study**. Cement and Concrete Research Volume 33, Issue 7, July 2003, Pages 1013-1020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884603000024>. Acesso em: 30/04/2020.

PYTEL, Zdzisław. **Evaluation of potential applications of recycled moulding and core sands to production of ceramic building materials**. Ceramics International, v. 40, n. 3, p. 4351-4358, 2014.

QUINTANA, L. M. H. et al. **Utilização da cinza de casca de arroz na produção de cerâmica vermelha**. Anais do 43º congresso brasileiro de cerâmica. Florianópolis. Junho de 1999. Disponível em : <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:QXjJK2c6f8QJ:https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/1999/Artigos/150.doc+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br> . Acesso em 01 de nov 2019.

RAMOS, Telma; MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana. **Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion**. Construction and Building Materials, v. 49, p. 343-351, 2013.

RASHAD, Alaa M. **Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement**. Construction and Building Materials, v. 72, p. 340-357, 2014.

RBS TV. **Cidades do Norte de SC gastam milhões para levar lixo a aterros a até 100 km de distância**. G1 GLOBO.COM. 15/06/2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/cidades-do-norte-de-sc-gastam-milhoes-para-levar-lixo-a-aterros-a-ate-100-km-de-distancia.ghtml> Acesso em: 25/10/2019.

REDDY, P. J. **Municipal solid waste management: Processing, energy recovery, global examples**. India: BS Publications. 2011.

REUTER, M.; XIAO, Y.; BOIN, U. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes. In: **VII International conference on molten slags fluxes and salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy**. 2004. p. 349-356.

REY-SALGUEIRO, Leticia et al. **Organic pollutants profiling of wood ashes from biomass power plants linked to the ash characteristics**. Science of the Total Environment, v. 544, p. 535-543, 2016.

SCHWARZ-TATARIN, Anja; FREYBURG, Sabine. **Influence of scrap glass powders and the maturing process in the unfired state on the body properties of a kaolinitic clay after firing**. Journal of the European Ceramic Society, v. 30, n. 7, p. 1619-1627, 2010.

SEKAR, S. K. et al. **Mechanical and fracture characteristics of Eco-friendly concrete produced using coconut shell, ground granulated blast furnace slag and manufactured sand**. Construction and Building Materials, v. 103, p. 1-7, 2016.

SHAKIR, Alaa. MOHAMMED, Ali. **Manufacturing of bricks in the past, in the present and in the future: a state of the art review**. Vol. 02. Setembro, 2013. [https://www.researchgate.net/publication/270751259\\_Manufacturing\\_of\\_Bricks\\_in\\_the\\_Past\\_in\\_the\\_Present\\_and\\_in\\_the\\_Future\\_A\\_state\\_of\\_the\\_Art\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/270751259_Manufacturing_of_Bricks_in_the_Past_in_the_Present_and_in_the_Future_A_state_of_the_Art_Review)

SIDDIQUE, Rafat; NOUMOWE, Albert. **Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete**. Resources, Conservation and Recycling, v. 53, n. 1, p. 27-35, 2008.

SIDDIQUE, Rafat. **Utilization of wood ash in concrete manufacturing**. Resources, Conservation and Recycling, v. 67, p. 27-33, 2012.

SINGH, Gurpreet; SIDDIQUE, Rafat. **Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS)**. Construction and Building Materials, v. 28, n. 1, p. 421-426, 2012.

TABASOVÁ, A. **Waste-to-energy technologies: Impact on environment**, Energy. v. 44, n. 1, p. 146- 155, 2012.

TORKAMAN, Javad; ASHORI, Alireza; MOMTAZI, Ali Sadr. **Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks**. Construction and building materials, v. 50, p. 432-436, 2014.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. **Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation**. Journal of cleaner production, v. 90, p. 397-408, 2015.

UPRETY, Bijaya K. et al. Biodiesel production using heterogeneous catalysts including wood ash and the importance of enhancing byproduct glycerol purity. **Energy Conversion and Management**, v. 115, p. 191-199, 2016.

VACLAVIKOVA, M. et al. Removal of cadmium, zinc, copper and lead by red mud, an iron oxides containing hydrometallurgical waste. **Studies in Surface Science and Catalysis**, v. 155, p. 517-525, 2005.

YE, Chuqiao et al. **Preparation and properties of sintered glass–ceramics containing Au–Cu tailing waste**. *Materials & Design*, v. 86, p. 782-787, 2015.

YEIH, Weichung et al. **Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates**. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 737-745, 2015.

YLINIEMI, Juho et al. Lightweight aggregates produced by granulation of peat-wood fly ash with alkali activator. **International Journal of Mineral Processing**, v. 149, p. 42-49, 2016.

WU, Ching-Wei. et al. **Mechanochemically induced synthesis of anorthite: in MSWI fly ash with kaolin**. *Journal of Hazardous Materials*. Vol 244-245. Janeiro, 2013. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389412011545>

WEI, Yu-Ling et al. **Recycling steel-manufacturing slag and harbor sediment into construction materials**. *Journal of hazardous materials*, v. 265, p. 253-260, 2014.

WEI, Yu-Ling; CHENG, Shao-Hsian; KO, Guan-Wei. **Effect of waste glass addition on lightweight aggregates prepared from F-class coal fly ash**. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 773-782, 2016.

WIEMES, Leandro. **Incorporation os industrial wastes as raw materials in brick's formulation**. *Journal of Cleaner production*. Vol. 142, Parte 01, Pg. 67-77. Janeiro, 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616308617>

ZHU, Mengguang et al. **Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass**. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 398-405, 2016.