



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

UTILIZAÇÃO DE REJEITOS ORIUNDOS DE PROCESSOS SIDERÚRGICOS NA  
FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS

LUIZA DE ASSIS FERRARI SILVA

BELO HORIZONTE

2018

LUIZA DE ASSIS FERRARI SILVA

UTILIZAÇÃO DE REJEITOS ORIUNDOS DE PROCESSOS SIDERÚRGICOS NA  
FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS

Trabalho de Conclusão apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Carrusca de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

BELO HORIZONTE

2018

Silva, Luiza de Assis Ferrari

S ---

Utilização de rejeitos oriundos de processos siderúrgicos na fabricação de blocos intertravados / Luiza de Assis Ferrari Silva. / 2018.

-- f.; -- cm.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Carrusca de Oliveira. Coorientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Engenharia Ambiental e Sanitária, 2018.

1. Reaproveitamento de resíduos. 2. Blocos de concreto. 3. Aspectos ambientais. I. Silva, Luiza de Assis Ferrari. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Utilização de rejeitos oriundos de processos siderúrgicos na fabricação de blocos intertravados.

CDD -----

LUIZA DE ASSIS FERRARI SILVA

UTILIZAÇÃO DE REJEITOS ORIUNDOS DE PROCESSOS SIDERÚRGICOS NA  
FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas  
Gerais, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Engenheira  
Ambiental e Sanitarista.

Data de aprovação: 12/12/2018

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Evandro Carrusca de Oliveira – Presidente da Banca Examinadora  
CEFET-MG – Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva  
CEFET-MG - Coorientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mateus Justino da Silva  
CEFET-MG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Fernando Augusto Sâtes  
CEFET-MG

À minha tia Gláucia e ao meu tio Ronilson.

## AGRADECIMENTOS

Gratidão!

Aos meus queridos orientadores, Evandro e Sidney, que acreditaram em mim incondicionalmente e souberam lidar, leve e gentilmente, com todas as dificuldades dos passados momentos difíceis. Gratidão pelo apoio, pela dedicação, pela compreensão e pela força que me doaram. Tenho vocês como meus grandes amigos.

Ao CEFET e aos professores que contribuíram para a minha formação, em especial ao professor Frederico, à professora Lívia, ao professor Tiago e ao professor Felipe que fizeram a diferença para mim de uma forma que talvez nem mesmo eles possam imaginar.

Ao professor Mateus, ao professor Fernando, ao professor Augusto, ao Richard, ao Paulo e ao Adilson, por todo o auxílio.

Sou muito grata também à professora Ludmila, por toda a sensibilidade e engajamento. Você fez uma diferença inestimável para a minha trajetória no curso.

À minha tia Glaucia, que me apoiou com todo o seu amor e força, desde antes da ocasião do meu nascimento, sendo minha base dentro e fora de todas as suas possibilidades. Ao meu tio Ronilson, por todo seu apoio e amor sempre. Minha eterna gratidão a vocês que são meu porto seguro, minhas referências. Vocês que com sacrifício e, ao mesmo tempo, alegria e brilho no olhar me acompanharam e vibraram com o meu crescimento.

À minha mãe Glauciane, pelo amor à sua forma, e também ao meu pai Elizio, que me deram a chance de viver. Gratidão pela oportunidade e pela presença em minha vida, cada um com sua maneira.

Ao meu tio Rodrigo que me auxiliou em vários momentos com toda a sua alegria, inclusive tendo sido responsável pelo contato com a empresa e abertura da oportunidade de estudo.

Ao meu avô Waldir, que foi um grande pai durante o curto tempo que esteve comigo e à minha avó Reny, que mesmo que eu não tenha tido a oportunidade de conhecer, me ensinou muito de formas que não são explicáveis.

À minha avó Olindina e ao meu avô José, por terem me ensinado tanto sobre força e doçura, respectivamente, cada um à sua maneira. Sou grata pela oportunidade de ter cuidado de vocês e por toda a luta que enfrentamos juntos. Nossas experiências indubitavelmente me trouxeram muito crescimento e me tornaram uma pessoa muito mais forte do que algum dia acreditei que poderia ser.

À minha melhor amiga Bárbara por toda a tranquilidade e força que me doou em cada momento, pelo ombro amigo, pelo aconchego que só uma irmã de alma pode trazer.

Aos meus amigos Guilherme, Karine, Letícia, Lorrane e Rebeca, por todo o apoio e cumplicidade em todos os momentos de luta e, quem dirá de desespero, durante a nossa difícil trajetória. Vocês tornaram tudo muito mais leve para mim. Em especial ao Gui que sempre esteve disponível e pronto para me auxiliar na concretização do trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos meus queridos companheiros, Jolie, Zeus e Miau, por toda a pureza, alegria, leveza e segurança que me passam a cada dia e incondicionalmente.

## RESUMO

O processo siderúrgico produz grandes volumes de resíduos sólidos que ainda, em muitos casos, não possuem tecnologias adequadas para a sua reutilização ou reciclagem, necessitando de uma destinação adequada que geralmente é onerosa, além de causar diversos impactos ambientais e sociais, sendo necessária a busca de alternativas mais sustentáveis para a destinação desses resíduos siderúrgicos. Por outro lado, a pavimentação de superfícies demanda grandes volumes de matérias primas e, como Minas Gerais possui cerca de 45% do setor siderúrgico do país a manutenção com rejeitos deste setor pode também contribuir para o bom estado das vias públicas, extremamente relevante para diversas atividades econômicas da sociedade. O presente trabalho busca encontrar aplicabilidade ao uso de rejeitos provenientes de processos siderúrgicos na produção de blocos intertravados, possibilitando a redução do passivo ambiental gerado pelas atividades produtivas de ambos os setores, além de transformar resíduos deletérios em materiais necessários, agregando valor e utilidade aos mesmos e reduzindo os impactos ambientais gerados. O presente estudo descreve a metodologia, através de processos sistêmicos, para produzir blocos intertravados utilizando pó de balão, finos de minério e escória em sua constituição. Os ensaios físicos e químicos demonstram a competência do material para suportar tensões médias, além de contar com uma massa significativamente menor do que a do material convencional. Apesar da redução da massa, houve um aumento da densidade da estrutura do material, provavelmente devido ao uso da escória granulada, com sua estrutura aerada, como substituta para o agregado graúdo convencional e ao efeito filler. A resistência à compressão média obtida aos 28 dias para os traços 1, 2 e 3 foram respectivamente de 21,77, 34,52 e 19,94 MPa. Sendo que os traços 1 e 2 contaram com a substituição de cerca de 77% dos agregados convencionais por resíduos e o traço 3 contou com a substituição de 100%. Assim, o traço 2 que contou com a substituição total do agregado graúdo por escória e de metade da massa de agregado miúdo por finos de minério retornou os melhores resultados quanto a resistência à compressão, com um valor próximo ao que estabelece a NBR 9781 (ABNT, 2013), ou seja os blocos de concreto devem possuir uma resistência à compressão maior ou igual a 35 MPa para fins de tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais.

Palavras-Chave: Reaproveitamento de resíduos, Blocos de concreto, Aspectos ambientais.

## ABSTRACT

The steelmaking process produces large volumes of solid waste that in many cases do not have adequate technologies for their reuse or recycling, requiring adequate disposal that is generally costly, as well as causing diverse environmental and social impacts, requiring the search of more sustainable alternatives for the destination of this steel waste. On the other hand, the paving of surfaces demands large volumes of raw materials and, as Minas Gerais has about 45% of the country's steel sector, maintenance with tailings of this sector can also contribute to the good condition of the public roads, extremely relevant for several economic activities of society. The present work seeks to find applicability to the use of tailings from steelmaking processes in the production of interlocked blocks, enabling the reduction of the environmental liabilities generated by the productive activities of both sectors, besides transforming deleterious waste into necessary materials, adding value and utility to them and reducing the environmental impacts generated. The present study describes the methodology, through systemic processes, to produce interlocked blocks using balloon powder, ore fines and slag in its constitution. The physical and chemical tests demonstrate the ability of the material to withstand medium stresses, in addition to having a significantly lower mass than the conventional material. Despite the mass reduction, there was an increase in the density of the material structure, probably due to the use of the granulated slag with its aerated structure as a substitute for the conventional aggregate and the filler effect. The average compressive strength obtained at 28 days for traces 1, 2 and 3 were respectively 21.77, 34.52 and 19.94 MPa. Since traces 1 and 2 counted on the substitution of about 77% of the conventional aggregates by residues and the trace 3 counted on the substitution of 100%. Thus, trace 2 that counted on the total substitution of the aggregate by slag and half of the aggregate mass for ore fines returned the best results for the compressive strength, with a value close to that established by NBR 9781 (ABNT , 2013), ie concrete blocks must have a compressive strength greater than or equal to 35 MPa for pedestrian traffic, light and commercial vehicles.

Keywords: Reuse of waste, Concrete blocks, Environmental aspects.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Usina siderúrgica da empresa AVG.....	21
Figura 2: Ferro gusa saindo do alto-forno para o lingotamento. ....	25
Figura 3: Ferro gusa, produto final da usina siderúrgica AVG. ....	25
Figura 4: Coleta e armazenamento do pó de balão no sistema de tratamento de gases do alto-forno. ....	28
Figura 5: Estoque de pó de balão da AVG Siderurgia. ....	28
Figura 6: Escória saindo do alto-forno na siderúrgica AVG. ....	31
Figura 7: Estoque de escória bruta na empresa AVG Siderurgia. ....	32
Figura 8: Finos de minério antigos estocados na siderúrgica AVG. ....	33
Figura 9: Finos de minério novos estocados na siderúrgica AVG. ....	33
Figura 10: Escória bruta de alto-forno.....	35
Figura 11: Escória granulada de alto-forno. ....	36
Figura 12: Alguns formatos e disposições possíveis para blocos de concreto. ....	42
Figura 13: calçada romana em Coimbra, Portugal. ....	43
Figura 14: Estrutura típica de um pavimento intertravado. ....	46
Figura 15: Rodovia construída com pavimento intertravado na Colômbia.....	47
Figura 16: Um pátio de manobras no Porto em Lisboa e aeroporto de Hong Kong na China construídos com pavimento intertravado.....	48
Figura 17: Fluxograma representativo da metodologia proposta. ....	50
Figura 18: Amostras de pó de balão, finos de minério e escória bruta, respectivamente.....	52
Figura 19: Amostra de Pó de balão .....	53
Figura 20: Amostra de finos de minério.....	53
Figura 21: Amostra de escória.....	54
Figura 22: Corpos de prova respectivamente referentes aos traços de referência, 1, 2 e 3. ....	56
Figura 23: Emic DL30000N para ensaio de resistência à compressão.....	59
Figura 24: Morfologia dos grânulos de pó de balão em duas regiões. ....	67
Figura 25: Micrografia Eletrônica de varredura para a primeira região do pó de balão. ....	68
Figura 26: Micrografia Eletrônica de varredura para a segunda região do pó de balão.....	69
Figura 27: Micrografia Eletrônica de varredura para a segunda região do pó de balão.....	70
Figura 28: Morfologia dos grânulos de escória para duas regiões da amostra.....	72
Figura 29: Micrografia Eletrônica de varredura para a primeira região da amostra de escória. ....	73

Figura 30: Micrografia Eletrônica de varredura para a segunda região da amostra de escória. .....	73
Figura 31: Morfologia dos grânulos de escória para a primeira amostra. ....	75
Figura 32: Morfologia dos grânulos de finos de minério para duas regiões da amostra. ....	76
Figura 33: Morfologia dos grânulos de finos de minério e respectivo espectro EDS para a primeira amostra. ....	77
Figura 34: Morfologia dos grânulos de finos de minério e respectivo espectro EDS para a segunda amostra. ....	77
Figura 35: Morfologia dos grânulos de finos de minério com aumento de 2000 vezes para a primeira amostra. ....	79
Figura 36: Blocos retangulares para os traços de referência, 1, 2 e 3, respectivamente. ....	80
Figura 37: Fraturas nos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão..	83
Figura 38: Microscopia óptica para o traço de referência. ....	86
Figura 39: Microscopia óptica para o traço 1. ....	87
Figura 40: Microscopia óptica para o traço 2. ....	89
Figura 41: Microscopia óptica para o traço 3. ....	90

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Difratoograma (DRX) da amostra de pó de balão.....	62
Gráfico 2: Difratoograma da amostra de finos de minério.....	63
Gráfico 3: Difratoograma da amostra de escória.....	64
Gráfico 4: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 25, para a primeira região da amostra de pó de balão.....	68
Gráfico 5: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 26, para a segunda região da amostra de pó de balão.....	69
Gráfico 6: Mapa de composição da imagem 27, correspondente à primeira amostra.....	71
Gráfico 7: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 29, para a primeira região da amostra de escória.....	73
Gráfico 8: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 30, para a segunda região da amostra de escória.....	73
Gráfico 9: Mapa de composição para a imagem 31, para a primeira amostra de escória.....	75
Gráfico 10: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 33, para a primeira região da amostra de escória.....	77
Gráfico 11: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 34, para a segunda região da amostra de escória.....	77
Gráfico 12: Mapa de composição referente à imagem da figura 35 para a primeira amostra de finos de minério.....	79
Gráfico 13: Resistência à compressão para os seguintes traços e tempos de cura.....	82
Gráfico 14: Média das massas saturada e seca (kg) para os quatro traços propostos.....	92
Gráfico 15: Absorção de água por imersão média (%) para os quatro traços propostos.....	93
Gráfico 16: Índice de vazios médio (%) para os quatro traços propostos.....	95
Gráfico 17: Massas específicas médias seca e saturada (%) para os quatro traços propostos.....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais resíduos gerados na atividade siderúrgica durante o ano de 2016 em Minas Gerais.....	22
Tabela 2: Faixa de composição típica do pó de balão. ....	27
Tabela 3: Resíduos mais gerados nas atividades industriais em Minas Gerais. ....	29
Tabela 4: Faixa de composição para escórias ácidas e básicas. ....	31
Tabela 5: Composição Química aproximada do Resíduo “Charcok”. ....	35
Tabela 6: Composição química Escória de Alto-Forno.....	37
Tabela 7: Características dos elementos e compostos químicos dos resíduos das barragens antes e após a hidratação.....	37
Tabela 8: Estado geral da pavimentação de rodovias no país. ....	40
Tabela 9: Condição da superfície do pavimento nas rodovias de Minas Gerais. ....	41
Tabela 10: Proporções ou traços utilizados na confecção dos corpos de prova e blocos.....	55
Tabela 11: Fluorescência de Raio-X para o pó de balão. ....	65
Tabela 12: Fluorescência de Raio-X para a escória. ....	66
Tabela 13: Fluorescência de Raio-X para finos de minério. ....	66
Tabela 14: Resultados da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para o pó de balão...	70
Tabela 15: Resultados da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para a Escória. ....	74
Tabela 16: Finos de minério. ....	78
Tabela 17: Resultados dos ensaios de resistência à compressão para um tempo de cura de 7 dias. ....	81
Tabela 18: Resultados dos ensaios de resistência à compressão para um tempo de cura de 21 dias.....	81
Tabela 19: Resultados dos ensaios de resistência à compressão para um tempo de cura de 28 dias.....	81
Tabela 20: Massa saturada (kg) em triplicata para os quatro traços adotados. ....	91
Tabela 21: Massa seca (kg) em triplicata para os quatro traços adotados.....	91
Tabela 22: Absorção de água por imersão (%) em triplicata para os quatro traços propostos.	93
Tabela 23: Índice de vazios (%) em triplicata para os quatro traços propostos. ....	94
Tabela 24: Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> ) em triplicata para os quatro traços propostos. ....	95
Tabela 25: Massa específica saturada (kg/m <sup>3</sup> ) em triplicata para os quatro traços propostos..	96

## **LISTA DE SIGLAS**

CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

DRX – Difração de Raios-X

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

EPC - Elemento pré-moldado de concreto

FRX – Fluorescência de Raios-X

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

PAVERS – Blocos intertravados

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	18
<b>2. OBJETIVOS</b>	20
<b>2.1. Objetivo Geral</b>	20
<b>2.2. Objetivos Específicos</b>	20
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	21
<b>3.1. Siderurgia</b>	21
3.1.1. Processo Siderúrgico	23
3.1.1.1. <i>Combustíveis</i>	23
3.1.1.2. <i>Processos de Aglomeração</i>	23
3.1.1.3. <i>Alto-forno</i>	23
3.1.1.4. <i>Ferro Gusa</i>	24
3.1.2. Resíduos siderúrgicos	26
3.1.2.1. <i>Pó de Balão</i>	26
3.1.2.2. <i>Escória</i>	29
3.1.2.3. <i>Finos de Minério</i>	32
3.1.2.4. <i>Composição e Constituintes dos Resíduos Siderúrgicos</i>	34
3.1.2.5. <i>Expansibilidade dos Resíduos de Siderurgia</i>	37
<b>3.2. Resíduos Sólidos</b>	38
<b>3.3. Pavimentação</b>	39
3.3.1. Rodovias Brasileiras	39
3.3.2. Blocos Intertravados	41
3.3.2.1. <i>Formatos, disposições e dimensões</i>	42
3.3.2.2. <i>Características físicas</i>	43
3.3.2.3. <i>Histórico, demandas e produção dos pavimentos com blocos de concreto intertravados</i>	43
3.3.2.4. <i>Elementos de concreto para pavimentação (Pavers)</i>	45

3.3.2.5.	<i>Utilização de pavimentos intertravados em grandes obras</i> .....	47
<b>3.4.</b>	<b>Concreto</b> .....	48
3.4.1.	Cimento.....	49
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	50
<b>4.1.</b>	<b>Método de Abordagem</b> .....	51
<b>4.2.</b>	<b>Materiais</b> .....	51
<b>4.3.</b>	<b>Infraestrutura Necessária</b> .....	51
<b>4.4.</b>	<b>Método de Procedimentos</b> .....	51
4.4.1.	Caracterização das matérias primas .....	57
4.4.1.1.	<i>Fluorescência de raio-x (FRX)</i> .....	57
4.4.1.2.	<i>Difratometria de raio-x (DRX)</i> .....	57
4.4.1.3.	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)</i> .....	57
4.4.2.	Caracterização dos corpos de prova.....	57
4.4.2.1.	<i>Absorção de água por imersão</i> .....	57
4.4.2.2.	<i>Índice de vazios</i> .....	58
4.4.2.3.	<i>Determinação da massa específica</i> .....	58
4.4.2.4.	<i>Resistencia à compressão</i> .....	59
4.4.2.5.	<i>Microscopia Eletrônica</i> .....	60
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	61
<b>5.1.</b>	<b>Caracterização das matérias primas utilizadas</b> .....	61
5.1.1.	Difratometria de Raio-X (DRX) .....	61
5.1.2.	Fluorescência de Raio-X (FRX) .....	64
5.1.2.1.	<i>Pó de Balão</i> .....	64
5.1.2.2.	<i>Escória</i> .....	65
5.1.2.3.	<i>Finos de Minério</i> .....	66
5.1.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	67

5.1.3.1.	<i>Pó de Balão</i> .....	67
5.1.3.2.	<i>Escória</i> .....	71
5.1.3.3.	<i>Finos de Minério</i> .....	76
<b>5.2.</b>	<b>Caracterização dos corpos de prova</b> .....	<b>80</b>
5.2.1.	Ensaio de resistência à compressão .....	80
5.2.2.	Microscopia Óptica .....	85
5.2.2.1.	<i>Traço de referência</i> .....	85
5.2.2.2.	<i>Traço 1 – 100% de escória e 50% de pó de balão</i> .....	87
5.2.2.3.	<i>Traço 2 – 100% de escória e 50% de finos de minério</i> .....	88
5.2.2.4.	<i>Traço 3 – 100% de escória, 50% de pó de balão e 50% de finos de minério</i> .....	90
5.2.3.	Massa .....	91
5.2.4.	Absorção de Água por Imersão .....	93
5.2.5.	Índice de Vazios.....	94
5.2.6.	Massa Específica.....	95
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>98</b>
<b>7.</b>	<b>PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</b> .....	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>102</b>
	<b>ANEXO 1</b> .....	<b>105</b>
	<b>ANEXO 2</b> .....	<b>107</b>
	<b>ANEXO 3</b> .....	<b>109</b>
	<b>ANEXO 4</b> .....	<b>111</b>
	<b>ANEXO 5</b> .....	<b>112</b>
	<b>ANEXO 6</b> .....	<b>113</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento do setor siderúrgico no Brasil traz tanto benefícios para a economia, quanto relevantes prejuízos ambientais, cujos passivos são de difícil mensuração. Esse crescimento pode ser explicado pela estratégia adotada pelo país de voltar sua economia para a exportação de produtos de baixa tecnologia agregada, mas que demandam grandes quantidades de energia e recursos minerais, resultando no incremento da produção e, conseqüentemente, na degradação ambiental inerente à atividade (MILANEZ; PORTO, 2008).

O processo siderúrgico produz grandes volumes de resíduos sólidos que ainda não possuem tecnologias viáveis para a sua reutilização ou reciclagem, necessitando de um destino final adequado. A disposição dos resíduos em aterros industriais, para os grandes volumes característicos dessa atividade, são onerosos e demandam uma crescente ampliação desses locais, além de causar diversos prejuízos ambientais e sociais. Assim, torna-se necessária a busca de alternativas mais sustentáveis para a destinação dos resíduos siderúrgicos (LOBATO, 2014).

Por outro lado, a construção civil é um setor que necessita constantemente de materiais, nas suas demandas mais básicas às mais complexas, já que quaisquer atividades desenvolvidas hoje, direta ou indiretamente, inevitavelmente irão necessitar de uma estrutura física (GEYER, 2001). A produção de materiais de construção que suprem esse campo também gera impactos significativos ao meio, desde a extração da matéria prima, até seu beneficiamento e produção. Pode-se destacar o elevado volume de insumos consumidos nas atividades relacionadas que ocasionam a exploração crescente de recursos naturais, além dos altos preços dos materiais de construção.

A pavimentação de superfícies, desde residenciais até a de ruas, estradas e aeroportos, por exemplo, demanda grandes volumes de materiais. As pavimentações de grande porte geralmente são feitas utilizando asfalto e concreto, no entanto, nota-se que a vida útil dos mesmos é curta e não atende satisfatoriamente à demanda e à necessidade impostas pelo fim, já que o bom estado das vias públicas é relevante para diversas atividades da sociedade (CNT, 2018). Além disso, pavimentações de menor escala, como a de passeios, pátios e praças, por exemplo, costumam utilizar métodos pouco duráveis que impermeabilizam as superfícies agravando os problemas de drenagem urbana e de estabilidade do terreno, já que as rachaduras que surgem no material criam caminhos preferenciais para a água e favorecem a erosão (IPPUL, 2004).

Nesse contexto, a construção civil, sobretudo no âmbito da pavimentação de vias, é um dos setores industriais mais apropriados para o aproveitamento de resíduos, pela necessidade de obtenção de insumos mais acessíveis e pelas próprias características das pavimentações, permitindo imobilizar volumes expressivos de materiais. Os elementos presentes nos resíduos siderúrgicos possuem características similares aos dos agregados tradicionais utilizados na construção civil, sendo que o aproveitamento de resíduos nesse campo já tem demonstrado a possibilidade de geração de produtos de mais baratos, resistentes e duráveis (FILHO, 2013; MONTINI, 2009). Logo, o descarte de grandes volumes de resíduos gerados pelas atividades siderúrgicas, unido ao contexto e às necessidades da construção civil, abrem a possibilidade de gerar benefícios para os setores simultaneamente.

O presente trabalho busca encontrar aplicabilidade do uso de rejeitos provenientes de processos siderúrgicos na produção de blocos intertravados, itens requisitados em grandes quantidades para a pavimentação de superfícies, almejando a produção de um material de baixo custo com a substituição parcial ou total de agregados convencionais por resíduos, além de fornecer emprego e renda para a população carente que vive no entorno das indústrias do setor. Espera-se que esses produtos possam suportar os carregamentos requisitados e atender às normas pertinentes.

Com isso, o passivo ambiental gerado pelas atividades produtivas de ambos os setores em sua forma convencional, seriam mitigados reduzindo a carga sobre reservas naturais do planeta. Além disso, resíduos deletérios seriam utilizados para fins necessários, agregando valor e utilidade aos mesmos e reduzindo os impactos ambientais gerados.

Os resíduos utilizados no estudo são gerados nas atividades de produção do ferro gusa na AVG Siderurgia, unidade do Grupo AVG, instalada nas proximidades da BR-040, em Sete Lagoas – MG. A empresa tem uma capacidade de produção diária de cerca de 750 toneladas desse material, nas variedades de aciaria, nodular e cinzenta. Os resíduos escolhidos para a confecção dos blocos são: pó de balão, finos de minério e escória bruta.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um material cimentício ambientalmente, economicamente e tecnicamente viável, utilizando rejeitos provenientes de processos siderúrgicos em sua constituição, na produção de blocos intertravados (PAVERS), para fins de pavimentação de superfícies.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar os rejeitos (pó de balão, finos de minério e escória bruta) disponibilizados pela AVG Siderurgia, utilizando os ensaios de Difração de Raio-X (DRX), Fluorescência de Raio-X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS);
- Desenvolver misturas cimentícias (traços) com o uso de rejeitos siderúrgicos, substituindo um ou mais constituintes (cimento, brita e areia) da composição convencional, parcialmente ou totalmente, para a confecção de blocos intertravados;
- Moldar corpos de prova para os diferentes traços propostos, compostos por combinações de rejeitos (pó de balão, finos de minério e escória bruta) e agregados convencionais (areia e brita), além de corpos de prova de referência utilizando a composição convencional, para comparações técnicas;
- Moldar blocos intertravados compostos pelos traços propostos: traço 1 - 50% de resíduo (pó de balão), traço 2 - 50% de resíduo (finos de minério), traço 3 - 100% de resíduo (pó de balão e finos de minério) e também contendo a composição de referência.
- Ensaaiar os corpos de prova quanto a resistência à compressão nos tempos de 7, 21 e 28 dias;
- Ensaaiar os corpos de prova quanto a absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica aparente e massa específica saturada;
- Caracterizar as fraturas dos corpos de prova, utilizando a Microscopia Óptica;
- Buscar as proporções e materiais utilizados que confirmam as melhores propriedades ao material, além da otimização do custo agregado e dos benefícios ambientais.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Siderurgia

Metalurgia é a ciência e a tecnologia de extração dos metais a partir de seus minérios, sendo que a metalurgia do ferro é denominada siderurgia (SILVA J, 2011). O processo siderúrgico consiste basicamente na redução dos óxidos de ferro, sendo que a matéria prima mais utilizada para esse fim no Brasil é o minério de ferro hematítico e itabirítico oriundos do Quadrilátero Ferrífero representando cerca de 50% da extração nacional de largo uso por siderúrgica no país. A figura 1 mostra as instalações da usina siderúrgica da empresa AVG Siderurgia.

Figura 1: Usina siderúrgica da empresa AVG.



Fonte: Do autor, 2018.

O minério de ferro é encontrado na natureza principalmente sob duas formas, sendo elas a magnetita e a hematita. A magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) é minerada principalmente na Suécia, tendo coloração de cinza escura a preta, com densidade de cerca de  $5,16\text{g/cm}^3$  e formada aproximadamente por 72% de ferro e 28% de oxigênio. É altamente magnética, possibilitando sua separação das impurezas com maior facilidade. Já a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ocorre comumente no

Brasil, sendo o mineral mais empregado na siderurgia. Sua coloração varia entre o cinza e o vermelho e sua densidade é de aproximadamente de 5,26g/cm<sup>3</sup>, sendo formada por cerca de 70% de ferro e 30% de oxigênio (SILVA J, 2011).

Em Minas Gerais, o setor siderúrgico é relevante, contando com 42 empresas, representando o maior número de organizações geradoras de resíduos industriais, parcela que corresponde a 10,14% do total. Esse setor foi responsável pela geração de 9.842.955,24 toneladas de resíduos no ano de 2016, o que representa 19,97% do total de resíduos industriais gerados, sendo a atividade que mais gera resíduos no estado (FEAM, 2017). A tabela 1 mostra os principais resíduos gerados na atividade siderúrgica.

Tabela 1: Principais resíduos gerados na atividade siderúrgica durante o ano de 2016 em Minas Gerais

<b>Item</b>	<b>Resíduos mais gerados na atividade siderúrgica</b>	<b>Quantidade (t)</b>	<b>%</b>
1	Escória de alto forno	3.822.403,30	38,83
2	Escória de aciaria	1.866.565,36	18,96
3	Sucata de metais ferrosos	1.532.406,40	15,57
4	Resíduos sólidos composto de metais não tóxicos	767.203,87	7,79
5	Resíduos de sistema de controle de emissão gasosa contendo substâncias não tóxicas (precipitadores, filtros de manga entre outros)	373.502,60	3,79
6	Lodo ou poeira do sistema de controle de emissão de gases da produção de aço primário em fornos elétricos.	289.130,65	2,94
7	Resíduos sólidos de estações de tratamento de efluentes contendo substâncias não tóxicas	274.725,71	2,79
8	Finos de minério de ferro	124.186,81	1,26
9	Produtos fora da especificação ou fora do prazo de validade contendo ou não contendo substâncias não perigosas	121.931,27	1,24
10	Moinha de carvão vegetal	114.424,89	1,16
<b>Total geral da atividade</b>		<b>9.842.955,24</b>	<b>94,35</b>

Fonte: FEAM, 2017.

### 3.1.1. Processo Siderúrgico

#### 3.1.1.1. *Combustíveis*

O processo siderúrgico geralmente emprega dois combustíveis em suas atividades: o carvão vegetal (aço verde) e/ou o coque (carvão mineral ou mistura com coque sintético). O carvão vegetal é um produto negro, sólido e poroso, utilizado como combustível redutor. É produzido pela destilação da matéria orgânica vegetal na ausência de oxigênio. Já o coque é um produto cinza, sólido e poroso, também utilizado como combustível redutor no alto-forno das siderúrgicas. É um resíduo carbonoso obtido na decomposição por calor de hulhas (SILVA J, 2011).

#### 3.1.1.2. *Processos de Aglomeração*

Desde a lavra até a fase de beneficiamento do minério, são produzidas grandes quantidades de partículas finas e ultrafinas, que recebem o nome de finos de minério. Essas partículas não podem ser empregadas diretamente no processo da indústria, já que é necessário que a carga do alto-forno seja dotada de uniformidade e isenta de finos para permitir a eficiente permeabilidade à coluna. Quanto maior for o contato entre o gás redutor e o minério de ferro, menor será o consumo de combustível e o tempo necessário para a redução. Então, para possibilitar a utilização dos finos de minérios na produção, antes considerados rejeitos, é necessário que os mesmos sejam aglomerados através da sinterização ou da pelletização (SILVA J, 2011).

#### 3.1.1.3. *Alto-forno*

O alto-forno é um trocador de calor à contracorrente cuja função é a fusão redutora do minério de ferro, proporcionando grandes reações pelo contato da carga e dos gases, produzindo principalmente ferro gusa, escória, gases e poeiras. O alto-forno é constituído de tijolos refratários junto a uma carcaça externa de aço.

O processo consiste no carregamento alternado do minério de ferro, pelotas, sinter, coque ou carvão vegetal e fundente pelo topo do aparelho. O minério de ferro desce no alto-forno junto aos fundentes em contracorrente em relação ao gás quente de fluxo ascendente, proveniente da combustão do coque ou carvão, reduzindo o minério e pré-aquecendo os

materiais. Durante o aquecimento, a mistura vai passando por alterações em sua composição, passando pela secagem e calcinação, até que as reações de redução sejam concluídas, quando o oxigênio, que se encontrava combinado ao ferro, passa para a forma de óxidos de carbono nos gases produzidos. No processo também acontecem outras reações, em que ocorre a formação da escória pela fusão da ganga e dos fundentes, além de carbonetos. Os produtos do processo são: ferro-gusa, escória, gás de alto-forno e poeiras (SILVA J, 2011).

As proporções de materiais utilizados e a quantidade de produtos obtidos dependem de vários fatores. De acordo com Silva J (2011), um exemplo é que para 1,7 toneladas de minério, 0,65 toneladas de coque ou carvão, 0,25 toneladas de fundente e 1,8 a 2,0 toneladas de ar, seriam obtidas 1 tonelada de ferro-gusa, 200 a 400 quilos de escória e 2,5 a 3,5 toneladas de gás de alto-forno.

Para que o alto-forno tenha uma boa eficiência, é necessário que a matéria prima tenha boa permeabilidade, com uma carga de granulometria adequada, uniforme e livre da presença de finos. Indicativos da eficiência do aparelho são que o gás produzido tenha o teor de  $\text{CO}_2$  mais alto e a temperatura mais baixa possíveis, demonstrando a boa marcha do aparelho. Além disso, o minério deve ter alto teor de ferro e boa reducibilidade para que o consumo de coque ou carvão seja mínimo (SILVA J, 2011).

O oxigênio do ar que é injetado preaquecido pelas ventaneiras reage com o carbono do combustível (carvão ou coque), gerando uma grande quantidade de calor para o processo e ainda um gás composto de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$ . Após o início da reação, rapidamente todo o oxigênio será consumido, restando apenas dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que, em contato com o carbono incandescente, formará monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). Em seguida, o  $\text{CO}$  reage com os óxidos de ferro, reduzindo-os (SILVA J, 2011).

#### 3.1.1.4. *Ferro Gusa*

O Ferro gusa é produzido em alto-forno utilizando o coque ou carvão vegetal como combustível e redutor. O processo consiste na redução do minério de ferro, resultando em um material com 3,0 a 4,5% de carbono e alto teor de impurezas, como silício, manganês, fósforo e enxofre, ainda necessitando ser purificado antes da sua utilização. A figura 2 mostra o ferro gusa saindo do alto-forno e entrando na etapa de lingotamento e a figura 3 mostra os lingotes de ferro gusa que são o produto final da usina siderúrgica da AVG.

Figura 2: Ferro gusa saindo do alto-forno para o lingotamento.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 3: Ferro gusa, produto final da usina siderúrgica AVG.



Fonte: Do autor, 2018.

### 3.1.2. Resíduos siderúrgicos

A transformação do minério de ferro em ferro gusa em uma siderúrgica gera subprodutos ou rejeitos durante o processo de produção. Os 3 principais resíduos sólidos gerados nos Altos-Fornos são: a escória, o pó de balão e o fino de minério.

#### 3.1.2.1. *Pó de Balão*

As cinzas volantes siderúrgicas, denominadas como pó de balão no estado de Minas Gerais ou “Charcok” internacionalmente (SANTOS, 2015), são um resíduo sólido industrial constituído pelo material particulado produzido nos altos-fornos das siderúrgicas, que fica retido no sistema de controle de emissão de gases (OLIVEIRA; MARTINS, 2002). Esse pó é gerado na queima de carvão ou coque para derreter e reduzir o minério de ferro, contendo principalmente finos de carvão e minério de ferro.

Estima-se que são produzidos entre 28 e 45kg de pó de balão a cada tonelada de ferro-gusa em Minas Gerais. Mesmo que esse não seja um valor considerado expressivo, é um material considerado problemático (MILANEZ; PORTO, 2014). Cerca de 75% desse material é acondicionado em pátios a céu aberto, possibilitando sua dispersão, carregamento ou lixiviação, e a consequente contaminação dos solos e águas (OLIVEIRA; MARTINS, 2002).

. A constituição das cinzas volantes siderúrgicas é basicamente de óxidos metálicos e materiais carbonosos (LOBATO, 2014), estando relacionada às características do combustível e do minério de ferro utilizados na produção do ferro gusa. De acordo com o estudo de Oliveira e Martins (2003), em seu trabalho realizado em Sete Lagoas, a concentração de cádmio, chumbo e cromo nas amostras analisadas encontraram-se abaixo dos limites máximos permitidos na ABNT NBR 10004/2004. No entanto, a quantidade de fenóis apresentou-se cerca de cinco vezes maior que o limite máximo. Na tabela 2 é apresentada a composição típica do pó de balão.

Tabela 2: Faixa de composição típica do pó de balão.

<b>Composto</b>	<b>% em peso</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57
SiO <sub>2</sub>	12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2
CaO	3
MgO	0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05
C	20

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; MARTINS, 2003

O pó de balão é classificado como um resíduo sólido industrial perigoso, se enquadrando na classe I da NBR 10004 (ABNT, 2004), sendo necessários cuidados na sua estocagem, manuseio e transporte. É produzido em quantidade expressiva no estado de Minas Gerais, sendo que, no ano de 2016, o pó de balão foi o quarto resíduo perigoso gerado em maior quantidade nas atividades industriais, com um total de 70.484,77 toneladas, o que corresponde a 3,18% do total de resíduos perigosos gerados (FEAM, 2017).

A reutilização ou reciclagem do pó de balão ainda é pouco estudada. Sua aplicação ocorre mais comumente como matéria prima na indústria cerâmica, sendo adicionado à argila para a produção de tijolos e telhas. Seu uso melhora algumas propriedades dos produtos cerâmicos, como a coloração, além de possibilitar a redução do uso de combustíveis para queima (SILVA SANTOS et al, 2015).

Na empresa AVG Siderurgia, o pó de balão é classificado como um resíduo Classe IIA, sendo não perigoso e não inerte pois o alto-forno da siderúrgica é movido exclusivamente a carvão vegetal. Lá são produzidas cerca de 1200 toneladas desse resíduo por mês, sendo que o mesmo é vendido em sua totalidade para indústrias cerâmicas. O preço médio de venda desse resíduo é de três reais por tonelada. A figura 4 mostra a coleta e o armazenamento do pó de balão no sistema de tratamento de gases do alto-forno e a figura 5 mostra o estoque do rejeito no pátio da siderúrgica AVG.

Figura 4: Coleta e armazenamento do pó de balão no sistema de tratamento de gases do alto-forno.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 5: Estoque de pó de balão da AVG Siderurgia.



Fonte: Do autor, 2018.

### 3.1.2.2. Escória

A escória é um resíduo sólido produzido em grandes quantidades nas siderúrgicas, possuindo em sua constituição, uma grande quantidade de metais, como alumínio, antimônio, cádmio, cromo, estanho, manganês, molibdênio, selênio, tálium e vanádio. Estima-se que sejam produzidas cerca de 4,2 milhões de toneladas de escória no Brasil por ano demonstrando a importância de estabelecer formas de reciclagem para esse produto (MILANEZ; PORTO, 2014). Em Minas Gerais, a escória é o quinto resíduo produzido em maior quantidade nas atividades industriais, tendo sido produzidas 3.853.231,19 toneladas do resíduo no ano de 2016, conforme pode ser visto na tabela 3 (FEAM, 2017). Além disso, a escória é o resíduo produzido em maior quantidade pela atividade siderúrgica, representando 38,83% do total de resíduos produzidos na atividade conforme pode ser visto na tabela 1.

Tabela 3: Resíduos mais gerados nas atividades industriais em Minas Gerais.

Item	Resíduos mais gerados	Quantidade dos 10 mais gerados (t)	% em relação ao total de resíduos
1	Vinhaça	10.047.600,78	20,39
2	Bagaço de cana	9.600.565,51	19,48
3	Sucata de metais ferrosos	7.074.749,17	14,36
4	Fosfogesso	3.879.983,00	7,87
5	Escória de alto forno	3.853.231,19	7,82
6	Rejeito da concentração mineral	3.453.660,00	7,01
7	Escória de aciaria	1.944.886,21	3,95
8	Resíduos sólidos composto de metais não tóxicos	767.203,87	1,56
9	Torta de filtro	758.251,51	1,54
10	Cinzas de caldeira	602.410,67	1,22
<b>Total</b>		<b>41.982.541,91</b>	<b>83,97</b>

Fonte: FEAM, 2017.

É importante ressaltar que o uso desse material pode ser limitado por conter cal na forma livre, o que pode gerar expansões em contato com a umidade, sendo necessário um processo de cura de 3 meses a um ano (GEYER, 2001).

A escória é resultado da fusão da ganga, que é o material inerte do minério de ferro, dos fundentes e das cinzas do coque ou do carvão. Dessa reação, são formados silicatos ( $\text{CaO.SiO}_2$ ;  $\text{FeO.SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$ ) ou aluminatos ( $\text{MgO.Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$ ) que compõem esse material. Esse resíduo é classificado normalmente como um resíduo Classe IIB, ou seja, não perigoso e inerte de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

A formação da escória quase sempre necessita da adição de fundentes contendo óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), já que nas operações de redução, muitas impurezas possuem ponto de fusão superior à temperatura de operação da adotada no alto-forno, tornando sua separação do metal um processo muito difícil. Os fundentes combinam-se quimicamente com as impurezas formando um composto com o ponto de fusão mais baixo. Os óxidos de silício, de alumínio e de cálcio fundem a temperaturas de  $1710^\circ\text{C}$ ,  $2760^\circ\text{C}$  e  $2050^\circ\text{C}$  respectivamente, já combinação desses para a formação de silicatos ou aluminatos, resulta em compostos com ponto de fusão da ordem de  $1200^\circ\text{C}$  a  $1400^\circ\text{C}$  com a adição de fundentes. A cerca de  $800^\circ\text{C}$ , o calcário que pode ser utilizado como fundente, começa a se decompor e reage com parte da ganga e dos óxidos de ferro e manganês não reduzidos, iniciando a formação da escória (SILVA J, 2011).

A escória desempenha importantes funções no processo, separando a maior parte das impurezas, controlando a composição química do produto durante a produção, proporcionando reações químicas na interface entre metal e escória, protegendo o metal de temperaturas elevadas e conservando o calor, já que possui baixa condutibilidade térmica.

É importante que a escória produzida tenha boa fluidez, já que, quando viscosa, a mesma dificulta a operação do alto-forno em várias circunstâncias. Essa propriedade depende da temperatura em que a escória se encontra no momento e de sua composição química. Quando a quantidade de  $\text{CaO}$  somada a de  $\text{MgO}$  é aproximadamente igual à de  $\text{SiO}_2$  somada a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a escória é fluida quando no estado de fusão. Quando o teor de cal aumenta, a escória torna-se mais dessulfurante devido à basicidade, no entanto, também fica mais espessa. A escória é básica quando o teor de  $\text{CaO}$  somado ao de  $\text{MgO}$  é maior que o teor de  $\text{SiO}_2$  somado ao de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sendo formada nos fornos de coque, caso contrário, a mesma é ácida sendo formada nos fornos a carvão (GEYER, 2001). Na tabela 4 são apresentadas as faixas de composição das escórias ácida e básica.

Tabela 4: Faixa de composição para escórias ácidas e básicas.

Composto	Escória básica (%)	Escória ácida (%)
CaO	40 – 45	24 - 39
SiO <sub>2</sub>	30 – 35	38 - 55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11 – 18	8 - 19
MgO	2,5 - 9,0	1,5 - 9,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 – 2	0,4 - 2,5
CaO/SiO <sub>2</sub> média	1,31	0,68

Fonte: Adaptado de GEYER, 2001.

No alto-forno básico que utiliza coque como combustível, cujo teor de enxofre é elevado, exige-se uma maior quantidade de cal, necessitando de temperaturas mais elevadas para que a escória possa permanecer fluida, o que aumenta o consumo de coque. Já o alto-forno ácido, que utiliza carvão vegetal como combustível, cujo teor de enxofre é baixo, necessita de menor adição de cal, tornando a temperatura que mantém a escória fluida mais baixa e consumindo menos carvão. A figura 6 mostra a escória saindo do alto-forno e sendo resfriada.

Figura 6: Escória saindo do alto-forno na siderúrgica AVG.



Fonte: Do autor, 2018.

O alto-forno da AVG Siderurgia utiliza carvão vegetal como combustível redutor, produzindo uma escória ácida. Lá são produzidas cerca de 6500 toneladas desse resíduo por mês, sendo vendido em sua totalidade para cimenteiras. O preço de venda atual desse resíduo é de aproximadamente 15 reais por tonelada. A figura 7 mostra o estoque de escória da siderúrgica AVG.

Figura 7: Estoque de escória bruta na empresa AVG Siderurgia.



Fonte: Do autor, 2018.

### 3.1.2.3. *Finos de Minério*

O fino de minério é um pó fino ou ultrafino resultante dos processos de lavra, classificação, manuseio, transporte e peneiramento do minério de ferro, ou da etapa de sinterização. O resíduo pode retornar ao processo por meio dos processos de aglomeração, que conferem ao material as dimensões apropriadas para a carga do alto-forno, no entanto, seu aproveitamento total é tido como inviável, tendo em vista os grandes volumes gerados (SANTOS et al, 2015).

Na siderúrgica AVG, não ocorre o processo de aglomeração dos finos de minério para seu reaproveitamento, já que o processo não demonstrou ser economicamente viável para a empresa. Por isso, o resíduo é estocado visando alguma futura aplicação. Estima-se que tenham

sido acumuladas cerca de 300 mil toneladas de finos desde o ano de 2008 e que sejam produzidas 1000 toneladas do resíduo por mês. As figuras 8 e 9 mostram o estoque de finos de minério antigo acumulado e a figura 9 mostra o acúmulo atual do mesmo.

Figura 8: Finos de minério antigos estocados na siderúrgica AVG.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 9: Finos de minério novos estocados na siderúrgica AVG.



Fonte: Do autor, 2018.

#### 3.1.2.4. *Composição e Constituintes dos Resíduos Siderúrgicos*

Os resíduos de usinas siderúrgicas contam com uma grande variação na composição química e na faixa de distribuição de tamanho de grãos de seus elementos, mas ainda assim, é encontrado um teor médio de até 30% de óxidos de ferro não aproveitados. Considerando as condições de contorno das siderúrgicas, os principais componentes do resíduo são na escória de alto forno: goethita, hematita, argilominerais (caulinita), quartzo, calcário e calcita outros elementos também resíduos gerados em grandes escalas são: cinza volante e pó de balão. As partículas encontradas contam com uma amplitude entre 200 micrômetros e partículas menores de 10 milímetros, em faixas que variam entre chertes, areias, siltes e brita.

A fabricação de ferro gusa é realizada em unidades chamadas Altos-Fornos, nas quais os óxidos contidos nos minerais de ferro são reduzidos e se separam das impurezas que os acompanham com a formação da escória. Os 3 principais resíduos sólidos gerados na atividade são: a escória, o pó de balão e o fino de minério. Esses resíduos, juntamente com os argilominerais (silicatos hidratados), apresentam tamanho médio inferior a 120 $\mu$ m.

O fino de minério é formado por partículas com tamanhos variando entre 4 a 64  $\mu$ m, sendo menores do que areia fina e maiores do que argila. Este material apresenta baixa plasticidade e baixa resistência quando seco ao ar. A composição e constituição do fino é consideravelmente determinada pelo tipo de carga e operação do alto-forno. Os finos de minérios e as argilas se mostram viáveis para substituir os agregados miúdos, convencionalmente compostos por areia.

O resíduo siderúrgico conhecido como pó do balão é coletado do alto-forno pelo sistema de tratamento de gases, sendo constituído do pó do sistema de limpeza à seco dos gases do alto-forno, também pode ser denominado de “Charcok” quando o combustível utilizado na indústria não for composto por carvão vegetal, ou “Charcoal” quando utiliza o carvão vegetal. Existem outros resíduos à base de coque que tem nomes similares com e.g. Fercoque e Alucoque. Estes resíduos correspondem a cerca de 13% dos resíduos sólidos gerados nas indústrias siderúrgicas independentes. Além disso, sabe-se que a destinação de cerca de 74% desse resíduo sólido ocorre a céu aberto nos pátios das empresas, possibilitando a contaminação do solo e dos corpos d’água e do ar. Observa-se que ainda faltam de políticas e diretrizes para o gerenciamento de resíduos sólidos industriais, os quais constituem um dos problemas ambientais mais graves, com ênfase ao setor siderúrgico. Os produtores independentes no estado de Minas Gerais, geram de 28 a 45 kg de pó de balão a cada tonelada de ferro-gusa produzido. Além disso, a região de Sete Lagoas é uma das principais do estado de Minas Gerais. A composição do

material particulado varia com o processo produtivo e com as matérias-primas utilizadas, podendo ser observada na Tabela 5.

Tabela 5: Composição Química aproximada do Resíduo “Charco”.

<b>Elementos</b>	<b>Percentagem (%)</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57
SiO <sub>2</sub>	12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05
CaO	3.0
MgO	0.1
Carvão vegetal	20

Fonte: ArcelorMittal

As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, fundentes (calcário e dolomita) e cinzas do coque ou carvão. A escória fundida é uma massa que sobrenada no ferro gusa por sua insolubilidade e menor densidade, sendo conduzida por canais até o local onde ocorrerá o resfriamento. As Escórias de Alto-Forno podem ser resfriadas de 2 formas:

- Esfriada ao ar ou Cristalizada

As escórias cristalizadas são formadas pelo vazamento da massa, em estado líquido, em pátios, onde são resfriadas de forma mais lenta ao ar. Assim, os seus componentes formam distintas fases cristalinas, e com isto não adquirem poder de aglomerante hidráulico, como é observado nas escórias granuladas. Essa escória recebe o nome de Escória Bruta de Alto-Forno, podendo ser britada ou utilizada como material inerte em diversas aplicações, podendo substituir materiais pétreos. Esse material pode ser observado na figura 10.

Figura 10: Escória bruta de alto-forno.



Fonte: Minas Logística.

- Resfriada com Água ou Granulada

Ao sair do alto-forno, a escória líquida extravasada sobre um leito de água ou é transportada para os granuladores onde recebe jatos de água sob alta pressão, sendo resfriada bruscamente. Assim, não há tempo suficiente para formação de cristais, formando uma estrutura vítrea. Esse resíduo é chamado de Escória Granulada de Alto Forno. A Escória Granulada de Alto-Forno possui grande potencial hidráulico, existindo um mercado amplo para esses resíduos, principalmente para indústrias cimenteiras e concreteiras, onde a Escória Granulada de Alto-Forno pode ser moída e utilizada na fabricação do cimento e concreto. Esse material pode ser observado na figura 11.

Figura 11: Escória granulada de alto-forno.



Fonte: ArcelorMittal

A composição química das Escórias de Alto-Forno produzidas varia pouco. Os elementos mais comumente encontrados são os óxidos de: cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e magnésio (Mg). Também existem minoritariamente FeO, MnO, TiO<sub>2</sub>, enxofre, dentre outros. Essa composição depende das matérias primas e do tipo de ferro gusa a ser fabricado, sendo de extrema importância, determinando as características físico-químicas das Escórias de Alto-Forno. A tabela 6 traz a composição típica da escória de alto-forno.

Tabela 6: Composição química Escória de Alto-Forno.

<b>Elementos</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
FeO	0,45
SiO <sub>2</sub>	33,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,42
CaO	41,60
MgO	7,95
TiO	0,73

Fonte: ArcelorMittal

Dependendo das características das Escórias de Alto-Forno, resultantes do tipo de resfriamento e composição química, registram-se várias aplicações para as mesmas.

### 3.1.2.5. *Expansibilidade dos Resíduos de Siderurgia*

O óxido de ferro é o principal responsável pelas características expansivas dos resíduos das siderurgias devido a sua hidratação, causando a expansão tanto nos blocos, quanto nas aplicações como material em preparos de pavimentos. Quanto aos demais resíduos, sua composição química ou tamanho de partículas se encontra tipicamente na faixa de partículas de areias finas, siltes ou argilas, e não comprometem significativamente os resultados de expansibilidade nas duas aplicações propostas. Contudo, a porcentagem dos elementos e compostos presentes na composição química dos resíduos do alto-forno varia em virtude das matérias-primas e parâmetros de operação do alto-forno o local da barragem onde se fez a coleta e do processo de beneficiamento de minérios a que o rejeito foi submetido.

A Tabela 7 apresenta as variações que poderão ocorrer nos resíduos antes e após a hidratação dos seus principais elementos e compostos constituintes.

Tabela 7: Características dos elementos e compostos químicos dos resíduos das barragens antes e após a hidratação.

<b>Fórmula</b>	<b>Nome</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Molar (g/mol)</b>	<b>Volume Molar (cm<sup>3</sup>/mol)</b>	<b>Varição de volume (%)</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,70
Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Ferro	3,40	89,86	26,43	271,17
FeO(OH)	Goetita	4,28	88,85	20,76	192,00

Fonte: adaptado de SILVA J, 2011.

Um aumento considerável de volume do uso dos elementos solo-cimento em relação às dimensões originais por meio de hidratação ( $\text{FeO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) acarretaria uma expansão destrutiva nas estruturas do bloco intertravado. A expansibilidade dos resíduos representa um complicador experimental para sua aplicação em razão da variação volumétrica dos elementos e compostos constituintes. Acredita-se que a semelhança do que acontece para as escórias de aciaria é possível que existam valores limite que usado destes resíduos como parâmetro de processamento, buscando um máximo de instabilidade dimensional para determinados teores (COLLINS, 1998 e COLLINS, 1999).

A estabilização destes resíduos está diretamente associada à formação de produtos estáveis durante sua hidratação e reações com a pasta cimento e agregados graúdos e miúdos durante a cura dos blocos (SIMIELI, 2007). Ademais, os compostos formados são volumetricamente estáveis, em razão do tempo de estocagem, do grau de exposição do material à umidade, da temperatura ou taxa de resfriamento. Deste modo, para minimizar a expansibilidade dos resíduos é importante que o material esteja sujeito às condições que permitam, no decorrer do tempo, a hidratação ou envelhecimento microestrutural devido à ação das intempéries (SONG, 1998).

### **3.2. Resíduos Sólidos**

A Lei 12.305 (2010) que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, coloca que resíduo sólido é um material, substância, objeto ou bem descartado, no estado sólido ou semissólido, resultante de atividades humanas. Já rejeitos são resíduos sólidos que não apresentam possibilidade de tratamento ou recuperação por meio de técnicas disponíveis ou economicamente viáveis, que não a disposição final ambientalmente adequada.

De acordo com a norma ABNT NBR 10004 (2004), são considerados resíduos sólidos, aqueles provenientes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição, sendo eles em estado sólido ou semissólido. A norma classifica esses resíduos de acordo com sua periculosidade.

- Classe I: são aqueles resíduos que são considerados perigosos por suas características físicas, químicas ou infecto-contagiosas. Também podem ser considerados perigosos, resíduos dotados de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.
- Classe II-A: São resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes, podendo ser dotados de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

- Classe II-B: São aqueles resíduos que quando submetidos a testes de solubilização, não tiverem nenhuma das substâncias que os constituem solubilizadas em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto cor, turbidez e sabor.

### 3.3. Pavimentação

Pavimentos são estruturas de múltiplas camadas de espessuras finitas sobre uma superfície devidamente preparada, sendo destinada a resistir aos esforços mecânicos e ao desgaste ocasionado pelo intemperismo, proporcionando aos usuários melhores condições de deslocamento (SILVA M, 2011).

A NBR 7207 (ABNT, 1982), define que as principais funções de um pavimento são resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e à segurança, além de resistir aos esforços horizontais tornando, conferindo maior vida útil à superfície.

Para isso, os pavimentos são formados pelas seguintes camadas que devem ser dotadas de suas respectivas funções, de acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017):

- Revestimento: Resistir às ações do tráfego, sendo impermeável e confortável, sendo a única camada visível;
- Base: Aliviar as tensões no revestimento, distribuindo-as para as camadas inferiores;
- Sub-base: Em caso de necessidade complementa à base;
- Reforço do subleito: Encontra-se sobre o subleito devidamente possibilitando a redução da espessura de outras camadas;
- Camada de regularização: Aplicada em caso de necessidade de corrigir falhas da camada anterior;
- Leito: É o limite entre o terreno de fundação e o pavimento;
- Subleito: Terreno da fundação do pavimento.

#### 3.3.1. Rodovias Brasileiras

De acordo com o Boletim Estatístico da confederação nacional do transporte (CNT, 2018), o Brasil possui uma malha rodoviária de cerca de 1,7 milhões de quilômetros, dos quais apenas 213 mil quilômetros são pavimentados, o que corresponde a cerca de 12% do total. O

transporte rodoviário constitui o principal meio de transporte de cargas e passageiros no país, representando 61,1% do transporte de cargas, além de ter participado do transporte de média e longa distâncias de cerca de 92 milhões de pessoas (CNT, 2018).

Tendo em vista a expressividade desse modal na matriz de transportes brasileira, é notável a importância da qualidade da pavimentação das vias, que deve permitir deslocamento suave, ter estrutura forte, resistir ao fluxo de veículos e permitir o escoamento da água na sua superfície. No entanto, observa-se que os pavimentos utilizados convencionalmente no país apresentam problemas.

O principal pavimento utilizado no país atualmente é o asfáltico, que demanda constante manutenção preventiva, apresentado vida útil consideravelmente baixa, raramente atingindo a durabilidade prevista em projeto. Estima-se que em alguns casos os defeitos comecem a aparecer no revestimento, cerca de sete meses depois de sua confecção. Os principais defeitos observados são fissuras, trincas (transversais, longitudinais e em malha), corrugação, exsudação, desagregação, remendos, afundamentos, ondulações e buracos (CNT, 2017).

De acordo com a Pesquisa de Rodovias realizada pela CNT no ano de 2017, foram identificados 52.911 km de rodovias, aproximadamente metade do total avaliado no Brasil, com problemas no pavimento, conforme detalhado na Tabela 5.

Tabela 8: Estado geral da pavimentação de rodovias no país.

<b>Estado Geral</b>	<b>Extensão total</b>	
	<b>Km</b>	<b>%</b>
Ótimo	9.442	8,9
Bom	31.040	29,3
Regular	35.590	33,6
Ruim	21.217	20,1
Péssimo	8.525	8,1
<b>Total</b>	<b>105.814</b>	<b>100</b>

Fonte: CNT, 2017

No estado de Minas Gerais, 88,3% da malha rodoviária analisada apresentou algum tipo de avaria na pavimentação. As condições do pavimento e suas respectivas quantidades estão listadas na Tabela 6.

Tabela 9: Condição da superfície do pavimento nas rodovias de Minas Gerais.

<b>Condição da superfície do pavimento</b>	<b>Km</b>	<b>%</b>
Perfeito	1.770	11,7
Desgastado	7.458	49,5
Trinca em malha/remendos	5.410	35,9
Afundamentos/ondulações/buracos	341	2,3
Destruído	97	0,6
<b>Total</b>	<b>15.076</b>	<b>100</b>

Fonte: CNT, 2017.

A qualidade da pavimentação das vias também implica no consumo de combustível, no tempo de viagem e no gasto com manutenção. Além disso, a escolha de uma rota em melhores condições pode resultar em uma redução das emissões de gás carbônico entre 0,1 gCO<sub>2</sub>/t.km e 1,8 gCO<sub>2</sub>/t.km, ou seja, 0,01% a 0,2%. Observou-se uma economia média de 18,7% no gasto com manutenção dos caminhões, além de em uma redução média no consumo de combustível de 5,06%, correspondendo a uma queda de aproximadamente 1,10 bilhões de litros consumidos para o ano de 2004, resultando em uma economia de cerca de R\$ 1,6 bilhões (BARTHOLOMEU, 2006).

### 3.3.2. Blocos Intertravados

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), o pavimento intertravado é flexível, composto por uma camada de base e uma camada de revestimento, sendo a superfície responsável pela resistência ao desgaste e cumprindo uma função estrutural. O revestimento é formado por peças de concreto que se encaixam sobre uma camada de assentamento e as juntas são preenchidas com material específico. O encaixe simultâneo dos blocos proporciona o intertravamento dos mesmos.

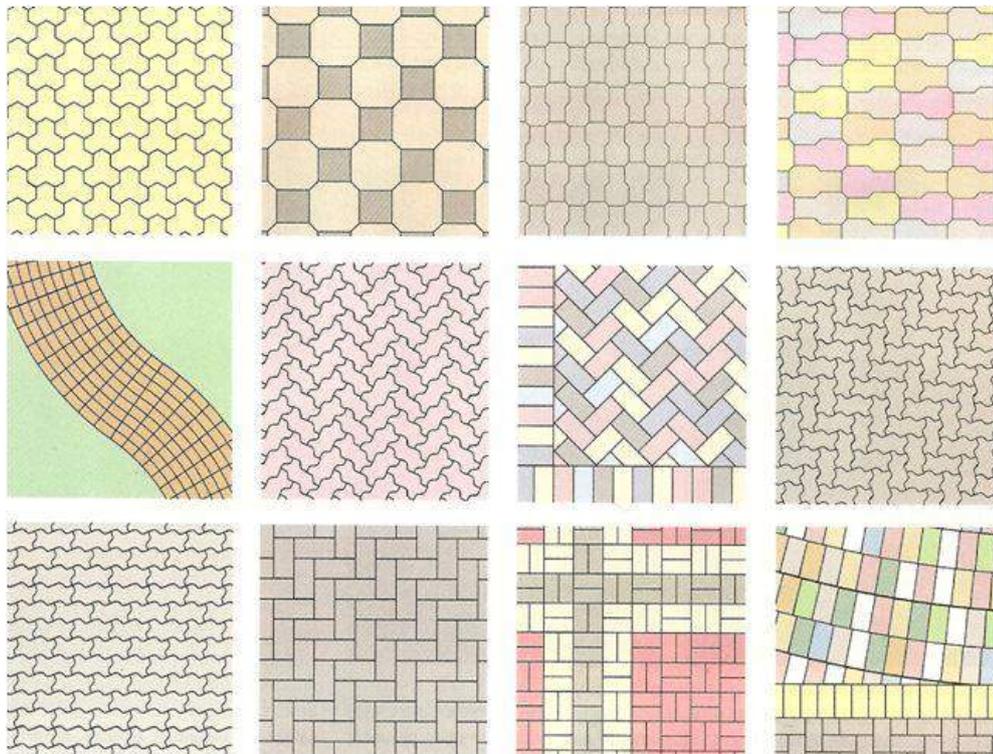
As peças devem ser produzidas utilizando concreto constituído por cimento Portland de qualquer tipo ou classe, desde que atenda às normas, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos. Os agregados podem ser naturais, industriais ou reciclados (ABNT, 2013).

### 3.3.2.1. Formatos, disposições e dimensões

As peças de concreto podem ser de diversos formatos, tendo um comprimento de no máximo 250 mm, largura de no mínimo 97mm e espessura de no mínimo 60mm. As mesmas devem obedecer a algum dos cinco tipos de formato listados pela norma. Alguns formatos e disposições possíveis são mostrados na figura 10 (ABNT, 2013).

- Peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, podem ser arranjadas entre si em fileiras ou em espinha de peixe;
- Peças de concreto com formato único, só podendo ser assentadas em fileiras;
- Peças de concreto com formatos geométricos (trapézios, hexágonos, triédros, dentre outros), devendo ter peso superior a 4 kg;
- Conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, podendo ser assentadas com diferentes padrões.

Figura 12: Alguns formatos e disposições possíveis para blocos de concreto.



Fonte: Infraestrutura urbana.

### 3.3.2.2. *Características físicas*

Quando para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais, os blocos devem ser capazes de resistir a uma compressão de 35 MPa. Já quando para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados, os mesmos devem ser capazes de resistir a uma compressão de 50 MPa, ambos aos 28 dias de cura, segundo a norma brasileira. Além disso, as peças de concreto devem apresentar absorção de água média menor ou igual a 6 % (ABNT, 2013).

### 3.3.2.3. *Histórico, demandas e produção dos pavimentos com blocos de concreto intertravados*

Os pavimentos intertravados são aqueles que possuem uma camada de revestimento constituída por elementos pré-moldados de concreto (EPC). Consiste em uma técnica que resulta de uma evolução de procedimentos dos quais existem relatos há cerca de 25 séculos. Á época, consistia na colocação de pedras justapostas em seu estado natural (Figura 13 – calçada do período Romano em Coimbra/Portugal). As primeiras peças pré-moldadas de concreto foram fabricadas no final do século XIX (MÜLLER, 2005).

Figura 13: calçada romana em Coimbra, Portugal.



Fonte: Müller, 2005.

Os blocos intertravados de concreto na concepção que se conhece hoje em dia, também chamados de elementos pré-moldados de concreto (EPC), foram desenvolvidos na Holanda

como um substituto eficiente para blocos de tijolo de barro. A produção mundial em 1980 já ultrapassava 45 milhões de metros quadrados, sendo cerca de dois terços desse total aplicado em vias de tráfego urbano. No final da década de 1990, a produção chegou à impressionante marca de produção de 100m<sup>2</sup> por segundo (SMITH, 2003). Ou seja, uma taxa de crescimento médio na produção em torno de 33% ao ano. As demandas mundiais continuam crescentes, tendo os fabricantes, dificuldades de atender aos mercados locais, tendo em vista a dificuldade de transporte e armazenamento dessas peças, já que custos de logística são altíssimos.

Desde a década de 1990 até meados da década passada, tem-se observado que a indústria de pavimentos intertravados de concreto vem crescendo consideravelmente, superando os padrões estabelecidos para a construção civil, vinculado principalmente à disponibilidade de equipamentos de grande produtividade e portáteis. Esse material era utilizado apenas com o objetivo de proporcionar melhores efeitos arquitetônicos e paisagísticos, tendo começado a ser adotado também por ser um material versátil e de baixo custo. Assim, existe a possibilidade de uso em diversos âmbitos, como o rodoviário e o industrial, conferindo inúmeras vantagens comparativas ao produto (SMITH, 2003).

Estima-se que nos EUA, a quantidade em metros quadrados de pavimentos em que se aplica esta técnica, dobra a cada 5 anos. Em 2005 foram utilizados mais de sessenta milhões de metros quadrados. Ainda assim, o crescimento em termos percentuais é muito maior nos países do BRICS e Europa. No caso do BRICS, essas taxas observadas podem ser relacionadas à elevação do poder de compra e aos expressivos índices de crescimento da economia com reflexo na melhoria da infraestrutura.

Os principais empecilhos que são observados atualmente, para maior disseminação desta tecnologia de pavimentação com o uso de blocos intertravados, são a logística de matéria-prima e produtos acabados visto que ambos são pesados e volumosos, o que dificulta e muitas vezes inviabiliza o uso, além de fornecedores de areia que, localmente, tem tornado inviáveis novos processos de expansão das plantas de fabricação dos blocos, apesar da demanda muitíssimo aquecida, associado ao preço dos agregados (SILVA M, 2011). A rápida elevação dos custos e a indisponibilidade dos insumos vêm preocupando profissionais do setor. Uma forma de contornar o problema exposto seria utilizar resíduos siderúrgicos, que são gerados em grandes volumes, para substituição parcial ou total dos agregados graúdo e miúdo convencionais, os insumos mais críticos da cadeia de fornecedores.

Os blocos confeccionados com resíduos se apresentam como uma solução inovadora, trazendo a possibilidade de criar produtos dotados de diferentes cores, sem o uso de corantes. Além disso é possível mitigar os impactos gerados pela disposição final desses resíduos, mesmo

quando considerada ambientalmente adequada. Também existe a possibilidade de agregar características convenientes quanto à durabilidade e ao desempenho desses produtos em uso. A presença de fases cristalinas mais duras na composição dos resíduos siderúrgicos pode proporcionar aos blocos agregados de resíduos um aumento na resistência ao desgaste (ARISTIMUNHO, 2010; FREIRE, 2012).

#### 3.3.2.4. *Elementos de concreto para pavimentação (Pavers)*

Observa-se que os blocos intertravados são bastante utilizados em ciclovias, vias urbanas, pátios de manobras e estradas, por exemplo, tendo sido reconhecidos pela melhor uniformidade na sua aplicação, tendo em vista que os elementos aparados não necessitam de reaparelhamento antes do assentamento final obviamente, principalmente devido ao seu controle de produção e simetria, como acontecia com as pedras naturais (MÜLLER, 2005). A camada de revestimento composta pelo bloco intertravado apresenta uma superfície bastante resistente ao desgaste cumprindo assim uma função estrutural (SILVA M, 2011).

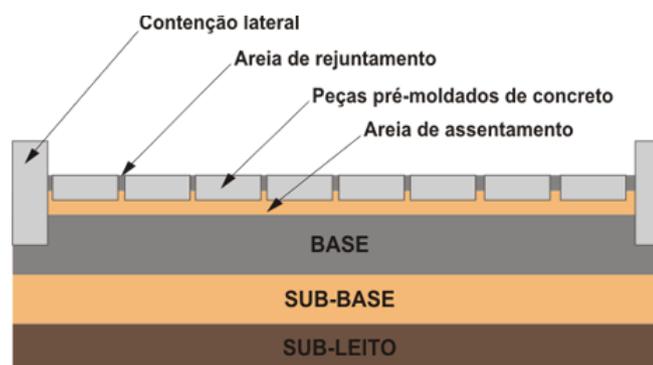
As normas brasileiras básicas para os blocos de concreto destinados à pavimentação são a NBR 9781 – “Peças de concreto para pavimentação: especificação” e a NBR 9780 – “Peças de concreto para pavimentação: determinação da resistência à compressão”. Ambas apresentam uma variação entre as dimensões fornecidas pelo fabricante e as reais das peças, não devendo os produtos comerciais ultrapassar os limites toleráveis:

- Variações dimensionais no comprimento/largura máximo  $\pm 3$  mm, na espessura máximo  $\pm 5$  mm;
- Os cantos vivos (bordas, quinas e chanfros) não devem apresentar defeitos, escamações ou perdas de material, e nem tão pouco rebarbas acentuadas;
- As peças não devem apresentar trincas ou fraturas em excesso, bem como outros defeitos (segregações ou heterogeneidade) que possam interferir em seu assentamento e funcionamento.

Estas normas estabelecem a condição de rolamento que conferem conforto ao usuário e a durabilidade do pavimento, o que contribui decisivamente para a função estrutural do pavimento por meio de suas características de intertravamento, além de suportar as tensões cisalhantes superficiais de contato das rodas dos veículos. A capacidade de distribuição dos esforços da camada de revestimento depende essencialmente de sua espessura, formato e arranjo, ressaltando que a resistência à compressão individual dos elementos possui pouca influência neste aspecto.

A camada de rolamento é formada pelos blocos arranjados, assentados sobre uma camada delgada de areia, compondo um revestimento de grande durabilidade e resistência. A conformação pode ser observada na figura 14.

Figura 14: Estrutura típica de um pavimento intertravado.



Fonte: Muller, 2005.

O projeto de pavimento intertravado deve ser adequado às suas condições de tráfego, embora seja conhecido como drenante. Ressalta-se que não se deve deixar de lado os cuidados com a drenagem pela adoção do sistema de pavimento intertravado, sendo necessário conferir o local para determinar direções da água, pontos de drenagem e avaliar as condições de cheias. Assim, evita-se o acúmulo da água, que poderia promover a erosão do subleito e da sub-base, mantendo a estabilidade e a uniformidade do pavimento.

A camada de base é responsável por receber as tensões distribuídas pela camada de revestimento, resistindo e também distribuindo os esforços ao subleito. Isso evita o surgimento de deformações permanentes e a consequente deterioração do pavimento. Estudos realizados demonstram que a camada de base deve ser uma camada pouco permeável, ou impermeável, para evitar a penetração da água e a prematura deterioração do subleito. O dimensionamento poderá requerer, ainda, uma camada de sub-base, suplementar à base, executada diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço de subleito dependendo da magnitude das cargas geradas pelo tráfego e das características mecânicas e dos módulos de elasticidade da base e do leito. Então, pode-se dizer que as camadas constituintes da estrutura de um pavimento intertravado possuem a função de distribuir a tensão normal vertical aplicada na superfície, de tal maneira que o subleito receba uma parcela muito inferior desta tensão, o que caracteriza um pavimento flexível. Alguns outros materiais começam a ser empregados no projeto e na execução de pavimentos intertravados, como os geotêxteis. Eles possuem a finalidade de proteger as camadas inferiores da infiltração de água, evitar o bombeamento de finos e conter

a fuga de materiais em áreas próximas às contenções laterais, tais como: meio-fios, drenos, caixas de serventia, etc.

As espessuras das camadas constituintes do pavimento intertravado, como nos pavimentos asfálticos, irão depender das seguintes características:

- Intensidade do tráfego que circulará sobre o pavimento;
- Características do terreno de fundação;
- Qualidade dos materiais constituintes das demais camadas.

### 3.3.2.5. *Utilização de pavimentos intertravados em grandes obras*

A industrialização dos blocos de concreto para a pavimentação, aliada a aquisição de equipamentos de grande produtividade e elevado grau de precisão dimensional e estrutural, demonstra grande crescimento nas últimas décadas.

São apresentadas a seguir informações de obras recentes, que podem ser observadas nas figuras 15 e 16, que mostram a utilização de pavimentos intertravados em rodovias, portos e aeroportos, além de vias urbanas que ligam pontos fora das cidades e possuem características próprias de tráfego comercial, tanto no volume quanto no tipo. O pavimento intertravado vem ocupando vários nichos da construção civil, estando presente em calçadas, ruas, caminhos, pisos industriais, portos, aeroportos e em rodovias.

Figura 15: Rodovia construída com pavimento intertravado na Colômbia.



Fonte: CIA. World FactBook, 2013.

Figura 16: Um pátio de manobras no Porto em Lisboa e aeroporto de Hong Kong na China construídos com pavimento intertravado.



Fonte: CIA. World Fact Book, 2013

### 3.4. Concreto

O concreto deve conter cimento, água e agregados, podendo ser adicionado de aditivos, como pigmentos, fibras, agregados especiais e minerais, por exemplo. Na mistura do concreto, o cimento juntamente com a água forma uma pasta, cuja fluidez depende da quantidade de água adicionada, envolvendo os demais agregados. Assim, é formada uma mistura que inicialmente pode ser moldada, endurecendo de forma irreversível com o tempo e adquirindo resistência mecânica (ISAIA, 2007).

As proporções adotadas entre água, cimento, agregados finos e agregados miúdos são capazes de conferir ao concreto diferentes propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade, além de características que possibilitem a trabalhabilidade do mesmo de acordo com o fim requerido. A relação água/cimento utilizada confere ao concreto um desempenho distinto quando endurecido. Quanto menor for essa relação, maior será a resistência mecânica do mesmo (ISAIA, 2007).

Após a mistura, a pasta passa a ser constituída por três fases que correspondem ao cimento anidro, água e ar, sendo que o cimento é hidratado progressivamente, ocasionando a formação de novas fases e a variação do volume de cada uma delas. Pastas que empregam uma quantidade de água superior a necessária para hidratar o cimento criam poros com água, que juntamente com os poros da contração e com o ar aprisionado na massa, contribuem para a redução da resistência do concreto. Então, desde que a hidratação seja alcançada, quanto menor for a relação água cimento, melhores serão as características mecânicas retornadas (ISAIA, 2007).

Para amenizar a dificuldade de se obter concretos plásticos tentando manter uma relação água/cimento baixa, utiliza-se aditivos plastificantes adicionados à água. Assim, possibilita-se a obtenção de pastas plásticas utilizando uma mesma relação água/cimento e obtendo um mesmo potencial de resistência (ISAIA, 2007).

Os agregados utilizados no concreto trazem um importante papel na estabilidade volumétrica e na tendência a criar fissuras do mesmo.

#### 3.4.1. Cimento

Cimento é um material composto por um pó fino que tem função ligante, sendo utilizado para unir os componentes de uma mistura. Quando em contato com a água, o mesmo tem a propriedade de endurecer e não se decompor mais na ocasião de um novo contato.

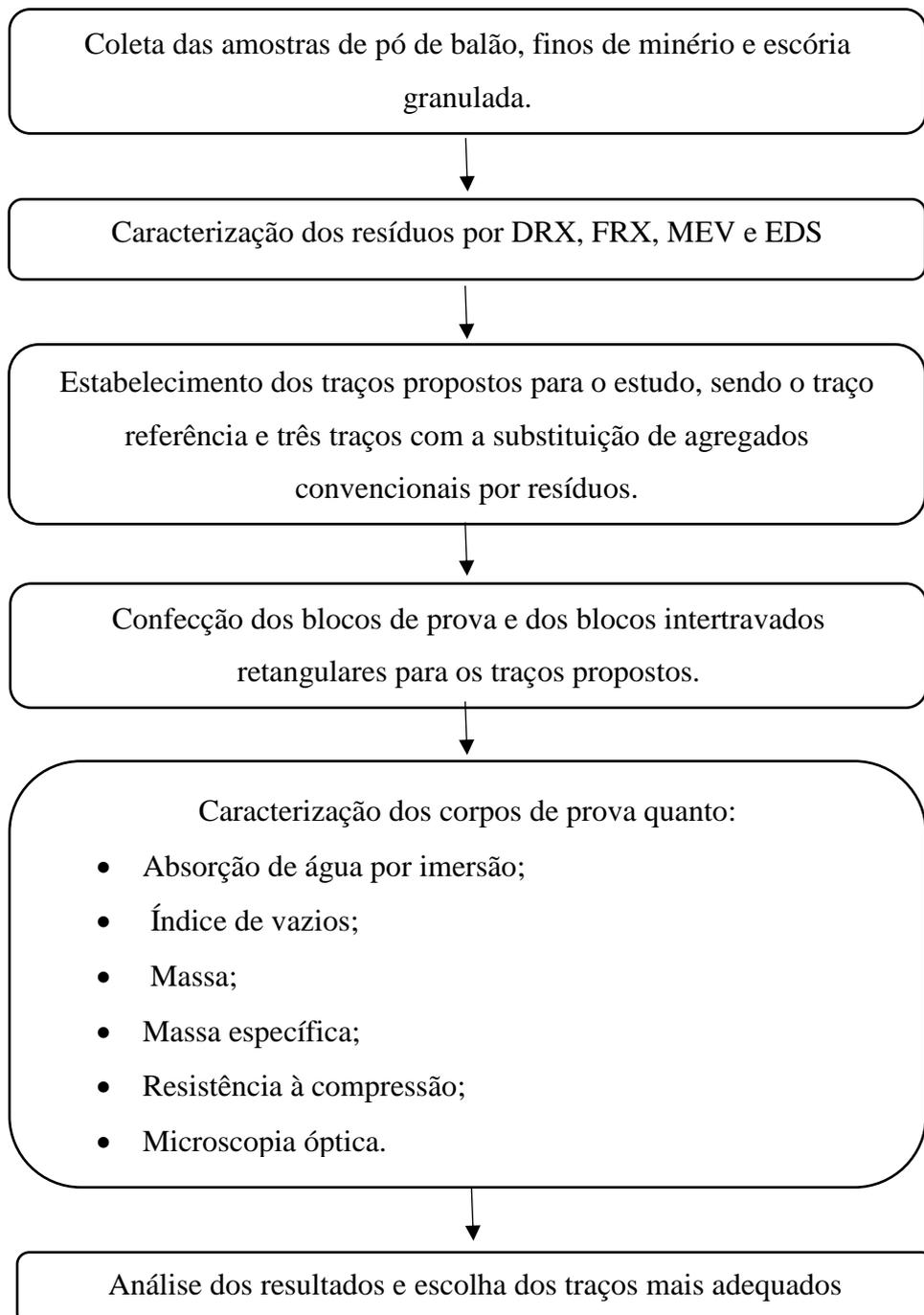
No Brasil existem cinco tipos básicos de cimento e três tipos especiais. A composição dos mesmos pode influenciar suas características de resistência, trabalhabilidade, durabilidade e impermeabilidade. Convencionalmente são constituídos por uma mistura de calcário, argila e químicos, podendo ser adicionado de gesso, escória e argila pozolânica, por exemplo, com o objetivo de conferir características desejadas ao material.

O Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) possui a propriedade de atingir altas resistências nos primeiros dias de cura devido a sua alta reatividade inicial. Essa propriedade é obtida utilizando uma dosagem diferente de calcário e argila na obtenção do clínquer, além de uma moagem mais fina.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

No trabalho em questão, será estudada a viabilidade do uso de rejeitos provenientes de processos siderúrgicos na fabricação blocos intertravados. O material utilizado foi fornecido pelo Grupo AVG, mais especificamente pela unidade siderúrgica localizada às margens da BR 040, em Sete Lagoas, Minas Gerais, coordenadas geográficas 19°28'01,15''S 44°17'46,86''O.

Figura 17: Fluxograma representativo da metodologia proposta.



Fonte: Do autor, 2018.

#### **4.1. Método de Abordagem**

A abordagem do estudo em questão é de caráter quantitativo, com avaliações feitas experimentalmente.

#### **4.2. Materiais**

Para o trabalho em questão, foram utilizadas areia fina lavada, brita 0, cimento Portland CP V -ARI, água e aditivo plastificante para concreto como constituintes tradicionais de blocos intertravados. Também foram utilizados os resíduos pó de balão, escória e finos de minério, provenientes de processos siderúrgicos e fornecidos pela AVG Siderurgia, como substitutivos dos agregados convencionais.

#### **4.3. Infraestrutura Necessária**

Os ensaios de Difração de Raio X (DRX), Fluorescência de Raio X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram utilizados para caracterização das matérias primas, sendo realizados no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais. A confecção dos corpos de prova e ensaios de resistência a compressão, e microscopia óptica foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes. Ambos os laboratórios citados são pertencentes ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), instalados no Campus I da Instituição.

#### **4.4. Método de Procedimentos**

Inicialmente foram coletadas amostras dos três rejeitos siderúrgicos de interesse (escoria, finos de minério, e pó de balão) nas instalações da empresa AVG Siderurgia. Buscando-se colher porções dos materiais que sejam representativas com relação às características do universo (densidade, teor, distribuição granulométrica, constituintes amostrais), a amostragem foi feita conforme a NBR 10007, para amostragem de resíduos sólidos.

Os materiais foram caracterizados de acordo com a sua composição utilizando as respectivas técnicas de Difração de Raio X (DRX), Fluorescência de Raio X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Essa análise será feita com o objetivo de compreender as propriedades de cada material. As Figuras 18, 19, 20 e 21 mostram as amostras dos três resíduos utilizados que foram submetidas às análises mencionadas. Assim, as figuras 18-A e 19 mostram amostras de pó de balão, as figuras 18-B e 20 mostram amostras de finos de minério e as figuras 18-C e 21 amostras de escória granulada.

Figura 18: Amostras de pó de balão, finos de minério e escória bruta, respectivamente.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 19: Amostra de Pó de balão



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 20: Amostra de finos de minério.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 21: Amostra de escória.



Fonte: Do autor, 2018.

A amostra de escória foi utilizada como substituta da brita 0, agregado convencionalmente utilizado na fabricação de blocos intertravados. Para isso, a mesma passou por um processo de seleção manual com o objetivo de remover as frações de granulometria desproporcional.

Foram estabelecidos três traços, substituindo as frações de areia e brita pelos resíduos em diferentes proporções, sendo que a areia será substituída parcialmente ou totalmente por pó de balão e finos de minério e a brita será substituída totalmente pela escória. A fração correspondente ao cimento foi mantida conforme usual. Foram confeccionados corpos de prova e blocos intertravados para cada um dos traços estabelecidos, além de corpos de prova e blocos intertravados controle, feitos dentro das proporções e matérias primas usuais. O cimento escolhido para compor os blocos e corpos de prova é o CP-V ARI Portland (Cimento Nacional) que confere alta resistência inicial. As proporções dos constituintes de cada traço, bem como o número de corpos de prova e blocos intertravados confeccionados para cada um deles podem ser observados na tabela 10.

Tabela 10: Proporções ou traços utilizados na confecção dos corpos de prova e blocos.

Matéria-prima	Blocos de Referência	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Cimento (CPV - ARI)	15,0 kg	15,0 kg	15,0 kg	15,0 kg
Água	8 L	8 L	8 L	8 L
Aditivo	0,28 L	0,28 L	0,28 L	0,28 L
Brita 00	15,5kg	-	-	-
Escória	-	15,5kg	15,5kg	15,5kg
Areia	27,0 kg	13,5 kg	13,5 kg	-
Pó de Balão	-	13,5 kg	-	13,5 kg
Finos de minério	-	-	13,5 kg	13,5 kg
Quantidade de corpos de prova	13	13	13	13
Quantidade de blocos intertravados	4	4	4	4

Fonte: Do autor, 2018.

Para cada traço estabelecido foram feitos 13 corpos de prova 4 blocos intertravados retangulares. Dos 13 corpos de prova obtidos para cada traço, um será destinado a análises físico-químicas, nove aos ensaios de resistência a compressão e três para os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

Alguns corpos de prova feitos para cada traço são mostrados na figura 22, em que é possível perceber as diferenças de coloração de acordo com a composição dos mesmos.

Figura 22: Corpos de prova respectivamente referentes aos traços de referência, 1, 2 e 3.



Fonte: Do autor, 2018.

Para a produção dos corpos de prova e blocos, as matérias primas serão misturadas nas proporções estabelecidas para cada traço na seguinte ordem: água adicionada do agente plastificante, agregado grosso (brita ou escória), cimento e agregados finos (areia, pó de balão e finos de minério). Os corpos de prova serão moldados em formas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, desmoldados após 24 horas e mantidos submersos em recipientes com água saturada de hidróxido de cálcio conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova serão mantidos submersos para cura durante os tempos de 7, 21 e 28 dias.

Adotou-se a utilização do aditivo plastificante com o objetivo de reduzir o ângulo de contato da água com os agregados, diminuindo a quantidade de água necessária para o amassamento da mistura, o que facilita a desmoldagem dos corpos de prova e blocos. O uso do aditivo torna a mistura obtida mais homogênea, reduzindo a relação água/cimento, trazendo uma maior coesão entre as partículas e proporcionando uma maior impermeabilidade, o que também leva a produção de blocos e corpos de prova com um melhor acabamento e com maior resistência mecânica.

#### 4.4.1. Caracterização das matérias primas

Foi realizada uma caracterização das matérias primas com o objetivo de determinar propriedades físico-químicas e estruturais das mesmas.

##### 4.4.1.1. *Fluorescência de raio-x (FRX)*

As amostras de pó de balão, finos de minério e escória foram submetidas ao ensaio de fluorescência de raio-x, realizada no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. A ensaio tem por objetivo realizar uma análise química dos materiais em forma elementar e em forma de óxidos.

##### 4.4.1.2. *Difratometria de raio-x (DRX)*

As amostras foram submetidas a análise por difratometria de raio-x, com o objetivo de determinar as fases mineralógicas predominantes nos materiais. O ensaio foi realizado utilizando o difratômetro Shimadzu XRD 7000 do Laboratório de Caracterização, que foi operado com tubo de cobre, tensão de 30kV e corrente de 30mA. Os resultados obtidos foram comparados com a base de dados ICDD (International Center for Diffraction Data) para a identificação das fases cristalográficas predominantes nos materiais. (FILHO, 2013)

##### 4.4.1.3. *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)*

As amostras foram analisadas quanto a sua morfologia (forma e tamanho) e composição química utilizando microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersiva utilizando o equipamento Shimadzu Superscan SSX – 550 do Laboratório de Caracterização. As amostras foram recobertas com ouro antes do ensaio.

#### 4.4.2. Caracterização dos corpos de prova

##### 4.4.2.1. *Absorção de água por imersão*

É definida como o ganho percentual de massa quando a amostra absorve o máximo de água, mergulhando-a durante 24 horas.

$$A * A\% = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100$$

Onde:

$M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova saturado.

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco em estufa.

#### 4.4.2.2. Índice de vazios

É o percentual volumétrico de espaços vazios na amostra, sendo a razão entre os volumes de poros permeáveis e o volume total.

$$Iv = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100$$

Onde:

$M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova saturado.

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco em estufa.

$M_i$  = massa do corpo-de-prova imerso em água

#### 4.4.2.3. Determinação da massa específica

- Massa específica aparente

Volume ocupado por um sólido incluindo a sua porosidade

$$Mes = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i}$$

- Massa específica saturada

$$Mesat = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i}$$

#### 4.4.2.4. Resistência à compressão

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, sendo o mesmo especificado pela norma ABNT NBR 5739/94 que descreve o procedimento a ser utilizado no ensaio para corpos de prova cilíndricos.

Foram utilizados nove corpos de prova para cada traço nos ensaios. Cada corpo de prova foi posicionado no equipamento e o carregamento foi iniciado e mantido até a ruptura do corpo de prova. A máquina utilizada no ensaio foi a prensa Emic, modelo DL30000N, localizada no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais do CEFET-MG. A resistência à compressão foi dada em MegaPascal (MPa), sendo obtida pela divisão a carga de ruptura (Newtons) pela área de carregamento ( $\text{mm}^2$ ) e multiplicando o resultado por um fator P que é dado em função da altura da peça.

Figura 23: Emic DL30000N para ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Do autor, 2018.

#### 4.4.2.5. *Microscopia Eletrônica*

Foram feitas imagens no microscópio eletrônico das fraturas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência a compressão com o objetivo de avaliar os tipos, morfologias e locais das fraturas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o estudo realizado, esperou-se desenvolver blocos intertravados para pavimentação de superfícies utilizando resíduos provenientes de processos siderúrgicos em sua constituição. Assim, resíduos deletérios que são produzidos em grandes volumes puderam compor um material útil e requisitado em grandes quantidades, evitando que mais matéria prima convencional seja extraída, agregando valor a esses materiais e reduzindo os passivos ambientais associados a ele.

### 5.1. Caracterização das matérias primas utilizadas

Como agregados convencionais graúdo e miúdo, utilizou-se respectivamente brita 0 e areia grossa lavada comercial, como matérias primas para a composição dos corpos de prova e blocos intertravados controle. Além disso, utilizou-se o cimento Portland CP V ARI, cujas análises físico-químicas foram fornecidas pelo fabricante.

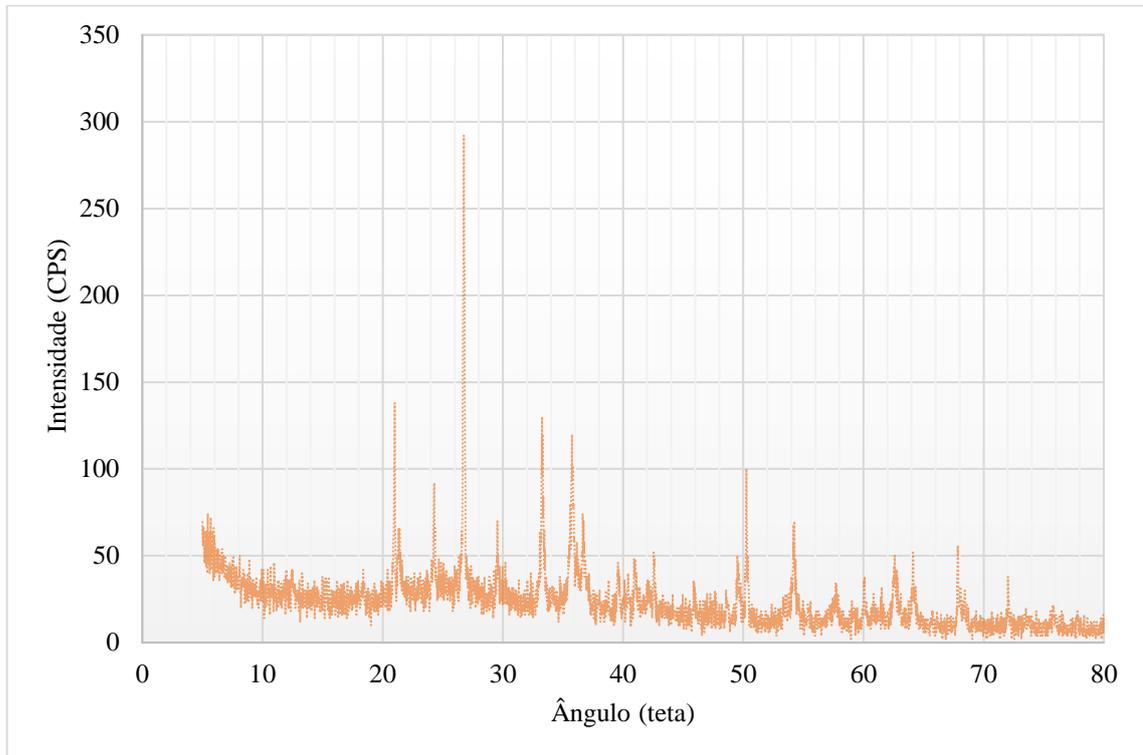
Como substitutos aos agregados convencionais graúdo e miúdo foram utilizados respectivamente escória no primeiro caso e pó de balão e finos de minério no segundo. Esses resíduos foram submetidos a análises físico-químicas e estruturais.

#### 5.1.1. Difratometria de Raio-X (DRX)

Foram realizadas análises cristalográficas utilizando-se a difratometria de raio-x. O aparelho utilizado para tanto foi o Shimadzu XDR 7000. Com os difratogramas gerados para as amostras de pó de balão, finos de minério e escória, representados respectivamente nos gráficos 1, 2 e 3, utilizou-se a base de dados ICDD (International Center for Diffraction Data) para a identificação das fases cristalográficas predominantes nos materiais.

O gráfico 1 mostra os resultados do DRX para a amostra do pó de balão coletada na siderúrgica AVG.

Gráfico 1: Difratoograma (DRX) da amostra de pó de balão.



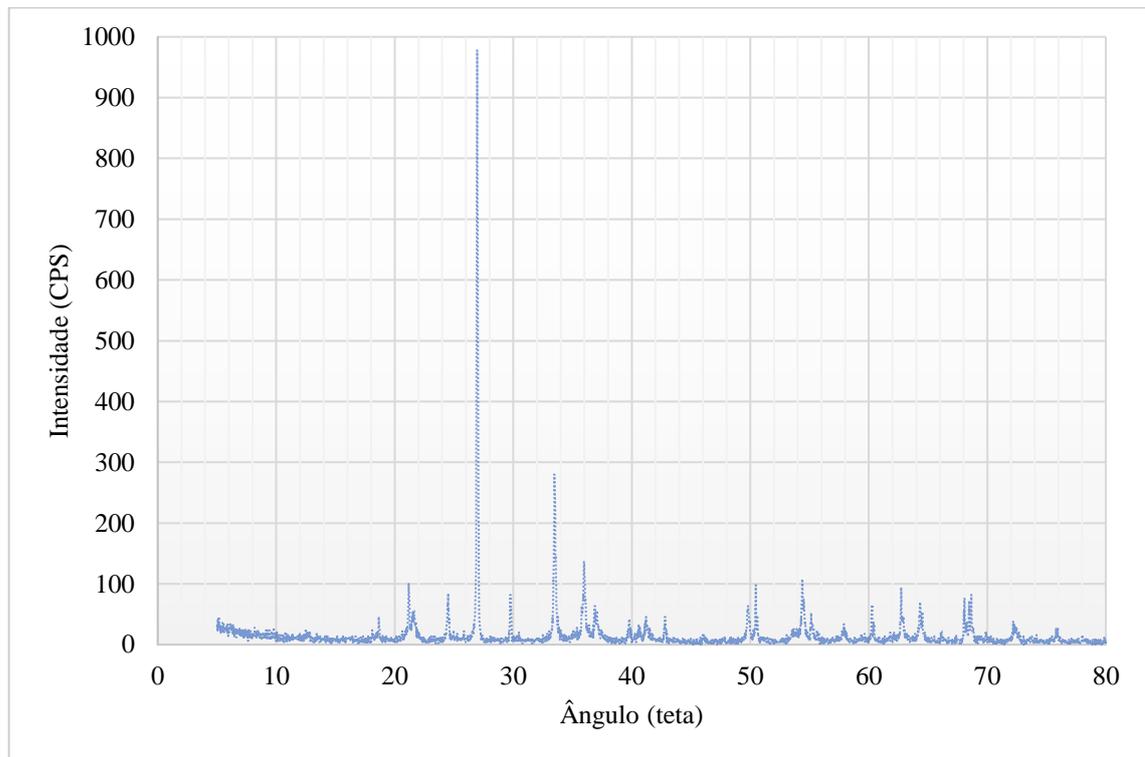
Fonte: Do autor, 2018.

Analisando o gráfico 1, as intensidades e ângulos indicam a presença majoritária de sílica (quartzo) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), minoritariamente caulinita e traços de calcita e ilita. Os espectros de difração de raios x obtidos na matéria primas foram comparados com as fichas de DRX (PDF-2) para o quartzo (ICCD 01-085-1780), hematita (ICCD 01-087-1164), caulinita (ICCD 01-089-6538), dolomita (ICCD 01-075-1760), calcita (ICCD- 01-086-2334) e ilita (ICCD 00-002-0050), indicando como principais fase mineralógicas óxidos de ferro, quartzo e argilominerais.

De acordo com o estudo de Gomesi et al (2017), a análise do pó de balão por difratometria de raios x revelou a presença de fases cristalográficas associadas a compostos de ferro, como a hematita e a magnetita, além de óxidos de ferro, calcita e quartzo. Dias (2011) analisou por DRX uma amostra de lama de alto-forno obteve o resultado de que a mesma é constituída por óxidos de ferro, como a hematita, a magnetita, a maghemita e a wustita, além de calcita e quartzo. Ambos ressaltam que existem outras fases cristalinas minoritárias de difícil detecção por causa da baixa intensidade dos picos.

O gráfico 2 mostra os resultados do DRX para a amostra de finos de minério coletada na siderúrgica AVG.

Gráfico 2: Difratoograma da amostra de finos de minério.



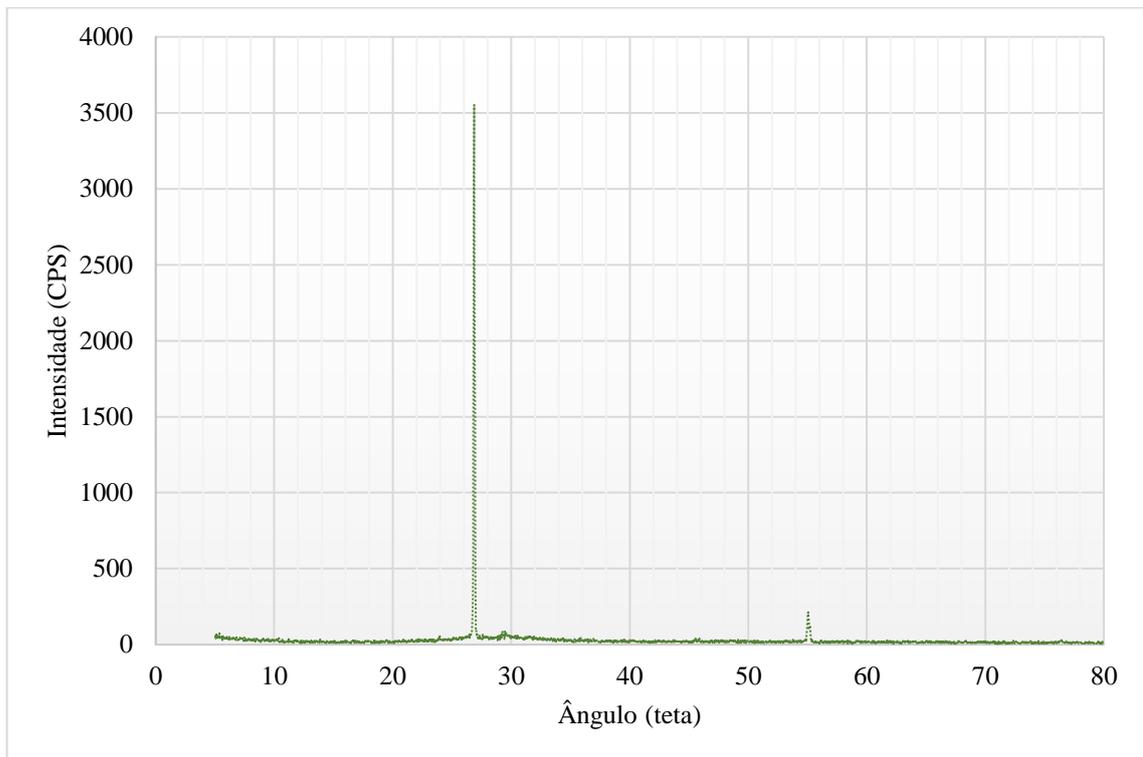
Fonte: Do autor, 2018.

Analisando o gráfico 2 (DRX de finos de minérios), as intensidades e ângulos indicam bastante semelhança com a amostra de pós de balão com as fases mineralógicas presentes majoritárias: óxidos de ferro, quartzo e argilominerais. Em menor proporção calcita, dolomita e ilita.

Tendo em vista que os finos de minério nada mais são que o próprio minério de ferro em partículas finas, observa-se caracterizações existentes na literatura. De acordo com o estudo de Henriques et al (2011), a fase mineral identificada nas amostras de minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero é a hematita. Já de acordo com Fontes et al (2013), as fases encontradas em minério de ferro specularítico foram quartzo, goethita, hematita, magnetita, ilmenita e almandina.

O gráfico 3 mostra os resultados do DRX para a amostra de escória coletada na siderúrgica AVG.

Gráfico 3: Difratoograma da amostra de escória.



Fonte: Do autor, 2018.

Analisando o gráfico 3 (DRX da escória), mostra a presença de apenas uma fase cristalina o quartzo, com possível traço de CaO.

De acordo com o estudo de Pimentel et al (2017), a escória de alto-forno é composta por silicatos cristalizados (Ca – Mg – Al), sendo constituída predominantemente por calcita, hematita e quartzo.

### 5.1.2. Fluorescência de Raio-X (FRX)

#### 5.1.2.1. *Pó de Balão*

A tabela 11 mostra os resultados obtidos para a Fluorescência de Raio-X para o pó de balão em duplicata.

Tabela 11: Fluorescência de Raio-X para o pó de balão.

<b>Espécie</b>	<b>% Amostra 1</b>	<b>% Amostra 2</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	85,597	84,740
<b>SiO<sub>2</sub></b>	10,123	10,503
<b>CaO</b>	2,856	3,127
<b>MnO</b>	0,735	0,817
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,393	0,512
<b>ZnO</b>	0,260	0,263
<b>SrO</b>	0,035	0,037
<b>Soma</b>	99,999	99,999

Fonte: Do autor, 2018.

Na análise elementar da amostra de pó de balão, nota-se a prevalência de óxidos de ferro e sílica, apresentando um teor médio de cerca de 85% de Fe<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e de 10% de SiO<sub>2</sub>.

#### 5.1.2.2. Escória

A tabela 12 mostra os resultados obtidos para a Fluorescência de Raio-X para a escória em duplicata.

Tabela 12: Fluorescência de Raio-X para a escória.

<b>Espécie</b>	<b>% Amostra 1</b>	<b>% Amostra 2</b>
<b>CaO</b>	44,004	43,725
<b>Si<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	32,249	31,299
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12,895	12,394
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6,780	8,403
<b>MnO</b>	1,745	1,802
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,783	0,861
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,703	0,696
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,453	0,465
<b>SrO<sub>2</sub></b>	0,321	0,296
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,055	0,049
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,014	0,011
<b>Soma</b>	100,002	100,001

Fonte: Do autor, 2018.

Na análise elementar da amostra de escória, nota-se a prevalência de óxidos de cálcio e sílica, apresentando um teor médio de cerca de 44% de CaO e de 31% de Si<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

### 5.1.2.3. *Finos de Minério*

A tabela 13 mostra os resultados obtidos para a Fluorescência de Raio-X para finos de minério em duplicata.

Tabela 13: Fluorescência de Raio-X para finos de minério.

<b>Espécie</b>	<b>% Amostra 1</b>	<b>% Amostra 2</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	83,733	83,989
<b>SiO<sub>2</sub></b>	14,769	14,641
<b>MnO</b>	0,710	0,673
<b>CaO</b>	0,689	0,698
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,077	0,000
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,021	0,000
<b>Soma</b>	99,999	100,001

Fonte: Do autor, 2018.

Na análise elementar da amostra de finos de minério, nota-se a prevalência de óxidos de ferro e sílica, apresentando um teor médio de cerca de 84% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e de 15% de  $\text{SiO}_2$ .

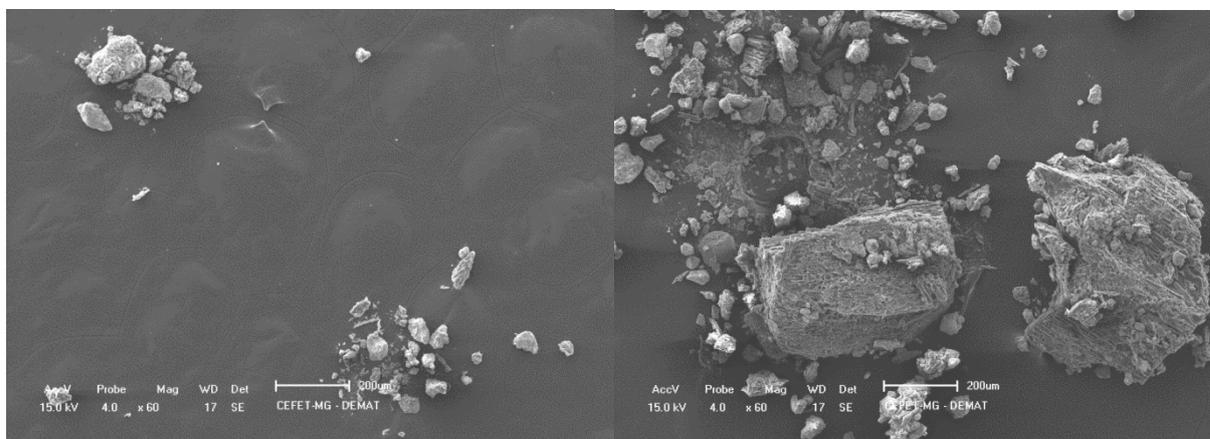
### 5.1.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

Foram realizadas análises morfológicas e de composição utilizando a microscopia eletrônica de varredura (equipamento SHIMADZU modelo 550X) nas amostras *in natura* dos resíduos siderúrgicos escolhidos.

#### 5.1.3.1. *Pó de Balão*

A figura 24 mostra a micrografia eletrônica de varredura do pó de balão com aumento de 60 vezes em duas regiões distintas.

Figura 24: Morfologia dos grânulos de pó de balão em duas regiões.



Fonte: Do autor, 2018.

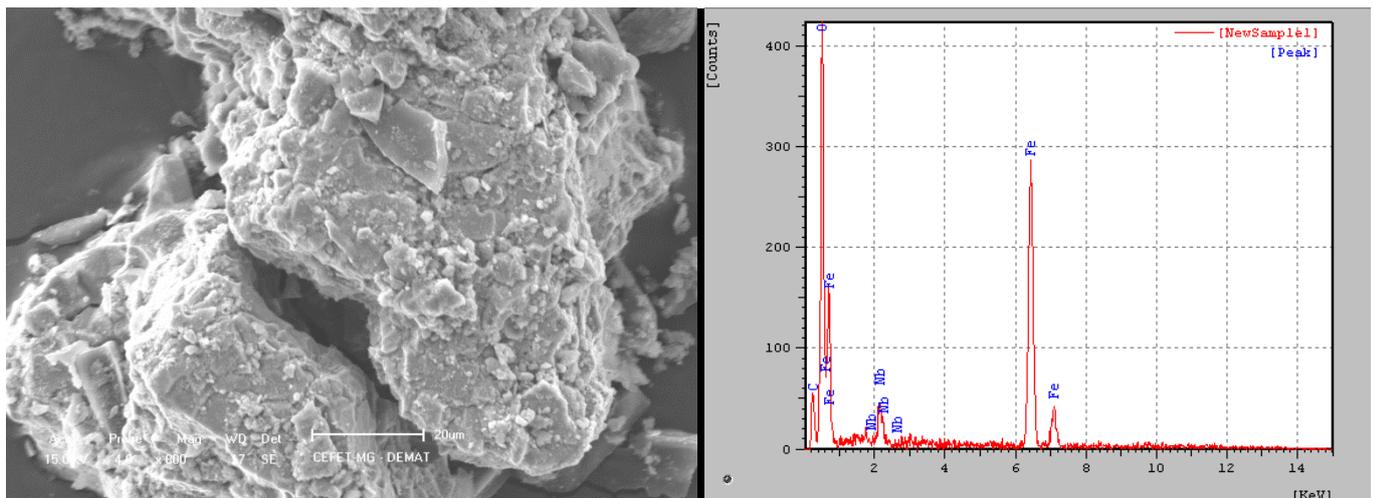
Observa-se nesses campos que as partículas possuem um tamanho de cerca de 400  $\mu\text{m}$  ou menores, revelando um material particulado com uma grande distribuição de tamanhos, predominando partículas finas. Não foi observado um padrão morfológico, além disso as imagens demonstram que as partículas tendem a se fracionar em partículas menores. É importante destacar que as partículas pequenas tendem a formar flocos ou torrões, que oferecem certa resistência para se desfazerem.

O uso de resíduos na formulação dos traços pode provocar uma atividade pozzolânica, bem como um efeito filler, promovidos devido a uma granulometria fina. No entanto, para isso o material deve estar desaglomerado, possibilitando a exposição de sua área superficial e que os mesmos possam preencher os vazios, evitando o empacotamento. No entanto as partículas podem estar fortemente unidas resultando em aglomerados que não se rompem com facilidade, podendo prejudicar os resultados esperados (FILHO, 2013).

As figuras 25 e 26 mostram a morfologia dos grânulos de pó de balão, sendo que a largura total das imagens corresponde a 130  $\mu\text{m}$ . Os gráficos 4 e 5 são as respectivas espectrografias de energia dispersiva para as regiões apresentadas pelas figuras 25 e 26.

Figura 25: Micrografia Eletrônica de varredura para a primeira região do pó de balão.

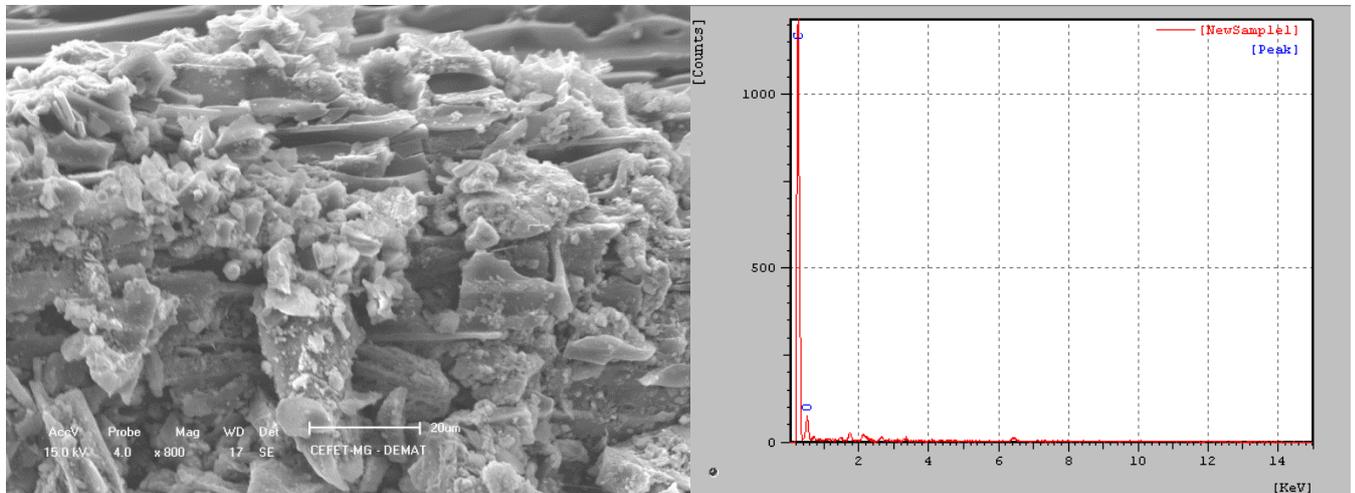
Gráfico 4: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 25, para a primeira região da amostra de pó de balão.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 26: Micrografia Eletrônica de varredura para a segunda região do pó de balão.

Gráfico 5: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 26, para a segunda região da amostra de pó de balão.



Fonte: Do autor, 2018.

As figuras 25 e 26 também demonstram o padrão disforme e particulado do material, no entanto as partículas apresentadas em cada imagem apresentam um padrão de forma distinto. Analisando o gráfico 4 que apresenta a espectrografia de energia dispersiva para a região da figura 24, é possível perceber que a partícula presente nessa região é composta basicamente por oxigênio e ferro, ou seja, provavelmente é constituída principalmente por óxidos de ferro. Já analisando o gráfico 5 que apresenta a espectrografia de energia dispersiva para a região da figura 25, é possível perceber que a partícula presente nessa região é composta basicamente por carbono, ou seja, provavelmente é composta por finos de carvão que é o combustível utilizado pela empresa responsável pela geração do resíduo. Imagens e respectivos EDS para outras regiões apresentados no anexo 1 confirmam esses resultados.

Os resultados da Espectroscopia de energia dispersiva para as 6 regiões analisadas são apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Resultados da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para o pó de balão.

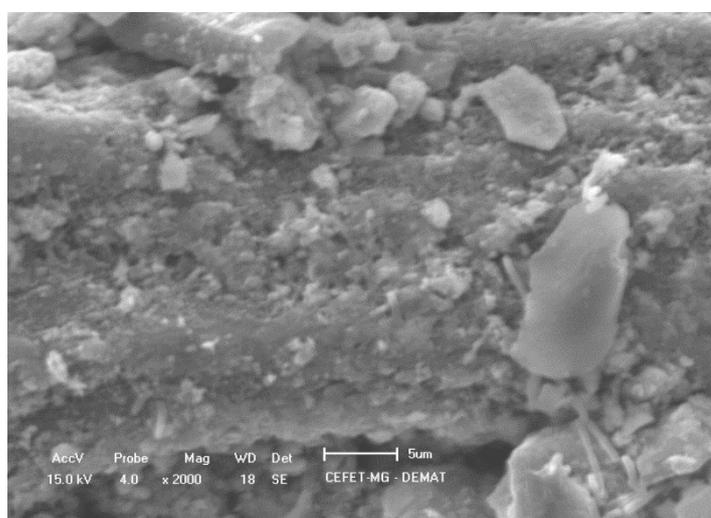
Elemento	Amostra 1			Amostra 2		
	% (região 1)	% (região 2)	% (região 3)	% (região 1)	% (região 2)	% (região 3)
<b>C</b>	20,235	12,415	76,024	81,265	79,660	75,628
<b>O</b>	54,412	57,782	21,507	18,735	20,340	21,203
<b>Al</b>	3,298	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Si</b>	1,343	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Ca</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Fe</b>	19,640	28,748	2,034	0,000	0,000	2,737
<b>Nb</b>	1,072	1,055	0,435	0,000	0,000	0,338
<b>P</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,094
<b>Total</b>	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Fonte: Do autor, 2018.

É possível observar a prevalência de carbono, oxigênio e ferro na composição do pó de balão nas três regiões escolhidas para as duas amostras analisadas, o que pode confirmar a composição típica do resíduo colocada pela literatura, que é a de finos do combustível utilizado e óxidos de ferro presentes no minério de ferro (GOMESI et al, 2017).

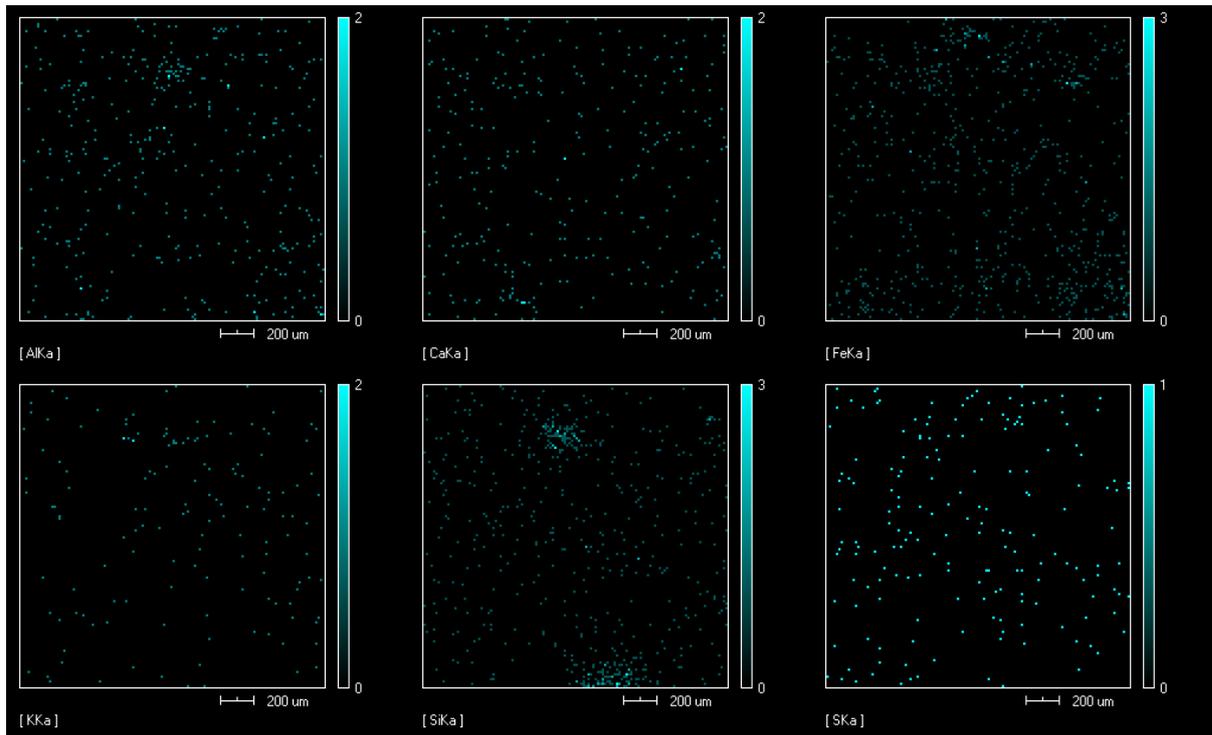
A figura 27 mostra a morfologia de uma região da amostra do pó de balão, sendo que a largura total da imagem corresponde a cerca de 53  $\mu\text{m}$ . Já o gráfico 6 apresenta o mapa de composição referente à imagem 27.

Figura 27: Micrografia Eletrônica de varredura para a segunda região do pó de balão.



Fonte: Do autor, 2018.

Gráfico 6: Mapa de composição da imagem 27, correspondente à primeira amostra.



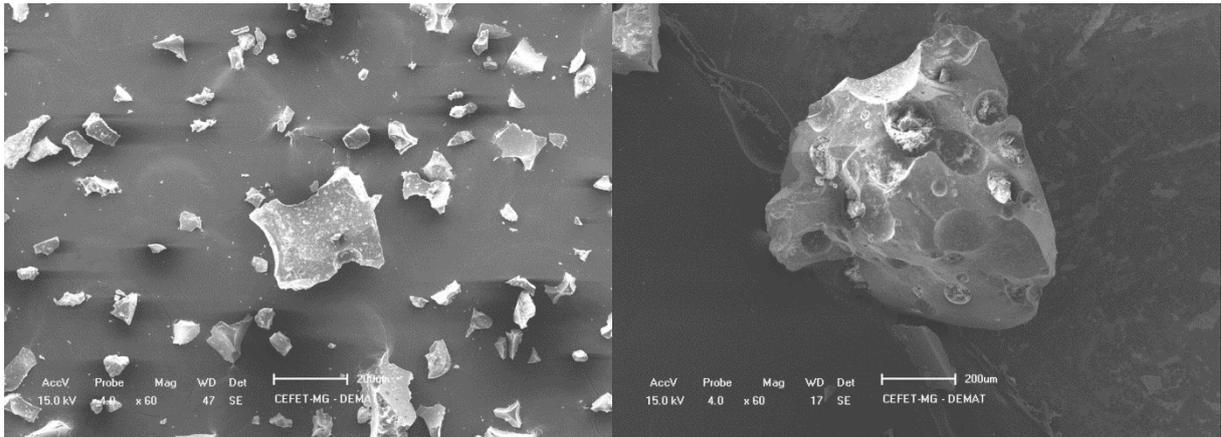
Fonte: Do autor, 2018.

A figura 27 reitera o aspecto morfológico já apresentado para o pó de balão. Além disso, o mapa de composição correspondente à imagem, apresentado no gráfico 6, demonstra a presença de ferro e silício em maiores proporções e de alumínio, cálcio, enxofre e potássio em menores proporções. Uma imagem e seu respectivo mapa de composição para outra região pode ser observada no anexo 2.

#### 5.1.3.2. Escória

A figura 28 mostra a micrografia eletrônica de varredura da escória em duas regiões distintas.

Figura 28: Morfologia dos grânulos de escória para duas regiões da amostra.



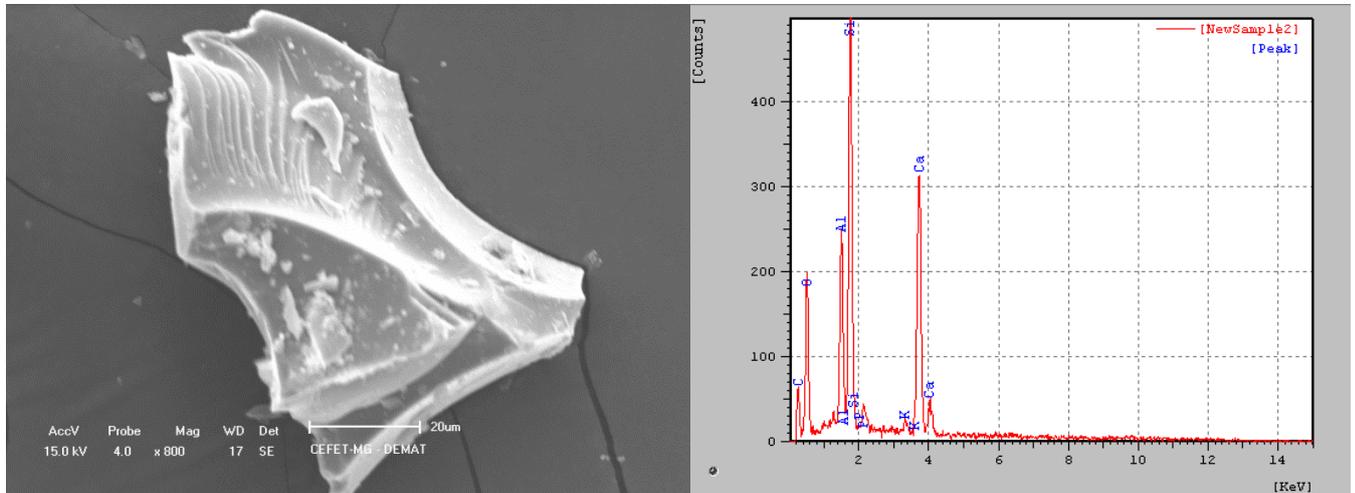
Fonte: Do autor, 2018.

Não é possível mensurar o tamanho das partículas de escória já que as mesmas saem do alto-forno em estado líquido, sendo resfriadas em água e partidas ao longo do processo, apresentando tamanhos variados. É possível observar na figura 28, que o material possui padrão morfológico de superfícies lisas e com quinas, além de apresentar espaços vazios em formato circular em sua estrutura, demonstrando ser um material aerado, até mesmo por passar por um processo de resfriamento rápido. Pode-se observar também que apesar de serem partículas aeradas, a estrutura da escória parece ser maciça, não tendendo a formar aglomerados como, como foi observado para o pó de balão.

As figuras 29 e 30 mostram a morfologia dos grânulos de escória, sendo que a largura total das imagens corresponde a 130  $\mu\text{m}$ . Os gráficos 7 e 8 são as respectivas espectrografias de energia dispersiva para as regiões apresentadas pelas figuras 29 e 30.

Figura 29: Micrografia Eletrônica de varredura para a primeira região da amostra de escória.

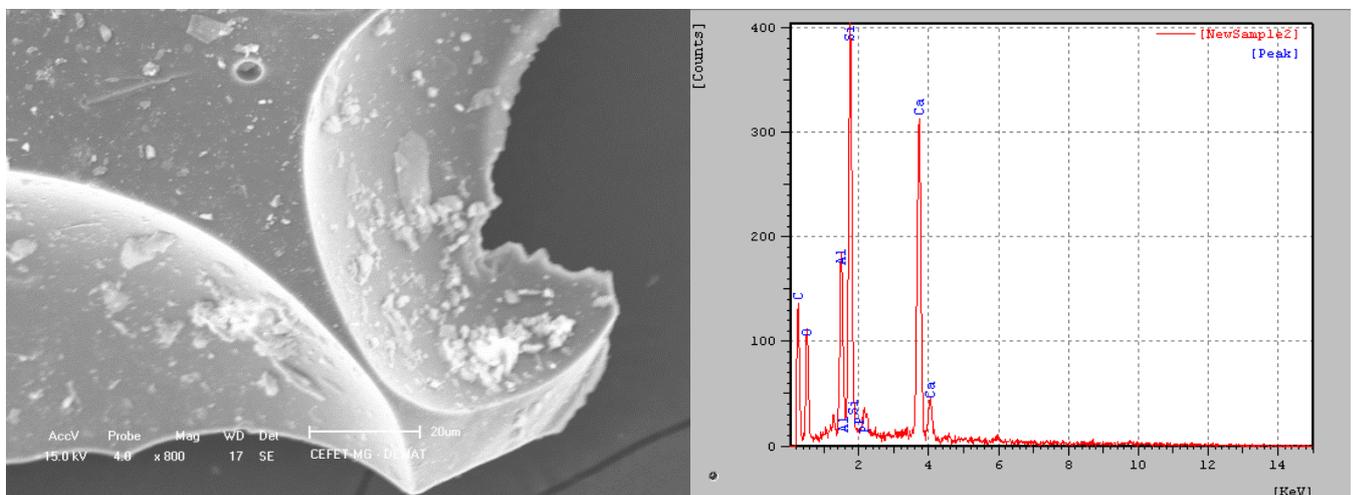
Gráfico 7: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 29, para a primeira região da amostra de escória.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 30: Micrografia Eletrônica de varredura para a segunda região da amostra de escória.

Gráfico 8: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 30, para a segunda região da amostra de escória.



Fonte: Do autor, 2018.

As figuras 29 e 30 também demonstram o padrão morfológico de superfícies lisas e quinadas do material, além de reiterar a característica do material de ter espaços vazios de formato circular, causados pelas bolhas de ar formadas durante o seu resfriamento rápido em água. Analisando os gráficos 7 e 8 que apresentam a espectrografia de energia dispersiva para as respectivas regiões das figuras 29 e 30, é possível perceber que as partículas são compostas

majoritariamente por silício, cálcio e alumínio. Imagens e respectivos EDS para outras regiões, que são apresentadas no anexo 3, reiteram esses resultados.

Os resultados da Espectrografia de energia dispersiva para as 6 regiões analisadas são apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Resultados da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para a Escória.

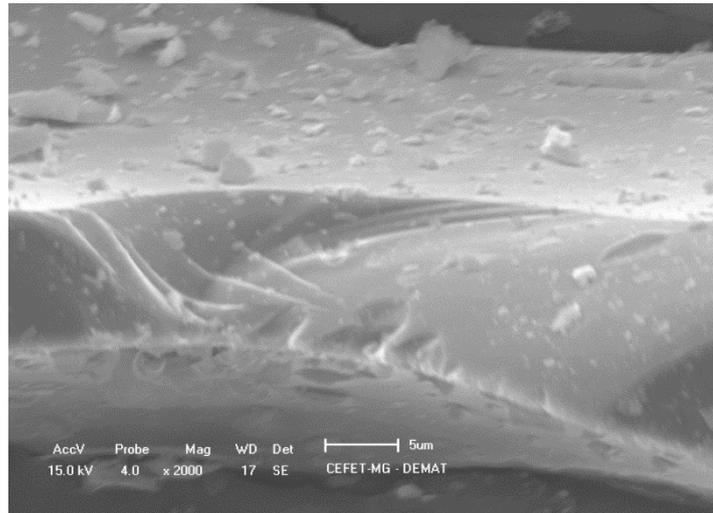
Elemento	Amostra 1			Amostra 2		
	% (região 1)	% (região 2)	% (região 3)	% (região 1)	% (região 2)	% (região 3)
<b>C</b>	9,249	17,696	25,164	31,004	37,072	29,810
<b>O</b>	70,695	50,811	59,94	47,326	35,672	55,513
<b>Al</b>	0,000	6,093	2,887	4,324	4,493	1,857
<b>Si</b>	20,009	13,108	6,760	9,257	10,720	6,525
<b>Ca</b>	0,000	11,543	4,134	7,694	11,857	2,569
<b>Fe</b>	0,000	0,000	0,48	0,000	0,000	0,618
<b>Nb</b>	0,000	0,000	0,368	0,000	0,000	0,339
<b>P</b>	0,047	0,192	0,000	0,063	0,186	0,000
<b>K</b>	0,000	0,557	0,267	0,332	0,000	0,276
<b>Total</b>	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Fonte: Do autor, 2018.

É possível observar a prevalência de oxigênio, silício, cálcio, alumínio e carbono na composição da escória nas três regiões escolhidas para as duas amostras analisadas, o que pode confirmar a composição típica da escória.

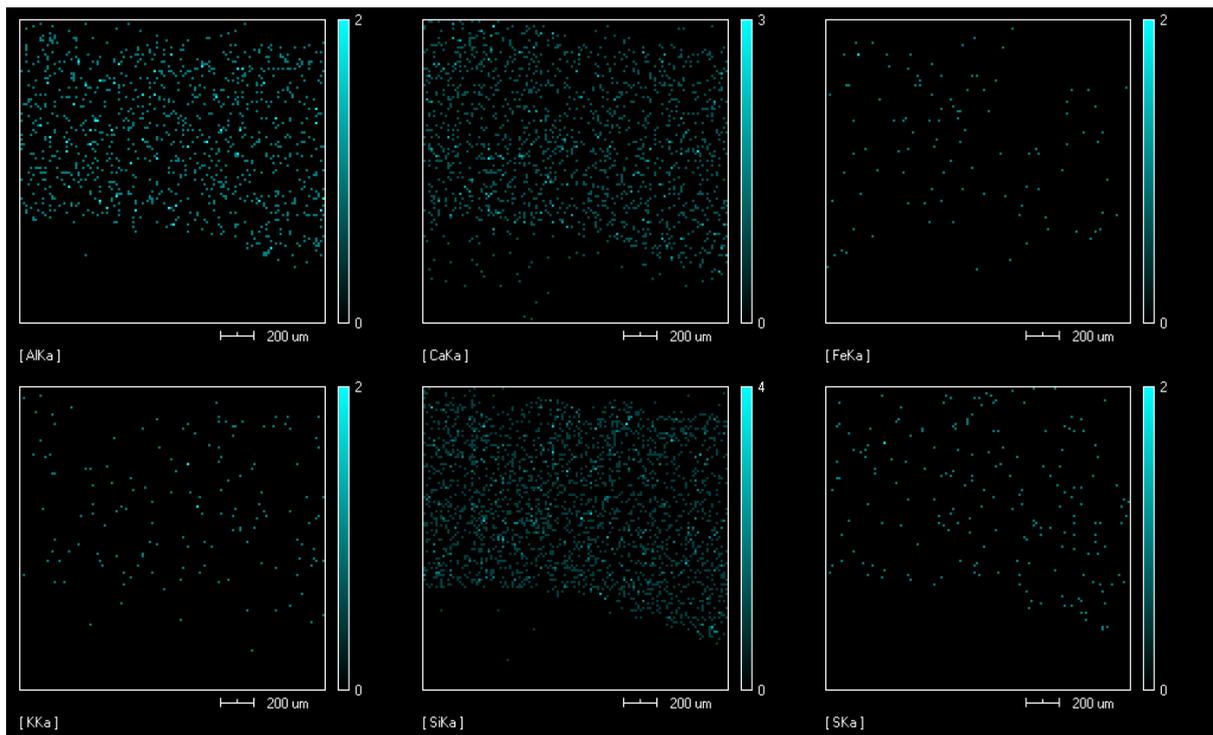
A figura 31 mostra a morfologia de uma região da amostra de escória, sendo que a largura total da imagem corresponde a cerca de 53  $\mu\text{m}$ . Já o gráfico 9 apresenta o mapa de composição referente à figura 31.

Figura 31: Morfologia dos grânulos de escória para a primeira amostra.



Fonte: Do autor, 2018.

Gráfico 9: Mapa de composição para a imagem 31, para a primeira amostra de escória.



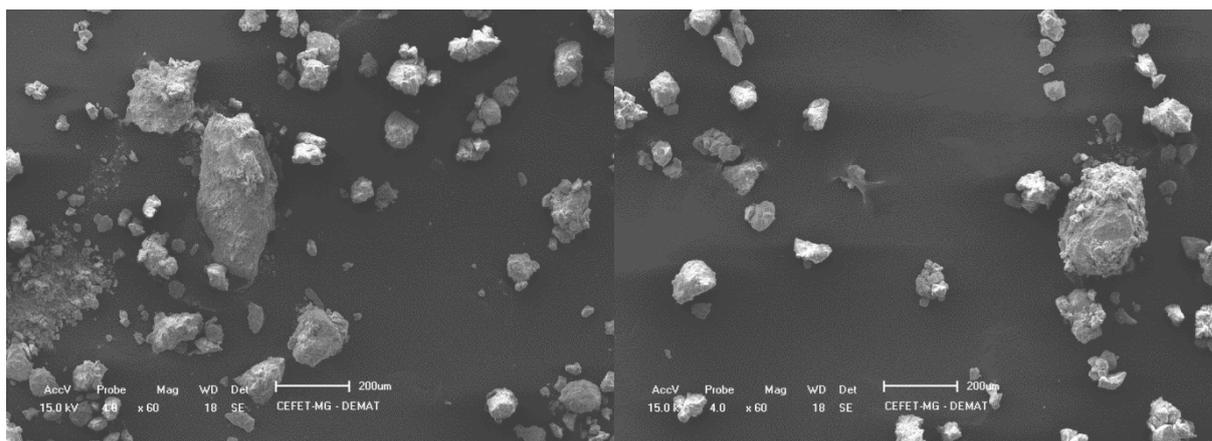
Fonte: Do autor, 2018.

A figura 31 reitera o aspecto morfológico já apresentado para a escória. O mapa de composição correspondente à imagem, colocado pelo gráfico 9, demonstra a presença de silício, alumínio e cálcio em maiores proporções e de ferro, enxofre e potássio em menores proporções. Uma imagem e seu respectivo mapa de composição para outra região pode ser observada no anexo 5.

### 5.1.3.3. Finos de Minério

A figura 32 mostra a microscopia eletrônica de varredura do para os finos de minério em duas regiões distintas.

Figura 32: Morfologia dos grânulos de finos de minério para duas regiões da amostra.



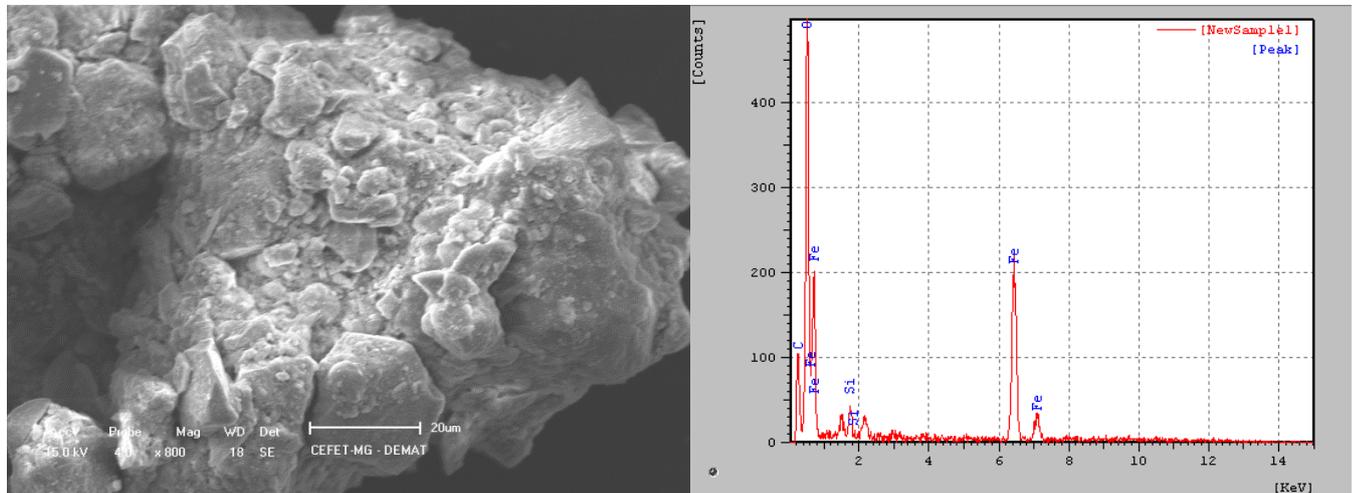
Fonte: Do autor, 2018.

Observa-se que as partículas possuem um tamanho de 400  $\mu\text{m}$  ou menores, também não apresentando um padrão morfológico, demonstrando que as partículas do material tendem a formar agregados que costumam ser difíceis de romper.

As figuras 33 e 34 mostram a morfologia dos grânulos de finos de minéri, sendo que a largura total das imagens corresponde a 130  $\mu\text{m}$ . Os gráficos 10 e 11 são as respectivas espectrografias de energia dispersiva para as regiões apresentadas para as figuras 33 e 34.

Figura 33: Morfologia dos grânulos de finos de minério e respectivo espectro EDS para a primeira amostra.

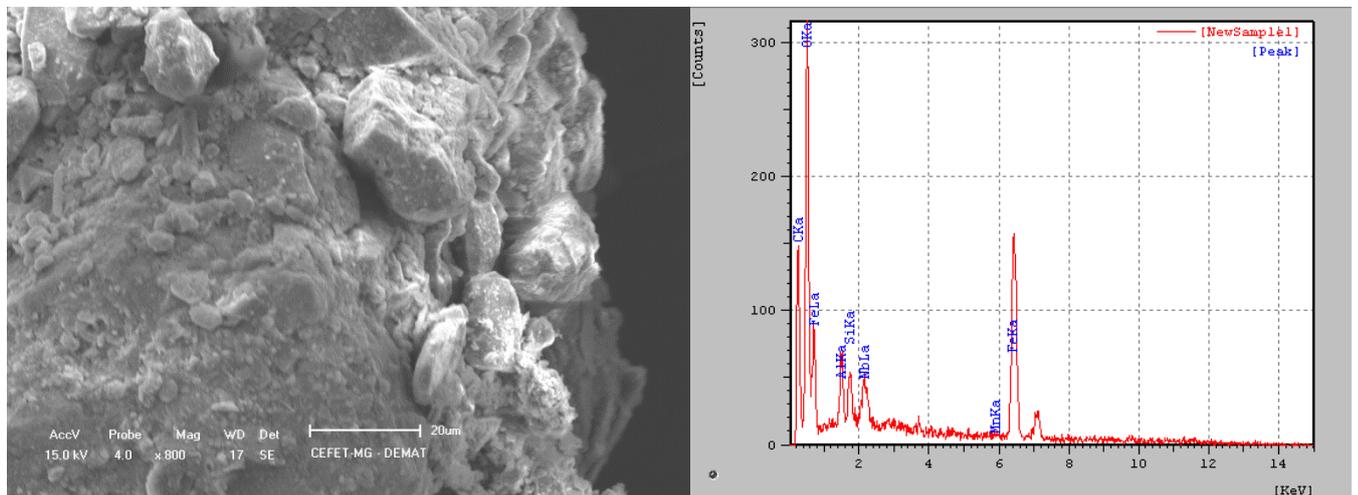
Gráfico 10: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 33, para a primeira região da amostra de escória.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 34: Morfologia dos grânulos de finos de minério e respectivo espectro EDS para a segunda amostra.

Gráfico 11: Respectiva Espectrografia de Energia Dispersiva correspondente à figura 34, para a segunda região da amostra de escória.



Fonte: Do autor, 2018.

As figuras 33 e 34 também demonstram o padrão morfológico disforme e granular dos finos de minério. Analisando os gráficos 10 e 11 que apresentam a espectrografia de energia dispersiva para as respectivas regiões das figuras 33 e 34, é possível perceber que as partículas das regiões são compostas majoritariamente por oxigênio, ferro, cálcio e silício. Imagens e respectivos EDS para outras regiões que são apresentados no anexo 6 reiteram esses resultados.

Os resultados da Espectrografia de energia dispersiva para as 6 regiões analisadas são apresentados na tabela 16.

Tabela 16: Finos de minério.

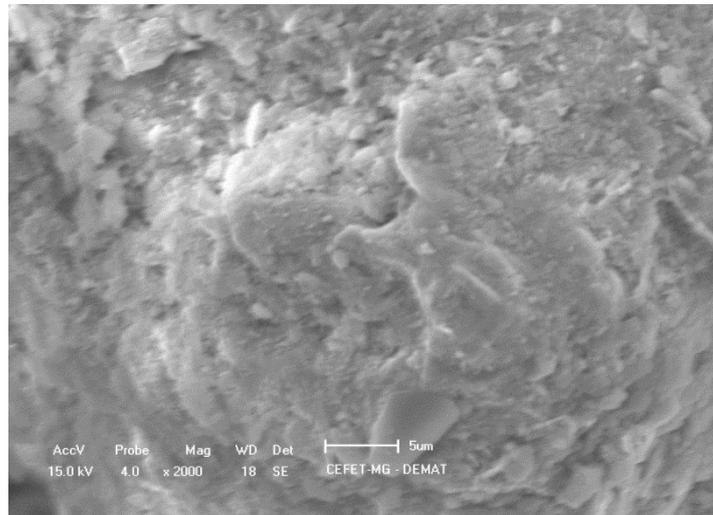
<b>Elemento</b>	<b>Amostra 1</b>			<b>Amostra 2</b>		
	<b>% (região 1)</b>	<b>% (região 2)</b>	<b>% (região 3)</b>	<b>% (região 1)</b>	<b>% (região 2)</b>	<b>% (região 3)</b>
<b>C</b>	10,656	18,584	10,943	31,008	26,254	0,000
<b>O</b>	67,009	61,337	62,453	52,782	53,353	38,166
<b>Al</b>	0,000	0,000	6,335	1,980	0,613	27,977
<b>Si</b>	1,487	1,163	4,807	1,304	0,681	23,864
<b>Ca</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Fe</b>	20,848	18,916	15,462	12,095	18,839	9,993
<b>Nb</b>	0,000	0,000	0,000	0,831	0,000	0,000
<b>P</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,260	0,000
<b>K</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Total</b>	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Fonte: Do autor, 2018.

Observando os resultados da tabela 16, nota-se o predomínio de oxigênio, ferro e carbono nas regiões analisadas para as amostras de finos de minério.

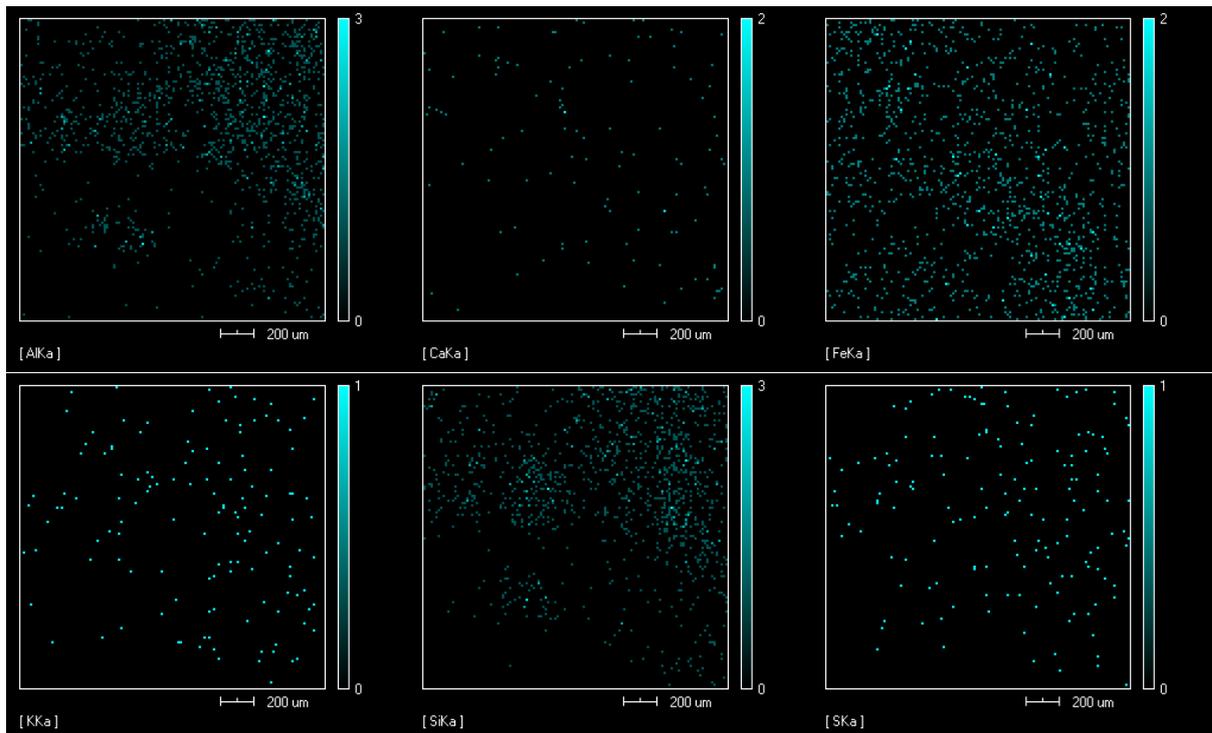
A figura 35 mostra a morfologia de uma região da amostra de escória, sendo que a largura total da imagem corresponde a cerca de 53  $\mu\text{m}$ . Já o gráfico 12 apresenta o mapa de composição referente à figura 35.

Figura 35: Morfologia dos grânulos de finos de minério com aumento de 2000 vezes para a primeira amostra.



Fonte: Do autor, 2018.

Gráfico 12: Mapa de composição referente à imagem da figura 35 para a primeira amostra de finos de minério.



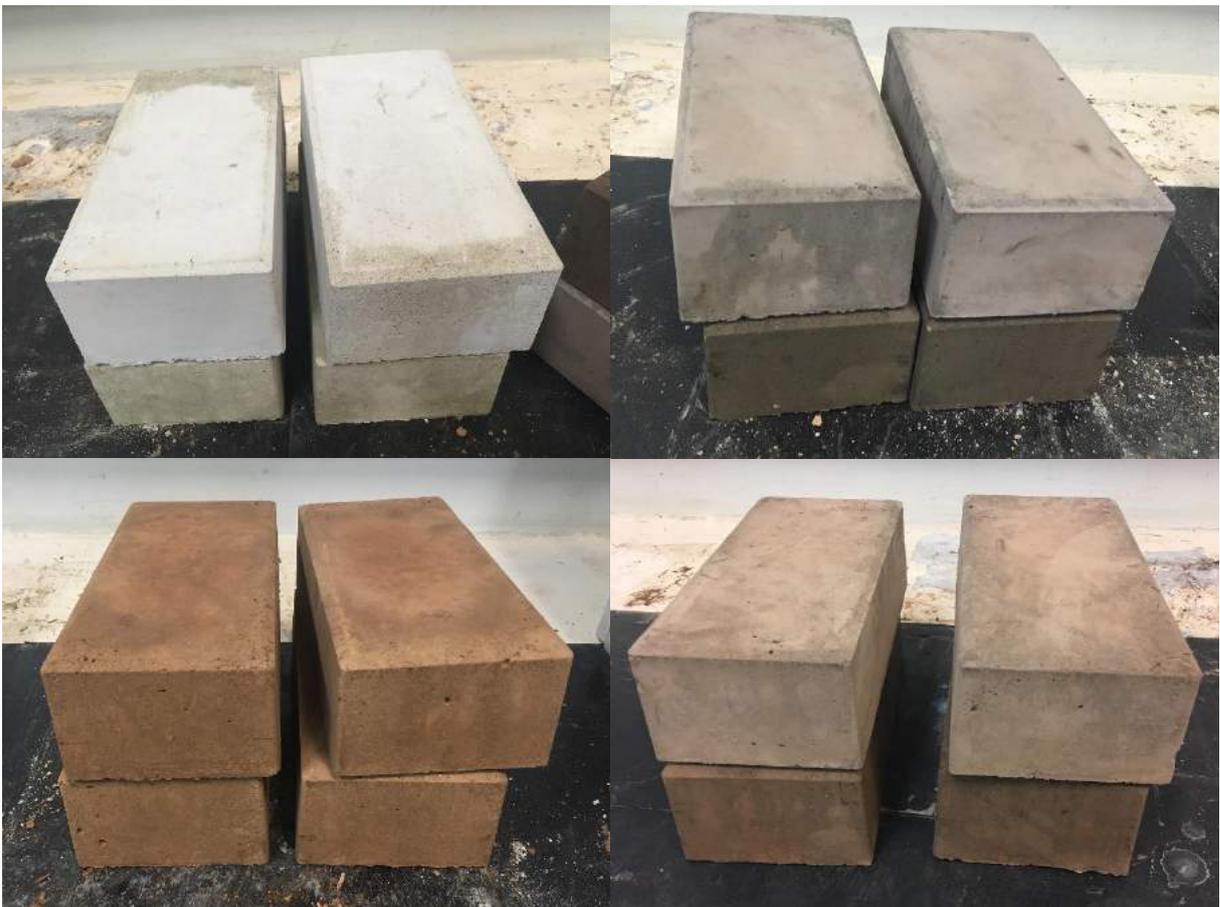
Fonte: Do autor, 2018.

A figura 35 reitera o aspecto morfológico já apresentado para os finos de minério e o mapa de composição correspondente à imagem, demonstra a presença de ferro, silício e alumínio em maiores proporções e de cálcio, enxofre e potássio em menores proporções.

## 5.2. Caracterização dos corpos de prova

Os corpos de prova e os blocos intertravados retangulares produzidos conforme os traços propostos neste estudo, apresentaram aspecto visual satisfatório similar ao produto comercial. O uso dos resíduos conferiu diferentes colorações ao material, como pode ser observado na imagem

Figura 36: Blocos retangulares para os traços de referência, 1, 2 e 3, respectivamente.



Fonte: Do autor, 2018.

### 5.2.1. Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme a norma técnica NBR 5739 (ABNT, 1994). Os resultados dos mesmos são apresentados nas tabelas 17, 18 e 19, para os tempos de cura de 7, 21 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 17: Resultados dos ensaios de resistência à compressão para um tempo de cura de 7 dias.

Tensão máxima (MPa)	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	13,52	13,26	13,86	13,55	0,25
Traço 1	6,48	5,21	5,27	5,65	0,59
Traço 2	10,56	10,11	10	10,22	0,24
Traço 3	9,45	12,7	10,73	10,96	1,34

Fonte: Do autor, 2018.

Tabela 18: Resultados dos ensaios de resistência à compressão para um tempo de cura de 21 dias.

Tensão máxima (MPa)	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	31,63	28,14	28,71	29,49	1,53
Traço 1	9,29	8,49	10,75	9,51	0,94
Traço 2	28,16	26,45	27,9	27,50	0,75
Traço 3	16,18	15,63	15,43	15,75	0,32

Fonte: Do autor, 2018.

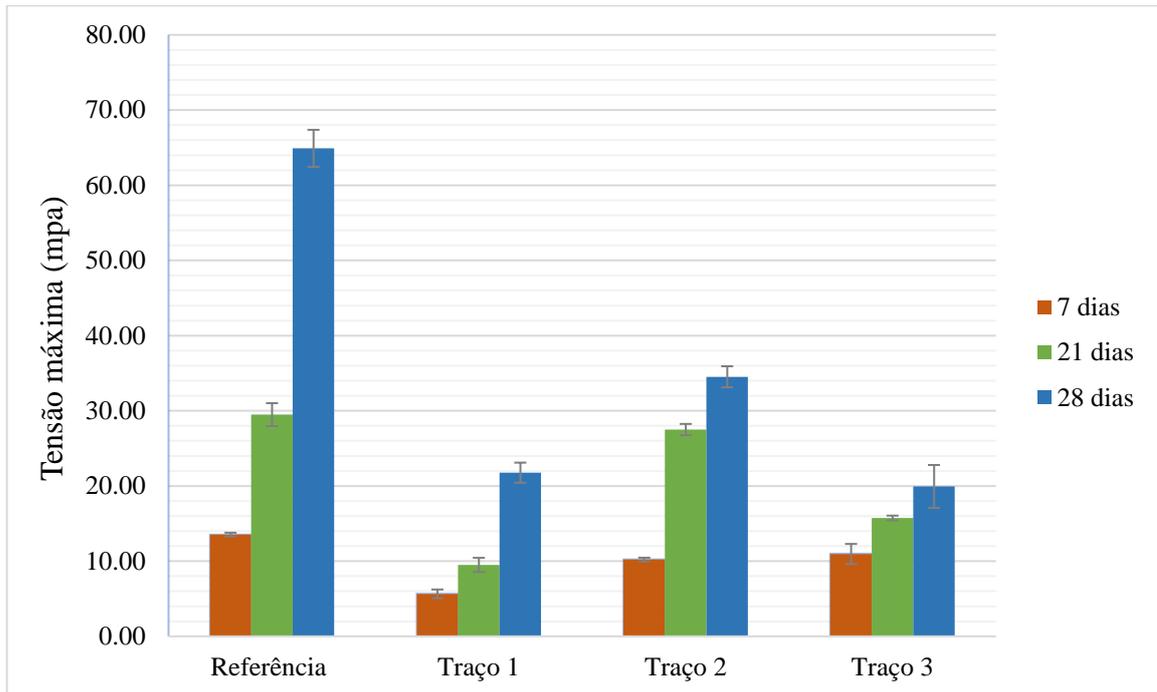
Tabela 19: Resultados dos ensaios de resistência à compressão para um tempo de cura de 28 dias.

Tensão máxima (MPa)	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	62,57	68,32	63,81	64,90	2,47
Traço 1	22,16	23,18	19,98	21,77	1,33
Traço 2	34,43	36,29	32,85	34,52	1,41
Traço 3	21,67	15,92	22,24	19,94	2,85

Fonte: Do autor, 2018.

Os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão também são apresentados no gráfico 13

Gráfico 13: Resistência à compressão para os seguintes traços e tempos de cura.



Fonte: Do autor, 2018.

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizadas as mesmas proporções em massa para cimento, água, aditivo plastificante, agregado graúdo e agregado miúdo para todos os traços propostos e a massa obtida teve uma consistência pastosa. As proporções utilizadas retornaram em uma relação água/cimento de 0,53 e, segundo Kiahara et al (2005), utilizando cimento CP V ARI, uma relação água/cimento de 0,55 retorna um concreto com resistência média de 42 MPa e uma relação água cimento de 0,50 retorna um concreto com resistência média de 47 MPa.

Analisando os resultados dos ensaios de resistência a compressão expostos acima, observa-se que o traço padrão atingiu uma resistência à compressão superior à esperada aos 28 dias de cura, com uma resistência média de 64,90 MPa. Essa resistência é suficiente para suportar elevados carregamentos.

Observou-se que todos os traços propostos tiveram a sua resistência à compressão maior, quanto maior foi o tempo de cura.

O traço 1 que contou com a substituição de 100% da massa de brita por escória e 50% da massa de areia por pó de balão teve uma resistência média de 21,77 MPa aos 28 dias de cura. O traço 2 que contou com a substituição de 100% da massa de brita por escória e 50% da massa de areia por finos de minério retornou uma resistência à compressão média de 34,52 MPa. Já o traço 3 que contou com a substituição total dos agregados graúdo e miúdo, com a substituição

de 100% da massa de brita por escória, 50% da massa de areia por pó de balão e os outros 50% da massa de areia por finos de minério retornou uma resistência à compressão média de 19,94 MPa. Assim, o traço 2 foi o que retornou os melhores resultados.

Os tipos de fratura que foram majoritariamente observados durante ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova com resíduos em sua composição são mostrados na figura 37.

Figura 37: Fraturas nos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão



Fonte: Do autor, 2018.

Durante os ensaios, notou-se que os corpos de prova compostos por resíduos não apresentaram tipos de ruptura que se enquadrem nos apresentados pela norma citada. Em sua maioria, as rupturas ocorreram na parte superior periférica dos corpos de prova, em forma de lascas finas. Observou-se também que, em sua maioria, as fraturas partiam as frações de escória, muitas vezes passavam por um pedaço mais graúdo da mesma. As fraturas também passaram pelas porções de escória majoritariamente, independente da granulometria das mesmas, demonstrando que esse material que substituiu o agregado graúdo constituiu a parte mais frágil do material. Além disso, os grãos de escória que inicialmente se mostraram como um material pouco denso e, na maioria das vezes, areado, se desfez no interior dos corpos de prova, apresentando-se como material desagregado na ocasião do rompimento dos corpos de prova. Ou seja, a porção de agregado graúdo que compôs os corpos de prova passou a se comportar como bolsas de material solto no interior da massa. Esses fatores podem ter diminuído a resistência do material. Posteriormente, as frações de escória se agregaram novamente formando um material frágil e aerado. Esse comportamento pode ter ocorrido pelo tempo de cura não ter sido suficiente para o material.

Os corpos de prova não foram retificados, utilizando-se Neoprene para atenuar as deformidades das superfícies dos mesmos. Além disso, os corpos de prova constituídos por resíduos, principalmente os que continham pó de balão em sua composição, sofreram pequenos abatimentos após a moldagem, o que acentuou as deformidades da superfície superior dos mesmos. Logo, essas deformidades somadas ao uso do Neoprene em substituição à retificação dos corpos de prova podem ter contribuído tanto para os tipos de ruptura observados quanto para a obtenção de resistências inferiores.

Em um traço convencional de concreto, os fatores que geralmente determinam a resistência do mesmo são a porosidade da matriz e a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo. O concreto é um material que está submetido a um progressivo enfraquecimento da matriz junto ao aumento de sua porosidade, sendo que a relação água/cimento influencia nessa quantidade de espaços vazios (MEHTA; MONTEIRO, 1994). O nível de tensão que o concreto pode suportar também depende da distribuição, do tamanho e da intercomunicação destes poros (ZHANG, 1998). Logo, as propriedades mecânicas do concreto reduzem à medida que a porosidade total aumenta.

A substituição de agregados graúdos naturais por reciclados, por exemplo, reduz a resistência à compressão do concreto progressivamente, quanto maior for a taxa de substituição, principalmente pela porosidade interna dos agregados graúdos reciclados. No entanto, com a redução da proporção água/cimento da mistura, essa propriedade pode se aproximar aos valores obtidos utilizando agregado graúdo convencional, mas é necessário levar em consideração que agregados reciclados geralmente contam com uma maior absorção de água e isso deve ser compensado para que não ocorra a redução excessiva da relação água/cimento efetiva da mistura (CARRIJO, 2005). Recomenda-se a pré-saturação desses materiais antes da fabricação do concreto (PEDROZO et al. 2000) Além disso, é importante salientar que a absorção de água dos agregados graúdo e miúdo convencionais pode ser considerada nula (CARRIJO, 2005).

Assim, a porosidade elevada da escória, bem como a sua baixa massa específica, além da elevada capacidade de absorção de água tanto da escória quanto do pó de balão e dos finos de minério também podem ter influenciado nos resultados obtidos para a resistência à compressão. Além disso, a considerável menor massa específica da escória em relação à do agregado graúdo convencional levou a obtenção de um maior volume de concreto para um mesmo peso total, ocasionando uma conseqüente redução proporcional no teor de cimento do concreto que é determinante para a resistência do mesmo.

### 5.2.2. Microscopia Óptica

Foram feitas imagens de microscopia óptica das regiões fraturadas após o ensaio de resistência à compressão nos quatro traços propostos. Nota-se que em qualquer dos traços, o concreto é um compósito bifásico, composto por uma região formada pelo agregado miúdo disperso no meio ligante que compõe a matriz e a região formada pelo agregado graúdo disperso na matriz.

#### 5.2.2.1. *Traço de referência*

As imagens de microscopia óptica para as regiões fraturadas dos corpos de prova para o traço de referência, composto pela composição convencional de cimento, brita e areia, são apresentadas na figura 38.

Figura 38: Microscopia óptica para o traço de referência.



Fonte: Do autor, 2018.

Observa-se que as fraturas ocorreram majoritariamente na interface entre o aglomerado de areia e cimento e a brita, sem que a mesma se quebrasse. Além disso, observa-se que para um tempo de cura de 7 dias, a superfície da brita da região de fratura apresentou uma maior quantidade de material aderido do que a superfície da brita em uma região de fratura com um tempo de cura de 28 dias, indicando o ganho de resistência da mistura de cimento, areia e água, quanto maior for o tempo de cura a que o concreto for submetido. Isso demonstra que a região de interface entre a mistura e a brita é a região mais frágil do material.

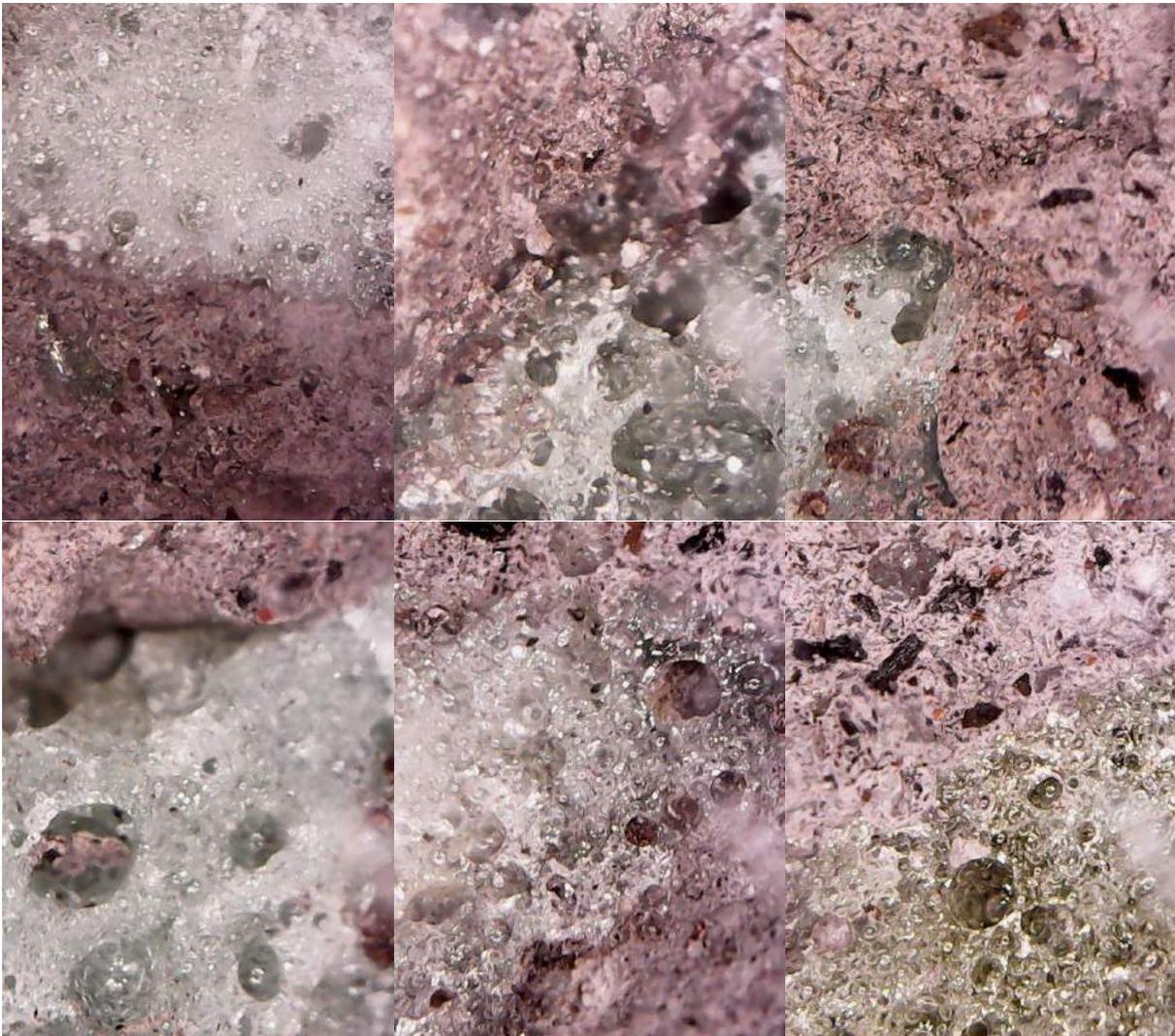
Outros estudos também demonstram que a ruptura de concretos convencionais ocorre na pasta de cimento na região ao redor do agregado graúdo convencional (CARRIJO, 2005),

sendo esta interface a região de maior fragilidade na massa e determinante para a resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

#### 5.2.2.2. Traço 1 – 100% de escória e 50% de pó de balão

As imagens de microscopia óptica para as regiões fraturadas dos corpos de prova referentes ao traço 1 são apresentadas na figura 39.

Figura 39: Microscopia óptica para o traço 1.



Fonte: Do autor, 2018.

O traço 1 é composto pela substituição total em massa do agregado graúdo por escória e de metade da massa de agregado miúdo por pó de balão. Notou-se que, logo após o rompimento dos corpos de prova, as frações compostas por escória se encontravam

desagregadas, mas, com o passar do tempo e com a secagem dos corpos de prova rompidos, as mesmas se rearranjaram formando um material aerado, com a aparência comparativa de uma fina espuma, conforme é possível observar nas imagens da figura 38. Observa-se que as fraturas ocorreram majoritariamente passando pelas frações de escória, partindo-as. Isso demonstra que as partes da massa constituídas por esse material são as regiões de maior fragilidade da massa, e não a interface entre a escória e a mistura de pó de balão, areia, cimento e água.

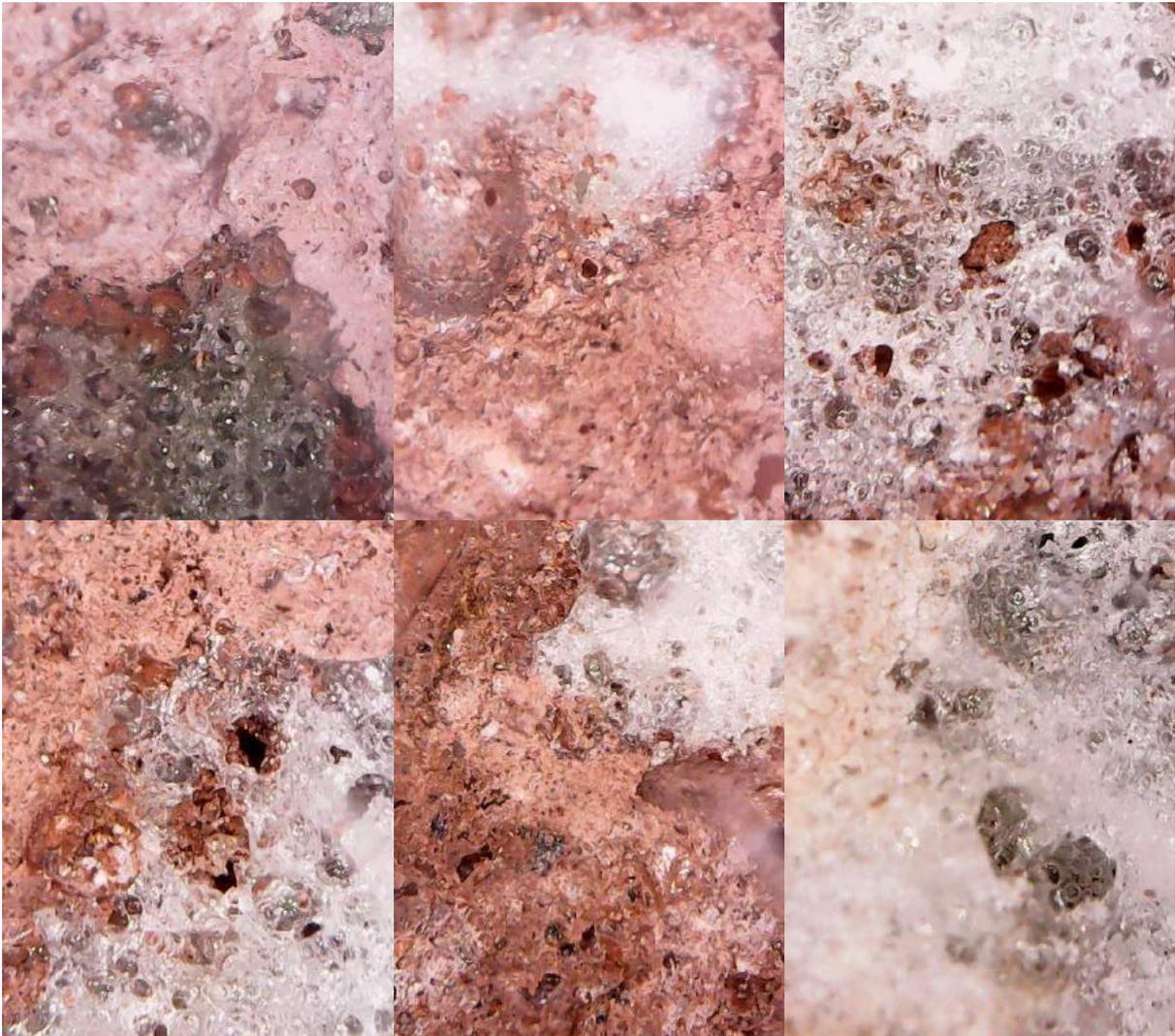
Em seu estudo, Carrijo (2005) observou que as fraturas dos corpos de prova compostos por agregado graúdo reciclado, com densidades inferiores à dos agregados graúdos convencionais, também ocorreu partindo as frações que compõem o agregado graúdo, concluindo que a porosidade dos mesmos é um dos fatores responsáveis pela redução da resistência do material.

Assim, a tensão necessária para o rompimento do material com a fratura passando pelas frações de agregado graúdo, constituídas por grãos de escória, é menor do que a tensão necessária para o rompimento convencional que ocorre na interface entre a matriz e o agregado graúdo convencional. Portanto, a resistência à compressão será conseqüentemente menor.

#### *5.2.2.3. Traço 2 – 100% de escória e 50% de finos de minério*

As imagens de microscopia óptica para as regiões fraturadas dos corpos de prova referentes ao traço 2 são apresentadas na figura 40.

Figura 40: Microscopia óptica para o traço 2.



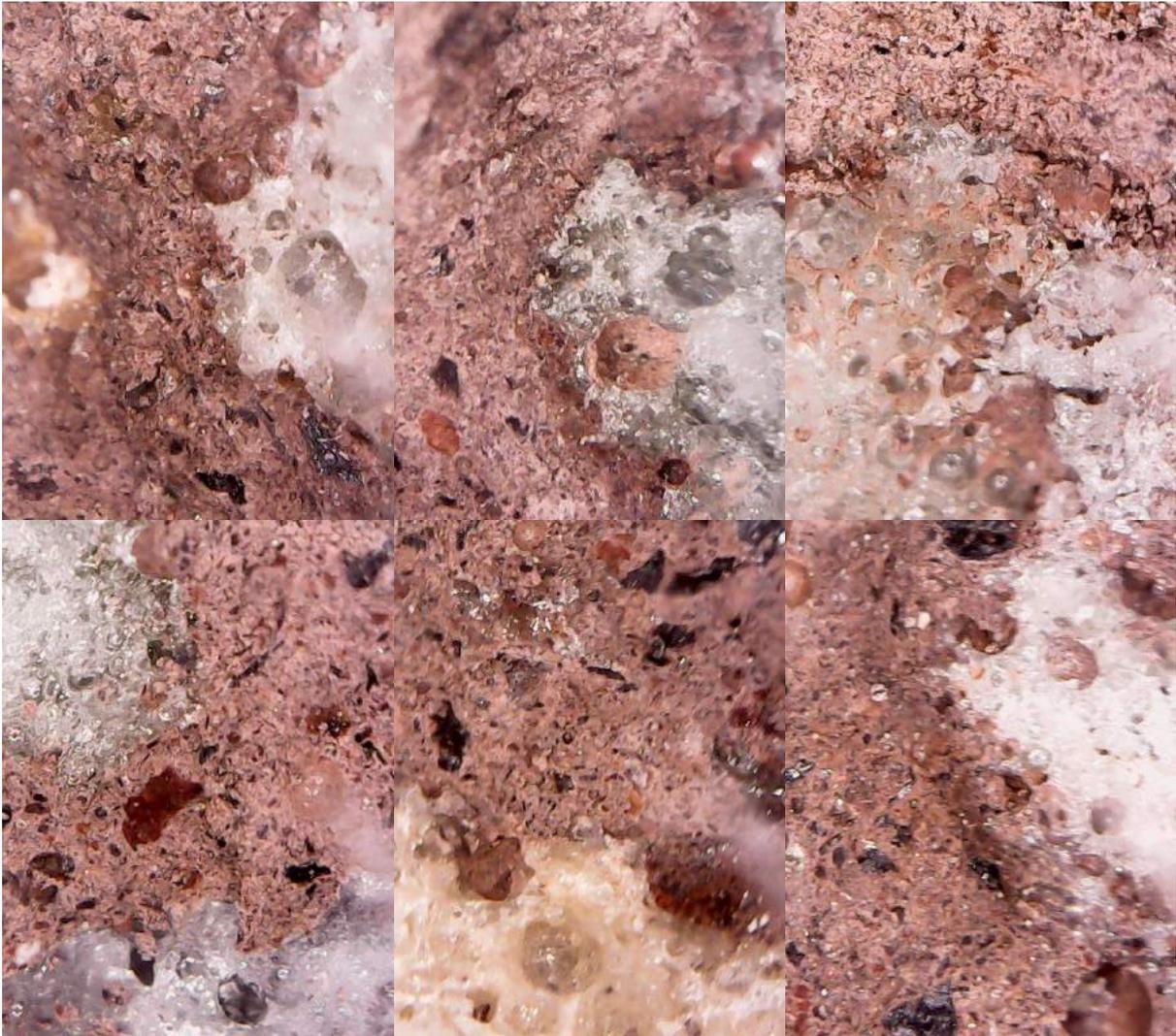
Fonte: Do autor, 2018.

O traço 2 é composto pela substituição total da fração da massa de agregado graúdo por escória e pela substituição de metade da massa de agregado miúdo por finos de minério. Nas imagens da figura 40, pode-se notar que as fraturas também ocorreram majoritariamente partindo as frações de escória, que constituíram as porções mais frágeis da massa, criando caminhos preferenciais para as fraturas. Observou-se também a formação de uma interface entre a fração constituída pela mistura de água, cimento, finos de minério e areia e a fração constituída por escória, sendo possível perceber uma mescla entre as duas frações em diversos pontos das fraturas, o que não foi observado no traço que usou finos de minério em sua composição. Logo após o rompimento dos corpos de prova desse traço, a escória também se mostrou desagregada, formando posteriormente uma estrutura aerada.

#### 5.2.2.4. Traço 3 – 100% de escória, 50% de pó de balão e 50% de finos de minério

As imagens de microscopia óptica para as regiões fraturadas dos corpos de prova referentes ao traço 3 são apresentadas na figura 41.

Figura 41: Microscopia óptica para o traço 3.



Fonte: Do autor, 2018.

O traço 3 é composto pela substituição total da fração da massa de agregado graúdo por escória e pela substituição de metade da massa de agregado miúdo por finos de minério e pela outra metade por pó de balão. Nas imagens da figura 41 é possível perceber que as fraturas também ocorreram majoritariamente partindo as frações de escória que no momento da ruptura se encontravam desagregadas. Da mesma forma que ocorreu nos traços 1 e 2, posteriormente a

escória formou estruturas aeradas como apresentado nas imagens. Também foi observada a formação de uma interface com a ocorrência de uma mescla entre as duas frações.

### 5.2.3. Massa

As tabelas 20 e 21 apresentam os resultados para as respectivas massas saturada e seca em triplicata para os quatro traços propostos.

Tabela 20: Massa saturada (kg) em triplicata para os quatro traços adotados.

Massa Saturada (kg)	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	5,34	5,36	5,28	5,33	0,03
Traço 1	3,56	3,54	3,46	3,52	0,04
Traço 2	4,04	4,04	4,02	4,03	0,01
Traço 3	3,70	3,70	3,72	3,71	0,01

Fonte: Do autor, 2018.

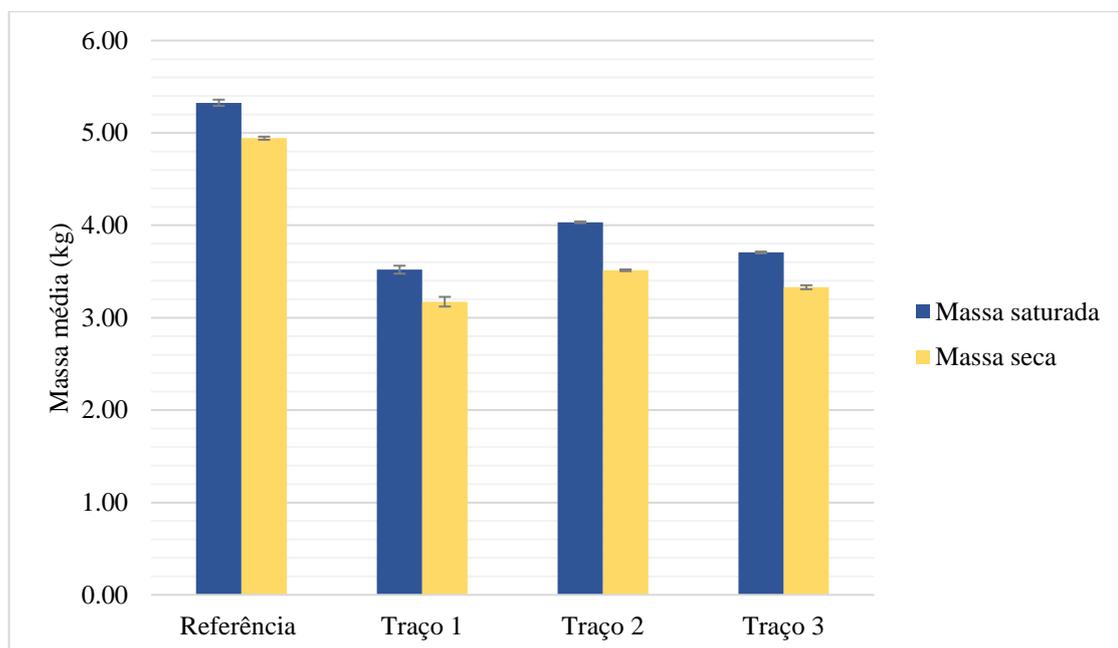
Tabela 21: Massa seca (kg) em triplicata para os quatro traços adotados.

Massa Seca (kg)	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	4,96	4,95	4,92	4,94	0,02
Traço 1	3,22	3,20	3,10	3,17	0,05
Traço 2	3,52	3,50	3,52	3,51	0,01
Traço 3	3,34	3,35	3,30	3,33	0,02

Fonte: Do autor, 2018.

O gráfico 14 apresenta as médias para as massas saturada e seca para blocos intertravados constituídos pelos os quatro traços propostos.

Gráfico 14: Média das massas saturada e seca (kg) para os quatro traços propostos.



Fonte: Do autor, 2018.

Observando-se as tabelas 20 e 21 e o gráfico 14, percebe-se que houve uma redução média das massas seca e saturada dos blocos de todos os traços que utilizaram resíduos. O traço 1, constituído pela substituição total da fração de agregado graúdo por escória e por metade da fração de agregado miúdo por pó de balão, apresentou a composição de menor massa, correspondendo a cerca de 66% da massa saturada e 64% da massa seca do bloco de referência o que corresponde a uma redução de massa de respectivamente 34% e 36%.

O traço 2 foi o que apresentou blocos com a maior massa, sendo ele constituído pela substituição total da fração de agregado graúdo por escória e por metade da fração de agregado miúdo por finos de minério. As médias de suas massas saturada e seca corresponderam respectivamente a cerca de 75% e 71% das massas médias do bloco de referência, representando uma redução na massa de respectivamente 25% e 29%.

Essa redução na massa dos traços que utilizam resíduos em sua composição em comparação com o traço de referência, pode ter ocorrido principalmente por causa da substituição da brita pela escória que é um material significativamente menos denso. Além disso, pode-se observar nas imagens apresentadas anteriormente, a estrutura aerada da escória que traz espaços vazios para a mistura. Além disso o fino de minério é mais denso que o pó de balão, incrementando a massa dos traços em que ele está presente.

A massa dos materiais é um fator negativo tendo em vista a questão de logística no transporte e armazenamento dos mesmos (ILOS, 2011). Sendo assim, a redução da massa dos blocos de concreto que utilizaram resíduos siderúrgicos em sua composição é um fator que pode ser considerado um fator positivo. Além disso, pode-se levar em consideração a possibilidade de aplicação do material para fins estruturais.

#### 5.2.4. Absorção de Água por Imersão

A tabela 22 apresenta os resultados para o teste de absorção de água por imersão em triplicata para os quatro traços propostos.

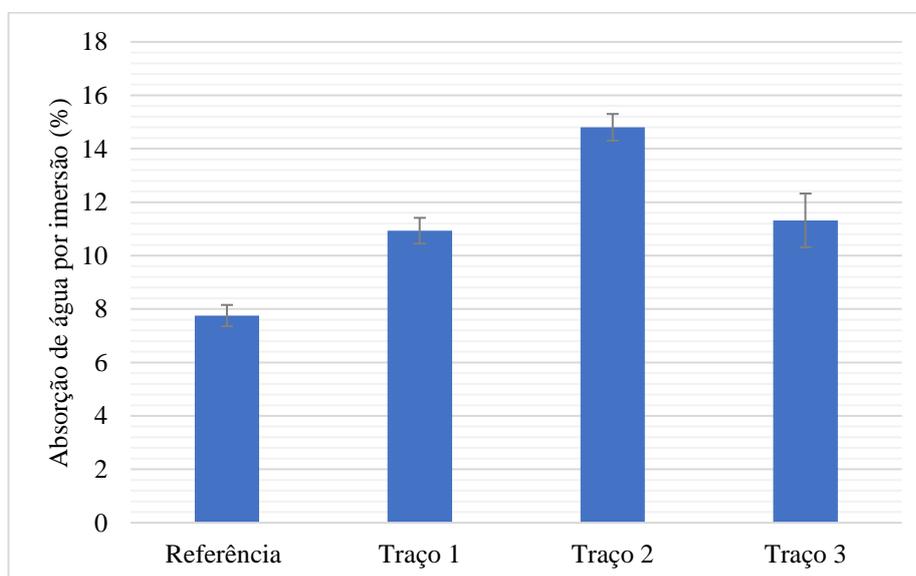
Tabela 22: Absorção de água por imersão (%) em triplicata para os quatro traços propostos.

Absorção de água por imersão (%)	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	7,66	8,28	7,32	7,75	0,40
Traço 1	10,56	10,63	11,61	10,93	0,48
Traço 2	14,77	15,43	14,20	14,80	0,50
Traço 3	10,78	10,45	12,73	11,32	1,01

Fonte: Do autor, 2018.

O gráfico 15 apresenta as médias dos resultados de absorção de água por imersão para os quatro traços propostos.

Gráfico 15: Absorção de água por imersão média (%) para os quatro traços propostos.



Fonte: Do autor, 2018.

Analisando os resultados para os ensaios de absorção de água por imersão, observa-se que os blocos de referência apresentaram a menor absorção. O traço 2 retornou a maior absorção com uma média de 14,80%, seguido do traço 3 com 11,32% e do traço 1 com 10,93%. Assim, a presença de finos de minério pode estar associada a maiores índices de absorção de água, além da existência de espaços vazios vinculados à estrutura aerada da escória, ressaltando ainda que a absorção de água por agregados graúdos convencionais pode ser considerada nula (CARRIJO, 2005).

#### 5.2.5. Índice de Vazios

A tabela 23 apresenta os resultados para o índice de vazios em triplicata para os quatro traços propostos.

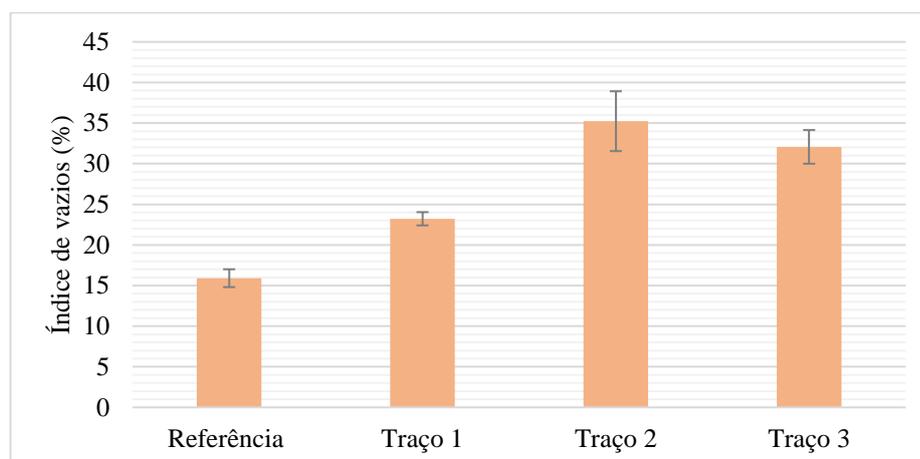
Tabela 23: Índice de vazios (%) em triplicata para os quatro traços propostos.

Índice de vazios (%)	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	17,43	15,41	14,88	15,91	1,10
Traço 1	22,97	22,37	24,32	23,22	0,82
Traço 2	33,77	40,30	31,65	35,24	3,68
Traço 3	30,51	30,70	35,00	32,07	2,07

Fonte: Do autor, 2018.

O gráfico 16 apresenta as médias dos resultados do índice de vazios para os quatro traços propostos.

Gráfico 16: Índice de vazios médio (%) para os quatro traços propostos.



Fonte: Do autor, 2018.

O traço de referência retornou o menor índice de vazios dentre os quatro traços propostos. O traço 2 apresentou o maior índice de vazios médio, de 35,24%, seguido pelo traço 3 e pelo traço 1 com seus respectivos 32,07% e 23,22%. Logo, não apenas a presença de escória, mas também a de finos de minério pode estar associada ao incremento do índice de vazios e, conseqüentemente, da absorção de água.

O maior índice de vazios encontrado no traço 2 contrapõe dados da literatura já apresentados, já que o mesmo retornou o maior valor médio para o ensaio de resistência à compressão. Então o uso de finos de minério pode trazer benefícios à mistura.

#### 5.2.6. Massa Específica

As tabelas 24 e 25 apresentam os respectivos resultados para as massas específicas seca e saturada, em triplicata, para os blocos constituídos pelos quatro traços propostos.

Tabela 24: Massa específica seca ( $\text{kg/m}^3$ ) em triplicata para os quatro traços propostos.

Massa específica seca	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	2,28	1,86	2,03	2,06	0,17
Traço 1	2,18	2,11	2,09	2,13	0,04
Traço 2	2,29	2,61	2,23	2,38	0,17
Traço 3	2,83	2,94	2,75	2,84	0,08

Fonte: Do autor, 2018.

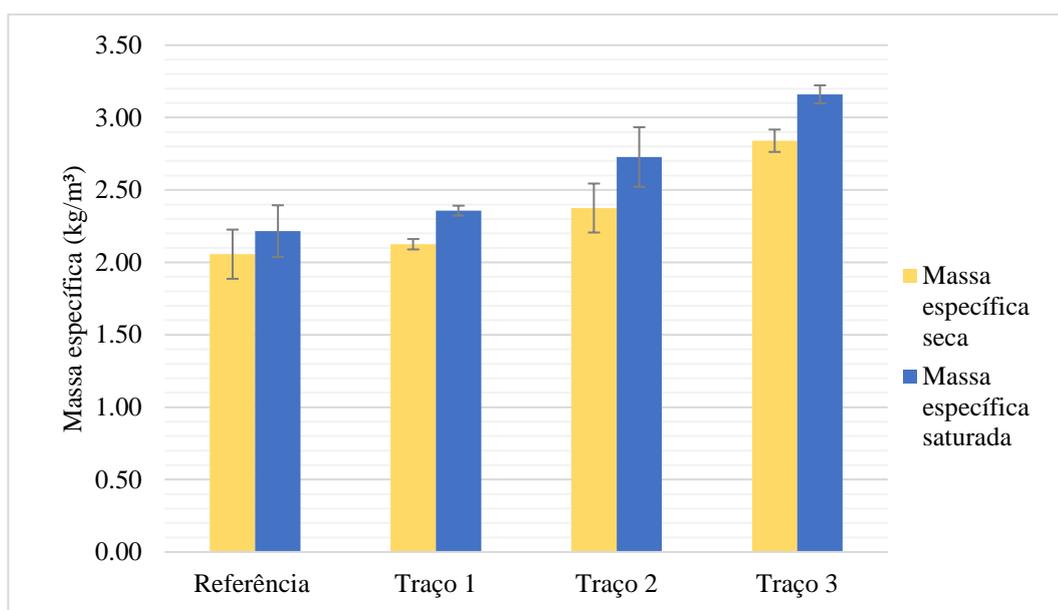
Tabela 25: Massa específica saturada ( $\text{kg/m}^3$ ) em triplicata para os quatro traços propostos.

Massa específica saturada	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão
Referência	2,45	2,02	2,18	2,22	0,18
Traço 1	2,41	2,33	2,34	2,36	0,03
Traço 2	2,62	3,01	2,54	2,73	0,21
Traço 3	3,14	3,25	3,10	3,16	0,06

Fonte: Do autor, 2018.

O gráfico 17 apresenta as médias das massas específicas seca e saturada para os quatro traços propostos.

Gráfico 17: Massas específicas médias seca e saturada (%) para os quatro traços propostos.



Fonte: Do autor, 2018.

Analisando os resultados para as massas específicas seca e saturada, é possível observar que apesar de possuir uma maior massa média, seca ou saturada, o traço de referência apresentou os menores valores para os parâmetros em questão, mesmo possuindo um percentual menor de espaços vazios. As maiores médias para massa específica foram encontradas no traço 3, seguido do traço 2 e do traço 1. Então, mesmo que os blocos que utilizam resíduos em sua constituição possuam uma massa menor para um mesmo volume, quando comparados ao traço de referência, eles possuem uma estrutura constituída pela matriz e pelos agregados miúdos mais densa, característica que é compensada pela baixa densidade da escória.

Possivelmente essa característica pode ser explicada pela atuação dos resíduos utilizados como agregados miúdos como filler, devido ao tamanho reduzido de suas partículas, possibilitando um maior preenchimento dos espaços vazios da fração constituída pela matriz aderida aos agregados miúdos e, conseqüentemente, no incremento da massa específica, mesmo que a massa permaneça menor.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, pode-se perceber que os resíduos sólidos escolhidos para o desenvolvimento do trabalho são causadores de diversos impactos ambientais, correntemente constituindo fonte de ônus não só para a indústria, mas para toda a sociedade. Apesar de existirem alguns contrapontos possíveis na utilização desses materiais, percebe-se que os mesmos têm grande potencial de aplicabilidade no ramo da construção civil, principalmente na pavimentação de superfícies, que atualmente demanda grandes volumes de matéria prima e exige processos degradantes para a produção, além de apresentarem durabilidade insuficiente para os usos a que são submetidos.

Com a análise das caracterizações dos resíduos utilizados, pode-se perceber que a constituição química dos mesmos se aproxima à dos agregados convencionalmente utilizados. Além disso, o pó de balão e os finos de minério são constituídos por partículas finas ou ultrafinas que podem proporcionar uma atividade pozolânica, bem como um efeito filler nas misturas de concreto. No entanto, percebe-se também que as mesmas tendem a se aglomerar em torrões maiores que são difíceis de desfazer, podendo gerar empacotamentos que prejudicam as propriedades do material almejado. Além disso, a escória utilizada no estudo é do tipo granulada, que é resfriada bruscamente ocasionando a sua vitrificação e a formação de bolhas de ar em seu interior, o que torna a sua estrutura aerada.

Os corpos de prova e os blocos intertravados produzidos apresentaram aspecto visual regular, com dimensões e formatos sem contrações, trincas ou laminações, com características satisfatórias similares às do produto comercial, apesar de terem apresentado um pequeno abatimento. Além disso, os resíduos conferiram diferentes colorações ao material.

A resistência à compressão média obtida aos 28 dias para os traços 1, 2 e 3 foram respectivamente de 21,77, 34,52 e 19,94 MPa. Sendo que os traços 1 e 2 contaram com a substituição de cerca de 77% dos agregados convencionais por resíduos e o traço 3 contou com a substituição de 100%. Assim, o traço 2 que contou com a substituição total do agregado graúdo por escória e de metade da massa de agregado miúdo por finos de minério retornou os melhores resultados quanto a resistência à compressão, com um valor próximo ao que pede a NBR 9781 (ABNT, 2013), que diz que blocos de concreto devem contar com uma resistência à compressão maior ou igual a 35 MPa para fins de tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais. Considerando países contam com uma maior experiência no uso desse tipo de pavimento e têm uma afinidade climática com o Brasil, a Austrália pede uma resistência à compressão de 35MPa para tráfego leve e 45MPa para tráfego pesado e a África do Sul pede

25MPa e 35MPa, respectivamente. Logo, o traço 2 está próximo de atender aos padrões inferiores brasileiro e australiano, bem como atende o padrão inferior africano, estando próximo a atender o superior.

Durante o ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova apresentaram, em sua maioria, fraturas periféricas finas na parte superior dos mesmos, assim, o uso do Neoprene em substituição à retificação e os pequenos abatimentos que trouxeram irregularidades à superfície superior dos corpos de prova podem ter sido fatores influenciaram negativamente os valores obtidos para a resistência à compressão dos traços propostos.

Além disso, observou-se que as fraturas partiram as frações constituídas por grãos de escória majoritariamente, que na ocasião do rompimento se apresentaram como material desagregado, posteriormente formando um material aerado e frágil. Isso demonstra que as frações constituídas por escória, utilizada como material substituto do agregado graúdo constituíram a parte mais frágil da massa. Assim, a tensão necessária para o rompimento do material com a fratura passando pelas frações de agregado graúdo, constituídas por grãos de escória, é menor do que a tensão necessária para o rompimento de material constituído por uma composição de referência, que ocorre na interface entre a matriz e o agregado graúdo convencional. Portanto, a resistência à compressão será conseqüentemente menor.

As massas seca e saturada dos blocos que utilizam resíduos siderúrgicos em sua constituição foram consideravelmente menores do que as massas do bloco de referência, com uma redução respectiva de 34% e 36% para o traço 1 e de 25% e 29% para o traço 2. Essa redução é um fator positivo tanto para a logística no transporte e armazenamento dos blocos, quanto para a possibilidade de aplicação do material para fins estruturais.

Os traços que contam com o uso de resíduos em sua constituição também contaram com uma maior absorção de água e com um maior índice de vazios, sendo que o traço 2 retornou valores superiores em relação aos traços 1 e 3. Isso contrapõe o resultado mais satisfatório para resistência à compressão obtida para o traço 2, já que a literatura coloca que quanto maior for o índice de vazios, menor será a resistência à compressão. Esses resultados indicam que a presença de finos de minério pode estar relacionada tanto a maior resistência à compressão quanto ao maior índice de vazios. Além disso, a porosidade do agregado graúdo também é um dos fatores responsáveis pela redução da resistência do material, sendo mais um dos fatores que demonstram que o uso da escória em substituição ao agregado graúdo convencional acarreta a redução da resistência à compressão, apesar de diminuir o peso do material.

Analisando os resultados para as massas específicas seca e saturada, é possível observar que apesar de possuir uma maior massa média, seca ou saturada, o traço de referência

apresentou os menores valores para os parâmetros em questão, mesmo possuindo um percentual menor de espaços vazios. As maiores médias para massa específica foram encontradas no traço 3, seguido do traço 2 e do traço 1. Então, mesmo que os blocos que utilizam resíduos em sua constituição possuam uma massa menor para um mesmo volume, quando comparados ao traço de referência, eles possuem uma estrutura constituída pela matriz e pelos agregados miúdos mais densa, característica que é compensada pela baixa densidade da escória.

Provavelmente o pó de balão e dos finos de minério atuaram como filler na mistura possibilitando um preenchimento de espaços vazios mais efetivo da fração formada pela matriz aderida aos agregados miúdos, já que mesmo que os traços constituídos por resíduos tenham apresentado massas inferiores à referência, as massas específicas são superiores. Além disso, o traço 3 que conta com uma substituição total do agregado fino por resíduos apresentou a massa específica mais elevada. Essa diferença entre massa e massa específica é possibilitada pela existência de espaços vazios causados pela estrutura aerada da escória.

Assim, mesmo que os traços constituídos por resíduos tenham retornado valores de resistência à compressão menores que os de referência, existe uma gama de aplicações para o material desenvolvido que é mais leve e mais barato que os convencionais. Com o uso desses materiais para a fabricação de blocos intertravados, um resíduo que gera diversos impactos, poderá ser transformado em insumo empregado na fabricação concreto para fins de pavimentação e estruturais, agregando valor social, econômico e ambiental ao seu reaproveitamento. Assim, torna-se possível a redução da carga ambiental e a pressão sobre os recursos naturais explorados, além da criação de emprego e renda para a população do entorno das siderúrgicas e da oferta de um produto economicamente mais acessível.

## 7. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Algumas alterações metodológicas poderiam ter retornado em resultados mais satisfatórios quanto a resistência à compressão. Assim são sugeridos alguns temas para investigações futuras.

Inicialmente, percebeu-se que a substituição do agregado graúdo por escória foi um dos principais fatores que contribuíram para os resultados dos ensaios de resistência à compressão. Então, sugere-se a substituição da escória granulada pela escória cristalizada que possui uma estrutura mais compacta e maciça. Além disso, é possível que o uso da escória granulada processada como agregado fino possa retornar bons resultados.

Além disso, é possível perceber que o pó de balão e os finos de minério formam aglomerados que são difíceis de romper, podendo trazer prejuízos aos resultados. Essa situação possivelmente pode ser contornada coletando os resíduos ainda secos, antes da disposição dos mesmos nos pátios a céu aberto. Isso pode ser feito de maneira viável e econômica em maior escala, realizando o transporte desses resíduos do estoque diretamente para a produção dos blocos em vez de fracionar o transporte, como geralmente é feito.

Sugere-se a realização de estudos que variem a relação água/cimento nos traços buscando uma mais adequada, já que as características dos resíduos são distintas das dos agregados convencionais, resultando em demandas de água para o amassamento diferentes.

A realização de estudos com mais variações de dosagens e combinações de resíduos, bem como o uso de agregado graúdo convencional também pode retornar resultados satisfatórios.

A realização dos ensaios de resistência à abrasão e de difratometria de raios-x também seriam de grande valia para a linha de estudo.

Por fim, outra proposta de estudo futura é utilizar dos meios da prototipagem e da impressão 3D para criar um molde para blocos intertravados que busque formas e encaixes que reduzam a probabilidade de fraturas e deslocamentos em vias, possibilitando uma maior resistência do conjunto de blocos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7207 - Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007 – Amostragem de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004 - Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5733 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9780 – Peças de Concreto para Pavimentação - Determinação de Resistência à Compressão (Norma em revisão). 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial, 1991.
- ARISTIMUNHO, Peterson Benites. AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO NA FORMA DE PÓ EM ARGAMASSA, Tese. 2010
- BARTHOLOMEU, D.B. Quantificação dos impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz“, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- CARRIJO, Priscila Meireles. Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção civil e demolição no desempenho mecânico do concreto. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- CIA. World FactBook. Disponível em <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>. Data de acesso: novembro de 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT. Boletim econômico. Brasília, jan. 2018. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br>> Acesso em: 01 mai. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT. Pesquisa rodoviária 2017: relatório gerencial. Brasília, 2017. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 01 mai. 2018.

FILHO, J,N,S. Estudos De Reaproveitamento Dos Resíduos Das Barragens De Minério De Ferro Para Uso Na Pavimentação De Rodovias E Fabricação De Blocos Intertravados. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. Brasil. 2013

FREIRE, Carolina Braccini. Utilização de Resíduos da Exploração de Itabiritos em Pavimentos Intertravados. Tese, 2012.

GEYER, Regeane; Maria Tubino. Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. UFRS. Porto Alegre, RS. Brasil. 2001 Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/1508>> Acesso em 08 de Abril de 2018.

ILOS. Panorama Logística Verde – Iniciativas de sustentabilidade ambiental das empresas no Brasil. Rio de Janeiro, 2011.

ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil d Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo. 2007.

LOBATO, N.C.C. GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. UFMG. Belo Horizonte, MG. Brasil. 2014.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MILANEZ, B.; PORTO, M.F. A ferro e fogo: impactos da siderurgia para o ambiente e a sociedade após a reestruturação dos anos 1990. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, 4, Brasília, 2008.

MONTINI, Marcelo. Aplicação de resíduos de bauxita e cinza pesada da indústria do alumínio na fabricação de cimento Portland – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. UFSCAR. São Carlos, SP. Brasil, 2009.

OLIVEIRA, Míriam Regina Cardoso; MARTINS, Jader – Caracterização e classificação do resíduo sólido “pó de balão”, gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal:- Estudo de caso na região de Sete Lagoas/MG-Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. UFOP. Ouro Preto, MG. Brasil. Acesso em 5 de Abril de 2018.

PEIXOTO, R. A. F. et al. Estudo do comportamento das propriedades microestruturais, ambientais, físicas e mecânicas do concreto dosado a partir da reciclagem de resíduos sólidos de siderurgia e suas aplicações em Obras sociais e de arte corrente de engenharia. Revista DOXA, Coronel Fabriciano, v.7, 09 nov. 2005.

PEDROZO P. H.; LEITE M. B.; DAL MOLIN D.C.C. Technical viability study of the use of construction and demolition waste to concrete production. CIB Symposium on construction & environment: theory into practice. Global Seven Editora Ltda.São Paulo, 2000.

PEREIRA, E. A C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. Metalurgia & Metais. 1995.

FILHO, Joaquim Nery Sant'ana. Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. CEFET-MG. Belo Horizonte, MG. Brasil. 2013.

SILVA, M. J., Elementos de concreto para pavimentação produzidos com agregados de escória de aciaria. 2005. 163f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

SILVA, J.N.S. Siderurgia. Escola Técnica Aberta do Brasil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Belém, PA. Brasil. 2011.

SILVA SANTOS, D. M.; GONÇALVES, S. S.; MOCBEL, E. B. B.; BARBOSA, A. C. C.; Fagury Neto, E. Estudo das propriedades físico-mecânicas de cerâmicas argilosas incorporadas com pó de despoeiramento e sua viabilidade na fabricação de peças para alvenaria. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Instituto de Geociências e Engenharias. Faculdade de Engenharia de Materiais. Artigo apresentado na I Semana Acadêmica de Engenharia Mecânica. Marabá, 2015.

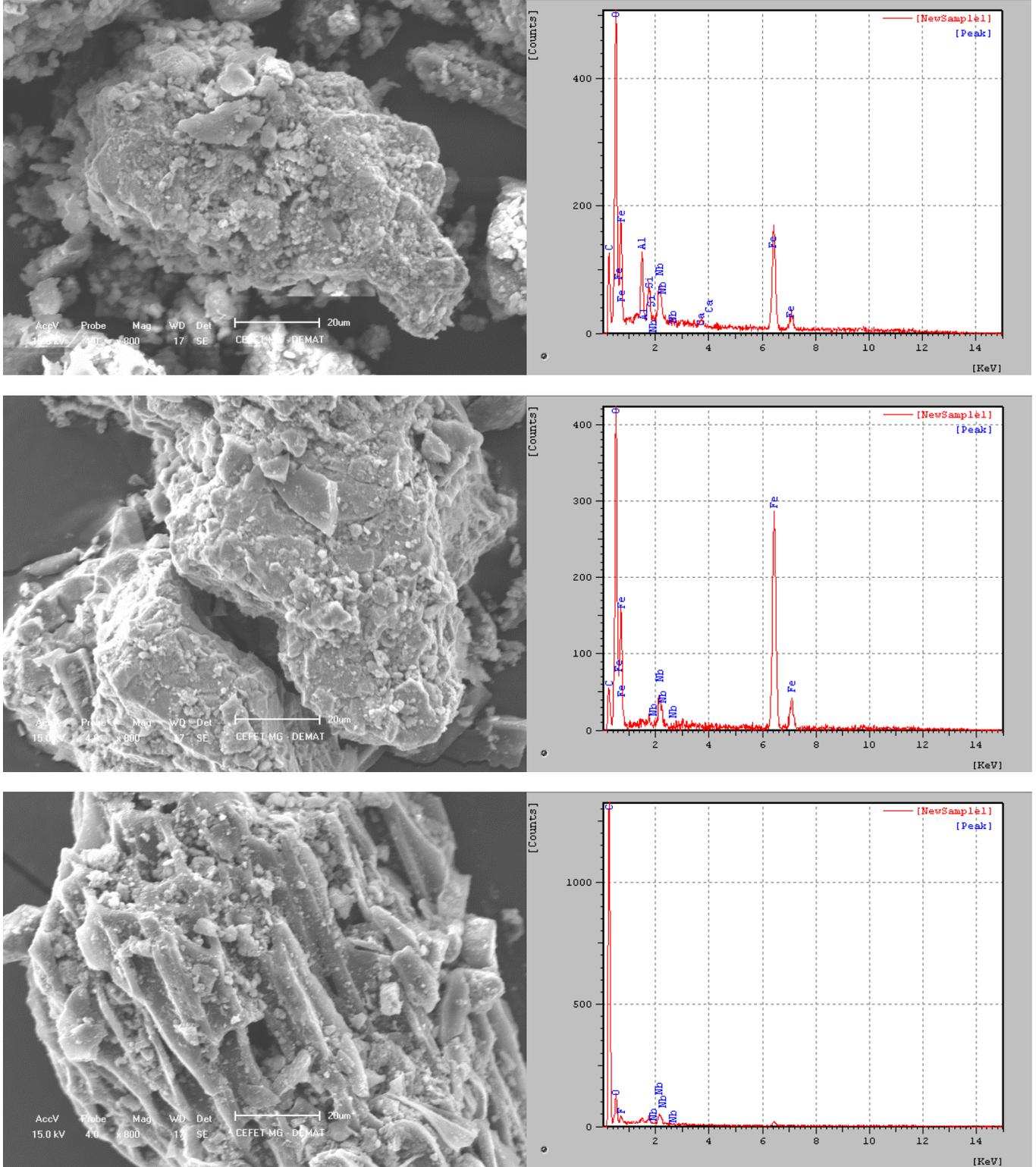
SINDIFER. Anuário 2016. 2016, Sindicato das Indústrias do Ferro no Estado de Minas Gerais. Disponível em <[http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario\\_2016.pdf](http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario_2016.pdf)>. Acesso em: abril de 2018.

SMITH, D. R., Grand Entrances. Interlocking Concrete Pavement Magazine. v.10, n.2, 2003.

ZHANG, B. Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue. Cement and concrete research. V.2, 1998, pp. 699-711.

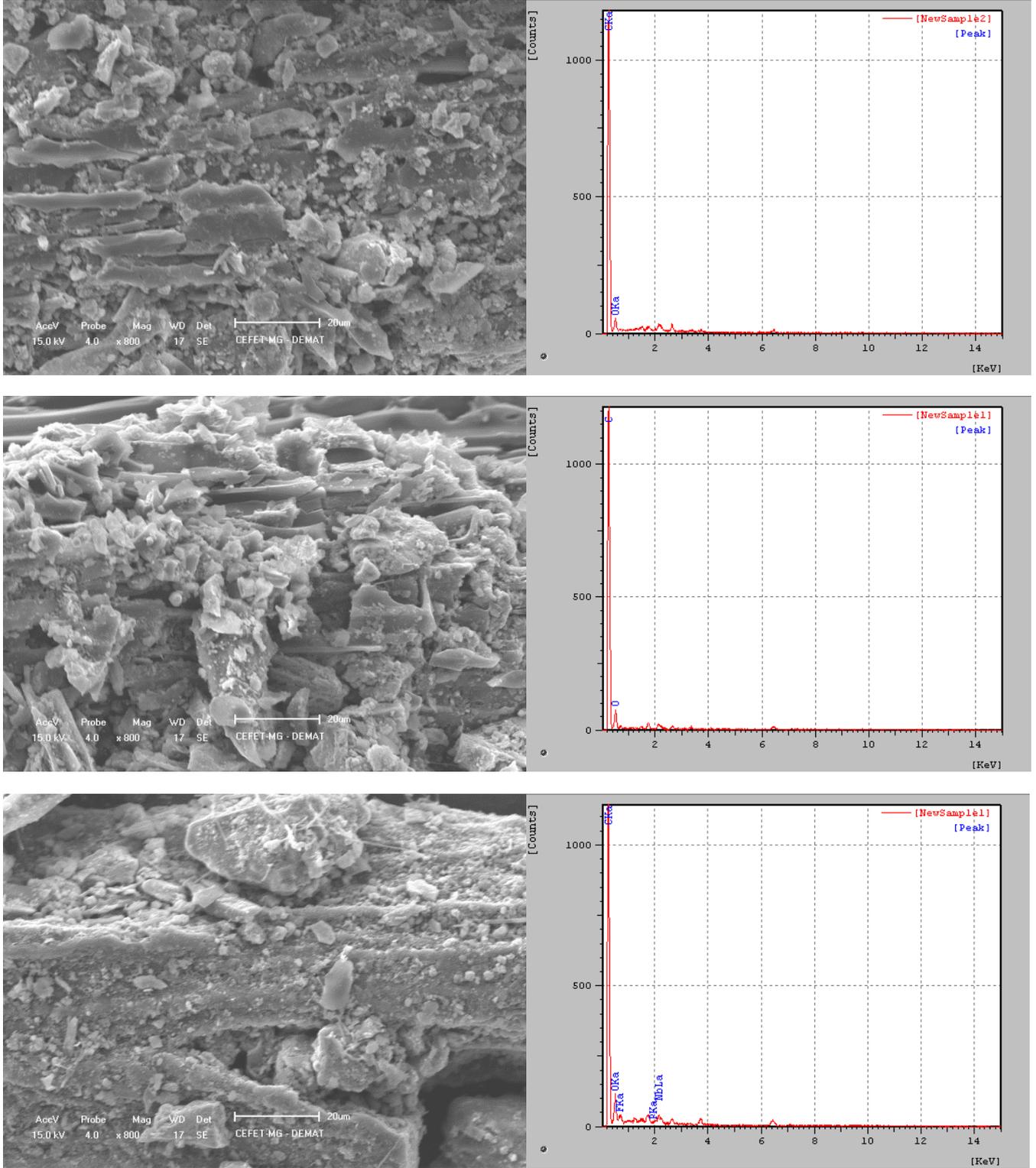
### ANEXO 1

Morfologia dos grânulos de pó de balão com aumento de 800 vezes e respectivos espectros EDS em três regiões distintas da primeira amostra.



Fonte: do autor.

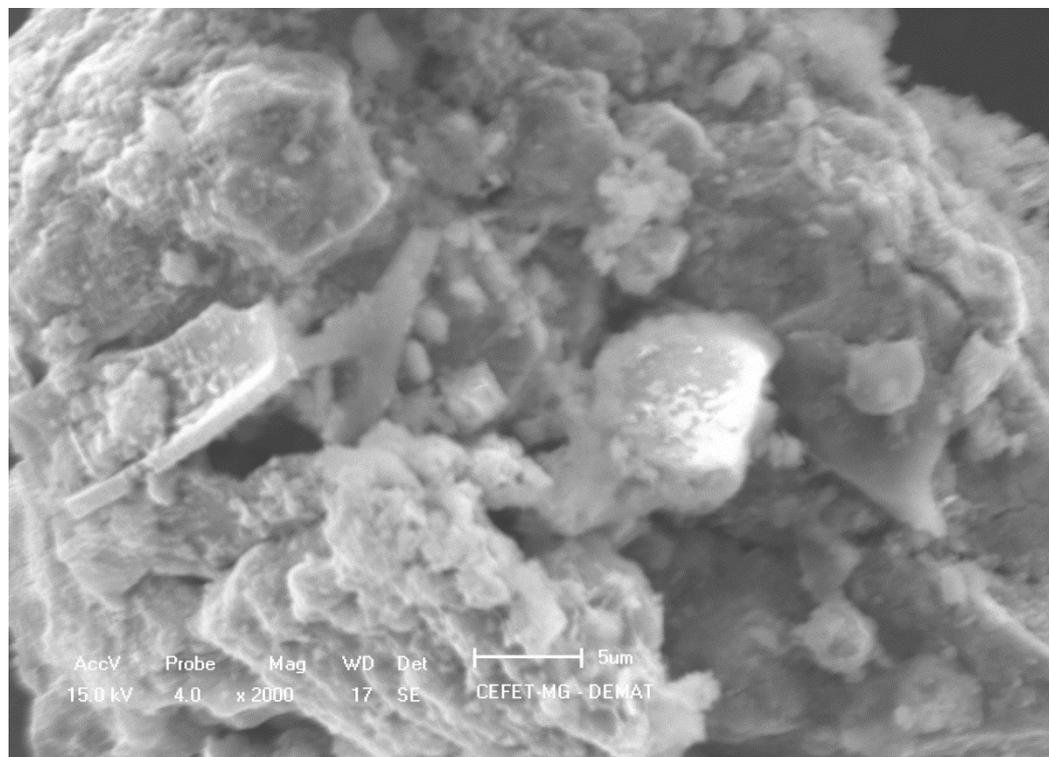
Morfologia dos grânulos de pó de balão com aumento de 800 vezes e respectivos espectros EDS em três regiões distintas da segunda amostra.



Fonte: do autor.

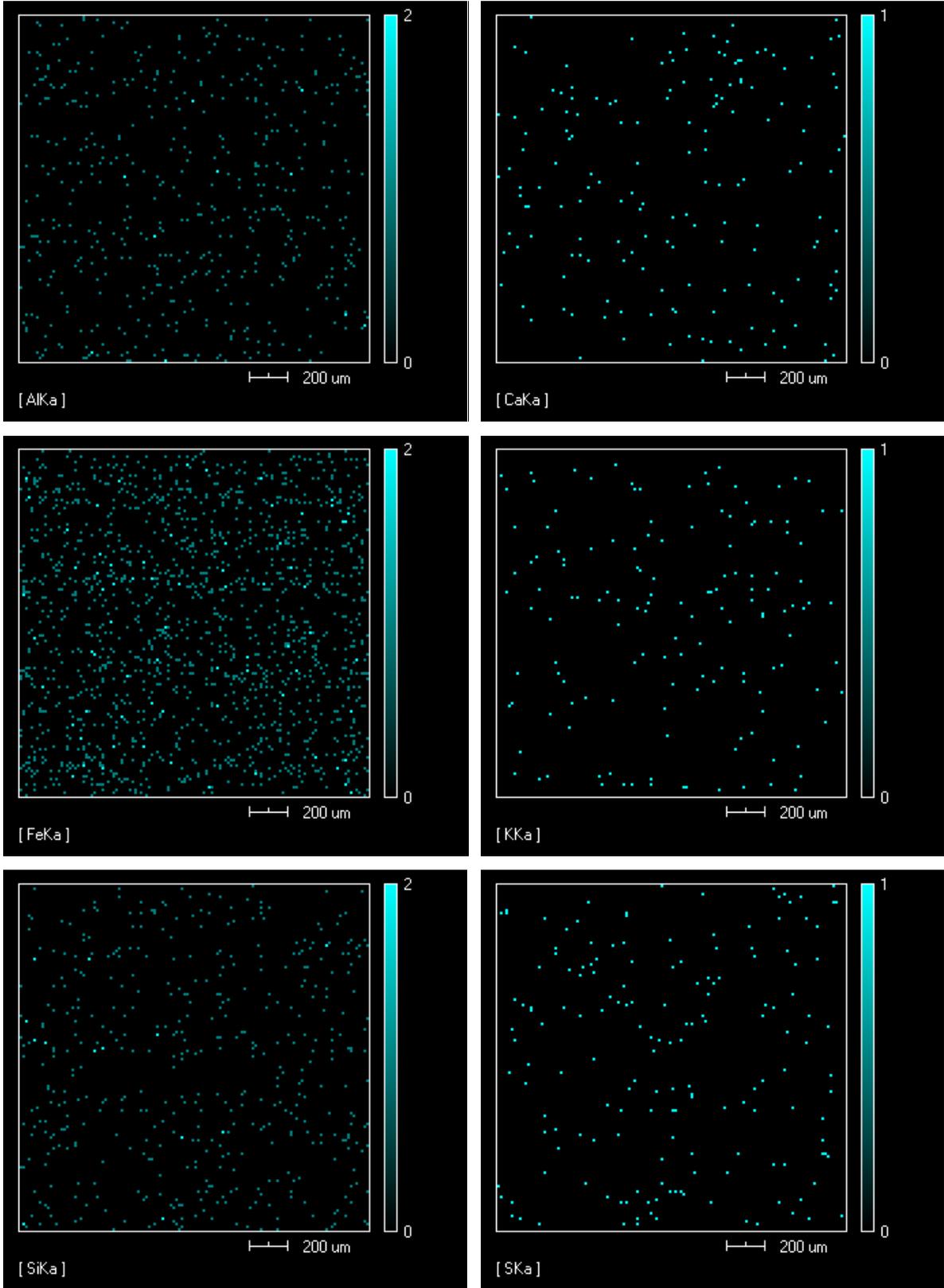
## ANEXO 2

Morfologia dos grânulos de pó de balão com aumento de 2000 vezes para a primeira amostra.



Fonte: do autor.

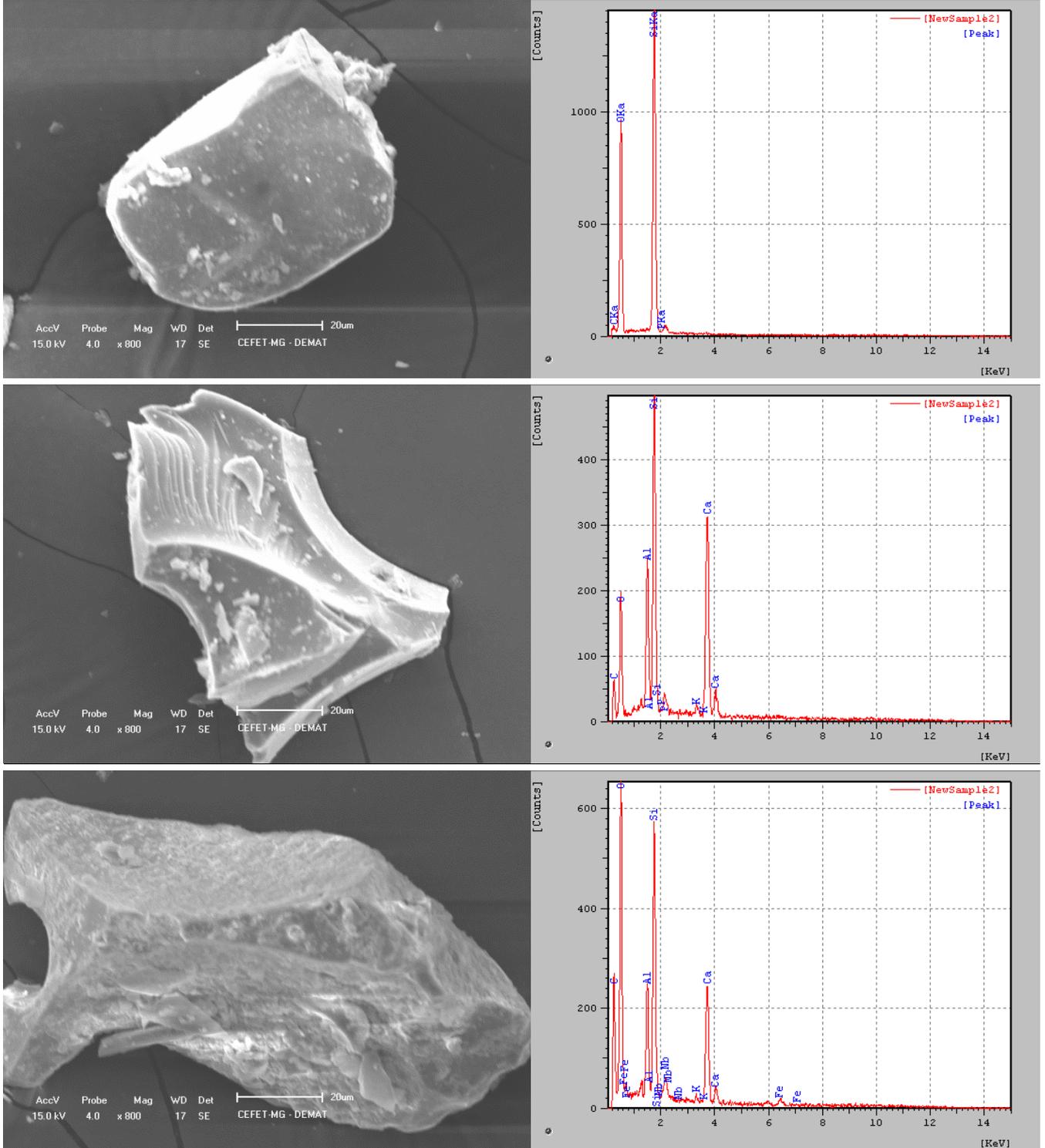
Mapa de composição da imagem com aumento de 2000 vezes para a primeira amostra.



Fonte: do autor.

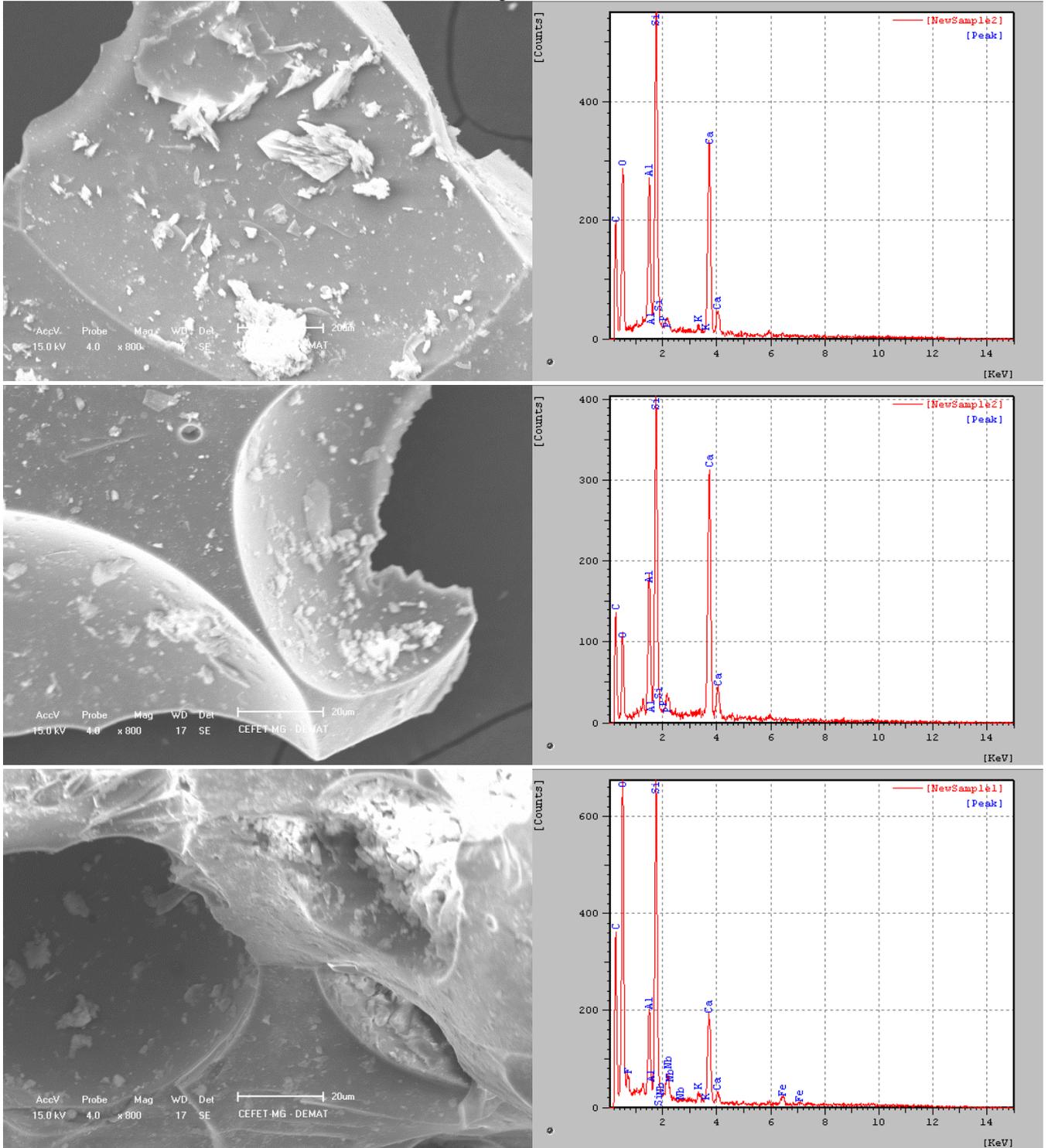
### ANEXO 3

Morfologia dos grânulos de escória com aumento de 800 vezes e respectivos espectros EDS em três regiões distintas da primeira amostra.



Fonte: do autor.

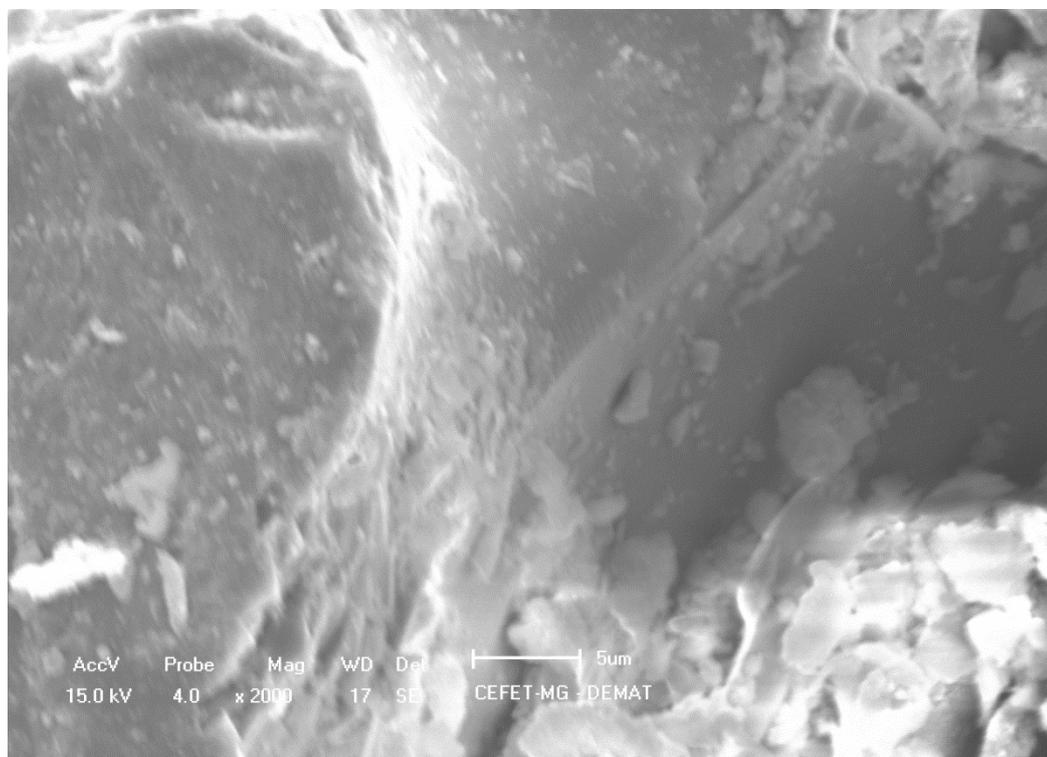
Morfologia dos grânulos de escória com aumento de 800 vezes e respectivos espectros EDS em três regiões distintas da segunda amostra.



Fonte: do autor.

## ANEXO 4

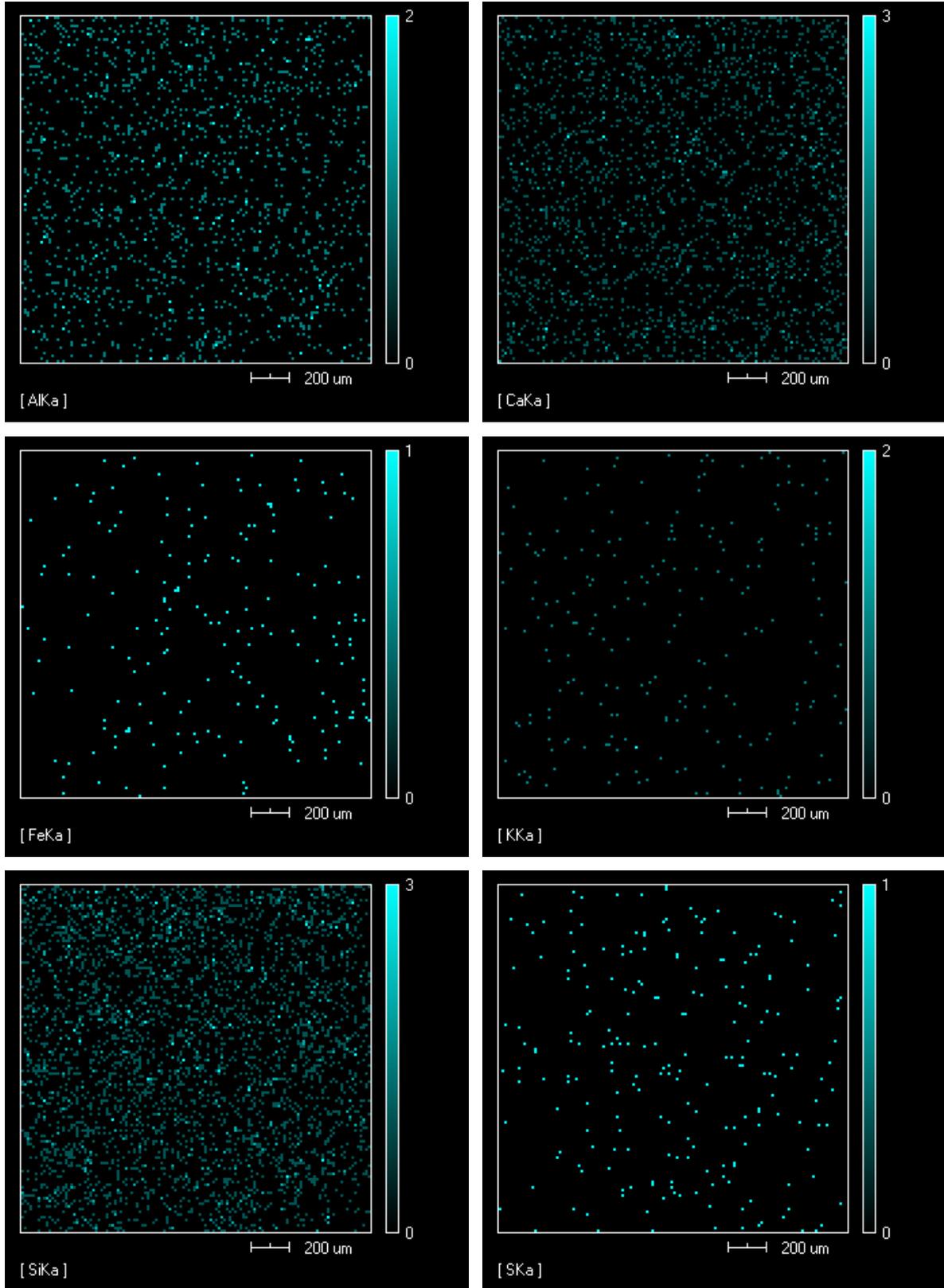
Morfologia dos grânulos de escória com aumento de 2000 vezes para a segunda amostra.



Fonte: do autor.

### ANEXO 5

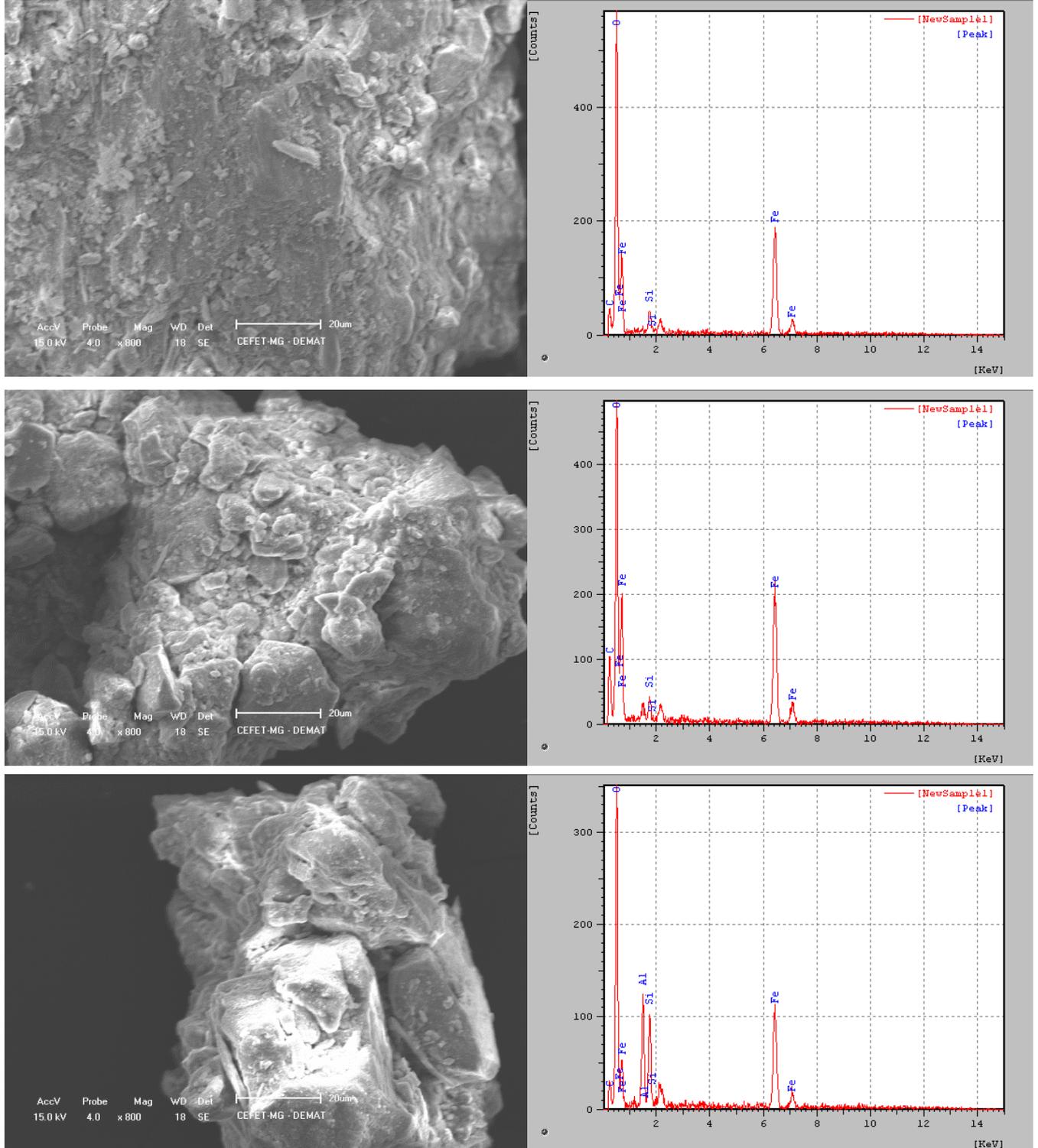
Mapa de composição da imagem com aumento de 2000 vezes para a segunda amostra.



Fomte: do autor.

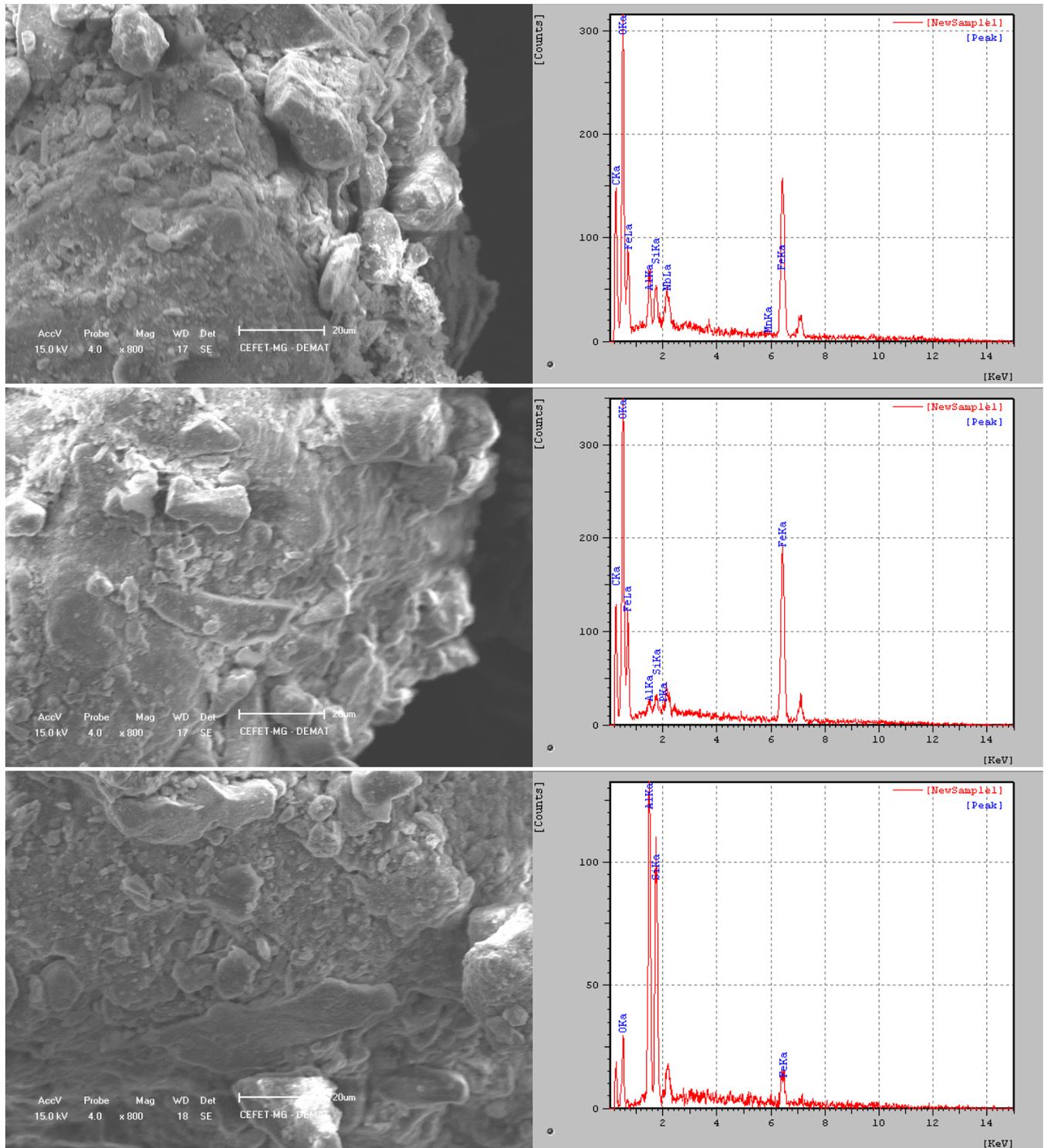
## ANEXO 6

Morfologia dos grânulos de finos de minério com aumento de 800 vezes e respectivos espectros EDS em três regiões distintas da primeira amostra.



Fonte: do autor.

Morfologia dos grânulos de finos de minério com aumento de 800 vezes e respectivos espectros EDS em três regiões distintas da segunda amostra.



Fonte: do autor.