

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

CLEBER LUIS PEDROSO

**COMPÓSITOS À BASE DE REJEITO DO MINÉRIO DE FERRO,
RESÍDUO DE CONCRETO, RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE
CELULOSE E RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA CAL**

TESE

CURITIBA

2020

CLEBER LUIS PEDROSO

**COMPÓSITOS À BASE DE REJEITO DO MINÉRIO DE FERRO,
RESÍDUO DE CONCRETO, RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE
CELULOSE E RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA CAL**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Profº Dr. Vsévolod Mymrine

Co-orientador: Profº Dr. Alfredo Iarozinski Neto

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Pedroso, Cleber Luis

Compósitos à base de rejeito do minério de ferro, resíduo de concreto, resíduos da produção de celulose e resíduo da produção da cal [recurso eletrônico] / Cleber Luis Pedroso.-- 2020.

1 arquivo texto (144 f.): PDF; 13 MB.

Modo de acesso: World Wide Web

Título extraído da tela de título (visualizado em 14 abr. 2020)

Texto em português com resumo em inglês

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020

Bibliografia: f. 133-144

1. Engenharia civil - Teses. 2. Redução de resíduos. 3. Minérios de ferro - Resíduos - Reaproveitamento. 4. Resíduos industriais - Aspectos ambientais. 5. Sustentabilidade e meio ambiente. 6. Desenvolvimento econômico - Aspectos ambientais. 7. Construção civil - Inovações tecnológicas. 8. Papel - Indústria - Reaproveitamento. 9. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 10. Resíduos como material de construção. 11. Materiais de construção. I. Mymrine, Vsévolod. II. Iarozinski Neto, Alfredo. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: ed. 23 – 624

TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº 11

A Tese de Doutorado intitulada: **Compósitos à Base De Rejeito Do Minério De Ferro, Resíduo De Concreto, Resíduos Da Produção De Celulose E Resíduo Da Produção Da Cal**, defendida em sessão pública pelo candidato **Cleber Luis Pedroso**, no dia 09 de março de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração: Construção Civil, linha de pesquisa: Materiais E Componentes De Construção, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Ph.D. Vsévolod Mymrine- Presidente - UTFPR

Prof^a. Dr^a. Elizabete Yukiko Nakanishi - UFPR

Prof^a. Dr^a. Maria Jose Jerônimo de Santana Ponte - UFPR

Prof^a. Dr^a. Sonia Zanello Broska - UTFPR

Prof.Dr. Rodrigo Eduardo Catai - UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. DSc. Vsévolod Mymrine, e ao co-orientador Prof. DSc. Alfredo Iarozinski Neto, por todo apoio, dedicação e comprometimento que tiveram durante o desenvolvimento desta tese.

Ao laboratório de materiais do DACOC – UTFPR, especial agradecimento ao técnico de laboratório Felipe Perreto, aos bolsistas Jair Arrieta e Mônica A. Avanci pela disponibilidade no auxílio de centenas de corpos de prova. O trabalho de vocês é fundamental, para que a pesquisa tecnológica ocorra.

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM, UTFPR especial agradecimento ao Tecnólogo, Técnico Alexandre José Gonçalves, por seu apoio técnico exemplar na realização dos ensaios de MEV e EDS.

Ao Laboratório de Minerais e Rochas - LAMIR da UFPR, que nessa pesquisa teve fundamental importância para a realização dos ensaios de FRX e DRX, concedendo desconto financeiro no pagamento dos mesmos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família pelo imenso carinho e incentivo incondicional, pois souberam entender, que minha ausência por inúmeras vezes, inclusive nos sábados e domingos destes últimos anos se fez necessário para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

PEDROSO, Cleber L. Compósitos à base do rejeito de minério de ferro, resíduo de concreto, resíduos de produção de celulose e resíduo de produção da cal. 2020. 144f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

A presente tese refere-se ao desenvolvimento de novos compósitos para a construção civil, utilizando como matérias-primas o resíduo do minério de ferro (RMF), resíduos de concreto (RC), resíduos da produção da cal (RPC) e resíduos da produção de celulose (RPCCEL), todos estes com elevada alcalinidade, sobre tudo o RMF com pH 10,21 proveniente da barragem denominada “Fundão” do município de Mariana MG. Realizou-se os ensaios de DRX, MEV e EDS para explicar o considerável ganho de resistência, acompanhando as mudanças das propriedades mecânicas, estruturas morfológicas e os processos físico-químicos de formação de novas estruturas. Durante o intervalo de tempo de 720 dias, foi utilizado 1045 corpos de prova, distribuídos em 19 composições para a realização dos ensaios de: resistência à compressão, coeficiente de resistência a água, absorção de água por imersão e coeficiente de expansão linear, atendendo as exigências das normas brasileiras. As composições de número 16 e 17 destacaram-se, visto que as suas propriedades são as mais satisfatórias dentre as demais obtendo suas resistências à compressão de 4,07MPa e 6,92MPa aos 28 dias de cura comprovando a formação das estruturas dos novos materiais. O aumento dos valores das propriedades mecânicas observadas durante a cura ocorre em função da neutralização e dissolução das superfícies agora com baixa alcalinidade com potencial hidrônico pouco acima de 7,50 ocasionando a síntese das novas formações amorfas e cristalinas. Os resultados desta tese permitem concluir que estes resíduos industriais associados, utilizados em materiais de construção civil, contribuem para diminuir a extração de recursos naturais, além de propiciar uma destinação correta aos resíduos depositados inadequadamente, oferecendo perigo constante ao meio ambiente e a sociedade que vive ao seu entorno. Ainda para comprovar a eficiência da composição 17 foi realizado a moldagem de dois materiais de construção em tamanho real.

Palavras-chave: Rejeito de Minério de Ferro, Celulose, Cal e Concreto.

ABSTRACT

PEDROSO, Cleber L. Composites based on iron ore tailings, concrete residues, cellulose residues, lime residues. 2020. 144f. Doctoral Thesis - Graduate Program in Civil Engineering - PPGEC, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2020.

The present thesis refers to the development of new composites for civil construction, using as raw materials concrete waste (RC), waste from lime production (RPC), waste from cellulose production (RPCEL) and waste from ore iron (RMF), all of them with high alkalinity, above all RMF with pH 10.21 from the dam called "Fundão" in the municipality of Mariana MG. XRD, SEM and EDS tests were performed to explain the considerable resistance gain, following changes in mechanical properties, morphological structures and the physical-chemical processes of formation of new structures. During the period of 720 days, 1045 specimens were used, distributed in 19 compositions for the performance of the tests of: compressive strength, water resistance coefficient, water absorption by immersion and linear expansion coefficient, meeting the requirements Brazilian standards. The compositions number 16 and 17 stood out, since their properties are the most satisfactory among the others, obtaining their compressive strengths of 4.07MPa and 6.92MPa at 28 days of curing, proving the formation of the structures of the new materials. The increase in the values of the mechanical properties observed during the curing occurs due to the neutralization and dissolution of the surfaces now with low alkalinity with hydrogenic potential just above 7.50, causing the synthesis of the new amorphous and crystalline formations. Also to prove the efficiency of the composition 17, two real-size building materials were molded. The results of this thesis allow us to conclude that these associated industrial wastes, used in civil construction materials, contribute to reduce the extraction of natural resources, in addition to providing a correct destination for waste that is improperly deposited, offering constant danger to the environment and the society that lives around it. its surroundings.

Keywords: Waste Iron Ore, Cellulose, Lime and Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Artigos científicos localizados pela base de dados Scopus	19
Figura 2 - interligação dos artigos científicos e suas co-citações gerados pelo software VOSviewer.	19
Figura 3 - Geração de resíduos dregs, grits e lama de cal no Brasil – 1998 a 2011 .	38
Figura 4 – Fluxograma da metodologia de realização dos ensaios.....	51
Figura 5 - Resíduo de minério de ferro (RMF).....	54
Figura 6 - Resíduo de Concreto (RC).....	55
Figura 7 - Resíduo da Produção da Cal (RPC	55
Figura 8 - Resíduo da produção de celulose (Dregs).....	55
Figura 9 - Resíduo da produção de celulose (Grits	55
Figura 10 - Resíduo da produção de celulose (Lama de Cal)	55
Figura 11 – Conjunto de molde metálico c/ diâmetro e altura de 20mm.....	57
Figura 12 - Prensa manual: Capacidade 10Ton	57
Figura 13 - Balança digital: mod. AD2000	57
Figura 14 - Corpos de prova confeccionados com resíduos	57
Figura 15 – Difratoograma dos elementos mineralógicos do RMF através do DRX ...	69
Figura 16 - Estrutura morfológica do resíduo RMF através do MEV e análise através do EDS.....	70
Figura 17 – Granulometria do RMF	72
Figura 18 – Difratoograma do RC através do DRX.....	74
Figura 19 - Estrutura morfológica RC através do MEV e análise micro-química EDS	75
Figura 20 Granulometria do RC	77
Figura 21 Difratoograma do RPCEL através do DRX.....	79
Figura 22 – Estrutura morfológica RPCEL através do MEV e análise micro-química EDS.....	80
Figura 23 – Granulometria do RPCEL.....	83
Figura 24 – Difratoograma do RPC através do DRX.....	85
Figura 25 - Estrutura morfológica (geometria externa) do RPC através do MEV e análise através do EDS.....	86
Figura 26 - Granulometria RPC.....	88
Figura 27 - Resistência a compressão uniaxial das composições 16 e 17	92
Figura 28 Coeficiente de Resistência à Água com 28 e 90 Dias de Cura	93
Figura 29 - Absorção de Água dos CPs com 28 e 90 Dias de Cura.....	95
Figura 30 Expansão ou retração linear das amostras durante o período de cura	97
Figura 31 – Difratoograma da mistura inicial da composição 16 através do DRX.....	99
Figura 32 – Difratoograma da composição 16 através do DRX - 3 dias de idade	101
Figura 33 – Difratoograma da composição 16 através do DRX - 180 dias de idade.	103
Figura 34 – Difratoograma da composição 16 através do DRX - 720 dias de idade.	104
Figura 35 – Difratoograma da mistura inicial da composição 17 através do DRX.....	105
Figura 36 – Difratoograma da composição 17 através do DRX - 3 dias de idade.....	107
Figura 37 – Difratoograma da composição 17 através do DRX - 180 dias de idade.....	108
Figura 38 – Difratoograma da composição 17 através do DRX - 720 dias de idade.	109
Figura 39 – Estrutura morfológica da mistura inicial da composição 16 através do MEV e análise micro-química EDS	111
Figura 40 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 3 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	112
Figura 41 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 7 dias de cura através do	

MEV e análise micro-química EDS	114
Figura 42 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 28 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	115
Figura 43 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 180 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	116
Figura 44 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 720 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	117
Figura 45 – Estrutura morfológica da mistura inicial da composição 17 através do MEV e análise micro-química EDS	119
Figura 46 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 3 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	120
Figura 47 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 7 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	122
Figura 48 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 28 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	123
Figura 49 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 180 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	124
Figura 50 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 720 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS	125
Figura 51 – Tijolo confeccionado utilizando a proporção da composição 17.....	127
Figura 52 – Paver confeccionado utilizando a proporção da composição 17.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições dos corpos de prova.....	58
Tabela 2 - Composição química do RMF	68
Tabela 3 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RMF.....	69
Tabela 4 - Composição micro-química do RMF através do EDS.....	71
Tabela 5 – Composições Granulométricas do RMF	71
Tabela 6 - Composição química do RC através do FRX	73
Tabela 7 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RC	75
Tabela 8 - Composição micro-química do RC através do EDS	76
Tabela 9 - Composição granulométrica do RC.....	77
Tabela 10 - Composição química do RPCEL	78
Tabela 11 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RPCEL.....	80
Tabela 12 - Composição micro-química do RPCEL através do EDS.....	81
Tabela 13 – Composições Granulométricas do RPCEL.....	82
Tabela 14 - Composição química do RPC através do FRX.....	84
Tabela 15 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RPC	85
Tabela 16 - Composição micro-química do RPC através do EDS.....	87
Tabela 17 – Granulometria do RPC.....	87
Tabela 18 – Traços e Umidade das Composições	89
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de resistência a compressão uniaxial	90
Tabela 20 – Coeficiente de Resistência à Água com 28 e 90 Dias de Cura.....	93
Tabela 21 – Absorção de Água dos CPs com 28 e 90 Dias de Cura.....	94
Tabela 22 - Expansão ou retração linear das amostras durante o período de cura ..	96
Tabela 23 – Legenda do DRX da mistura seca da composição 16	100
Tabela 24 – Legenda do DRX da Composição 16 com 3 dias de cura	102
Tabela 25 – Legenda do difratograma da Composição 16 com 180 dias de cura ...	103
Tabela 26 – Legenda do DRX da Composição 16 com 720 dias de cura	104
Tabela 27 – Legenda do difratograma da mistura inicial da composição 17	106
Tabela 28 – Legenda do difratograma da composição 17 com 3 dias de cura.....	107
Tabela 29 – Legenda do difratograma da Composição 17 com 180 dias de cura ...	108
Tabela 30 – Legenda do difratograma da Composição 17 com 730 dias de cura ...	109
Tabela 31 - Composição microquímica da mistura inicial de número 16.....	111
Tabela 32 - Composição microquímica da composição 16 aos 3 dias de cura	113
Tabela 33 - Composição microquímica da mistura 16 aos 7 dias de cura.....	114
Tabela 34 - Composição microquímica da mistura 16 aos 28 dias de cura.....	116
Tabela 35 - Composição microquímica da mistura 16 aos 180 dias de cura.....	117
Tabela 36 - Composição microquímica da mistura 16 aos 720 dias de cura.....	118
Tabela 37 - Composição microquímica da mistura inicial de número 17.....	120
Tabela 38 - Composição microquímica da mistura 17 aos 3 dias de cura.....	121
Tabela 39 - Composição microquímica da mistura 17 aos 7 dias de cura.....	122
Tabela 40 - Composição microquímica da mistura 17 aos 28 dias de cura.....	124
Tabela 41 - Composição microquímica da mistura 17 aos 180 dias de cura.....	125
Tabela 42 - Composição microquímica da mistura 17 aos 720 dias de cura.....	126

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
RPCEL	Resíduo da Produção de Celulose
RC	Resíduo de Concreto
RPC	Resíduo da Produção de Cal
RMF	Resíduo de Minério de Ferro
DRX	Difração de Raios X
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADPt	Tonelada de Polpa Seca ao Ar Livre
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ABPC	Associação Brasileira dos Produtores de Cal
BRACELPA	Associação Brasileira de Celulose e Papel
CP	Corpo de prova
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UFPR	Universidade Federal do Paraná
LAMIR	Laboratório de Análises Minerais e Rochas

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
Å	Angstrom
Abs	Absorção de água
cm	Centímetro
m ³	Metro cúbico
dm	Decímetro
g	Gramma
g/cm ³	Gramma por centímetro cúbico
g/dm ³	Gramma por decímetro cúbico
h	Horas
kg	Quilograma
kg/ADPt	Quilograma por tonelada de polpa seca ao ar livre
kg/ano	Quilograma por ano
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
km	Quilômetro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
n	newtons
μμ	Micrômetro
ton	Tonelada
ton/mês	Tonelada por mês
ton/ano	Tonelada por ano
n°.	Número
\$	Unidade monetária
M _f	Módulo de finura
RA%	Percentual retido acumulado (série normal)
γ	Massa específica
m _{rec+amostra}	Massa do recipiente mais a massa da amostra
m _{rec}	Massa do recipiente

V_{rec}	Volume do recipiente
h	Relação entre a massa úmida e a massa seca ou teor de umidade
m_h	Massa úmida
m	Massa seca
i	Coefficiente de inchamento
f_c	Resistência à compressão
F	Força de compressão
C_{RA}	Coefficiente de resistência à água
R_{Sat}	Resistência dos corpos de prova saturados
R_{Sc}	Resistência dos corpos de prova secos
m_s	Amostra saturada
M_p	Porcentagem de material pulverulento
m_i	Massa inicial
M_{sf}	Massa seca final
Abs_{cp}	Absorção de água pelo corpo de prova
m_{sat}	Massa da amostra saturada em água após imersão
m_s	Massa da amostra seca
v	Volume em mm^3
π	Constante matemática
r	Raio da amostra
h	Altura da amostra
d	Massa específica aparente
L_i	Leitura inicial
L_f	Leitura final

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVAS	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	16
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.4	ESTRUTURA DA TESE	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	RESÍDUO DA PRODUÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO (RMF)	21
2.2	RESÍDUOS DE CONCRETO (RC)	31
2.3	RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE CELULOSE (RPCEL)	37
2.4	RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE CAL (RPC)	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	ESCOLHA DOS RESÍDUOS	53
3.2	COLETA DOS RESÍDUOS	53
3.3	EXPOSIÇÃO DAS 19 COMPOSIÇÕES	57
3.4	ETAPAS DA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	59
3.5	ENSAIOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO EM RESÍDUOS	59
3.5.1	<i>Determinação do Teor de Umidade</i>	60
3.5.2	<i>Composição Granulometria</i>	60
3.5.3	<i>Determinação da Massa Específica Real</i>	60
3.5.4	<i>Determinação do Material Pulverulento</i>	61
3.5.5	<i>Determinação da Pozolânicidade do Resíduo de Minério de Ferro</i>	61
3.5.6	<i>Verificação do pH dos Resíduos</i>	62
3.5.1	<i>Fluorescência de Raios-X (FRX)</i>	62
3.5.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	63
3.5.3	<i>Micro-análise Química pelo Método de Dispersão de Energia (EDS)</i>	64
3.5.4	<i>Difração de Raios-X (DRX)</i>	64
3.5.5	<i>Resistência à Compressão Axial</i>	65
3.5.6	<i>Coeficiente de Resistência à Água</i>	66
3.5.1	<i>Absorção de Água por Imersão</i>	66
3.5.2	<i>Coeficiente de Expansão Linear</i>	67
3.5.3	<i>Determinação da Massa Específica</i>	67
4	RESULTADOS E ANÁLISES	68
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	68
4.1.1	<i>Resíduo de Minério de Ferro (RMF)</i>	68
4.1.2	<i>Resíduo de Concreto (RC)</i>	72
4.1.3	<i>Resíduos da Produção de Celulose (RPCEL)</i>	78
4.1.4	<i>Resíduo da Produção da Cal (RPC)</i>	83

4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES	89
4.2.1	<i>Teor de Umidade</i>	89
4.2.2	<i>Resistência à Compressão Uniaxial</i>	90
4.2.3	<i>Coefficiente de Resistência à Água</i>	92
4.2.4	<i>Absorção de Água</i>	94
4.2.5	<i>Expansão ou retração das Amostras Durante o Período de Cura</i>	95
4.2.6	<i>Mudanças de Redes Cristalinas de Minerais Durante a Cura</i>	98
4.2.7	<i>Análise Mineralógica das Composições 16 e 17</i>	99
4.2.7.1	Aspecto Mineralógico da Mistura Inicial, aos 3, 180 e 720 dias de cura da composição 16	99
4.2.7.2	Aspecto Mineralógico da Mistura Inicial aos 3, 180 e 720 dias de cura da Composição 17.....	105
4.3	ESTRUTURA MORFOLÓGICA DA COMPOSIÇÃO 16.....	110
4.4	ESTRUTURA MORFOLÓGICA DA COMPOSIÇÃO 17.....	119
4.5	MOLDAGEM DE DOIS MATERIAS DE CONSTRUÇÃO, UTILIZANDO O TRAÇO DA COMPOSIÇÃO 17.....	126
5	CONCLUSÕES	128
	REFERÊNCIAS	131

1 INTRODUÇÃO

Uma das motivações para o desenvolvimento de novas tecnologias e novos processos de melhorias são criadas geralmente em momentos de real necessidade, tendo em vista que o ser humano naturalmente se compadece com o seu semelhante e visando dar um destino adequado as ocorrências da sociedade a qual está inserido, possibilitando a solução conjunta e satisfatória para determinada situação. Em especial a motivação pessoal para o desenvolvimento desta tese se deu após o colapso da barragem de rejeitos de minério de ferro denominada Fundão em Mariana, Minas Gerais no ano de 2015.

O rompimento desta barragem provocou o derramamento de rejeitos provenientes da extração do minério de ferro retirado de extensas minas da região, ocasionando um desastre industrial e conseqüentemente causando um dos maiores impactos ambientais da história brasileira, envolvendo barragens de rejeitos, despejando um volume estimado de 62 milhões de metros cúbicos de resíduos no meio ambiente, além é claro diversas pessoas mortas e muitas desaparecidas.

Infelizmente esta tragédia voltou a ocorrer com o colapso da barragem de Brumadinho, em janeiro de 2019, localizada apenas 65 km da capital mineira. Lamentavelmente deixou mais de 200 mortos e cerca de 90 desaparecidos, além de causar mais um desastre ambiental.

Diante deste contexto de percepção a nível mundial está sendo dada atenção os impactos ecológicos associados a indústria de mineração, indústria florestal, a indústria de celulose e papel, bem como os meios para minimizar os impactos gerados pela destinação de seus resíduos oriundos do processo de fabricação (KISSINGER e HEROLD, 2012).

A extração do minério de ferro é uma atividade econômica muito importante no Brasil, corresponde a 87,7% dos bens primários exportados e 4% do PIB (Produto Interno Bruto brasileiro). As reservas de minério de ferro no Brasil representam 11,9% das reservas mundiais e são localizadas nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará (DNPM, 2016).

Nestes três estados são gerados aproximadamente 379 mil toneladas de rejeitos de minério de ferro (RMF) diariamente, os quais são despejados em 672 barragens de rejeito, sendo 340 delas localizadas no Estado de Minas Gerais (SNISB, 2018).

Se não bastasse todo este montante de resíduo gerado pela indústria da mineração, temos o fato que as fábricas de papel e celulose também geram uma grande variedade de resíduos de origem orgânica e inorgânica, tornando-se uma grande preocupação ambiental, fazendo com que o setor busque novas pesquisas para que se possa dar um destino final correto a este material (MONTE et al., 2009).

A geração de resíduos da produção de celulose tem sido proporcionalmente melhor quantificada em função do fechamento do ciclo de produção nas fábricas, sendo possível fazer com que algumas matérias primas sejam utilizadas diversas vezes, aproveitando ao máximo seu potencial, buscando, assim, uma solução ainda que limitada, para os problemas das poluições hídricas e aéreas do setor, tendo em vista a conscientização das indústrias para a preservação do meio ambiente e as restrições das leis ambientais municipais, estaduais e federais. Com essas medidas, uma grande parte da poluição que antes saía das chaminés na forma de poeiras e partículas ou de poluentes hídricos dissolvidos em efluentes, tem sido convertida para a forma de resíduos sólidos.

A geração de resíduos sólidos de celulose depende muito do conceito, idade da fábrica de beneficiamento, dos insumos utilizados nas operações de produção, das pessoas envolvidas no gerenciamento ambiental e da responsabilidade social da empresa.

Entretanto, alguns resíduos sólidos são comuns na maioria das fábricas kraft, tais como: lama de cal, dregs, grits e os lodos das estações de tratamento de águas e efluentes. O processo Kraft é aquele que adiciona sulfeto no licor de cozimento acelerando acentuadamente a deslignificação fornecendo um produto final mais resistente utilizado em sacarias de cimento, cal hidratada e carvão vegetal.

As fábricas construídas nos últimos dez anos que utilizam o processo kraft, estão mostrando gerações de resíduos sólidos entre 40 a 70 kg secos/adt de celulose (adt = air dry ton – tonelada seca ao ar). Isso corresponde, a cerca de 70 a 120kg úmido por tonelada de celulose produzida (MANSKINEN, NURMESNIEMI e PÖYKIÖ, 2011).

O processo kraft é o mais empregado para a produção de polpa celulósica em todo o mundo. Cerca de 80% da polpa é produzida utilizando este processo. Ele também é conhecido como processo “sulfato” devido ao aumento acentuado da deslignificação propiciando a produção de polpa mais resistente. Os compostos

químicos utilizados no cozimento são o sulfeto e o hidróxido de sódio em pH alcalino entre 13 e 14 (PIOTTO, 2013).

O Estado do Paraná possui, aproximadamente, 52 fábricas produtoras de papel e celulose; sendo 5 fábricas só de celulose, 6 fábricas só de papel e 41 fábricas integradas, isto é, produzem polpa de alto rendimento de celulose e papel. Com isto, o Estado do Paraná representa 8,55% de participação do ranking brasileiro (BRACELPA, 2016).

Temos ainda a considerar nesta tese que o volume de resíduo de concreto (RC) gerado é muito expressivo na indústria da construção civil, tendo em vista que uma das maiores fontes geradoras são as usinas de concreto e as construtoras, as quais trabalham fundamentalmente com os materiais a base de cimento, a qual teve uma produção global do concreto em 2017 de cerca de 10^9 t/ano (MINERAL COMMODITY RESUMOS, 2017).

Assumindo que o concreto é constituído por aproximadamente 40-45% do consumo de cimento, e que os agregados somados com água são 7 a 8 vezes o volume do consumo de cimento contido no concreto, torna-se evidente o enorme consumo do material relatado anteriormente (SCRIVENER et al., 2018).

No Brasil, segundo Correa et al. (2009), em São Paulo e região metropolitana, aproximadamente 9% do volume do concreto produzido foi perdido por não ser utilizado no intervalo de tempo adequado para a sua aplicação. Este valor é significativamente superior ao valor apresentado por outros pesquisadores. Segundo Webster et al. (2012) relatam que nos EUA, o concreto retornado é de aproximadamente 5% do volume total gerado. O desperdício britânico segundo a Concrete Association (2014) é estatisticamente entre 1%, a 3%. Para Nielsen e Glavind (2007) na Dinamarca o volume perdido ficou em torno de quase 3% da produção concreto, e quando os caminhões contendo concreto não utilizado na obra voltam para a concreteira, se torna um resíduo e um problema ambiental.

Ainda temos como resíduo integrante desta tese o resíduo da produção da cal (RPC) que segundo Garcia (2008), os resíduos da produção da cal se originam da rocha calcária mal queimada, quando o processo de combustão ocorre de forma incompleta. Esses resíduos são geralmente comercializados como subprodutos, constituído essencialmente da cal e elementos não calcários como: Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , entre outros, em quantidade total superior a 12% (NBR 6453) (ABNT 2003).

A calcinação perfeita depende da experiência do operador, da temperatura de queima e tecnologia do forno (OATES,2008). Entretanto a maioria das empresas que trabalham com a cal são mal estruturadas e não levam em consideração o calor que seria realmente necessário no interior de fornos rotativos, ocasionando grande geração de resíduo da cal (SALCUDEAN et. al., 2004; CHIU e STROPKY, 2014).

A geração de todos estes tipos de resíduos industriais aliado a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, a escassez dos recursos naturais e a restrição de locais para sua destinação, aliados à busca pelo desenvolvimento sustentável exigem que o setor da construção civil busque novas metodologias e tecnologias voltadas à reciclagem e/ou reutilização dos resíduos industriais. A reciclagem pode ser a melhor maneira para diminuir os impactos ambientais gerados pela produção de resíduos, entretanto é preferível conter ao máximo o desperdício reduzindo assim a demanda pelo consumo de materiais naturais.

Segundo a Lei Federal nº12.305 (Política Nacional de Resíduos Sólidos, Brasil, 2010) deve haver elos entre setores da indústria, produção, serviços e consumo na questão da coleta e do reaproveitamento correto dos resíduos sólidos em seu ciclo e destinação final adequada.

Os resíduos produzidos por um determinado setor muitas vezes podem ser considerados como matérias-primas úteis para outras indústrias, reduzindo, assim, o impacto ambiental (FERREIRA e OLHERO, 2002).

Desta forma esta tese considera a possibilidade de integrar o resíduo de concreto (RC), os resíduos da produção de celulose (RPCEL) (dregs, grits e lama de cal) o resíduo de minério de ferro (RMF) juntamente com o resíduo da produção da cal (RPC) o qual será utilizado como aglomerante, juntamente com o ambiente alcalino, proporcionado pelos resíduos na elaboração de novos compósitos, sugerindo uma nova forma de destinação para estes rejeitos, transformando-os em matérias primas para serem utilizados na construção civil, trazendo um enorme benefício ao meio ambiente com a reutilização destes resíduos. Serão também analisadas as mudanças das estruturas morfológicas e a variabilidade dos resultados de resistência à compressão.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Com um déficit de moradias estimado em cerca de 5 milhões de domicílios, 90% do total está concentrado na faixa de baixa renda, o Brasil tem outro ponto a resolver a médio prazo: proporcionar habitações adequadas para mais de 20 milhões de famílias até 2024, quando o País deverá ter 16,8 milhões de novos núcleos familiares, dos quais 10 milhões sobrevive com renda entre um e três salários mínimos (FGV PROJETOS, 2016).

Para Souza (2017), da Fundação João Pinheiro (FJP), entidade do governo mineiro que há mais de 20 anos produz estudo sobre o déficit habitacional que é o adotado como oficial pelo Ministério das Cidades, explica que quase 85% das famílias ganham até três salários mínimos. São elas as que mais sofrem com a baixa produção de moradias com subsídio público.

Para Magalhães (2013) o programa de habitação popular utilizado hoje no país, criou mercado para as construtoras desenvolverem projetos direcionados as famílias que ganham menos e tinham dificuldade de acessar crédito de longo prazo. Considerando o valor médio das habitações que é pouco mais de 68 mil reais, na próxima década seriam necessários 760 milhões de reais, ou 76 milhões por ano, em imóveis de interesse social para resolver o problema, números que se tornam ainda mais grandiosos em um ambiente de aperto fiscal em que se encontra a economia atual do país.

A relevância desse estudo se encontra no fato de que é necessário propor um material alternativo para a construção de habitações unifamiliares de baixo custo, favorecendo a economia e minimizando os impactos ao meio ambiente gerados no processo convencional de construção de casa. Logo, reaproveitar os resíduos industriais empregando-os na construção civil, faz com que haja grande redução no consumo de matérias-primas e energia, além de obter um novo material com funções semelhantes aos existentes por um valor muito mais atrativo.

Almeja-se, também, que este estudo venha contribuir para que seja conhecido o potencial dos resíduos de concreto, resíduos da produção de celulose, o resíduo de minério de ferro e os resíduos da produção da cal, em formar novos compósitos para a construção civil.

Considerando o contexto descrito, surgiu a seguinte questão: É possível utilizar o resíduo de concreto (RC), resíduo da produção da cal (RPC), o resíduo de

minério de ferro (RMF) e os resíduos da produção de celulose (RPCEL) como matéria-prima para elaboração de compósitos para construção civil?

A partir dessa pergunta problema, qual proporção da mistura destes resíduos admitem maior resistência mecânica à compressão uniaxial, permitindo a utilização desta composição como um novo material para construção civil?

Por fim, quais seriam as características mineralógicas e morfológicas das composições com os melhores valores de propriedades mecânicas, dentre elas: resistência à compressão uniaxial, coeficiente de resistência à água, absorção de água, massa específica e dilatação, responsáveis pela formação das estruturas nos compósitos?

Se constatada como tecnicamente viável, pode representar uma alternativa para o aumento da vida útil dos aterros industriais e, também, a geração de novo material parecido ao concreto para produção de componentes de construção como, por exemplo, blocos estruturais, blocos de vedação, meio fio e mobiliário urbano que não utilizam tratamento térmico na produção, além, de poupar recursos naturais (GEMELLI, CAMARGO e BRESCANSIN, 2009).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver compósitos a base de rejeito do minério de ferro, resíduo de concreto, resíduos do processo da produção de celulose e resíduo da produção da cal, juntamente com o resíduo de mineração para produção de novos materiais para a construção civil com características e propriedades que atendam as demandas das Normas Brasileiras, juntamente com uma tecnologia ambientalmente favorecida.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar as matérias primas (física, morfológica e quimicamente),
- b) Determinar os processos de interação físico-químicos entre os componentes e formação de estruturas morfológicas dos materiais desenvolvidos durante os períodos de cura;
- c) Determinar os parâmetros mecânicos dos materiais desenvolvidos.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa são o rejeito de minério de ferro (RMF), resíduo de concreto (RC), resíduos da produção de celulose (RPCEL) e resíduo de produção da cal (RPC). Na pesquisa foram utilizados os métodos de pesagem, secagem, peneiramento, mistura, compactação e cura, além dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, absorção e resistência à água, massa específica e dilatação para selecionar a melhor composição. Por fim, foram realizados testes para análise química, mineralógica, e morfológica pelos métodos de: Fluorescência de Raios-X (FRX), Difractometria de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), para definição das composições químicas e mineralógicas das matérias primas e composições finais dos corpos de prova.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está dividida em cinco seções, incluindo esta primeira, a qual apresenta os aspectos gerais do tema abordado: uma breve introdução, os objetivos, os procedimentos e as justificativas da pesquisa.

Na segunda seção é realizada a revisão bibliográfica contemplando o processo de geração dos resíduos, suas características químicas e físicas, produções, destinações e aproveitamentos.

Na terceira seção são descritos os métodos e materiais utilizados nesta pesquisa, apresentação dos procedimentos de escolha e coleta dos resíduos, definição das composições, moldagem dos corpos de prova e ensaios realizados para acompanhamento das alterações de características e propriedades dos materiais desenvolvidos.

Na quarta seção é abordada a análise dos resultados, as mudanças de composição mineralógica e estruturas dos materiais durante os períodos de cura e na quinta seção as conclusões obtidas.

Ao final, encontram-se as conclusões e referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a revisão da literatura utilizou-se o estudo bibliométrico com a finalidade de sistematizar as pesquisas realizadas no campo do saber relacionados com os problemas a serem investigados nesta pesquisa.

Os estudos bibliométricos são conhecidos por concentrar e examinar a produção de artigos em uma determinada área do conhecimento especificada pelo usuário, mapeando as comunidades acadêmicas e identificando as redes de pesquisadores e suas publicações científicas.

Por meio da criação de indicadores que buscam filtrar as instituições, os autores e os acadêmicos mais citados em redes de coautorias, identificando as diferentes contribuições teóricas, empíricas ou metodológicas na área de interesse.

Destaca-se que a análise bibliométrica é um método de análise quantitativa para a pesquisa científica. Os dados elaborados por meio dos estudos bibliométricos, mensuram a contribuição do conhecimento científico inseridos nas publicações vinculadas a sua área de interesse. De acordo com Lundenberg (2016) a geração do conhecimento é materializada por meio da produção científica e também é utilizada como critério de avaliação de publicações em instituições científicas, assim como critério para a alocação de fundos para pesquisas.

O levantamento de dados neste estudo foi realizado por meio da pesquisa de trabalhos indexados nas bases de dados Scopus e Web of Science, considerando as publicações nacionais e internacionais, com um período de tempo pré-fixado dos últimos dez anos.

Nesta etapa realizou-se como referência, as Leis da Bibliometria (Lei de Zipf) que se refere a frequência de palavra-chave no texto e também a Lei de Lotka que se refere a produtividade do autor levando em consideração o fator de impacto da produção científica dos autores na respectiva área de conhecimento, tendo como palavras-chave para a busca: “((Lime production waste) or (Structure formation processes) or (Mechanical properties) or (Hazardous red mud) or (Chemical interaction) or (Residues Iron ore tailings) or (Iron ore tailing) or (Strength Microstructure) or (Strength properties Durability) or (Iron ore tailings from tailing dams) or (Reuse of residues) or (Tailing dams) or (Kraft cellulose waste) or (waste from causticizing dregs grits lime mud))”.

Os resultados da pesquisa foram expressos por meio de gráficos, formatados a partir da ferramenta de visualização de redes bibliométricas gerados pelo software VOSviewer. Essas redes podem, por exemplo, incluir periódicos, pesquisadores ou publicações individuais e podem ser construídas com base em citações, acoplamentos bibliográficos, co-citações ou relações de co-autoria.

A seguir na Figura 1 pode-se verificar o gráfico gerado pela base de dados Scopus com o quantitativo de artigos localizados e identificados respectivamente por suas áreas de conhecimento. Podemos observar que para área de engenharia civil localizou-se 747 artigos científicos, sendo que destes 10% foram utilizados na revisão bibliográfica.

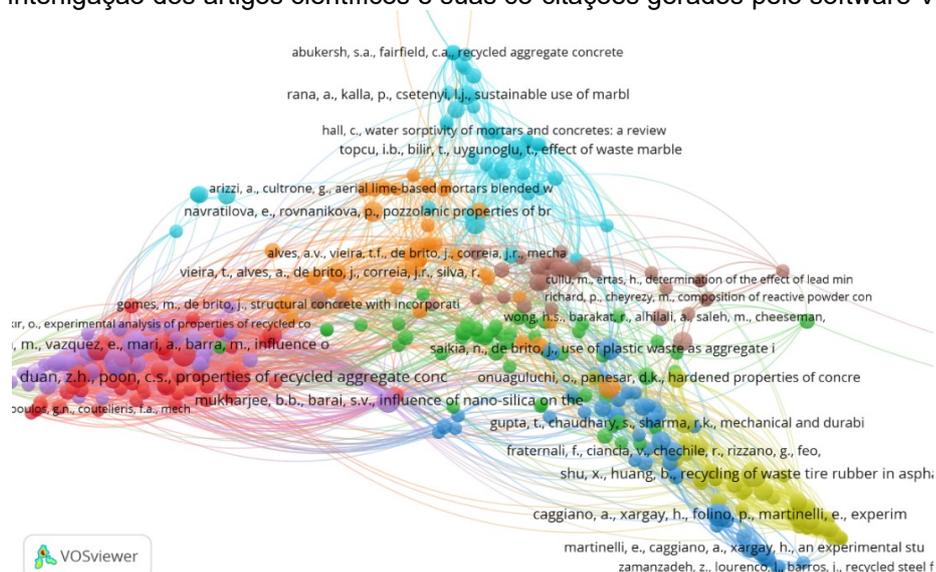
Figura 1 - Artigos científicos localizados pela base de dados Scopus



Fonte: SCOPUS (2019)

Também pode-se verificar na Figura 2 o gráfico gerado pelo software VOSviewer, as interligações dos artigos científicos e suas respectivas co-citações, destes 75 artigos selecionados.

Figura 2 - interligação dos artigos científicos e suas co-citações gerados pelo software VOSviewer.



Fonte: VOSVIEWER (2019)

Para concluir um estudo em revisão bibliométrica cada pesquisador pode criar suas próprias fontes de buscas em bases de dados renomadas, criando o seu “formulário” com características mais apropriadas ao seu estudo. Em geral, primeiramente é utilizado a busca no resumo do artigo, com informações do tipo: nome do periódico; título do artigo; autores; ano de publicação; instituição do autor principal do artigo; país; JCR do periódico; Google Scholar Citation; WoS Citation Report do artigo; campo para indicar o atendimento aos objetivos da pesquisa; descrição dos objetivos/resultados relevantes do estudo como por exemplo o método de pesquisa adotada para a construção da síntese final da revisão e análise dos resultados obtidos.

Tendo sempre como objetivo da busca nas bases de dados, encontrar artigos recentes, publicados e indexados.

Devido a grande quantidade de artigos que podem ser encontrados, esse trabalho de busca na base de dados exige o refinamento dos resultados gerados, tornando-se necessário uma eventual limitação do escopo da busca, por exemplo, definindo o período da busca dos últimos 10 anos. Outra restrição importante são as áreas de pesquisa que já são conhecidas devido ao trabalho de busca e leitura dos artigos encontrados nos periódicos estudados. Com este importante método de revisão bibliográfica buscou-se identificar o maior número de publicações relevantes das áreas de estudo, tornando-se possível um melhor entendimento das pesquisas realizadas globalmente, para estes resíduos utilizados nesta tese.

2.1 RESÍDUO DA PRODUÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO (RMF)

A extração de minério de ferro é uma atividade econômica muito importante no Brasil, corresponde a 87,7% dos bens primários exportados e 4% do PIB (Produto Interno Bruto brasileiro). As reservas de minério de ferro no Brasil representam 11,9% das reservas mundiais e são localizadas principalmente nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará (DNPM, 2015).

Durante o processamento, uma grande porcentagem do minério extraído é rejeitado por não possuir mais as propriedades que o mercado exige, sendo encaminhado ao descarte em barragens de contenção, juntamente é claro de uma enorme quantidade de água, proveniente do processo de beneficiamento deste mineral (YELLISHETTY e MUDD, 2014)

Segundo estatísticas oficiais, a descarga anual de rejeitos de minério de ferro na China é de 300 milhões de toneladas, no entanto a reutilização do RMF é inferior a 10% (LIU, PROBST e LIAO, 2005).

Estima-se que cerca de 75 grandes projetos envolvendo rejeitos de minério de ferro estão ocorrendo globalmente na recuperação de ouro, diamantes e cobre contidos na lama destinado as barragens de contenção. Acontece que para a recuperação destes minerais nobres se faz necessário a utilização de produtos químicos, entre eles alguns metais pesados, deixando assim o rejeito da barragem de contenção ainda mais perigoso e volumoso pois a quantidade de água adicionada ao processo aumenta consideravelmente o volume total da massa na barragem de rejeitos (JESUS, 2015).

No Chile, 1,6 milhão de toneladas de RMF são produzidos todos os dias (WILLIAMS, 2017). Na África do Sul, estima-se que haja 17,7 milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro estocados em barragens de contenção (BREYTENBACH, 2017). Na China, estima-se que aproximadamente 33.000ha de terra afetados pelas atividades de mineração segundo Chen et al. (2016), dos quais 20% são ocupados por barragens de rejeitos de minério de ferro.

Em 2012, um total de 2.532 minas abandonadas foram relatadas existir na Austrália, embora o número real é provável que seja maior, porque os conjuntos de dados de muitos estados são incompletos e não integrados (UNGER et al., 2012).

Mais de 1,2 bilhão de toneladas de RMF já foram armazenados na União Europeia e bilhões de toneladas globalmente de acordo com Wang et al. (2014) e

ainda com uma quantidade crescente entre 5 e 7 bilhões de toneladas por ano, tendo em vista a nova produção dos países emergentes (SCHOENBERGER, 2016).

Aproximadamente 379 mil toneladas de rejeitos de minério de ferro são gerados diariamente no Brasil, os quais são despejados em 672 barragens de rejeito, sendo 340 delas localizadas no Estado de Minas Gerais (SNISB, 2018).

As barragens de rejeitos ocupam grandes áreas, ocasionando enorme impacto ambiental ao longo de toda a sua vida útil. Estes impactos ambientais incluem desmatamento na construção a poluição das águas dos rios, incluindo o lençol freático durante a operação e após o fechamento da mina, sem contar os danos ambientais graves e o perigo ao ser humano em caso de ruptura de uma barragem de contenção (KOSSOFF et al., 2014).

Os riscos associados a essas estruturas de exploração de minério de ferro, preocupa a sociedade brasileira. Na ruptura da barragem de rejeitos em Bento Rodrigues, Mariana - MG, considerado uns dos maiores desastres ambientais no Brasil e no mundo, mais de 35.000.000 m³ de lama foram liberados no meio ambiente e posteriormente alcançou o oceano Atlântico, afetando ecossistemas ao longo 662 km a jusante do rio Doce (IBAMA, 2015).

Não só algumas barragens existentes no Brasil estão se aproximando rapidamente da sua capacidade total, mas também os rejeitos descartados em processo de descomissionamento, processo pelo qual a barragem já se encontram em estado final de operação e são reconhecidos como tendo alto risco de colapso o que torna-se ainda mais preocupante a estabilidade destas estruturas de contenção associado ao alto custo para manutenção destas áreas e o risco que oferecem as comunidades locais, por um período de tempo indeterminado (DAUCEA et al., 2019).

Como não poderia deixar ser, a legislação ambiental está cada vez mais restritiva, influenciando assim as empresas a encontrarem um uso potencial significativo de reutilização para rejeitos de minério de ferro (RMF) que poderiam mitigar parte do impacto de barragens de rejeitos sem prejudicar a cadeia produtiva da mineração com o uso efetivo de práticas sustentáveis nos processos produtivos (EDRAKI et al., 2014).

O uso de resíduos de mineração como recurso de matéria-prima pode ser uma solução para o fornecimento de um material alternativo (NUSS; BLENGINI, 2018). O problema dos resíduos pode ser uma oportunidade para recuperar

matérias primas e inclusive gerar um significativo valor econômico para as empresas geradoras.

Até o momento apenas poucos esforços foram feitos a fim de mover a indústria de mineração para uma economia circular (L'EBRE et al., 2017). Por exemplo, no modelo de economia circular do instituto Ellen MacArthur Foundation amplamente divulgado na União Europeia, a indústria de mineração está separada e não incluída em looping de reuso de rejeitos (L'EBRE et al., 2017). De acordo com o estudo de Ruokonen e Temmes (2018), a contribuição das empresas de mineração para uma economia circular está em grande parte ausente nas empresas de mineração e nos programas ambientais. Há apenas uma limitada participação da indústria de mineração europeia abordando tímidas questões de sustentabilidade. Se o setor de mineração não estiver incluído no conceito de economia circular, as oportunidades serão perdidas e a recuperação de materiais economicamente viáveis podem não serem concretizadas associado ao alto risco de disposição que estes rejeitos oferecem (L'EBRE et al., 2017).

A utilização de conceitos de uma economia circular, a qual propõe uma mudança em toda a maneira de consumir, iniciando no design do produto final a ser vendido até nossa relação com as matérias-primas e os resíduos resultantes do processo, necessitará de avanços preenchendo as lacunas do conhecimento em oportunidades de negócios. Vários estudos anteriores se concentraram em dar uma visão geral sobre sua implementação, as diferenças potenciais do setor estão entre o investimento necessário para colocar pesquisas realizadas na área, em prática e o interesse das empresas geradoras em fechar um ciclo ecologicamente correto (KIRCHHERR et al., 2018).

Segundo Long et al. (2016) o colapso da barragem de rejeitos da mineradora Sarmarco em novembro 2015 na cidade de Mariana foi um dos maiores desastres ambientais da história da mineração brasileira. No entanto, este episódio voltou a ocorrer na cidade de Brumadinho em janeiro de 2019, ocasionando novamente a perda de vidas e um enorme desastre ambiental.

Sendo assim a indústria da mineração brasileira tenta colocar em prática um sistema que viabilize garantir a sustentabilidade ambiental e a minimização de descarga de rejeitos em barragens. Vários estudos têm demonstrado a possibilidade do uso de rejeitos de minério de ferro na fabricação de tijolos, produção de concreto e proteção radiológica, bem como outras aplicações (MA et al., 2016).

Para diminuir os problemas ambientais causados por este resíduo e alcançar a sustentabilidade, uma possível solução é reutilizar os resíduos. Sabe-se que vários resíduos sólidos têm sido utilizados como matérias-primas alternativas nas produções de cimento, como escória de aço, cinzas volantes e resíduos de lodo de ferro alumina (TSAKIRIDIS et al., 2008).

A demanda global por esta matéria-prima aumentou drasticamente durante as últimas décadas, e a projeção é que se duplique a demanda entre 2010 e 2030 (UNEP et al., 2013).

Ao mesmo tempo a qualidade de alguns minérios utilizados na indústria de mineração diminuíram em termos de concentração se faz necessário extrair cada vez mais matéria prima, para que seja suprida a necessidade dos mercados consumidores emergentes(GIURCO et al., 2014).

Segundo Paivi, Kinnunen e Kaksonen (2019) os objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, bem como implementação do acordo de Paris, o qual resultou na recomendação para que seja utilizado os resíduos de mineração em tecnologias verdes, como aplicações e conversão de novos materiais, com objetivo de reduzir a extração desnecessária de novas jazidas (ALI et al., 2017).

Além de benefícios econômicos, a mineração também criou desafios ambientais, através de quantidades significativas de resíduos de mineração, com sua enorme quantidade de rejeitos gerados, não reutilizados e depositados no meio ambiente (BELLENFANT et al., 2013; EDRAKI et al., 2014).

Os sistemas de gerenciamento de resíduos de mineração deveriam ser baseados em pensamento econômico (take-make-waste) segundo L'ebre et al. (2017) e Liu et al. (2019), os quais sugerem também que a produção desejada deva ser levada em consideração nas avaliações de eco eficiência para a indústria de mineração. O desenvolvimento de um modelo econômico para a indústria de mineração tem um potencial significativo, em resolver os desafios da escassez de recursos minerais o desperdício de recursos financeiros e a poluição ambiental (Zhao et al., 2012), Lottermoser, (2011), Bellenfant et al. (2013) e Van Zyl et al., 2016), minimizando o desperdício com subsequente geração de lucros econômicos (BELLENFANT et al., 2013).

A produção mundial total de minério de ferro em 2014 foi de 3,22 bilhões toneladas. A produção brasileira foi de 412 milhões de toneladas (12,8% em peso).

O estado de Minas Gerais é o maior produtor de minério de ferro do Brasil responsável por 65% da produção nacional (DNPB, 2017).

Devido ao baixo teor de ferro entre 31% e 45% geralmente encontrado no minério nas jazidas no estado de Minas Gerais, o beneficiamento é obrigatório para a indústria siderúrgica, pois esta necessita de um material com teor maior de ferro em sua composição, aproximadamente 60% a 70% (LIMA; LOPES; GONTIJO, 2011).

De acordo com Araujo et al. (2013) baseado nas características do minério por exemplo, tamanho de partícula e mineralogia, é estimado que para cada tonelada de minério de ferro beneficiado, 400kg de rejeitos são produzidos. Com base na produção brasileira de 2014, cerca de 275,5 milhões de toneladas de resíduos foram depositados em aterros e barragens de rejeito.

Quase metade do volume total de minério de ferro extraído nas operações de mineração é destinado como rejeito e descartado em barragens de contenção, as quais representam enormes impactos ambientais além de oferecer grande risco de vida para as pessoas que vivem e trabalham em seu entorno, caso a barragem venha a se romper (WANNA et al., 2019).

RMF é um material em pó fino, pesado, estável e cristalino cujos principais componentes são óxido de ferro, sílica e alumina (LIU, XU e AN, 2012). Segundo Yellishetty et al. (2008) esta constituição mineralógica prontamente sugere que pode ser incorporada em materiais cerâmicos destinados a construção civil e em compostos cimentícios em substituição parcialmente no agregado natural (CHEN et al., 2013).

Quando usado como agregado em compostos à base de cimento, o RMF promove o ganho da resistência mecânica, segundo Uchechukwu et al. (2014) no entanto sua porcentagem deve ser avaliada com cautela, pois podem reduzir significativamente a trabalhabilidade. Sua heterogeneidade de características físico-químicas, dada a sua variação na composição mineralógica, pode ser o provável motivo para tal comportamento (ZHAO, FAN e SUN, 2014).

As características químicas do RMF são geralmente semelhantes às matérias-primas comuns, no entanto uso de RMF só foi bem-sucedido em combinação com outros materiais, como por exemplo areia, brita, cal e cimento (BOLTAKOVA et al., 2017).

Estudos anteriores mostraram que o RMF tem potencial para ser efetivamente utilizado em produções de cimento e também ser utilizado como uma adição em concreto. Luo et al. (2016) relataram que o cimento usando RMF como matéria-prima tem uma relativa melhora na reatividade e menor calor de hidratação do que o produto comum. Shettima et al. (2016) realizaram uma pesquisa sobre concreto usando RMF como substituição parcial do agregado miúdo. Ficou evidenciado que uma ligeira melhora da resistência mecânica do concreto utilizando RMF foi detectada, enquanto que a trabalhabilidade ficou prejudicada, deixando-o pouco adensável.

Acontece que a indústria da construção civil também é responsável por vários impactos ambientais, a partir da extração de matérias-primas (até 50% dos recursos naturais extraídos) são para a utilização e manutenção de casa e edifícios (Bianchini et al., 2005). Por outro lado, o setor emprega 7,4% da mão de obra no Brasil e aproximadamente 30% da população está empregada na indústria de transformação mineral relacionado com a produção de materiais de construção. O Brasil também é o terceiro maior produtor mundial de materiais cerâmicos segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica ANICER (2018), entretanto tornar a produção mais sustentável é um dos desafios atuais do setor (CABRAL et al., 2010).

Além disso, Zhao et al. (2014) utilizaram RMF para produzir concreto e concluíram que a quantidade máxima admitida para este resíduo é de 40% em peso. No entanto, os componentes químicos que compõem o RMF são diversos não sendo possível executar um traço confiável para obter uma resistência relativamente boa em torno de 20Mpa, o autor enfatiza a necessidade de realizar a caracterização do lote a cada nova remessa de resíduo.

No entanto, a valorização dos rejeitos está alinhada com Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas. Rejeitos de mineração podem contribuir especialmente para o SDG11 “Cidades e Comunidades Sustentáveis” e ao SDG12 “Produção e Consumo Responsável” minimizando a produção de resíduos (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2016). A valorização de rejeitos significa a recuperação de metais residuais e a utilização da matriz mineral.

Para Solomons (2017) os resíduos perigosos podem ser transformados em valiosas fontes de metal secundário, combinando a recuperação de metais e gestão ambiental com tecnologias desenvolvidas, sendo que uma única área de rejeitos

pode conter metais valiosos podendo gerar até milhões de euros de retorno para as empresas.

Considerando que os rejeitos são materiais que já foram extraídos, triturados e processados, o que significa dizer que os custos reais de beneficiamento para sua reutilização são menores em comparação com os minérios primários que necessitaram passar por todo o processo de beneficiamento de mineração, já que o processamento pode girar em torno de 40 a 60% do custo total de processamento mineral (Cox et al., 2011; Zhao et al., 2012). Os resíduos contêm minerais e recursos energéticos, que podem se tornar valiosos, por exemplo para o desenvolvimento de novas tecnologias e novas exigências de mercado ou melhores preços das commodities (LOTTERMOSER, 2011).

Os principais riscos ambientais relacionados a resíduos de mineração, os quais são potenciais poluentes, é a acidificação dos rios lagos e oceanos, desestabilizando assim a fauna e a flora, e principalmente sobrecarregando e pondo em estado de atenção a estabilidade das barragens de rejeitos segundo Bellenfant et al. (2013).

Como é de amplo conhecimento sabemos que já ocorreram graves acidentes com barragens de rejeitos, por exemplo, na Espanha (1998), Romênia (BRGM, 2001), mais recentemente no Canadá (2015) e no Brasil em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) ambos no estado de Minas Gerais (DUNSTER, 2012). Rejeitos são, portanto, uma enorme questão de responsabilidade para empresas de mineração (WANG et al., 2014).

De acordo com Dauceca et al. (2019) realizou-se a caracterização do rejeito de uma mina localizada a noroeste do estado de Minas Gerais com o objetivo de investigar o conteúdo deste material e as principais características visando o reaproveitamento deste material pelo processo de concentração magnética. Pode-se concluir, que é possível recuperar os rejeitos de minério de ferro e consequentemente diminuir o volume existente, o que pode ser interessante para a sustentabilidade ambiental e econômica da região.

Constatou-se também que devido a ineficiência das operações industriais os resíduos depositados em barragens de rejeitos contiam teores de ferro entre 30 a 40% em peso, o que significa que em alguns casos o rejeito tem quantidade similares ou superiores aos teores de ferro de alguns minérios de ferro no estado in natura, antes de serem extraídos da natureza. E concluíram que após a

concentração magnética, a recuperação em massa de ferro foi de 40% e de 64% em peso, para um campo magnético de 5465 Gauss. O mesmo material peneirado e posteriormente analisado por FRX, o qual apresentou 30,3% de Fe e 55,4% de SiO₂ entre outros minerais em menores quantidades, enquanto os minerais identificados por DRX para a mesma amostra foram: quartzo, hematita, goethita, magnetita e caulinita.

De acordo com Fontes et al. (2019) realizou-se uma avaliação do potencial de uso de rejeitos de minério de ferro na fabricação de telhas cerâmicas. Para este estudo foi coletado 12 amostras de RMF, sendo realizado em quatro barragens e em três pontos diferentes em cada uma delas, para assegurar uma representação confiável de cada barragem de acordo com a (FEAM, 2017). As coletas foram feitas conforme especificado na NBR 10.007, ao final da pesquisa concluíram que em determinada fração granulométrica em que se enquadra as argilas, podem sim serem usadas na produção de telhas cerâmicas, além de apresentarem plasticidade e resistência, mostrando um comportamento no processo de produção adequado, para a produção industrial de azulejos, ladrilhos e porcelanas. Todas as quatro barragens estão localizadas perto de importantes áreas urbanas ao entorno de Belo Horizonte – MG.

De acordo com Zuccheratte, Freire e Lameiras (2017) realizou-se uma avaliação da produção de concreto utilizando como agregado o rejeito do minério de ferro na fração granulométrica arenosa com partículas entre 0,075 e 2,00mm e polietileno reciclado de PET. Os mesmos obtiveram a resistência à compressão do concreto aos 7 dias de aproximadamente 9,0 MPa, a absorção de água ficou entre 13,6 e 14,9% e a densidade do concreto de 1,9 g/cm³, podendo assim utilizar o concreto para fazer tijolos leves para alvenaria não estrutural. Desta forma reutilizando a maioria dos rejeitos de mineração armazenados de maneira insustentável, dando um destino final correto. Resolvendo o problema dos resíduos, tornando a indústria sustentável e desenvolvendo a pesquisa científica. No entanto é importante destacar que a resistência a compressão não teve um aumento ascendente, pois aos 21 dias foi de 8,0 MPa e aos 90 dias foi 9,0 MPa, indicando que o estudo deve ser aprofundado.

DO e MUN (2017) utilizaram um tipo de rejeito de minério de ferro (RMF) com alto teor de magnésio (16%) e baixo teor de silício (30%) utilizando-o como matéria-prima em substituição de argila para produzir clínquer de cimento pelo

processo convencional de sinterização, variando de 0 a 20% em peso as quantidades de adições de RMF. As propriedades do cimento alcançadas em diferentes resultados demonstraram que a adição de RMF, de até 10% em peso, não afetou negativamente a qualidade dos clínqueres produzidos, ao contrário, poderia produzir clínqueres de melhor qualidade do que sem RMF. Esses autores sugerem que o alta quantidades de magnésio e baixo teor de silício do RMF tem um enorme potencial como matérias-primas de cimento em vez de utilizar os recursos naturais.

Observaram ainda que a finura do cimento foi testada com o método de peneiramento utilizando a norma GB/T1345 (2005), e obtendo como resultado que o resíduo retido na peneira #200 foi de aproximadamente 2,6% em peso, o qual ficou abaixo da recomendação especificada para o padrão chinês GB / T 21372 (2008) que é de até 4,0% em peso. Análise de DRX (Difração de Raio X), mostrou que a adição de RMF não afetou qualitativamente a formação das fases mineralógicas.

Em uma empresa siderúrgica de Karabuk, localizada na Turquia, realizou um estudo para minimizar a geração de rejeitos, utilizando a separação magnética, fazendo com que o minério contido no rejeito seja retido, antes que o mesmo seja destinado a barragem de rejeitos. Com este processo foi possível realizar a separação de grãos magnéticos e de óxidos minerais contendo ferro presentes em sua composição. Obtiveram os resultados (média composição química % em peso) na seguinte quantidade: CaO 32,62%, SiO₂ 19,28%, Al₂O₃ 32,71%, Fe₂O₃ 22,61%, MnO 7,52%, MgO 8,05%, K₂O 0,13%, Na₂O 0,28% e TiO₂ 0,52%), com o material retido nestas proporções foi proposto reutilizar em blocos cerâmico em uma pequena olaria local. Ao final da pesquisa o autor enfatiza que ser for selecionado o tamanho adequado de grãos por empacotamento de partículas é possível sim reutilizar em tijolos cerâmicos. (Alanyali et al., 2012).

De acordo com Dauceca et al., (2019) estudaram a distribuição granulométrica, composição química e mineralógica de uma amostra de rejeitos de minério de ferro, proveniente da região de Itabirito, centro sul do estado de Minas Gerais com o objetivo de avaliar a possibilidade deste material voltar ao processo de fabricação de aço industrial.

Estes autores, utilizando a distribuição granulométrica da amostra com a granulometria variando de 1,4mm a 0,075mm e posteriormente submetido a difração de laser (Cilas 1064), obtiveram o teor de ferro da amostra de rejeitos de 30,3% em peso e sugerem que pode ser usado no beneficiamento industrial de minério de ferro

com teor de Fe entre 25% e 45% em peso. Com os dados coletados por DRX é possível inferir que as principais fases minerais diminuem nas seguintes ordem: quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) e goethita ($\text{FeO}\cdot\text{OH}$). Concluíram que a amostra global era composta por 30,3% Fe; 50,4% SiO_2 ; 2,1% Al_2O_3 ; 0,13% P e a perda ao fogo de 3% (sendo todas as % em peso).

Luo et al. (2016) estudaram o rejeito fornecido pela Nanjing Iron and Steel Group do distrito de Yeshan, Jiangsu, China, o qual foi utilizado como matéria-prima na substituição de argila para produzir clínquer de cimento pelo processo convencional de sinterização. Foram investigadas as propriedades do cimento Portland produzido com clínquer sinterizado a 1420°C com diferentes adições de RMF, variando de 0 a 20% em peso. Análise química e mineralógica mostrou que a adição de RMF com até 10% em peso, tem pouco efeito na formação das fases mineralógicas. Além disso, testes físico-mecânicos mostraram que o RMF com adição dentro de 10% em peso não afetou negativamente a qualidade do clínquer produzido, ao contrário, poderia produzir clínquer de melhor qualidade do que sem RMF.

A pesquisa destacou que a viabilidade de reutilizar RMF e produzir clínquer de cimento com alto teor de magnésio e baixo teor de silício tem um grande potencial a ser utilizado como matéria prima de cimento em vez da utilização de recursos naturais. Por fim destacou que análise realizada por DRX não mostrou que a adição RMF afetam qualitativamente a formação das fases mineralógicas. (ZHAO, FAN e SUN, 2014).

De acordo com os sucessos relatados, pode-se dizer que o uso de RMF como matéria-prima alternativa em concretos e produtos cerâmicos permanecem tecnicamente e economicamente atraente. A presença de ferro residual é certamente um inconveniente em ambas as aplicações, a excessiva areia de quartzo é mais atraente para o concreto, mas pode ter um uso potencial dos rejeitos de minério de ferro na fabricação de telhas cerâmicas (WANNA et al., 2019).

2.2 RESÍDUOS DE CONCRETO (RC)

A demolição de estruturas antigas gera grande quantidade de resíduos de concreto em áreas urbanas. Esses resíduos geralmente são enviados para aterros sanitários que em geral não estão preparados para receberem este tipo material (CHIU e STROPKY, 2014). Os resíduos de construção são um problema crescente em muitos países, em especial nos países em desenvolvimento, pois os mesmos em sua maioria não possuem uma legislação que direcione estes resíduos para uma provável reutilização. Liang e Vernerey (2014) relataram que a tendência principal na otimização de materiais pós vida útil, faz com que se reduza a disposição de resíduos, evitando o uso de recursos naturais não renováveis usados na produção de materiais de construção, reduzindo assim seu impacto ambiental. Para o desenvolvimento sustentável, muitos pesquisadores estudaram a possibilidade de usar resíduos na produção de concreto, dentre eles Chen et al. (2011) estudaram a possibilidade de fabricar tijolos a partir de rejeitos de hematita e resíduo de concreto para construção de casas provisórias para operários de uma obra de usina hidrelétrica na China.

Da mesma forma, Allanyali et al. (2012) investigaram a adição de resíduo de concreto em tijolos industriais. Eles concluíram que a mistura de concreto contendo entre 15% e 30% de agregado reciclado de concreto não sofre uma clara perda de propriedades mecânicas em comparação com a amostra de referência, conseqüentemente, a reciclagem de detritos de concreto é de grande importância estratégica.

Os métodos tradicionais usados na indústria de materiais de construção geralmente têm muitos efeitos adversos na saúde pública e/ou no meio ambiente, portanto, formas alternativas mais seguras, mais eficientes e duráveis precisam ser consideradas. Nos últimos anos, a tecnologia dos materiais tem sido usada especialmente no setor da construção como substituto do cimento para viabilizar a sustentabilidade e reduzir os problemas ambientais e de saúde.

O uso de resíduos de concreto continua sendo um grande desafio, pois existem enormes quantidades de resíduos que podem ser usados em materiais de construção para formar novos produtos, bem como para preservar as fontes de matérias-primas naturais.

A resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) nº 307, que versa sobre a Gestão dos Resíduos da Construção Civil, define que:

Os resíduos de blocos de concreto, blocos cerâmicos, tijolos, argamassas, outros componentes cerâmicos e assemelhados tenham como solução de destinação inicial, a reciclagem, de modo que seja possível o seu aproveitamento como elemento agregado para uso em pavimentos e concreto sem função estrutural. Este grupo de resíduos deve ser destinado a áreas de transbordo e triagem, áreas para reciclagem ou aterros de resíduos da construção civil licenciados pelos órgãos competentes, podendo ser reciclados. (CONAMA 307).

A reciclagem é frequentemente citada como a melhor maneira de gerenciar os resíduos, mas, ainda existem vários obstáculos ao uso de agregados reciclados nas construções, tais como: a falta de confiança dos clientes e prestadores de serviços; a distância entre obras e usinas de reciclagem e a falta de normas e especificações (SILVA, BRITO e DHIR, 2014).

A produção de agregados reciclados de concreto geralmente passa por três etapas, iniciando pela triagem com remoção de quaisquer impurezas, tais como o aço, madeira, gesso, alvenaria, vidro, plástico; em seguida por um processamento de moagem-trituração e, por último, por um peneiramento para determinação granulometria do agregado. Segundo Tosic et al. (2015), durante o processamento o concreto perde uma certa quantidade de pasta de cimento, embora uma parte permaneça ligada ao agregado. Esta pasta de cimento residual é a principal causa da menor qualidade do agregado reciclado comparado com o agregado natural.

Para Ogawa e Nawa (2012), as tensões de impacto causado pelo processo de trituração do resíduo de concreto fazem com que a camada superficial do agregado fique fraca, porosa e quebradiça. O processo também deixa numerosas microfissuras, tornando o material com propriedades inadequadas para a utilização em peças estruturais, possibilitando a utilização em artefatos de concreto e mobiliário urbano para as grandes cidades (TAM et al., 2010).

O resíduo de concreto é composto de agregados naturais com argamassa aderida. As propriedades físicas como densidade, tempo de pega, resistência e exsudação, dependem da qualidade e quantidade de argamassa aderida no agregado natural. Este é um material poroso e a porosidade depende da relação a/c do concreto empregado, o que pode levar a uma necessidade maior de água de amassamento acarretando em um a/c maior e, conseqüentemente a resistência a compressão axial será menor se comparado com a mesma argamassa com agregado natural (ETXEBERRIA *et al.*, 2011).

Outras características dos agregados, tais como: tamanho, máxima absorção de água, textura da superfície e forma de agregação estão diretamente associados à

trabalhabilidade da composição; no caso de agregados reciclados do concreto (resíduos de concreto) é difícil satisfazer a trabalhabilidade necessária comparada ao uso de agregados naturais. Tendo em vista a perda do abatimento devido a água de amassamento ser insuficiente ou simplesmente sugada pelo agregado reciclado, em alguns casos faz-se necessário a utilização de aditivo para reestabelecer o abatimento desejado (BEHERA et al., 2014).

Para Poon e Lam (2008), os agregados reciclados de concreto tem, em média, uma densidade de 10% menor que os agregados naturais. A maior absorção de água e diminuição da qualidade e durabilidade, é devido à argamassa que se mantém ligada ao resíduo e ainda durante o seu processo de obtenção, causam fissuras os grãos, prejudicando a qualidade quando comparados com agregados naturais (DE JUAN e GUTIÉRREZ, 2012).

O resíduo de concreto para ser utilizado como agregado reciclado na construção precisa de mais pesquisas na área para melhorar a qualidade do agregado. No entanto, o agregado de qualidade ainda é caro, e portanto, economicamente inviável. Em países onde o agregado natural é mais barato que o agregado reciclado, inviabiliza-se o processo de reutilização do resíduo de concreto, e contribui para exploração de jazidas de agregados naturais, tornando o ciclo prejudicial ao meio ambiente (MORALES et al., 2011).

Nos Estados Unidos estima-se que a produção de resíduos da construção e demolição de edifícios residenciais e não residenciais, em 2003, estava perto de 170 milhões de toneladas (EPA, 2016).

A quantidade total de resíduos gerado na União Europeia, em 2010 foi de mais de 2,5 bilhões de toneladas, dos quais quase 35%, cerca de 860 milhões de toneladas, foram provenientes da construção e demolição, 27%, aproximadamente 672 milhões de toneladas, pertenciam à mineração e exploração de pedreiras e 38%, cerca de 926 milhões de toneladas, resíduos domésticos (EUROSTAT, 2016). Estima-se que a produção mundial anual de concreto varia entre 6 bilhões (ISO, 2005) e 21 bilhões de toneladas (WBCSD, 2014).

O consumo anual global de agregados naturais (miúdo e graúdo) é de cerca de 15 bilhões de toneladas (AGI, 2014). Por se tratar de um número elevado, a preocupação quanto a disponibilidade de agregados naturais e o efeito da sua extração para o meio ambiente é também grande e preocupante.

Ghataora et al. (2044), afirmam que para a produção de uma tonelada de agregado natural que chega ao consumidor final são emitidos cerca de 0,5 tonelada de dióxido de carbono. O dióxido de carbono é o principal contribuinte para o efeito estufa. Para Oliver; Maenhout; Peters (2012), a produção de agregados naturais representa cerca de 5% das emissões globais de CO₂.

Vários estudos confirmaram que a extração, transporte e processamento dos recursos naturais utilizados na produção de materiais de construção consomem grande energia e emitem muito mais CO₂, se comparado com o agregado reciclado. (LIMBACHIYA, MEDDAH e OUCHAGOUR, 2012; UTAMA et al., 2013).

Outro problema é a saturação de aterros com materiais que ainda podem ser reaproveitados. Segundo Dunster (2012), um dos meios de evitar a destinação dos resíduos de concreto aos aterros é através da reciclagem e/ou reutilização desse material. Embora, argumenta-se que as operações de reciclagem também geram problemas ambientais devido ao meio de transporte utilizado considerando as usinas estarem longe dos centros urbanos e processos de reciclagem antiquados (SARAIVA, BORGES e FILHO, 2012).

A utilização de resíduo de concreto em substituição ao agregado natural pode proporcionar a redução de impactos ambientais, diminuir a emissão de CO₂ e evitar a utilização de energia não renovável.

Liang et al., (2014), desenvolveram três diferentes traços utilizando agregados reciclados, variando métodos de tratamento de superfície para melhorar a resistência à compressão do concreto. Os resultados experimentais mostraram que o tratamento de superfície pode melhorar a qualidade do concreto. Segundo a pesquisa, a resistência à compressão de um concreto com 100% de agregado graúdo reciclado atingiu 23,0 MPa em 28 dias.

Etxeberria et al., (2011), utilizaram diferentes frações de agregados graúdos reciclados para produção de concretos, sendo 0%, 25%, 50% e 100%. As proporções de mistura foram concebidas com agregado reciclado molhados, a fim de manter a sua alta umidade. A utilização de agregados molhados reduz a capacidade de absorção do agregado e evita influenciar no fator água/cimento (a/c) das misturas, tendo em vista que o fator a/c é um dos itens mais importante na dosagem de concreto, argamassa e compósitos, pois quanto maior for seu valor, menor será sua resistência a compressão por exemplo. O resultado obtido foi que a resistência mecânica à compressão ficou em torno de 25% menor que a resistência

mecânica à compressão do concreto convencional aos 28 dias, quando se utilizou concreto feito com 100% de agregados graúdos reciclados.

Berndt (2009) fez cinco traços de concreto utilizando agregado reciclado de concreto em conjunto com frações de cinzas volantes e escória de alto forno, em substituição parcial do cimento. A mistura com 30% de agregado reciclado apresentou o melhor desempenho, porém percebeu-se que concretos com agregados reciclados são menos resistentes e mais permeáveis comparado com concretos de agregados naturais de referência.

Brand; Roesler e Salas (2015), estudaram a qualidade de agregados reciclados graúdo aplicados em concretos. Para as misturas foram utilizados agregados reciclados com diferentes condições de umidade: seco em estufa, parcialmente saturado, completamente saturado. Os resultados demonstraram que as propriedades do concreto fresco eram melhores quando os agregados reciclados estavam, pelo menos, parcialmente saturados.

Mukharjee e Barai (2014), investigaram as características da zona de transição de concretos contendo agregados reciclados com adição de nano-sílica. A zona de transição é a região entre as partículas de agregado graúdo e a pasta de cimento e água, é a considerada fase mais fraca do concreto e mais complexa. Para isso, foram dosados concretos com agregados naturais e reciclados com e sem nano-sílica. Os resultados evidenciaram que a substituição completa de agregados graúdos naturais pelos reciclados diminuem a resistência característica à compressão do concreto em 25%, este resultado foi atribuído à inferior qualidade dos agregados reciclados. No entanto, percebe-se que a incorporação de nano-sílica fez com que houvesse a redução da porosidade na zona de transição, conseqüentemente deveria aumentar a resistência do concreto, mas isto não ocorreu.

Courard; Michel e Delhez (2011), pesquisaram sobre a substituição de agregados naturais por agregados reciclados em concretos compactados a rolo. Os resultados mostram que o concreto com agregado reciclado apresentou bom desempenho mecânico para substituição de até 10% em massa.

Mymrin e Corrêa (2007), desenvolveram um compósito à base de resíduos de concreto e resíduos de produção de cal, para aplicação em artefatos de concreto como novo material na construção civil. A resistência à compressão média aos 90 dias chegou a 19MPa e a absorção de água de 12,0%.

Pasandín e Pérez (2014) incorporaram resíduos de concreto em uma mistura de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente), de modo a promover a construção sustentável. Foram analisados percentagens de 5%, 10%, 20% e 30% de resíduos de concreto no lugar dos agregados naturais. Os resultados indicaram que até 20% de substituição as propriedades mecânicas foram semelhantes aos obtidos para misturas convencionais de referência.

Arabani e Azarhoosh (2012) pesquisaram sobre as propriedades mecânicas de misturas asfálticas contendo resíduos de concreto e escória de aciaria. Seis composições asfálticas foram desenvolvidas e três apresentaram resultados satisfatórios, com relação ao fenômeno da fadiga, responsável pelo fissuramento de revestimentos betuminosos e também com relação ao acúmulo de deformações cisalhantes que ocorrem em camadas de misturas asfáltica. As três composições melhores continham entre 10 e 15% de agregado reciclado.

A incorporação de resíduo de concreto foi introduzida na execução de base e sub-base de estradas utilizando misturas de solos e agregados de concreto reciclado, conclui-se que a substituição de até 25% de agregado reciclado era compatível, quando se compara os esforços verticais transmitidos ao subleito por solo-brita (agregado natural) de referência (BENNERT et al., 2000; TAM, GAO e TAM, 2010).

2.3 RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE CELULOSE (RPCEL)

Atualmente, existem no Brasil 220 empresas em atividade, em 540 municípios, localizados em 18 Estados, que juntas faturaram 4,7 bilhões de dólares e exportaram 13,00 milhões de toneladas de celulose em 2013. O país é o quarto maior produtor mundial de celulose com 6.900 mil de hectares de floresta plantada, que corresponde a 0,8 % da área do território nacional, ficando atrás dos Estados Unidos com 50.351 mil toneladas, China com 18.198 mil toneladas e Canadá com 17.073 mil toneladas (BRACELPA, 2016).

No processo químico Kraft de obtenção de celulose, a madeira, sob forma de cavaco, é tratada em vasos de pressão, denominados digestores, com soda cáustica e sulfureto de sódio. É um processo químico que visa dissolver a lignina, preservando a resistência das fibras, obtendo-se dessa maneira uma pasta denominada *Kraft*. É muito empregado para a produção de papéis cuja resistência seja o principal fator, como, por exemplo, sacos para cimento, cal hidratada, sílica e metacaulim (PIOTTO, 2013).

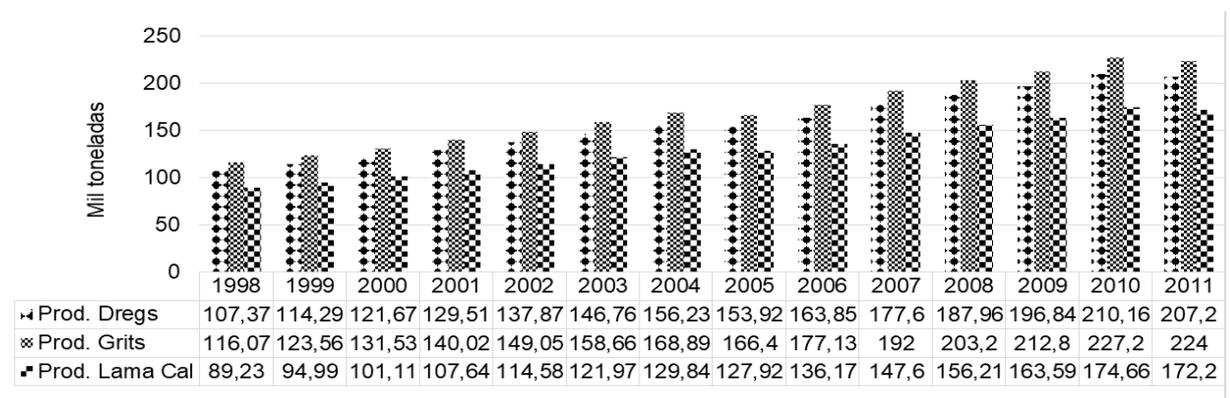
Segundo Wenzel (2012), o processo Kraft transfere os cavacos de madeira em solução alcalina forte de soda cáustica e sulfeto de sódio, denominado no processo de Licor Branco, em seguida é realizada a recuperação dos reagentes químicos a qual é uma das grandes vantagens do processo Kraft o qual gera energia ao processo com a biomassa dissolvida no licor residual de cozimento, denominado de Licor Preto.

As cinco grandes etapas do processo *Kraft* de produção de celulose, são: o pátio de madeira, a linha de pasta, as utilidades, a caustificação e a secagem. A primeira etapa recebe toras de 6 metros e os produtos gerados são cavacos triturados em condições adequadas para o cozimento, com dimensões entre 3 e 8mm, as cascas das toras e os cavacos menores que 3mm são considerados biomassa a serem utilizados nas caldeiras. A segunda etapa recebe os cavacos para cozimento e deslignificação em solução alcalina de soda caustica, chamada Licor Branco, e o produto gerado neste processo é o Licor Preto proveniente da biomassa dissolvida no cozimento. A terceira etapa recebe o Licor Preto e o processa em elevadas temperaturas de queima tornando-o uma pasta, com 20 até 40% de umidade, resultando em sais minerais fundidos, este processo é de fundamental importância econômica e ambiental para o processo *Kraft* de produção

de celulose, tornando-o viável e sendo denominado smelt ou Licor Verde. A quarta etapa recupera os reagentes químicos no processo de caustificação do Licor Verde, o qual é o composto de smelt que são os sais minerais fundidos resultado da queima do Licor Preto, dissolvido pelo Licor Branco. A última etapa remove até 90 % de umidade da polpa de celulose a qual para produção do papel, corte, enfardamento e comercialização. Nesta quarta etapa os principais resíduos gerados são o Dregs (RD), Grits (RG) e Lama da cal (RLC) (FIORESE, 2009).

A geração de resíduos dos resíduos da recuperação química, da produção de celulose Kraft, pode ser calculada, com base no estudo de caso feito em uma indústria paulista de celulose (Martins 2006). Segundo essa autora, a de geração dos resíduos em quilogramas (kg) por tonelada de Polpa Seca ao Ar Livre – em inglês: *Air Dried Pulp ton (ADPt)* – seria: 14,8 kg/ADPt para o *dregs*, 16 kg/ADPt para o *grits* e 12,3 Kg/ADPt para a lama de cal. Os valores da geração de resíduos da produção de celulose, seguem apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Geração de resíduos dregs, grits e lama de cal no Brasil – 1998 a 2011



Fonte: BRACELPA 2013.

Pode-se perceber que a geração dos resíduos da produção de celulose aumenta a cada ano, por este motivo torna-se necessário uma alternativa adequada para a destinação deste material.

Os resíduos da recuperação química: dregs, grits e lama de cal, derivam do processo Kraft de produção de celulose, a custo de novas tecnologias esses resíduos podem ser transformados em insumos e subprodutos para a construção civil.

Segundo Caux (2012), a recuperação química é uma das etapas responsáveis por recuperar os reagentes utilizados na digestão da madeira (Na_2S e $\text{Na}(\text{OH})_2$), e por consequência, produz os resíduos *dregs* e *grits*, que são os

principais pontos de concentração de elementos, como: óxido de magnésio, carbonato de cálcio, sódio, magnésio orgânico, sílica, ferro, magnésio, manganês, alumínio, sulfetos e cloretos.

O primeiro resíduo gerado é o dregs (RD) é um produto com coloração escura, resultante da queima incompleta do licor negro kraft na caldeira de recuperação e posterior precipitação, favorecida pelo meio fortemente alcalino, de elementos não processuais, como Al, Mg, Mn, Fe, Co, P, Si e Ca (MARTINS, 2007).

O RD constitui-se de um material fino e escuro, que se sedimenta facilmente, trata-se de pequenos resíduos resultantes da combustão incompleta que ocorre na fornalha da caldeira de recuperação. A presença de compostos cáusticos adsorvidos e/ou presentes de forma livre em sua superfície, mesmo quando lavado, ainda assim mantém um residual caustico e um pH elevado, portanto é alcalino.

Normalmente, o dregs é composto por carbonato de sódio, carbonato de cálcio, hidróxido de sódio, sulfetos, carbono não queimado e vestígios de metais pesados (Jordan *et al.*, 2002). Além dos componentes listados, os cristais de fosfato de cálcio podem ser precipitados e geralmente, o cálcio é o elemento mais abundante no dregs (ULMGREN e RAADESTROEM, 1997).

Foelkel (2013), explica que o dregs, quando recolhido isoladamente, é reconhecido por sua finura granulométrica: 90% de suas partículas são inferiores a 1,19 mm em diâmetro e densidade de 2,65 g/cm³ (base seca).

Aplicações do resíduo dregs: Landim (2005), estudou a adição de dregs ao efluente do branqueamento ácido no processo de branqueamento Kraft de celulose, como forma de reutilizar o resíduo no processo; GEMELLI *et al.*, (2009), estudaram a incorporação de quatro resíduos de celulose (Dregs, Grits, Cinza e Fibras) para aplicações em materiais de construção. A cinza e o dregs foram usados em substituição ao cimento enquanto que as fibras e o grits foram usados em substituição à areia, as resistências obtidas foram satisfatórias segundo o autor. DELCOLLI *et al.*, (2012), estudaram a influência de dregs na produção de argila expandida. Foram confeccionados corpos de prova com 1, 3, 5 e 10% do resíduo e uma composição de argila padrão, e queimados até 1160°C. Os corpos de prova que continham 10% do resíduo apresentaram melhor resultado de resistência mecânica.

O pH medido no dregs na saída do filtro de pré-prensagem encontra-se dentro do intervalo de 10 e 12,8 (MANSKINEN *et al.*, 2011).

O Segundo resíduo da produção de celulose é o grits (RG) consiste em um material insolúvel removido do reator de apagamento (no qual é adicionado CaO para regeneração do NaOH), rico em Ca, Mg, K, Na e Al, além de quantidades significativas da pirssonita $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2\text{H}_2\text{O}$], um carbonato mineral precipitado.

O grits são resíduos formados na preparação da cal hidratada, é o resultado da hidratação da cal virgem (óxido de cálcio), formando-se uma solução de cal hidratada (hidróxido de cálcio). Como a cal virgem produzida no forno de cal não é absolutamente pura e tampouco é totalmente reativa, sobram resíduos de outros compostos vitrificados, areia, carbonato de cálcio não reativo, etc. Esses resíduos que não se dissolvem são removidos como grits.

É comum a presença de carbonato de cálcio nos grits, pois a calcinação da cal nunca é completa no forno. Entretanto o Grits é um material residual do processo de hidratação da cal virgem para cal extinta, ou seja, da conversão do CaO para $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Consiste basicamente de cal virgem extremamente queimada e de carbonatos inertes não hidratados. São gerados na proporção de 1 a 4 kg secos/adt polpa. Portanto os resíduos que não se dissolvem são removidos como Grits. É comum a presença de carbonato de cálcio no Grits, pois a calcinação da cal nunca é completa no forno (Manskinen et al., 2011).

O resíduo do processo de hidratação da cal calcinada, que consiste em cal virgem queimada, carbonatos e inertes não hidratados, ou seja, partículas inertes separadas da cal durante a etapa de caustificação.

Segundo Martins (2006), durante a reação de hidratação da cal a liberação de calor é violenta, provocando a desintegração das partículas de cal, aumentando com isso a área exposta e liberando os sólidos inertes, *grits*, que serão separados e descartados. A quantidade estimada de *grits* gerado para cada tonelada de celulose seca ao ar livre é de 16,0 Kg/ADPt.

Considerando um crescimento médio anual de 7,5% na produção brasileira de celulose desde 1970, e as 14 milhões de toneladas de celulose produzidas no país em 2011, estima-se que o Brasil gerou e depositou em aterros industriais cerca de 3,9 milhões de toneladas de *grits*, nos últimos 40 anos (MARTINS, 2006; BRACELPA, 2012).

As caracterizações do grits realizadas por Machado, Pereira e Lima (2008), indicam que o grits é um resíduo rico em cálcio. A perda ao fogo elevada e o alto teor de CaO (óxido de cálcio) confirma a constituição carbonática do resíduo.

Foi ainda detectada a fase calcita (CaCO_3) no resíduo. Através da análise dos extratos lixiviados e solubilizados, o grits foi classificado como classe IIA, isto é, resíduo não-perigoso e não inerte (MACHADO, PEREIRA e LIMA, 2008). Também foi identificado que o grits constitui-se de areia, pedregulho, calcário (CaCO_3) e outras impurezas, podendo possuir, também, quantidades de CaO , Ca(OH)_2 e Na_2CO_3 .

O grits é um resíduo rico em cálcio, magnésio, potássio, sódio e alumínio. Sabe-se inclusive que ele contém razoáveis quantidades do carbonato mineral precipitado conhecido como pirssonita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Em relação ao dregs, é um resíduo mais grosseiro, com 70% de suas partículas com dimensões entre 0,425 a 4,75 mm e cerca de 10% de finos (menores que 0,075 mm). Sua densidade real é praticamente a mesma do dregs, cerca de $2,66 \text{ g/cm}^3$ (ADAMS, 2007).

Segundo Albuquerque et al., (2012) o grits apresentou-se potencialmente utilizável como agente estabilizante de solo para pavimento de estradas florestais, sendo mais eficiente após o tratamento térmico do grits a 600°C . Conforme Machado et al. (2007), dentro do comportamento geotécnico de misturas granulométricas de solo-grits os resultados apontaram que a fração fina do grits é a mais importante para ganhos de resistência mecânica, demonstrando a sua importância na reatividade das misturas, sendo que a fração graúda exerce menor influência nos ganhos de resistência mecânica dos solos.

O estudo proposto por Silva Jr (2010), para a valorização de resíduos da indústria de celulose na produção de agregados leves concluiu que a melhor utilização para os grits é, provavelmente, na aplicação como agregado, pois, em sua avaliação, as propriedades do grits mostraram que o material não é muito poroso, o que indica que o grits pode simular o efeito de cobertura da calcita ou dolomita no processo industrial.

Foi adicionado no processo de produção de cimento teores de grits entre 1% a 5% com relação ao peso das adições, e a conclusão obtida é que não foi evidenciado significativamente alterações nos valores previstos na composição do cimento, quanto a sulfatos e óxido de sódio (Na_2O) (ULMGREN e RAADESTROEM, 2013).

Conforme Martins (2006), a caracterização química e mineralógica do grits indica que o mesmo pode ser utilizado em substituição ao hidróxido de cálcio, neutralizante geralmente utilizado para o tratamento do efluente do branqueamento

ácido do processo Kraft e ainda afirmou que o grits pode contribuir para o aumento da fertilidade e calagem do solo.

O terceiro resíduo gerado na produção de celulose é a lama da cal (RLC) é extraído na etapa de clarificação do licor branco. Ela é constituída essencialmente por CaCO_3 , além de uma fração de componentes inertes, como óxido de magnésio, silicatos e fosfatos.

A lama da cal (RLC) é um resíduo fino que surge esporadicamente nas fábricas de celulose kraft. Sua geração ocorre nos momentos em que o forno da cal apresenta algum tipo de problema na operação ou manutenção do forno as empresas passam a fazer a caustificação a partir da cal virgem comprada no mercado até que a solução do problema de manutenção do forno da cal seja resolvida. Com a entrada da cal virgem comprada, ocorre ao mesmo tempo uma sobra de lama de cal, já que o forno não tem condições de queima-la e calciná-la. Quanto mais tempo o forno se mantiver parado e por mais tempo a situação persistir, maior será geração o resíduo da lama da cal. Para manutenções longas do forno da cal, as fábricas muitas vezes se veem em apuros, pois em geral não estão preparadas para manusear e estocar tanto resíduo.

Foelkel (2013) descreve que a remoção simultânea de dregs e grits inclui, via de regra um terceiro resíduo que é a lama de cal. Para facilitar o processo de lavagem e filtração desses dois resíduos, existe uma tecnologia muito utilizada que consiste em filtros lavadores que incorporam uma pré-camada de lama de cal antes de receberem o dregs e o grits. A quantidade removida de lama de cal varia entre 3,5 a 10,0 kg de lama base seca por tonelada do dregs e grits lavado e filtrado. O carbonato de cálcio (CaCO_3) quando removido, é denominado no processo como lama de cal.

Wolff, Santana e Grego (2008), classificam a lama de cal como material residual liberado como purga da alimentação do forno de cal, sendo constituído em quase sua totalidade por carbonato de cálcio e uma fração de inertes que varia entre 5 a 15% (óxidos de magnésio, silicatos, fosfatos, etc.). Estes autores relatam que a geração da lama de cal varia entre 6,0 a 10,0 kg secos/adt.

A composição da lama de cal é de 85 à 95 % carbonato de cálcio (CaCO_3) e de 5 à 15 % de inertes, óxidos de Magnésio, Silicatos e Fosfatos. O lodo contém partículas muito finas de CaCO_3 precipitado junto com pequena quantidade variável do resíduo *dregs* não precipitado (CABRAL et al., 2008).

A lama de cal deve ser processada, separada, lavada e filtrada antes de entrar no calcinador, ou forno de cal, com o objetivo de oxidar o sulfeto de sódio (Na_2S) residual e aumentar seu teor seco, tendo em vista que este processo pode ser realizado várias vezes com o objetivo de retirar o máximo proveito do material. Quando é grande a quantidade de impurezas presentes na lama da cal ou quando há um excesso de resíduo produzido, ele não é enviado para o forno de cal, gerando assim o resíduo (SENAI-CETCEP).

Segundo Martins (2006), a quantidade estimada de Lama de Cal gerada para cada tonelada de polpa de celulose seca ao ar livre é de 12,0 Kg/ADPt.

Considerando um crescimento médio anual de 7,5% na produção brasileira de celulose desde 1970, e a produção nacional de 14 milhões de toneladas em 2011, estima-se que o Brasil gerou e depositou em aterros industriais cerca de 3 milhões de toneladas de lodo de cal da produção de celulose de processo Kraft, no período de 40 anos (MARTINS, 2006; BRACELPA, 2012).

A redução, reutilização e reciclagem de resíduos da produção de celulose Kraft têm sido feitas em todo o mundo. Com métodos e fases de tratamento que variam, entre: química, física e biológica, com objetivos diversos que vão, desde a geração de energia ao desenvolvimento de novos produtos menos prejudiciais ao meio ambiente, sem abrir mão de ganhos econômicos (VAN HEININGEN, 2016).

Toikka (2013), pesquisou sobre a utilização da mistura de cinzas de moagem de celulose e resíduos dregs em camadas de barreiras hidráulicas em aterros e em construções de estradas. Os resultados demonstraram melhora da resistência do solo e redução da deformação.

Castro et al., (2014), realizaram estudos sobre a utilização do dregs como matéria-prima potencial na produção de clínquer de cimento. Porém com base nos resultados, as adições devem ser mantidas baixas, em torno de 1 a 5%, para controlar potenciais emissões de enxofre na fase de produção.

Cabral et al., (2009), investigaram o uso da lama da cal em solos ácidos, mesmo o resíduo apresente grandes concentrações de metais foi aplicado ao solo repetidas vezes elevando o pH solo, podendo ser comparável ao uso de calcário agrícola comercial.

Alguns autores também pesquisaram sobre o uso de dregs, com percentagem entre 10 a 30%, nas misturas de compostos orgânicos em solos degradados. Verificou-se diversos efeitos potencialmente benéficos, devido à sua

maior alcalinidade, entre eles o de favorecer na hidratação da cal e do cimento, propiciando ambiente favorável ao aumento de resistência do solo-cal e solo-cimento utilizados para estabilizar bases e sub-bases para pavimentação asfáltica (JORDAN et al., 2002).

Outros estudos sugerem que as alterações no solo causadas pelo uso de dregs podem melhorar a disponibilidade química de nutrientes pelo aumento do pH do solo que pode resultar em um efeito positivo, especialmente em solos ácidos com baixo teor de matéria orgânica e nutrientes (RITTER; MCDERMOTT; CHIRNSIDE., (2012). Entretanto, Jordan et al. (2002) defende que o uso de dregs no solo pode ser prejudicial devido aos seus compostos clorados e ao conteúdo de metais pesados, não sendo recomendado utilizar em áreas de agricultura.

Albuquerque et al. (2012), avaliaram às propriedades físicas e químicas de dois solos, entre 0 e 20 cm de profundidade, com resíduo alcalino de celulose dregs incorporado a eles e constataram o aumento no potencial eletronegativo superficial em ambos os solos e redução da taxa de floculação de argila na camada mais profunda ocasionada, possivelmente, por forças de repulsão entre as partículas do solo. Concluíram dizendo que a estabilidade do solo não foi alterada pela aplicação de resíduos alcalinos.

A mistura solo-resíduo com vistas à melhoria de subleitos e pavimentos de estradas, pode ser uma boa alternativa para os resíduos ricos em Ca(OH)_2 , CaCO_3 e CaO . Segundo Machado et al., (2007), a mistura solo-resíduo, lama de cal ou *grits*, em conjunto com tratamento térmico admite grande retenção de metais pesados, principalmente se os teores de caulinita e de geothita estiverem na faixa de 20 a 50% (MACHADO, LIMA e PEREIRA, 2008).

Machado et al., (2007), descrevem quanto ao aumento da reatividade adquirida ao *grits* e o efeito relativo à estabilização do solo, após o tratamento térmico variando de 800°C á 900°C, denominada no processo de calcinação. Uma alternativa tecnológica, permite a utilização de 24% de peso em porção seca do solo, por *grits* demonstrou um ganho na estabilização do solo por onde passará uma rodovia pavimenta. Foram observados principalmente ganhos nos valores da resistência mecânica (PEREIRA, MACHADO e LIMA, 2006).

Pereira et al., (2006) estudou a viabilidade técnica do emprego de alguns resíduos da produção de celulose e papel: *grits* e lama de cal, nas misturas para pavimentos de estradas florestais não pavimentadas. O resultado mais interessante

observado em campo foi a mistura 30% de lama de cal e 70% de cascalho, conforme dados coletados foi a que se demonstrou a mais promissora.

Os resíduos lama de cal e *dregs*, foram estudados na construção de bases e sub-bases de rodovias. Tendo como objetivo analisar o comportamento mecânico de misturas de solo-resíduo, solo-cal e solo-resíduo-cal e compostas por dois tipos diferentes de solos quanto ao comportamento. Concluiu que o aumento do tempo de cura produz o aumento contínuo nas resistências à compressão simples e diametral, supondo que seja decorrente da reação pozolânica da cal com o solo e com o resíduo que se desenvolve ao longo do tempo. Por fim, o reaproveitamento dos resíduos mostrou-se promissora e favorável ao meio ambiente, pois evita a disposição inadequada destes materiais em aterros sanitários (SILVA; BRITO; DHIR, 2014).

Algumas técnicas convencionais para o manejo e descarte desses resíduos como, por exemplo: compostagem, utilização no processo corretivo de solos, biomassa para geração de energia e aterro industrial foram estudados por (BELLOTE et al., 1998; CABRAL et al., 2008; VAN HEININGEN, 2016).

Na construção civil têm se criado alternativas de utilização dos resíduos *dregs* e *grits* em conjunto com o cimento em compósitos cerâmicos, no entanto observaram uma absorção de água acima do tolerado em norma (GEMELLI, CAMARGO e BRESCANSIN, 2009; LOUZADA, BIZINOTO e ROMONICH, 2009).

Gemelli, Camargo e Brescansin (2010), estudaram a influência da aplicação de resíduos de celulose e papel: *dregs*, *grits*, cinza e fibra, em argamassas de construção preparadas com CII-F-32 ou CII-Z-32 Portland e areia na proporção 1:3. O *dregs* e a cinza foram usadas no lugar do cimento, em quanto o *grits* e a fibra foram usados para substituir a areia. A investigação revelou que a composição e a microestrutura dos resíduos de cinzas foram semelhantes aos de ligantes hidráulicos, enquanto o *grits* usado apresenta uma composição e microestrutura que se assemelham a da areia, permitiu ser incorporado em argamassas. O tempo de cura, de 7 a 28 dias, e o tipo de cimento influenciou na resistência mecânica à compressão axial. Os melhores resultados foram obtidos em 28 dias de cura, com cimento CII-F-32, cinza e *grits*.

Segundo Louzada, Bizinoto e Ramonich, (2011), a ativação de escórias com resíduos alcalinos da produção de celulose, cinza e *dregs*, torna possível a produção de novo material cimentante de matriz criada à base exclusiva de resíduos, com

vantagens ambientais e econômicas. Por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi observado que a matriz criada apresentou produtos hidratados com um gel denso e contínuo. A pasta ativada com os resíduos apresentou resistência superior à pasta com 100% de escória, concluindo que os resíduos alcalinos estudados são elementos ativadores da escória.

Wolff et al., (2008) estudou o uso do lodo de tratamento de água em conjunto com resíduos da indústria de celulose: *dregs*, *grits* e lama de cal, e resíduo da britagem de granito, denominado pó de granito, na produção de cerâmica vermelha. A formulação foi baseada na distribuição granulométrica, (estabelecido pelo diagrama de Winkler), e as proporções de Óxidos de Cálcio (CaO), Sódio (Na₂O) e Potássio (K₂O), para obter um material com maior resistência mecânica após a queima. Ao final do processo, foram verificadas as proporções dos óxidos de cálcio, sódio e potássio, tornando possível a inserção destes materiais na produção de cerâmica segundo o autor.

Foram utilizados os resíduos *dregs* e *grits* em uma matriz de argila para a produção de cerâmica vermelha, sendo analisado as propriedades físicas e químicas destes materiais antes e após a queima a 1000°C. Os resultados obtidos permitiram concluir serem viáveis o uso dos resíduos em teores de cerca de até 10% em massa, na produção de telhas ou tijolos, com níveis de resistência mecânica apropriada para a finalidade de aplicação destes produtos. Ainda foi possível observar que os resíduos reduziram os níveis de concentração em solução, de Cloreto, Sódio e Sulfeto, lixiviados, quando submetidos à queima a 1000 °C, admitindo característica de material inerte (RIBEIRO et al., 2008).

Um estudo aprofundado sobre o processo de fabricação de cerâmicas vermelhas com resíduos da indústria de celulose: (*dregs*, *grits* e lodo de estação de tratamento de água). Foi realizado, por Caux (2006) que substituiu em até 25% a argila por lodo da estação de tratamento de água ou até 15% por resíduos *dregs* e *grits*, nos traços 50%:50%. Segundo esta pesquisa, a retração volumétrica das peças cerâmicas vermelhas que receberam a adição do lodo da estação de tratamento de água podem ser reduzidas com a introdução dos resíduos (*dregs* e *grits*), limitada em até 15% em peso.

2.4 RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE CAL (RPC)

Para Petti (1976), as rochas carbonatadas ou calcários são rochas constituídas, basicamente, por minerais de carbonato de cálcio (CaCO_3) denominados calcita. Esses minerais combinados com o carbonato de magnésio (MgCO_3) formam a rocha dolomítica (carbonato de cálcio e magnésio). Estas rochas podem ainda conter impurezas como matéria orgânica, quartzo, silicatos, fosfatos, sulfetos, sulfatos, óxidos metálicos de ferro e manganês, fluoretos e outros. Os elementos que acompanham mais frequentemente a calcita e a dolomita são: alumínio, titânio, sódio, potássio, bário, chumbo, vanádio, cromo, cobalto, níquel, cobre, gálio, zircônio, molibdênio e estanho.

O termo “calcário”, segundo Petrucci (1976), é empregado para caracterizar um grupo de rochas que suas propriedades são governadas pelo carbonato de cálcio (CaCO_3) que têm boa resistência mecânica e média durabilidade.

A produção da cal é um processo intensivo de emissões de CO_2 . É produzido a partir do calcário, que depois de extraído, selecionado e moído, é submetido a elevadas temperaturas em fornos industriais num processo conhecido como calcinação, que dá origem ao CaO (óxido de cálcio ou cal) e libera CO_2 (gás carbônico) (SLOTTE, ROMÃO e ZEVENHOVEN, 2013).

De acordo com Guimarães (2002), o processo de transformação dos blocos de rochas calcária em aglomerante se inicia nas partes mais quentes (em contato com os gases), evoluindo como “ondas térmicas” em direção as zonas frias (núcleo dos blocos). Ainda segundo o mesmo autor, a cal é a primeira camada a se formar no processo de calcinação e como possui condutividade térmica bem maior do que a rocha ela faz com que a velocidade de avanço da camada calcinada diminua à medida que se aproxima do núcleo do bloco submetido ao calor. Assim, de acordo com a distribuição granulométrica, da distribuição e carga do calor ao longo das zonas de aquecimento e calcinação, é frequente encontrar no material não calcinado uma zona central (núcleo) não dissociada, isto é, na forma de carbonato (“pedra crua”).

A calcinação perfeita depende da experiência do operador, da temperatura de queima e tecnologia do forno (OATES, 1998). Trabalhos na literatura referenciam também os fenômenos de transportes de calor no interior de fornos rotativos (SALCUDEAN et. al., 2004; CHIU e STROPKY, 2004).

Para Garcia (2008), os resíduos da produção da cal se originam da rocha calcária mal queimada, quando o processo de combustão ocorre de forma incompleta. Esses resíduos são geralmente comercializados como subprodutos, constituído essencialmente da cal e elementos não calcários como: Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , entre outros, em quantidade total superior a 12%. (NBR 6453) (ABNT, 2003).

Quanto à sua aparência, segundo Guimarães (2002), quando provém de rochas carbonatadas puras, a cal virgem é um produto inorgânico branco, podendo ainda apresentar colorações creme, amarelada e levemente cinza, o que pode indicar a presença de impurezas.

De acordo com Cincotto (2007), as principais variáveis que influem na qualidade da cal são: qualidade da matéria prima (características físicas e químicas), tamanho e distribuição granulométrica da rocha, velocidade de calcinação; temperatura de calcinação, duração da calcinação, tipo e qualidade do combustível, possibilidade de recarbonatação. Logo, estas variáveis afetam a possível geração do resíduo da produção de cal.

Para Pereira *et al.* (2008), a qualidade comercial de uma cal depende das propriedades químicas do calcário e da qualidade da queima.

Segundo Schulz *et al.* (2014), os maiores produtores mundiais de cal são: a China com 220 milhões de toneladas (63%), Estados Unidos, com 19 milhões de toneladas (5,5%), Índia, com 16 milhões de toneladas (4,5%), Rússia, com 10,4 milhões de toneladas (3%), Brasil, com 8,5 milhões de toneladas (2,5%), Japão, com 8,2 milhões de toneladas (2,3%) e Alemanha, com 6,5 milhões de toneladas (1,8%).

Segundo a ABPC (Associação Brasileira dos Produtores de Cal), o mercado brasileiro da cal contabilizou, em 2008, uma produção acima de 7 milhões de toneladas do produto, o que mantém o Brasil na disputa pela 5ª posição entre os países produtores.

No Paraná, a produção de calcário foi de 12 milhões de toneladas em 2014 (REBELO, GUIMARÃES e NETO, 2003).

As cales são produtos de múltiplos usos: na construção civil, a cal é utilizada, principalmente, na forma hidratada, como componente fundamental no preparo de argamassas, na construção de estradas, como elemento de estabilização de solos de baixa capacidade de suporte e como aditivo de misturas asfálticas, assegurando maior longevidade ao capeamento das rodovias, nas indústrias siderúrgica e

metalúrgica, em diversas fases da fabricação do aço, do alumínio e de outros metais não ferrosos, como cobre, ouro, níquel e zinco (ABPC, 2014).

Já os resíduos da produção de cal, como calcário e carbonatos à base de cal são utilizados pelas indústrias de cimento na clínquerização para a conservação de energia térmica (BHATTY e GAJDA, 2014).

Stroeven et al., (2011), pesquisaram composições a base de cal residual e cimento Portland de baixa qualidade para produção de compósito de cimento, obtendo um novo material de alta performance.

Al-Sayed et al., (2015), aplicaram o resíduo da produção de cal como matéria-prima na estabilização solo de base e sub-base onde seria executado pavimentos de concreto e verificaram que as misturas atenderam as exigências mínimas.

Mohammed et al., (2002), pesquisaram sobre a utilização do resíduo da produção de cal como um material de enchimento em misturas de pavimentação asfálticas.

Do, Mun e Keun (2017), estudaram as características do resíduo da produção de cal, subproduto da produção de carbonato de sódio (Na_2CO_3) incorporado ao concreto asfáltico. Os resultados demonstraram que houve melhora nas características de deformação permanente, rigidez e resistência à fadiga do concreto asfáltico.

Hart, Shakoor e Wilson (2013), avaliaram o desempenho de 20 amostras de resíduo da produção da cal a fim de garantir sua aplicação na construção civil. Os resultados mostraram que misturas de resíduos da produção da cal com solo tem grande potencial de aplicabilidade, como na cobertura diária de aterros, construção de barreiras hidráulicas, bem como material de preenchimento estrutural.

Segundo Guimarães et al. (2002), a cal origina a cal virgem comum, ou óxido de cálcio (CaO), a cal hidratada, ou hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a cal virgem dolomítica, ou óxido de cálcio e magnésio (CaOMgO), a cal hidratada normal tipo N, ou hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio ($\text{Ca}(\text{OH})_2\text{Mg}(\text{OH})_2\text{MgO}$), por exemplo. Por sua versatilidade e uso, ela está entre os 10 produtos de origem mineral de maior consumo mundial, muito usado como aglomerante-ligante e reagente químico.

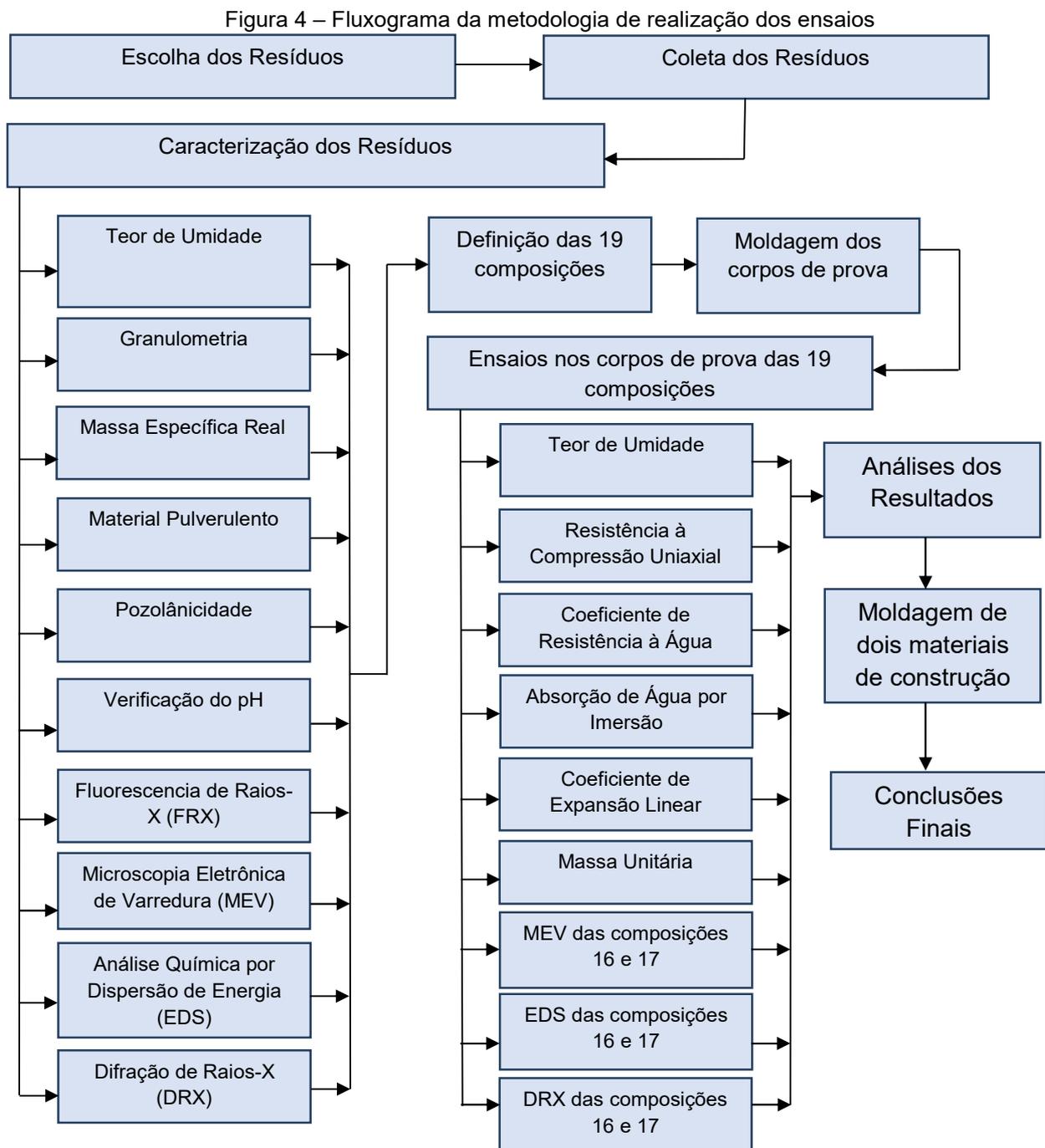
O uso da Cal pode ser observado na construção civil, no preparo de tintas, pigmentos e curtumes, na fabricação de metais não ferrosos, na produção de celulose e papel, de refratários, de borracha, na agricultura, entre outros. Como

aglomerante é utilizada em argamassas de assentamento, reboco e emboço, misturas asfálticas, matérias isolantes, misturas solo-cal, produtos com silicato cálcico, tijolo sílico-cal, pelotização de minério de ferro e estuques (GUIMARÃES, 2002; ABPC, 2013).

Waltrick (2010) analisou as características da cal utilizando a espectrofotometria de absorção atômica, apresentando um teor de SiO_2 , Al, Mn, K, Na, entre outros elementos, em aproximadamente 22,4%. Ainda foi encontrado na amostra, teor de calcário não queimado de 18,5 %, classificando este material como sendo Resíduo da Produção da Cal (R.P.C.) o qual não poderá ser utilizada como um aglomerante tradicionalmente comercializada no Brasil.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa serão descritos os procedimentos adotados na presente tese, desde a coleta das amostras, sua caracterização, preparação dos corpos de prova, composição das amostras, preparação dos corpos de prova, os ensaios, e as análises efetuadas com o intuito de desenvolver e testar, a nível de laboratório, os novos compósitos oriundos dos resíduos industriais, a Figura 4 traz o fluxograma com o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2019).

A determinação da composição granulométrica dos resíduos da produção de celulose foi obtida conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e os agregados classificados conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019), o material pulverulento por meio da NBR NM 46 (ABNT, 2003).

A massa específica aparente para agregado miúdo utilizou a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Para a determinação do teor de umidade dos resíduos utilizou-se a NBR 16097 (ABNT, 2012).

Os compósitos desenvolvidos com os resíduos aqui estudados seguiram as premissas da norma NBR 5738 (ABNT, 2003), no qual se destacam os processos de homogeneização das misturas, moldagem e cura dos corpos de prova.

As análises de absorção de água dos corpos de prova foram realizadas conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2009), e os ensaios de dilatação dos corpos de prova se deram conforme especificações da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram realizados conforme a (NBR 5739) (ABNT, 2007), com equipamento da marca EMiC, modelo DL 30000, capacidade máxima de 300 KN, com rótula, que comprimiu os corpos de prova a 2 mm/min até atingir o limite de rompimento de 30%, gerando os resultados finais dos ensaios. Por meio do software Tesc foram observados: a força máxima, em newton, a tensão em megapascal (MPa), com o qual se obteve os valores de resistência a compressão das amostras. Já as análises de resistência à água, seguiram as premissas da GOST 9479-84 de 1985, no qual se admite perda da resistência à compressão uniaxial de até 35 % dos corpos de prova saturados em relação a média das resistências dos corpos de prova secos.

A análise da composição química dos resíduos fez uso do método de Fluorescência de Raio-X – FRX – o qual foi realizada através do Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X da marca PANalytical, modelo Axios Max, adjunto ao software SuperQ 5I, para interpretação de análise semiquantitativa de varredura química dos materiais, operando com fonte de Raios-X o tubo de Rh de 3 kW, para efetuar a leitura da composição química por dispersão de comprimento de onda sequencial.

A análise de Difração de Raio-X foi executada por meio de Difrátômetro de Raio X da marca PANalytical, modelo EMPYREAN, adjunto ao software X'Pert High Score Plus para interpretação das fases cristalinas das amostras, resultando na

sequência de picos obtidos na contagem dos eventos. Os materiais analisados foram o rejeito de minério de ferro (RMF), o resíduo de concreto (RC), os resíduos da produção de celulose RPCEL (dregs + grits + lama de cal) e o resíduo da produção da cal (RPC).

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Energia Dispersiva foram realizadas na UTFPR e contaram com os equipamentos ZEISS e OXFORD Instruments, modelos EVO MA15 e X-MAX, por meio dos softwares Smart SEM e INCA – Point & ID, respectivamente, no qual foram realizadas as análises morfológicas e de composição atômica dos corpos de prova.

3.1 ESCOLHA DOS RESÍDUOS

A escolha dos resíduos se baseou no princípio de que os aglomerantes reagem em ambiente alcalino, logo a escolha de um resíduo com pH alcalino, poderia ser capaz de proporcionar uma condição favorável para o RPC agir com propriedades aglomerantes.

Por definição todo aglomerante é um material ativo e ligante, cuja sua principal função é formar uma pasta que promova a união entre os grãos existentes.

Ainda temos o RMF utilizado com função pozolânica (tendo em vista que o mesmo reage com o hidróxido de cálcio na presença de água formando compostos com propriedades cimentícias), cuja a pasta proporcionará a união de todos os resíduos que favora a obtenção de compósitos coeso, com maior resistência mecânica.

3.2 COLETA DOS RESÍDUOS

Os resíduos de concreto (RC), os resíduos da produção de celulose (RPCEL) e o resíduo da produção da cal (RPC) foram coletados em empresas na região metropolitana de Curitiba, no estado Paraná, Brasil. O resíduo de minério de ferro (RMF) foi coletado após o rompimento da barragem de Fundão em Mariana – MG. A utilização da maioria dos resíduos de nossa própria região foi estabelecida para que fosse possível acompanhar o seu processo de geração e destinação. Além disso, em uma eventual utilização em escala industrial, o custo do transporte seria elevado, então, em determinadas situações, inviabiliza a reutilização dos resíduos pelo alto custo do frete.

A seguir são descritos de forma sucinta a coleta dos vários resíduos utilizados:

Da empresa de beneficiamento do resíduo de concreto (RC) foram coletados dois baldes de 20 kg cada, para esta pesquisa. Este material é proveniente do processamento de blocos de concretos, manilhas, pisos de concreto, lajes, pilares e vigas, sendo que a sua dimensão máxima característica encontrada foi 4,8 mm, correspondente ao agregado miúdo e obteve o pH =10,34 medido em laboratório.

Os três resíduos da produção de celulose, do processo de caustificação, foram recolhidos nos locais os onde são descartados, sendo eles o dregs, o grits, e a lama de cal. A quantidade coletada de aproximadamente 40 kg de cada amostra sendo que seu pH=11.62 medido no ponto de coleta na indústria.

Sendo assim o resíduo de celulose é constituído por três resíduos o (grits + dregs + lama da cal), sendo que a proporção de cada um deles na mistura foi definida pela média histórica de geração na indústria sendo 34,33% dregs, 37,12% grits e 28,53% lama da cal.

O Resíduo de Produção de Cal (RPC), também foram coletados aproximadamente, 40 kg de amostra obtendo e o valor do pH=11,00. Por último coletado o resíduo de minério de ferro, após a catástrofe do rompimento da barragem Fundão em Mariana MG, também coletados aproximadamente, 40 kg de amostra e pontencial hidrogênico medido de 10,21.

Após esta etapa, os resíduos foram imediatamente acondicionados em sacos plásticos, embalados lacrados de modo a manter o estado de conservação e umidade os mais próximos possíveis do ponto de geração nas fábricas, por fim, foram transportados ao laboratório, onde foram realizados os ensaios.

Nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10 são expostas as imagens dos resíduos utilizados na pesquisa.

Figura 5 - Resíduo de minério de ferro (RMF)



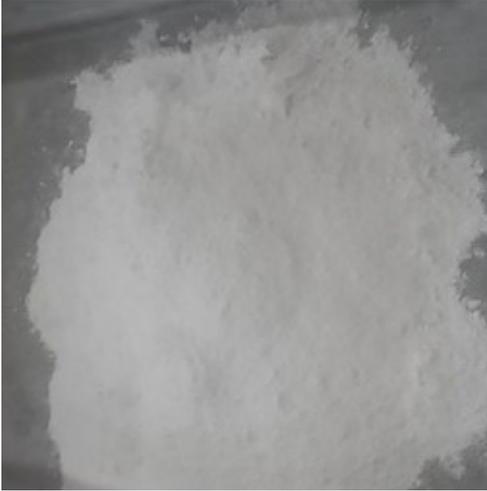
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 6 - Resíduo de Concreto (RC)



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 7 - Resíduo da Produção da Cal (RPC)



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 8 - Resíduo da produção de celulose (Dregs)



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 9 - Resíduo da produção de celulose (Grits)



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 10 - Resíduo da produção de celulose (Lama de Cal)



Fonte: Autoria própria (2019)

A forma adotada para coleta, preparo dos materiais e confecção dos corpos de prova dos compósitos, seguiram a seguinte ordem:

Coleta: 40 kg de amostras representativas por resíduo, realizado nos respectivos locais, lacradas e transportadas para o laboratório da UTFPR em Curitiba, conforme descrito anteriormente.

Pesagem: Foi utilizada balança digital da marca Marte, modelo AD2000, com resolução de 0,01 g, para pesagem dos resíduos, das misturas e composições para serem utilizadas na confecção dos corpos de prova (Figura 13).

Homogeneização: Após a pesagem dos resíduos conforme as composições estabelecidas, as massas necessárias foram misturadas por meio de revolvimento manual, sendo feita a conferência do processo de coloração uniforme e uma constante homogeneidade, onde se utilizou um pistilo e um almofariz para esse fim, conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2003).

Moldagem: Fez-se uso de molde de aço com 20 mm de diâmetro por 20 mm de altura (Figura 11), onde foi inserido 12,50 g da composição para posterior compactação, garantido a uniformidade da mistura, conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2003).

Compactação: Após a moldagem os corpos de prova foram comprimidos em prensa manual hidráulica da marca Bovenau, modelo P10ST (Figura 12), com 10 MPa de força por 30 segundos. Foram confeccionados 55 corpos de prova para cada uma das 19 composições no formato cilíndrico com altura e diâmetro de 20 mm, pesando 12,50 g cada amostra.

Cura: Após serem compactados os corpos de prova foram guardados em bandejas, em temperatura ambiente e livre de intempéries até a data dos respectivos ensaios conforme norma ABNT (NBR 5738) (ABNT, 2003), na Figura 14 pode ser visualizado os corpos de prova em processo de cura.

Para a pesquisa das propriedades mecânicas foram realizados os seguintes ensaios: resistência à compressão uniaxial, resistência à água, dilatação, retração, absorção de água e massa específica.

Para a pesquisa de processos físico-químicos de interação dos componentes e formação das estruturas dos novos materiais foram realizados os seguintes ensaios: Fluorescência de Raio-X (FRX), Difração de Raio-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Figura 11 – Conjunto de molde metálico c/ diâmetro e altura de 20mm



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 12 - Prensa manual: Capacidade 10Ton



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 13 - Balança digital: mod. AD2000



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 14 - Corpos de prova confeccionados com resíduos



Fonte: Autoria própria (2019)

3.3 EXPOSIÇÃO DAS 19 COMPOSIÇÕES

A definição das composições, seguiu os traços históricos de trabalhos publicados em periódicos internacionais, seguindo a metodologia empregada por Mymrin et al., (2020) utilizando resíduo de vidro; Mymrin et al., (2019) utilizando

resíduo de argamassa; Mymrin et al., (2019) utilizando resíduo do tratamento de água; Mymrin et al., (2019) utilizando resíduo da produção da cal; Mymrin et al., (2018) utilizando resíduo da estação de tratamento de esgoto.

Foram dosadas 19 traços das composições variando os teores de matérias primas em porcentagem: resíduos de concreto de 25% a 30%, resíduos de celulose (dregs + grits + lama de cal) variando 10% a 40%, o resíduo da produção de cal 15% a 25%, e o resíduo de minério de ferro 10% a 40% (Tabela 1).

O resíduo de celulose é constituído por três resíduos o (grits + dregs + lama da cal), sendo que a proporção de cada um deles na mistura foi definida pela média histórica de geração na indústria sendo 34,33% dregs, 37,12% grits e 28,53% lama da cal.

Para cada composição foram moldados 45 corpos de prova para a determinação da resistência à compressão uniaxial, sendo rompido 5 cps em cada idade de rompimento aos 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365 e 720 dias. Para cada uma das 19 composições, foram moldados 55 cps totalizando 1045 corpos de prova.

Tabela 1 - Composições dos corpos de prova

N°	Composições, %			
	RMF	RPCEL	RC	RPC
1	30	30	25	15
2	20	40	25	15
3	40	20	25	15
4	25	35	25	15
5	35	25	25	15
6	10	40	25	15
7	40	10	25	15
8	30	20	30	20
9	20	30	30	20
10	25	25	30	20
11	10	40	30	20
12	40	10	30	20
13	30	20	25	25
14	20	30	25	25
15	25	25	25	25
16	10	40	25	25
17	40	10	25	25
18	35	15	25	25
19	15	35	25	25

Fonte: Autoria própria (2019).

Os resíduos foram misturados da forma como recebidos, variando os percentuais de cada um, conforme apresentado na Tabela 1. Não foi realizado nenhum processo de secagem, calcinação ou moagem preliminar com a finalidade de aproximar-se ao máximo das condições industriais e aumentar a eficiência econômica e energética da produção de materiais a nível industrial e, também, para minimizar os custos em uma eventual produção em larga escala.

3.4 ETAPAS DA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Foram utilizados para o experimento moldes cilíndricos medindo 20 mm de altura por 20 mm de diâmetro, com aplicação em laboratório e função científica, visando à utilização de menos materiais por experimento, pois outros tipos de corpos padrão de prova como, por exemplo os cilíndricos 10cmx20cm ou até mesmo o 15cmx30cm, demandariam grandes quantidade de resíduos. Ainda uma prensa maior, uma área considerável em laboratório para moldagem, cura, armazenamento das matérias primas e, por fim também, a destinação de um grande volume de resíduos após o rompimentos de 1045 corpos de prova.

A compactação foi realizada em uma prensa manual com capacidade de até 10 toneladas, a pressão aplicada foi de 10 MPa e com tempo de permanência nesta pressão de 30 segundos.

A cura dos corpos de prova foi realizada em temperatura e umidade ambiente, para poder aproximar o máximo possível a uma produção industrial em larga escala.

3.5 ENSAIOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO EM RESÍDUOS

Os ensaios para caracterização dos resíduos foram: Teor de umidade, granulometria, material pulverulento, massa específica real, pozolânicidade, verificação do pH, FRX, MEV, EDS e DRX.

Por fim, foram realizados nas composições os seguintes ensaios: resistência à compressão uniaxial, absorção de água por imersão, coeficiente de expansão linear, determinação da massa específica, coeficiente de resistência a água, MEV, EDS e DRX.

3.5.1 Determinação do Teor de Umidade

O processo para obtenção do teor de umidade é usualmente adotado para a determinação da umidade total conforme NBR 16097 (ABNT, 2012) – por meio da Equação 01.

$$h = ((P_h - P_s) / P_s) \times 100 \quad (\text{Eq.01})$$

Onde P_h é a massa da amostra úmida e P_s é o peso seco depois de secagem na estufa a 100°C até peso constante. O processo de secagem em estufa é necessário para a identificação do P_s e assim poder determinar o teor de umidade de todos os resíduos pesquisados, conforme a NBR 16097 (ABNT, 2012).

3.5.2 Composição Granulometria

O ensaio de análise granulométrica de agregado está normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. A norma NBR 7211 (ABNT, 2019) classifica os agregados através de uma distribuição granulométrica obtida através do processo de peneiramento da amostra, nos limites inferiores e superiores.

Com os dados obtidos, calcula-se a porcentagem retida acumulada, e assim determina-se dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), segundo a Equação 2.

$$M_f = \sum RA\% / 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

M_f : módulo de finura;

$RA\%$: percentual retido acumulado na série normal.

3.5.3 Determinação da Massa Específica Real

A massa específica real, não considera os vazios, podendo ser pela relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis, através do cálculo do volume geométrico do corpo de prova e da massa do material, utilizando para isso as Equações 3 e 4, conforme NBR 9778 (ABNT, 2009).

$$\rho_r = m_s / (m_s - m_i) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (\text{Eq. 4})$$

onde:

ρ_r : massa específica real (g/cm³);

m_s : massa seca do material;

m_i : massa inicial;

v : volume, em centímetros cúbicos (cm³);

r : raio da amostra, em centímetro (cm);

h : altura da amostra, em centímetro (cm).

3.5.4 Determinação do Material Pulverulento

Este ensaio determina o percentual de material pulverulento no agregado. Seguindo a Equação 5, conforme a norma (NBR NM 46) (ABNT, 2003). O método permite determinar a quantidade de material mais fino que a abertura da malha da peneira de 0,075 mm. O excesso deste material prejudica a aderência entre a pasta de cimento e a argamassa, aumentando o consumo de água, acarretando retração e diminuição da resistência de concreto e argamassa (ITAMBÉ, 2011). Desta forma também pode ser prejudicial em compósitos.

$$M_p = [(m_i - m_{sf}) / m_i] \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

onde:

M_p : material pulverulento, em porcentagem (%);

m_i : massa inicial, em gramas (g);

m_{sf} : massa seca final, em gramas (g).

A existência de excesso de finos não ligantes resulta em consequências danosas para a retração linear, para resistência à compressão e para a retenção de água, pois se comportam como agregados e não apresentam efeito cimentante, tornando as massas pulverulentas ilhadas no bloco da argamassa (GUIMARÃES, 2002).

3.5.5 Determinação da Pozolânicidade do Resíduo de Minério de Ferro

A determinação do ensaio de pozolânicidade foi realizado para o RMF, visto que este atendeu aos requisitos indicados pela NBR 12653 (ABNT, 2014), quanto à sua atividade pozolânica. Primeiramente foi realizado a atividade pozolânica do RMF

com a cal aos 7 dias utilizando procedimentos indicados na NBR 5751 (ABNT, 2015).

A moldagem dos corpos de seguiu as especificações da NBR7215 (ABNT, 2019), e a determinação da consistência foi realizado conforme a as especificações da NBR7215 (ABNT, 2019). Sendo que a NBR 5751 (ABNT, 2015) recomenda um índice de consistência de 225 ± 5 mm. Assim sendo, e segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica-se em material pozolânico classe N as argamassas que obtiverem resistência à compressão axial média maior ou igual a 6,0MPa.

Após este procedimento realizou se o índice de desempenho pozolânico com o cimento Portland aos 28 dias, sendo que somente o RMF atendeu aos requisitos químicos indicados pela NBR 12653 (ABNT, 2014), quanto à sua atividade pozolânica. Para isso utilizou-se os procedimentos indicados na NBR 5752 (ABNT, 2014). Primeiramente foi realizado um traço de uma argamassa de referência com 100% de cimento e um segundo traço com substituição de 25% de RMF sob a quantidade de cimento.

Conforme requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica-se em material pozolânico classe N as argamassas que obtiverem índice de desempenho maior ou igual a 90%.

3.5.6 Verificação do pH dos Resíduos

Realizou-se a medição do potencial hidrogeniônico (pH) de duas maneiras, a primeira utilizando o indicador universal, que apresenta cores diferentes para cada valor de pH. Este procedimento foi realizado no momento da coleta do resíduo por ser um procedimento prático e considerado bastante preciso.

O segundo método foi realizado em laboratório, para isto utilizou-se peagômetro, aparelho este que mede a condutividade elétrica de uma solução e possui uma escala já graduada em valores de pH.

3.5.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Foi utilizado o método de Fluorescência de Raios-X (FRX) para analisar a composição química exclusiva dos resíduos. A análise de FRX possui características diferenciadas, tais como: a determinação de multi elementos simultâneos; a flexibilidade para análise qualitativa e quantitativa; operação com amostras sólidas e

líquidas e a não apresentação de caráter destrutivo (NAGATA; BUENO; PERALTA-ZAMORA, 2001).

A Espectrometria de Fluorescência de Raios X – do inglês a sigla: “*WD-XRF*” é uma técnica de análise multielementar por dispersão de comprimento de onda, sendo bastante versátil e parcialmente não destrutiva, que possibilita a determinação da composição química de amostras sólidas diversas. A técnica se baseia na separação e detecção de Raios X característico emitido pelos elementos constituintes da amostra, quando irradiados com um feixe de Raios X Primário produzido pelo equipamento (POTTS, 1992).

O método de Fluorescência de Raios X - FRX - é um meio de determinação qualitativo e quantitativo, que determina os componentes químicos, por meio, da medição do comprimento de onda e intensidade de emissão característica, ou intrínseca, ao elemento atômico. É a emissão de Raios X Secundário, ou Fluorescente, de um material excitado pelo bombardeamento com Raios X de alta energia, ou Raios Gama, que possibilita identificação elementar (JENKINS, 1999). O fenômeno é amplamente utilizado em processo utilizado para descobrir quais são os elementos constituintes de uma determinada amostra e sua quantidade, como por exemplo, na investigação de metais, vidro, cerâmica, compósitos de materiais de construção e para pesquisas em geoquímica, ciência forense e arqueologia (BECKHOFF, 2006).

3.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O processo utilizado para examinar e analisar, simultaneamente, a morfologia de uma amostra e a sua composição elementar é chamado de MEV / EDS.

A preparação da amostra se deu pela fixação de uma quantidade de resíduo, aproximadamente 1,5g em um suporte denominado stub e posteriormente metalizadas com um fina camada de Au para torná-las condutoras e para que seja possível produzir imagens de alta resolução da superfície do material.

Segundo Ramachandran (2001), a Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV - adjunta a Espectroscopia de Energia Dispersiva - EDS - formam a unidade de microanálise, consideradas como técnicas importantes na investigação da tecnologia do concreto, argamassas e compósitos. Também pode ser estudada a correlação entre microestrutura e durabilidade.

A microanálise pode ser realizada de modo pontual ou mais abrangente da área, usada para analisar a composição elementar quantitativa de uma área total ou para mapear pontos localizados em uma zona de interesse em particular. Para o mapeamento elementar usa-se do estudo de densidade e distribuição dos diferentes elementos em fase ou região, ou mesmo, no modo de deslocamento linear para determinar a variação da concentração de um ou mais elementos (RAMACHANDRAN, 2001).

Foi utilizado o método MEV para pesquisar as estruturas morfológicas das matérias-primas e as alterações nos compósitos desenvolvidos para mistura seca e para os corpos de prova com as idades entre 3, 7, 28 180 e 720 dias.

Para esta análise utilizou-se o equipamento MEV-EDS foi utilizado o equipamento modelo SCD 030. BALZERS UNION SL 9496, do Laboratório de Microscopia Eletrônica da UTFPR, com magnificação de até 30.000 vezes e aceleração de voltagem de 20kV.

Os resíduos foram analisados em um microscópio eletrônico de varredura, onde foi possível produzir imagens de alta resolução da superfície das amostras.

A preparação da amostra se deu pela fixação de uma pequena quantidade de resíduo, aproximadamente 1,5 g em um suporte denominado stub. Após a fixação da amostra, a mesma foi recoberta por uma fina camada de ouro (processo de metalização), técnica está utilizada para melhorar o nível de emissão de elétrons, facilitando a construção da imagem.

3.5.3 Micro-análise Química pelo Método de Dispersão de Energia (EDS)

Equipamento acoplado ao MEV o Espectrômetro Dispersivo de Energia (EDS) realiza a microanálise química para a obtenção de informação sobre a presença e quantidade dos elementos químicos determinados na amostra pontualmente ou em uma área pré-determinada pela Microscopia Eletrônica de Varredura, este ensaio foi realizado tanto para os resíduos como para os corpos de prova com as idades entre 3, 7, 28 180 e 720 dias.

3.5.4 Difração de Raios-X (DRX)

Com frequência é necessário expressar a composição, ou concentração, de uma liga em termos de seus constituintes. A forma mais comum é a percentagem

em massa e a percentagem atômica (CALLISTER & WILLIAN, 2002). A intensidade de Raios-X difratados fornece informações importantes sobre a estrutura cristalina do material analisado, geralmente obtidos sob a forma de difratograma. A contagem de fótons de Raios-X é medida em função do ângulo de difração 2 Theta.

Para Mymrine (2018), a formação de estruturas cristalinas juntamente com a fase amorfa pode responder pelo elevado crescimento da propriedade mecânica do material desenvolvido, pois a síntese de minerais aumentaria significativamente as propriedades mecânicas, mesmo nos primeiros dias de cura, podendo ser observado por Difração de Raio-X (DRX).

O difratograma apresenta picos, bem como, uma linha de base de variação lenta. As informações fisicamente relevantes estão contidas na localização, forma e tamanho dos picos, assim como, a decomposição em uma soma de um ou mais componentes, possivelmente sobrepostos, representados por núcleos. Frequentemente os difratogramas são analisados usando métodos, no qual a remoção da base e montagem dos picos são executadas manualmente. Este método muitas vezes requer o conhecimento das possíveis posições de pico (DAVIES et al., 2008).

Os ensaios são realizados através de uma amostra colocada diretamente no porta-amostra denominado spinner que nada mais é que o suporte do próprio equipamento, a massa utilizada no ensaio é de aproximadamente 1,50g do material a ser analisado, utilizando radiação λ Cu-K α onde Cu K α $\lambda=1,54184\text{\AA}$, tensão = 40 kV, corrente = 30 mA, varredura $2\theta= 3,5$ a 70° , tamanho do passo: 0,016 e tempo do passo 10s, para que dessa forma seja possível a realização da leitura da amostra pelo equipamento. Este ensaio foi realizado tanto para os resíduos, para as misturas seca e para os corpos de prova com as idades entre 3, 180 e 720 dias.

3.5.5 Resistência à Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram realizados no laboratório de materiais da UTFPR, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). As prensas utilizadas para o rompimento das amostras foram da fabricante EMiC.

A resistência à compressão uniaxial – f_c – segue as diretrizes da norma NBR 5739 (ABNT, 2007), cujos valores são calculados conforme a Equação 06.

$$f_c = 4F / \pi \times D^2 \quad (\text{Eq. 06})$$

onde:

f_c : Resistência à compressão, em megapascal (MPa);

F: Força máxima alcançada, em newtons (n);

D: Diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

Para cada composição foram moldados 45 corpos de prova para a determinação da resistência à compressão uniaxial, sendo rompido 5 cps em cada idade para os 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365 e 720 dias e ainda realizou-se a resistência à água nas idades de 28 e 90 dias sendo rompido 5 cps em cada idade. Desta forma foram rompidos 55cps para cada uma das 19 composições totalizando 1045 corpos de prova.

3.5.6 Coeficiente de Resistência à Água

Os valores do coeficiente de resistência à água – CRA – são calculados após a imersão dos corpos de prova em água por um período de 24 horas utilizando 5cps para idade de cura aos 28 e 90 dias, e para aprovação do material o resultado da equação deve ser maior ou igual a 0,65, ou seja, para estar em conformidade tolera-se a perda de até 35 % da resistência do material saturado em comparação com o seco (GOST 9479-84, 1985). O coeficiente é calculado conforme a Equação 7.

$$CRA = R_{Sat} / R_{Sc} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde:

CRA: Coeficiente de resistência à água;

R_{Sat} : Resistência dos corpos de prova saturados, em megapascal (MPa);

R_{Sc} : Resistência dos corpos de prova secos, em megapascal (Mpa).

3.5.1 Absorção de Água por Imersão

Para a obtenção da absorção de água por imersão (A_{bs}) das 19 composições, utilizou-se 5cps para idade de cura aos 28 e 90 dias, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009), onde o peso do CP seco (M_s) é comparado com o peso do corpo de prova saturado (M_{sat}), após imersão em água por 24 horas. A absorção de água por imersão é determinada conforme Equação 8:

$$A_{bs} = (M_{sat} - M_s) / M_s \times 100 \quad (\text{Eq. 8})$$

onde:

Abs: absorção de água pelo corpo de prova, em porcentagem (%);

M_{sat}: massa do corpo de prova após saturada em água por 24 horas, em gramas (g);

M_s: massa do corpo de prova em período de cura ao ar livre, em gramas (g).

3.5.2 Coeficiente de Expansão Linear

O coeficiente de expansão linear (α) é utilizado para verificar a expansão linear das amostras durante os seguintes períodos de cura: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365 e 730 dias, onde o diâmetro inicial (l_i) dos corpos de prova, ao quais são medidos por meio de um paquímetro digital e após cada idade de cura são submetidos às novas medições (l_f), calcula-se o coeficiente de expansão linear, conforme a Equação 9 NBR 12815 (ABNT, 2012) a seguir:

$$\alpha = (l_f - l_i) / l_i \times 100 \quad (\text{Eq. 9})$$

3.5.3 Determinação da Massa Específica

A massa específica aparente é a relação entre a massa da amostra seca e seu volume, incluindo os poros permeáveis à água, obtida por meio de balança e deslocamento da massa de água no frasco pelo agregado (ITAMBÉ, 2011).

Para obter o valor referente à massa específica aparente de uma amostra utiliza-se a Equação 10 NBR NM 52 (ABNT, 2009) - descrita conforme segue abaixo.

$$d = m / (L_f - L_i) \quad (\text{Eq. 10})$$

onde:

d: massa específica aparente, em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

m: massa, em gramas (g);

L_i: leitura inicial, em mililitros (ml);

L_f: leitura final, em mililitros (ml).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo estão apresentados os resultados, as análises dos rejeitos e análises das composições utilizadas para a confecção dos corpos de prova. A caracterização dos rejeitos, caracterização das composições, e ainda as mudanças de redes cristalinas de minerais durante a cura, análise mineralógica e análise da estrutura morfológica das composições com os melhores resultados de resistência a compressão. Com estes resultados pode-se verificar que é possível utilizar a união destes resíduos, propiciando assim resultados satisfatórios com valores de ensaios superiores aos exigidos por normas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

4.1.1 Resíduo de Minério de Ferro (RMF)

A composição química do RMF, foi determinada através do método de FRX, está apresentada na Tabela 2:

Tabela 2 - Composição química do RMF

Elementos	Teor de elementos em % de peso
Fe ₂ O ₃	48,1
SiO ₂	41,9
Al ₂ O ₃	6,3
K ₂ O	0,2
CaO	0,2
MnO	<0,1
SO ₃	<0,1
P.F	3,08

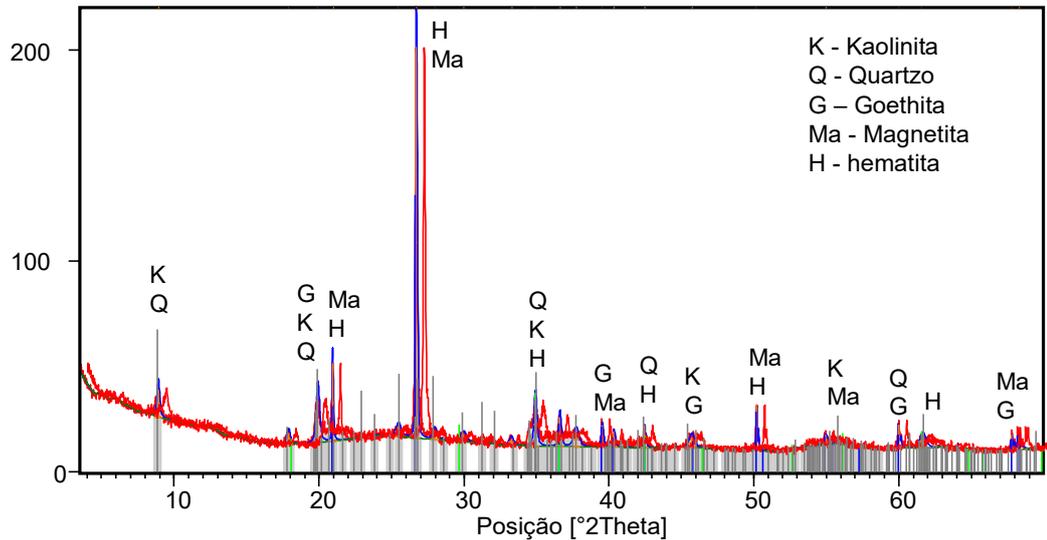
Fonte: Autoria própria (2020)

Observando a Tabela 2 vê-se que o resíduo de minério de ferro (RMF) é composto basicamente por Fe₂O₃ 48,1%; SiO₂ 41,9%; Al₂O₃ 6,3%; K₂O 0,2% e CaO 0,2%, apresentando altas concentrações de silício e alumínio, que constituem as fases minerais deste resíduo (Tabela 2).

O valor de perda ao fogo (3,08%) encontrado pode ser devido a mistura de matéria orgânica na barragem de contenção onde o resíduo é depositado após não ser mais útil para a produção.

Podemos observar a Figura 15 a qual mostra os principais minerais encontrados no resíduo da produção de ferro e na Tabela 3 está a formula dos minerais encontrados.

Figura 15 – Difratoograma dos elementos mineralógicos do RMF através do DRX



Fonte: Autoria própria (2020)

A Tabela 3 apresenta a legenda do Difratoograma de Raios X do RMF:

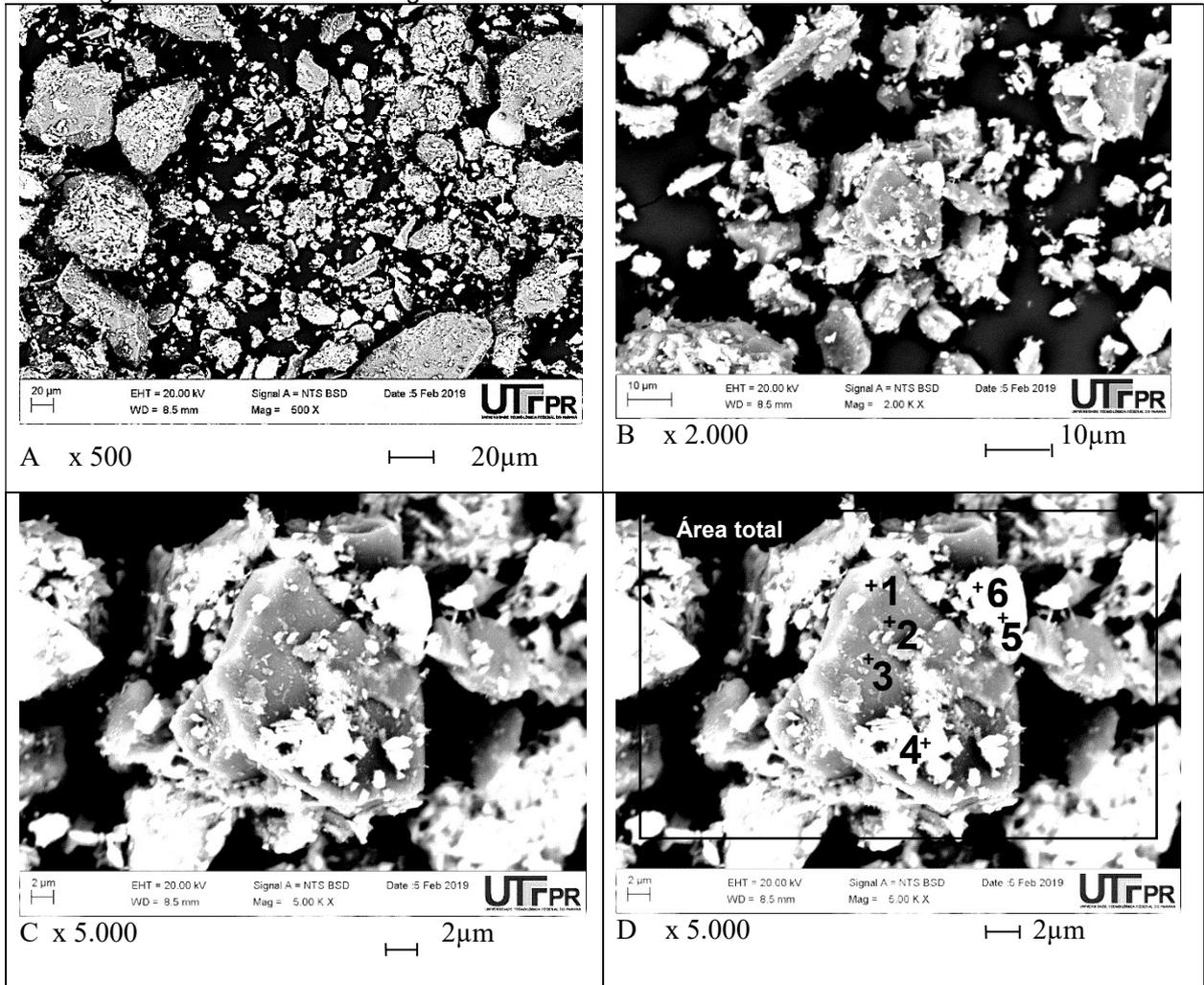
Mineral	Fórmula
Hematita	Fe_2O_3
Magnetita	Fe_2O_4
Goethita	$FeO(OH)$
Quartzo	SiO_2
Kaolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$

Fonte: Autoria própria (2020)

A composição mineralógica do RMF foi determinada através da decifração do difratoograma de raios-X, conforme Figura 15, sendo que os picos de maior intensidade pertencem aos minerais de hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_2O_4) com o pico de incidência em 27° , também são evidentes picos de outros minerais, como por exemplo a kaolinita nos picos de 9° , 20° , 35° , 46° e 55° o quartzo nos picos de 9° , 20° , 35° , 43° e 60° a goethita nos picos de 20° , 40° , 46° , 60° e 68° a magnetita nos picos de 21° , 27° , 40° , 50° , 55° e 68° e por último a hematita nos picos de 21° , 27° , 40° , 50° , 55° e 68° .

Na Figura 16, são apresentadas as estruturas morfológicas do RMF, ensaiadas através do método MEV. Na Figura 16-D estão os pontos estabelecidos para a leitura dos elementos químicos desta amostra.

Figura 16 - Estrutura morfológica do resíduo RMF através do MEV e análise através do EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

É possível observar na Figura 16-A e 16-B, partículas de diferentes tamanhos e que não possuem nenhuma ligação química entre si. O corpo demonstrado na Figura 16-C mede aproximadamente 20 μ m em sua maior extensão, se trata de uma partícula com superfície lisa. Na Figura 16-D com ampliação 5000x, observa-se a superfície lisa com eventuais impurezas ao seu entorno, ainda é possível observar poucas elevações e considerável quantidade de vazios, evidenciando ser um resíduo granular e irregular.

Com base no método EDS na Figura 16-D e na Tabela 4, foi possível identificar a inexistência de formas cristalinas, pois a variação da composição química nos diferentes pontos e área total é bastante alta.

Sobre a Figura 16-D os pontos 1, 2 e 3 indica que pode ser uma partícula de quartzo, já os pontos 4, 5, e 6 podem ser uma partícula de minério de ferro e por fim

a área total evidencia que nesta região analisada existe uma quantidade maior de partículas de ferro.

Tabela 4 - Composição micro-química do RMF através do EDS

Espectro	Si	Fe	Al	Total
1	92.65	6.71	0.64	100.00
2	92.41	6.80	0.79	100.00
3	94.73	4.79	0.49	100.00
4	9.17	88.71	2.11	100.00
5	2.50	96.19	1.31	100.00
6	7.74	89.16	3.07	100.00
Área total	26.56	64.86	7.81	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme observado a Tabela 4, pode-se evidenciar que se trata de uma amostra amorfa, por conterem diversos elementos em quantidades distintas, podemos ainda inferir que o Alumínio encontrado se trata de uma impureza da amostra selecionada.

A massa específica real do RMF definida por meio do processo do Frasco de Chapman, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009) foi 3.280 kg/m³.

Tabela 5 – Composições Granulométricas do RMF

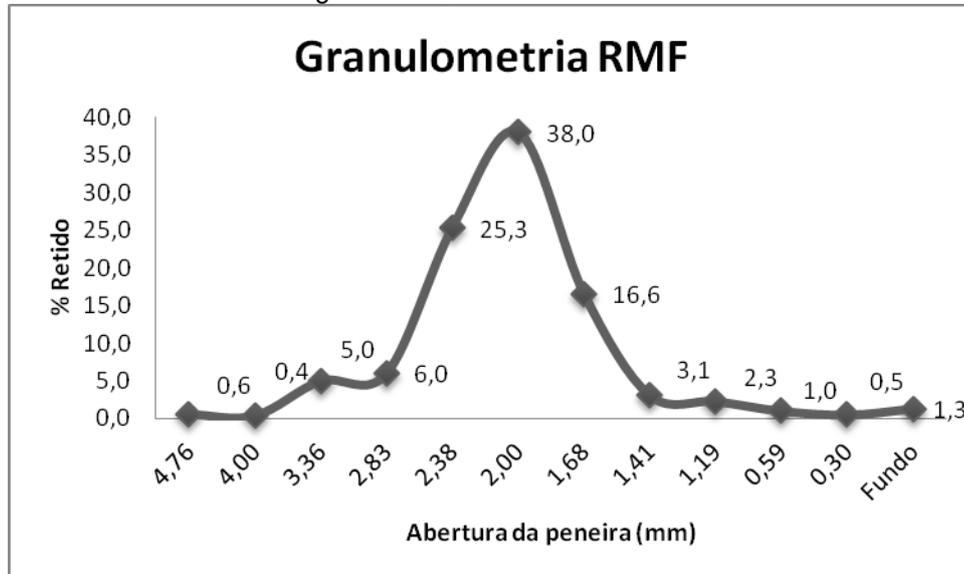
Abertura (mm)	Retido (g)	% Retido	Soma %
4,76	0,06	0,60	0,60
4,00	0,04	0,40	1,00
3,36	0,50	5,00	6,00
2,83	0,60	6,00	12,00
2,38	2,53	25,30	37,30
2,00	3,80	38,00	75,30
1,68	1,66	16,59	91,89
1,41	0,31	3,10	94,99
1,19	0,23	2,30	97,29
0,59	0,10	1,00	98,29
0,297	0,05	0,50	98,79
Fundo	0,13	1,30	100
Total	9,87	99,89	
Inicial	10,00g	100,00	

Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme Tabela 5 o ensaio realizado da composição granulométrica para o RMF teve a %retido nas peneiras #4,76mm 0,60%, #4,00mm 0,40%, #3,36mm

5,0%, #2,83mm 6,0% #2,38mm 25,3%, #2,00mm 38,0%, #1,68mm 16,6%, #1,41mm 3,1%, #1,19mm 2,3%, #0,59mm 1,0%, #0,297mm 0,5% no fundo 1,3%, o que representa uma distribuição descontínua.

Figura 17 – Granulometria do RMF



Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme observado na Figura 17 o RMF foi classificado como agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, conforme especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009). A composição granulométrica foi obtida, conforme a NBR 248 (ABNT, 2003), por meio da passagem do material através de peneiras, de 2,38 mm à 250 μ m, em um granulômetro à laser (Cilas 1064).

Este resíduo foi seco e peneirado passante na peneira #2,36mm, em seguida foram dissolvidos em água destilada, em solução de 10%, em seguida realizada a leitura do aparelho peagômetro feita em função da leitura do eletrodo quando submerso na amostra. O pH 10,21 obtido para o resíduo de minério de ferro evidencia a sua alcalinidade.

4.1.2 Resíduo de Concreto (RC)

O RC amplamente estudado nacional e internacionalmente tem uma enorme capacidade de ser reutilizado como agregado em diversos materiais e artefatos destinados a construção civil, podendo ser verificado com a fundamentação teórica anteriormente descrita no capítulo 2 item 2.2. A caracterização de sua composição química investigada através do método de FRX (Tabela 6) demonstra a presença,

basicamente, de SiO₂ 49,1%, CaO 22,5%, Al₂O₃ 6,4%, MgO 3,1%, Fe₂O₃ 1,9%, K₂O 1,7%, Na₂O 1,5%, SO₃ 0,9%, TiO₂ 0,7% e P₂O₅ 0,5%. O valor de perda ao fogo (P.F. =10,60%) provem da massa perdida após aquecimento do forno durante o ensaio de FRX denominado de material volátil, ocorre pela evaporação da água, por conter eventual matéria orgânica e ainda por conter dióxido de carbono (CO₂) presente nos concretos expostos em severas condições de exposição com relação aos agentes agressivos físicos e químicos a que este esteve submetido durante a sua vida útil. A influência das condições de exposição, ou severidade do ambiente, pode ser minimizada pela adequada dosagem do concreto como por exemplo, resistência mecânica, teor água/cimento e consumo de cimento do qual resultou o resíduo aqui utilizado, o qual sabe-se, no entanto, que o mesmo é proveniente de estruturas de concreto pré-fabricado de edificação industrial.

Tabela 6 - Composição química do RC através do FRX

Elementos	Teor de elementos em % de peso
SiO ₂	49,1
CaO	22,5
Al ₂ O ₃	6,4
MgO	3,1
Fe ₂ O ₃	1,9
K ₂ O	1,7
Na ₂ O	1,5
SO ₃	0,9
TiO ₂	0,7
P ₂ O ₅	0,5
MnO	<0,1
P.F	10,60

Fonte: Aatoria própria (2020)

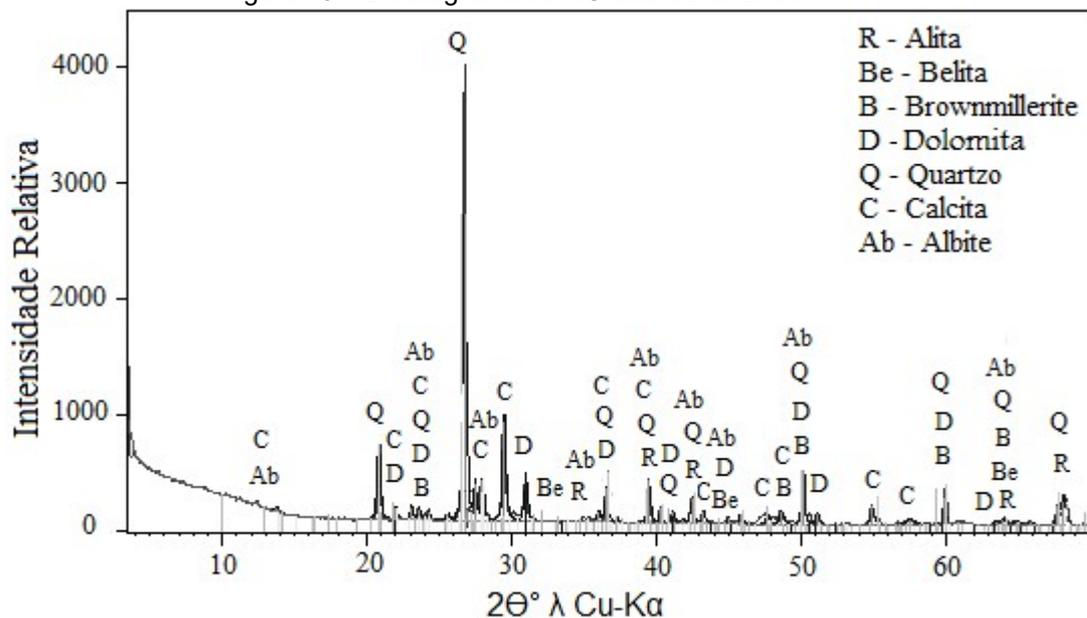
Através do método de FRX (Tabela 6) pode-se observar que quase a metade do material ensaiado se refere ao dióxido de silício (SiO₂) proveniente dos agregados utilizados no concreto principalmente a areia, os demais matérias presentes na composição são provavelmente provenientes do cimento Portland, como por exemplo o óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de magnésio (MgO) e o óxido férrico (Fe₂O₃), já os demais elementos (K₂O, Na₂O, SO₃, TiO₂, P₂O₅, e MnO) são de natureza diversa inclusive podemos considerar como impurezas no resíduo ensaiado.

Já com a realização do Difratoograma de Raio-X (DRX) do RC na (Figura 18), é possível observar a presença dos seguintes minerais: Alita (Ca_3SiO_5), Belita (Ca_2SiO_4), Brownmillerite ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{FeO}_3$), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Quartzo (SiO_2), Calcita (CaCO_3) e Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

A presença da calcita influencia no valor de perda ao fogo, pois em seu processo de calcinação este mineral resulta na formação de CaO e na liberação de CO_2 para que ocorra a reação, no entanto com a elevação de temperatura no ensaio de FRX a liberação de CO_2 volta a ocorrer novamente, ocorrendo a perda de massa. É possível afirmar também que após a verificação in loco, em duas empresas que trituram o concreto em Curitiba, o material recém beneficiado, é despejado diretamente no solo da usina o que pode eventualmente contaminar-se e desta forma influenciar o valor de perda ao fogo pela queima de matéria orgânica.

Através do método de DRX pode-se verificar a intensidade dos minerais que compõem aquela amostra, para a amostra do RC registrou a presença de minerais no cimento Portland como Alita, Belita e Brownmillerite o que sugere a possibilidade de hidratação destes durante a homogeneização e cura dos compósitos desenvolvidos, influenciando diretamente no aumento da resistência deste.

Figura 18 – Difratoograma do RC através do DRX



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se verificar na Figura 18 que a maior intensidade de pico ($2\theta = 27,0^\circ$, ângulo de incidência de raio-x) pertence ao Quartzo (SiO_2), oriundo dos agregados naturais utilizados no concreto. O valor de intensidade um pouco abaixo de 4000

pulsos, evidencia o mineral cristalino com estrutura atômica organizada e definida, favorecendo assim o arranjo entre partículas na mistura desejada. A quantidade de eventuais teores de materiais amorfos abaixo de aproximadamente 100 pulsos se caracterizam por sua desordem e desarranjados não sendo possível identifica-los.

A Tabela 7 apresenta a legenda do DRX do resíduo de concreto:

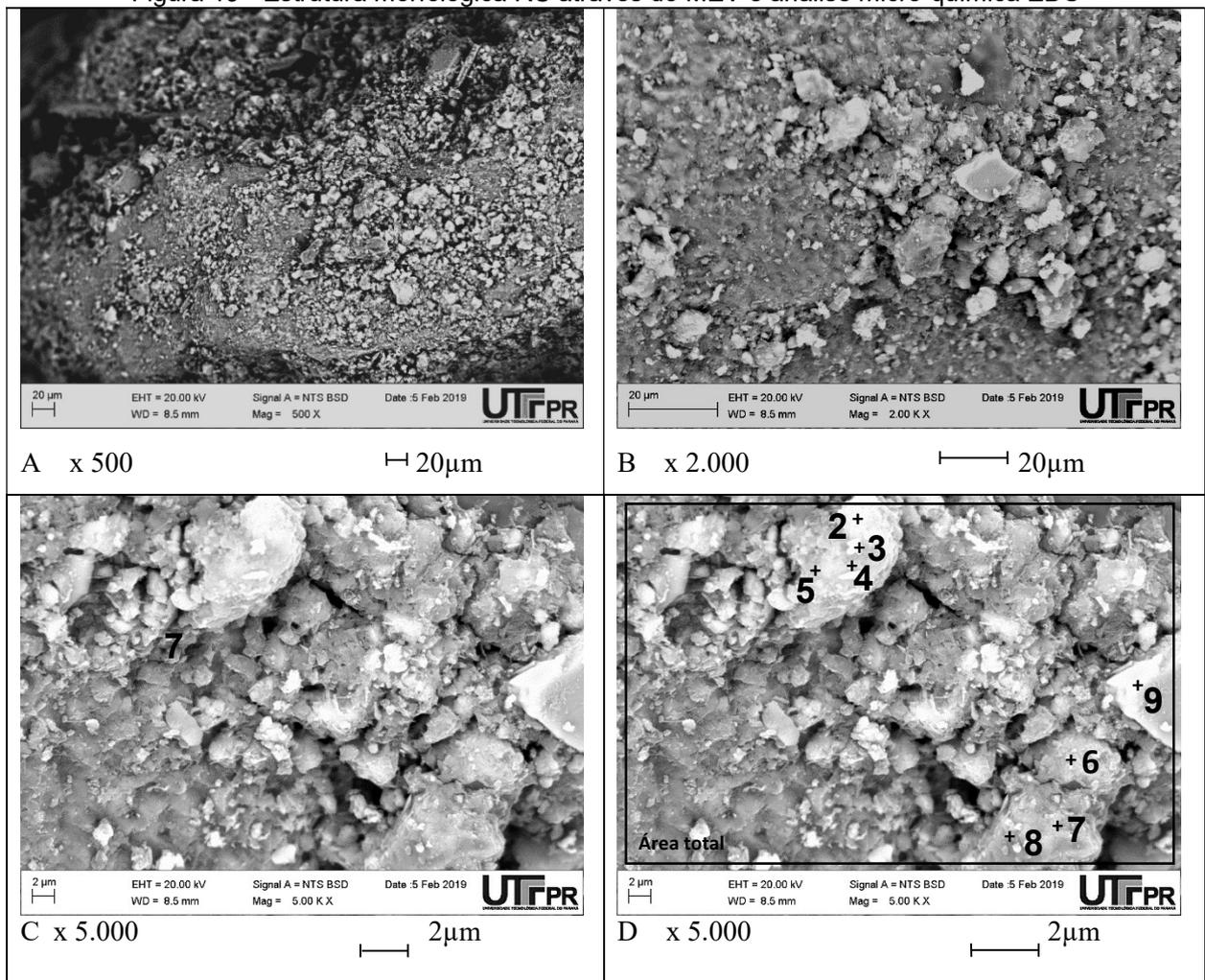
Tabela 7 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RC

Mineral	Fórmula
Alita	Ca_3SiO_5
Belita	Ca_2SiO_4
Brownmillerite	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}_3$
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Quartzo	SiO_2
Calcita	CaCO_3
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

Fonte: Aatoria própria (2020)

A Figura 19 apresenta a estrutura morfológica do RC pelo método MEV.

Figura 19 - Estrutura morfológica RC através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Aatoria própria (2020)

As Figuras 19-A com ampliação de 500x e 19-B com ampliação de 2.000x do RC demonstram que o material é constituído de partículas de diferentes formas e tamanhos. Podem ser identificadas partículas com tamanhos que variam entre 2 μm a 20 μm .

Nas imagens das Figuras 19-C com ampliação de 5.000x e 19-D, também com ampliação de 5.000x, é possível observar algumas partículas muito semelhantes a estruturas cristalinas, no entanto, com os pontos estipulados de 2 a 9 e área total as leituras dos elementos químicos realizadas pelo método EDS (Tabela 8) demonstram grande diferença entre os valores dos elementos químicos nestes diferentes pontos. Como por exemplo, os pontos 2, 3 e 4 da Figura 19-D aparentam ser uma estrutura cristalina, porém pelo método EDS pode-se verificar, na Figura 19-D os pontos 5, 6, 7, 8 e 9 da Tabela 8, demonstram uma grande variação no teor de magnésio, cálcio e silício, inferindo-se, assim, a impossibilidade de ser um corpo cristalino com composição química estável. A composição química da área total demonstra a quantidade e os principais elementos determinados através do método de EDS (Tabela 8).

Tabela 8 - Composição micro-química do RC através do EDS

Espectro	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Área total	2.86	4.33	60.23	0.66	29.01	2.92
2	2.30	5.15	35.16	1.27	52.18	3.93
3	2.48	5.03	32.36	0.61	56.04	3.51
4	3.25	5.91	32.57	0.55	54.62	3.10
5	1.95	5.61	34.72	0.48	51.34	2.60
6	4.66	5.67	31.53	0,76	54.04	3.38
7	26.51	5.03	5.40	-	61.58	1.47
8	34.23	8.38	6.26	-	49.77	1.36
9	1.41	5.49	39.56	1,46	12.11	34.67

Fonte: Autoria própria (2020)

Analisando os resultados da Tabela 8 pelo método EDS é possível observar que os pontos 2, 3 e 4 possuem pouca diferença do teor de seus elementos, essa diferença pode ser justificada por erros experimentais. Provavelmente esse corpo pode ser classificado como cristalino, não só por sua forma estrutural, mas sim pela sua constância de composição química. Nos pontos 5, 6, 7 e 8 a variação nos elementos químicos é bastante alta, permitindo interpretar como um corpo amorfo.

A massa específica real do RC definida por meio do processo do Frasco de Chapman, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009) foi 2.280 kg/m³.

O resíduo foi classificado como agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm. A composição granulométrica foi obtida, conforme a NBR 248 (ABNT, 2003). Os resultados de amostragem seguem apresentados na Tabela 9.

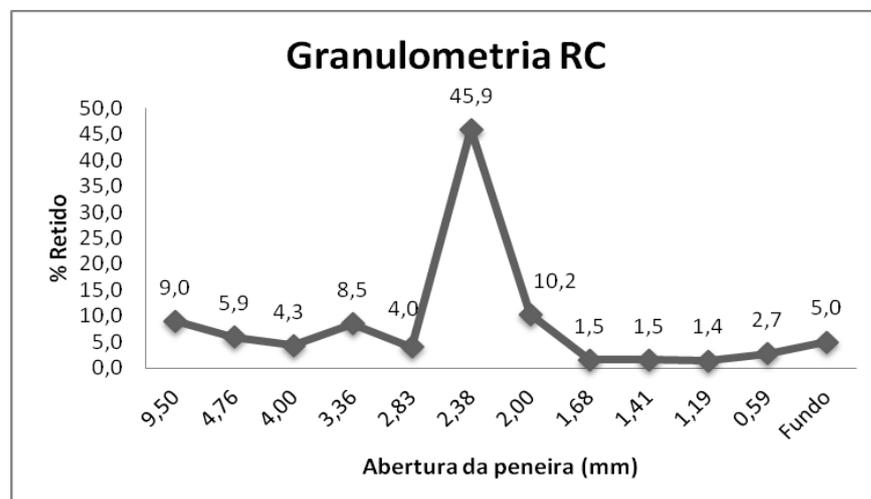
Tabela 9 - Composição granulométrica do RC

Abertura (mm)	Retido (g)	% Retido	Soma %
9,50	90,00	9,0	0,60
4,76	59,20	5,9	1,00
4,00	43,00	4,3	6,00
3,36	85,00	8,5	12,00
2,83	40,00	4,0	37,30
2,38	459,00	45,9	75,30
2,00	102,50	10,2	91,89
1,68	15,31	1,5	94,99
1,41	15,23	1,5	97,29
1,19	13,60	1,4	98,29
0,59	27,20	2,7	98,79
Fundo	50,00	5,0	100,00
Total	1000,04	99,9	
Inicial	1000,00g	100,0	

Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme ensaios realizados a composição granulométrica o RC teve a %retido nas peneiras #9,50mm 9,0%, #4,76mm 5,90%, #4,00mm 4,3%, #3,36mm 8,5%, #2,83mm 4,0% #2,38mm 45,9%, #2,00mm 10,2%, #1,68mm 1,5%, #1,41mm 1,50%, #1,19mm 1,40% #0,59mm 2,7% e fundo 5,0%, o que representa uma distribuição não contínua.

Figura 20 Granulometria do RC



Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme Figura 20 o resíduo foi classificado como agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm. A composição granulométrica foi obtida, conforme a NBR 248 (ABNT, 2003).

Este resíduo foi seco e peneirado passante na peneira #2,36mm, em seguida foram dissolvidos em água destilada, em solução de 10%, em seguida realizada a leitura do aparelho peagômetro feita em função da leitura do eletrodo quando submerso na amostra. O pH=10,34 obtido para o resíduo de concreto evidencia a sua alcalinidade.

4.1.3 Resíduos da Produção de Celulose (RPCEL)

O RPCEL é a soma da mistura dos três resíduos de celulose juntos (dregs, grits e lama da cal), o qual apresenta coloração escura, entre cinza e preto, possivelmente atribuída ao processo de queima da fração de matéria orgânica dissolvida em caldeira, processo este que antecede a recirculação do resíduo que voltará a ser coprocessado e quando este não tiver mais nenhuma propriedade capaz de gerar energia ao sistema de produção, esse material é descartado gerando o resíduo e conseqüentemente sendo descartado.

A composição química do RPCEL, analisada através do método de FRX (Tabela 10) demonstra a presença, basicamente, de óxido de cálcio (CaO) 52,3%, dióxido de silício (SiO₂) 1,7%, óxido de magnésio (MgO) 1,4%, anidrido sulfúrico (SO₃) 1,1%, óxido de alumínio (Al₂O₃) 0,5%, e óxido férrico (Fe₂O₃) 0,4%.

Tabela 10 - Composição química do RPCEL

Elementos	Teor de elementos em % de peso
CaO	52,3
SiO ₂	1,7
MgO	1,4
SO ₃	1,1
Al ₂ O ₃	0,5
Fe ₂ O ₃	0,4
K ₂ O	0,3
P ₂ O ₅	0,3
TiO ₂	<0,1
MnO	<0,1
P.F	41,32

Fonte: Autoria própria (2020)

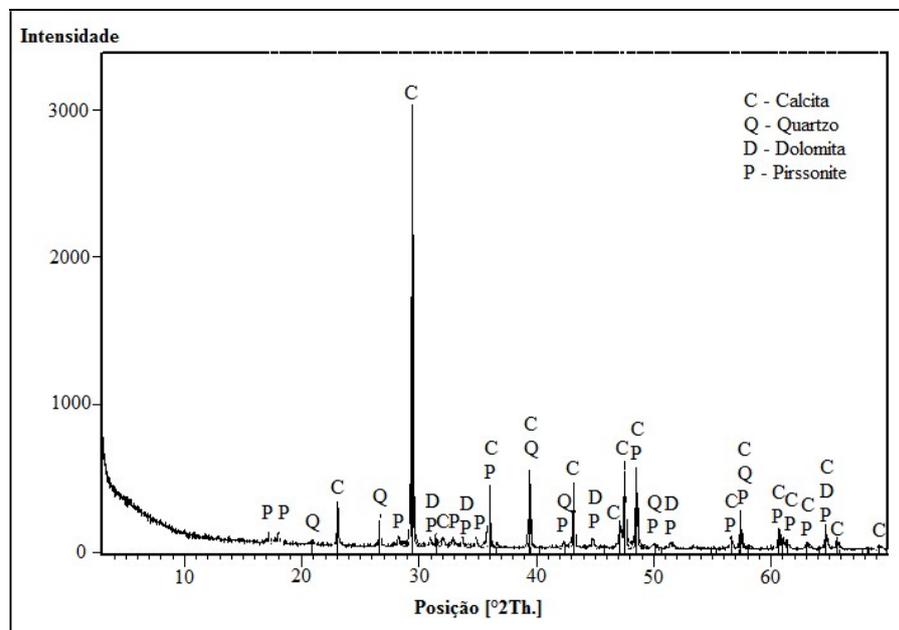
O valor de perda ao fogo (P.F.=41,32%) exprime a perda de massa após aquecimento no forno para a realização do ensaio, denominado de material volátil. Um dos principais motivos para a perda ao fogo se refere a quantidade de material orgânico proveniente da sua matéria prima, a madeira, temos também a reação de CO_2 com o calcário, o qual pode também ser verificado com base no DRX do RPCEL como sendo a maior intensidade a calcita (CaCO_3).

Já o Fe_2O_3 , K_2O , P_2O_5 , TiO_2 e o MnO podem ser considerados como resíduos do processo de produção por sua pequena quantidade obtida.

Para o Difratoograma de Raio-X (DRX) do RPCEL (Figura 21), é possível observar a presença dos minerais: Calcita (CaCO_3), Quartzo (SiO_2), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e Pirssonita $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2\text{H}_2\text{O}$.

A maior intensidade do pico para o ângulo incidente de $27,4^\circ$ próximo a 3000 pulsos por segundos, pertence a Calcita (CaCO_3), material este oriundo da matéria prima utilizada na produção de celulose. Os demais pontos menores próximos de 100 pulsos por segundo dos demais materiais é provável que existam uma alta quantidade de materiais amorfos com escalas reduzida.

Figura 21 Difratoograma do RPCEL através do DRX



Fonte: Autoria própria (2020)

Todos os elementos identificados são cristalinos (calcita, quartzo, dolomita e pirssonita), tendo uma perfeita organização molecular, já os amorfos tem sua estrutura desordenadas e estão localizados abaixo da curva do gráfico na faixa de

aproximadamente 100 pulsos por segundo, ou seja, a área dentro do gráfico é seguramente de material amorfo. Todos os picos que aparecem são elementos cristalinos em quantidade maior que 5%, variando sempre a inclinação de incidência do ângulo de raio x no momento do ensaio.

Abaixo segue a Tabela 11, apresenta a legenda do Difratoograma de Raios X do resíduo da produção de celulose:

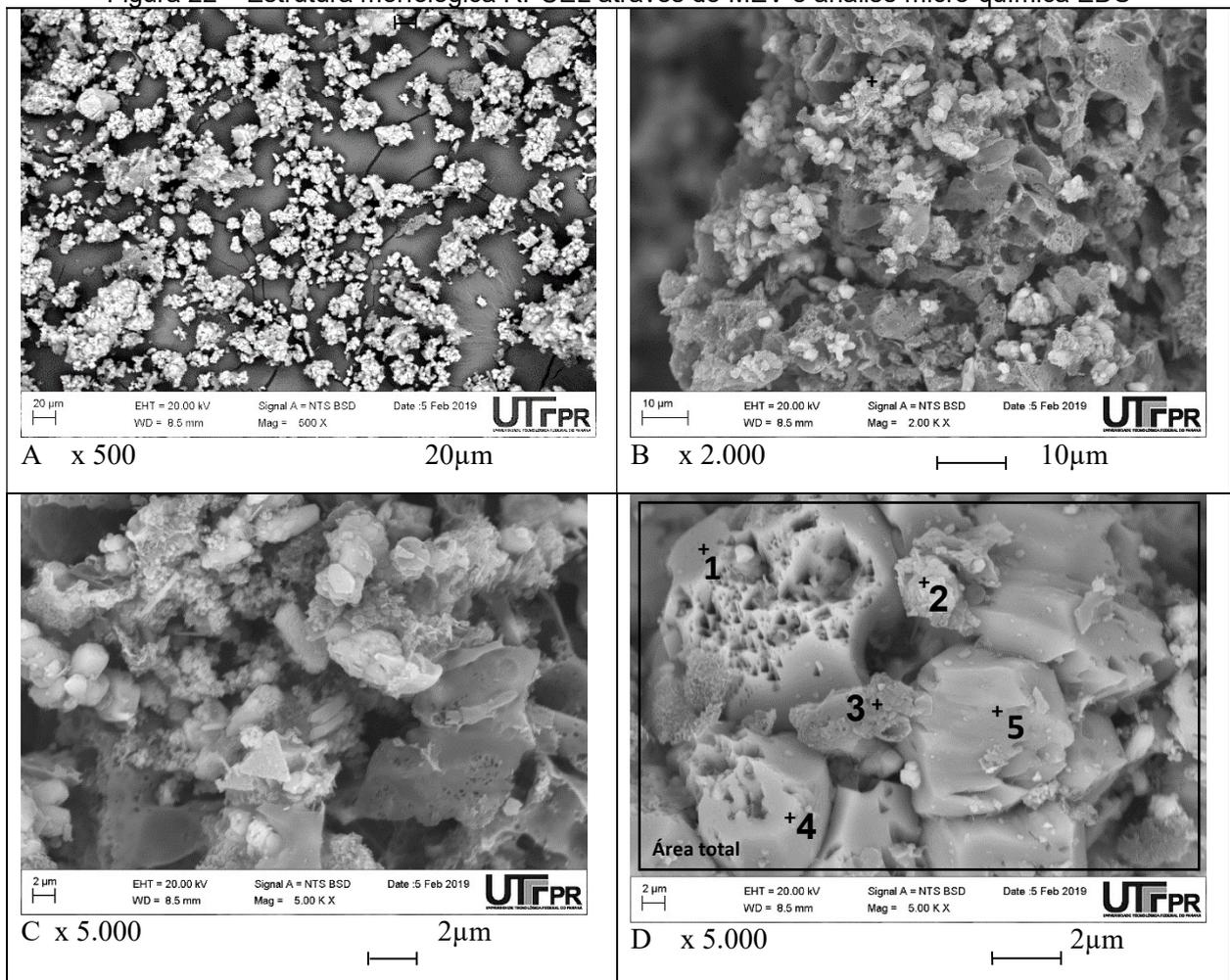
Tabela 11 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RPCEL

Minerais	Fórmula Química
Calcita	CaCO_3
Quartzo	SiO_2
Pirssonita	$\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2$
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 22 apresenta a estrutura morfológica do RPCEL pelo método MEV.

Figura 22 – Estrutura morfológica RPCEL através do MEV e análise micro-química EDS



Analisando os resultados da Figura 22 pode-se verificar que as Figuras 22-A e 22-B do RPCEL demonstram que todo o material é constituído de partículas de diferentes formas e tamanhos. As partículas variam de 2 µm a 20 µm.

Nas imagens das Figuras 22-C e 22-D, com ampliação de 5.000x é possível observar alguns corpos muito parecidos a partículas cristalinas, mas as análises realizadas pelo método EDS (Tabela 12) demonstraram diferença entre os teores dos elementos químicos em diferentes pontos. Como exemplo, os pontos 2 e 3 da Figura 22-D aparentam ser uma estrutura cristalina, porém pelo método EDS pode-se verificar na Tabela 12, variação no teor de cálcio e silício, demonstrando, assim, impossibilidade de ser um corpo cristalino com composição química sempre estável. A composição química da área total demonstra os elementos principais naquela área pré-estabelecida, determinados através do método de EDS (Tabela 12).

Tabela 12 - Composição micro-química do RPCEL através do EDS

Espectro	Na	Mg	Al	Si	Ca	Total
1	1.70	0.88	0.57	-	96.82	100.00
2	4.94	5.86	1.06	2.38	85.30	100.00
3	4.82	2.24	0.54	-	92.41	100.00
4	2.18	0.98	0.46	0.88	95.50	100.00
5	3.27	2.29	0.54	-	93.91	100.00
Área total	2.31	1.66	0.50	-	94.89	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se considerar um cristal quando a partícula é sólida homogênea e possui ordem interna tridimensional, que sob condições favoráveis pode manifestar-se externamente por superfícies limitantes planas e lisas. Com a distribuição regular as partículas elementares de uma estrutura cristalina pode ser descrita também pela repetição periódica de átomos, por esta razão a matéria cristalina apresenta uma homogeneidade periódica, quanto a distribuição das suas partículas elementares.

Embora a maioria das substâncias, naturais ou sintéticas sejam cristalinas, algumas delas pode faltar qualquer estrutura interna ordenada, diz-se que tais substâncias são amorfas e ainda as substâncias amorfas de ocorrência natural são designadas por mineralóides, ou seja são as partículas que se distribuem desordenadamente.

Cabe ressaltar, que provavelmente esses corpos identificados pelas análises do método EDS na Tabela 12 que os pontos 1 e 3 possuem uma pequena diferença e pode ser justificada por erros experimentais podendo ser classificado como

cristalino, não só por sua forma estrutural, mas sim pela sua constância de composição química.

Para os pontos 4 e 5 da Tabela 12 a variação é um pouco maior nos elementos químicos, permitindo interpretar como um corpo amorfo.

Conforme ensaios realizados seguindo procedimentos da NBR 16097 (ABNT, 2012) o RPCEL obteve a umidade de 39,15% do peso.

A massa específica aparente, definida por meio do processo do Frasco de Chapman, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009), foi 1.450 kg/m³.

O resíduo foi classificado como agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, conforme a composição granulométrica foi obtida, conforme a NBR 248 (ABNT, 2003), por meio da passagem do material através de peneiras, de 2 mm à 250 µm, em um granulômetro à laser (Cilas 1064), de 180 µm à 1 µm. Os resultados de amostragem seguem apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Composições Granulométricas do RPCEL

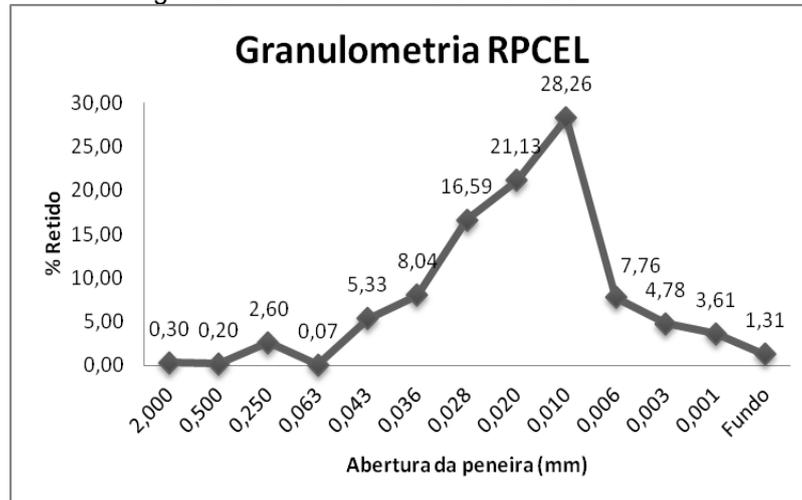
Abertura (mm)	Retido (g)	% Retido	Soma %
2	0,03	0,30	0,30
0,5	0,02	0,20	0,50
0,25	0,26	2,60	3,10
0,063	0,01	0,07	3,19
0,043	0,53	5,33	8,52
0,036	0,80	8,04	16,56
0,028	1,66	16,59	33,15
0,020	2,11	21,13	54,28
0,010	2,83	28,26	82,54
0,006	0,78	7,76	90,30
0,003	0,48	4,78	95,08
0,001	0,36	3,61	98,69
Fundo	0,13	1,31	100
Total	9,87	98,69	
Inicial	10,00g	100,00	

Fonte: Aatoria própria (2020)

Conforme ensaios realizados a composição granulométrica o RPCEL teve a %retido nas peneiras #2,00mm 0,30%, #0,5mm 0,20%, #0,25mm 2,60%, #0,063mm 0,07%, #0,043mm 5,33%, #0,036mm 8,04%, #0,028 16,59%, #0,020 21,13%,

#0,010 28,26%, #0,006 7,76%, #0,003 4,78%, #0,001 3,61% e fundo 1,31%, o que representa uma distribuição não descontínua.

Figura 23 – Granulometria do RPCEL



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar que conforme a Figura 23 a dimensão máxima característica encontrada foi de 2,00 mm e o módulo de finura de 4,53, calculada conforme as diretrizes da NBR 248 (ABNT, 2003). Este material é classificado como agregado miúdo, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), onde a maior concentração se deu na peneira com abertura de 0,010 mm, cujo percentual retido foi de 28,26 % da massa analisada, e o percentual de material pulverulento é de 96,81 %, conforme a norma NBR NM 46 (ABNT, 2003).

Este resíduo foi seco e peneirado passante na peneira #2,36mm, em seguida foram dissolvidos em água destilada, em solução de 10%, em seguida realizada a leitura do aparelho peagômetro feita em função da leitura do eletrodo quando submerso na amostra. O pH=11,62 obtido para o resíduo da produção de celulose evidencia a sua alcalinidade.

4.1.4 Resíduo da Produção da Cal (RPC)

O RPC apresenta coloração clara próxima do bege, atribuída devido ao processo de calcinação da matéria prima em temperaturas altas, alterando suas propriedades físicas e químicas. A composição química do RPC, determinada através do método de FRX, está apresentada na Tabela 14:

Tabela 14 - Composição química do RPC através do FRX

Elementos	Teor de elementos em % de peso
CaO	49,8
MgO	30,6
SiO ₂	1,9
Fe ₂ O ₃	0,7
Al ₂ O ₃	0,5
K ₂ O	<0,1
SO ₃	<0,1
MnO	<0,1
P.F	16,2

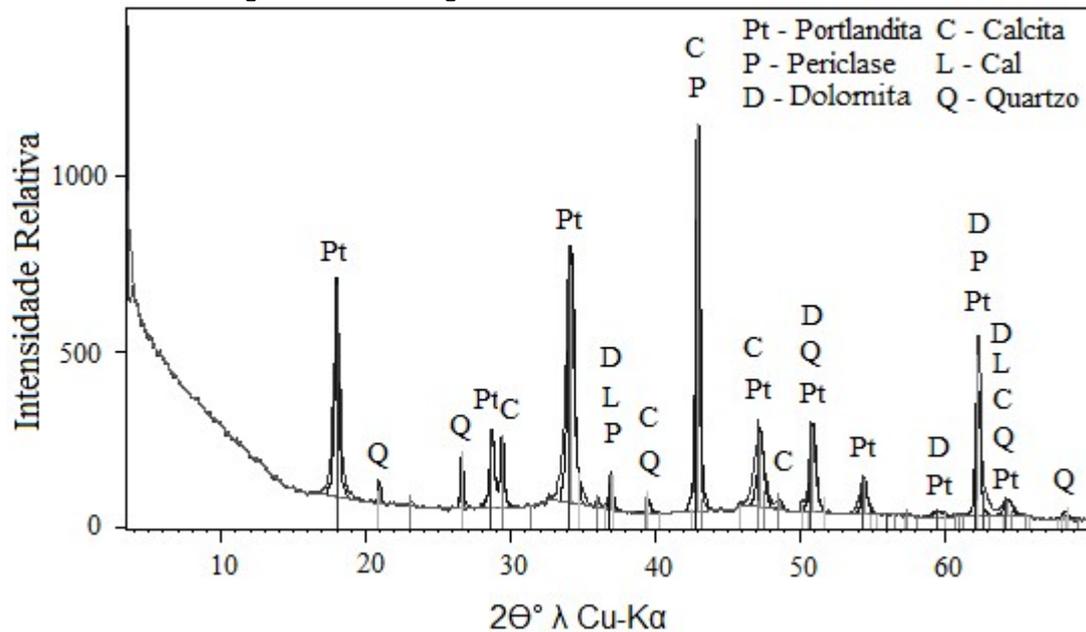
Fonte: Autoria própria (2020)

Uma das principais diferenças entre os outros calcários com o RPC está na quantidade de magnésio encontrado em sua composição. Para o calcário dolomítico a quantidade de magnésio é maior que 12%, sendo que o resíduo da produção da cal, conforme pode-se observar na tabela acima é composto basicamente por óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) com proporções de 49,8% e 30,6% respectivamente, assim evidenciando que este resíduo se trata de um calcário dolomítico. O resíduo da produção de cal é oriunda do calcário dolomítico $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ uma matéria prima abundante na região sul do Brasil. A presença de SiO₂, Fe₂O₃ e outras impurezas podem ser explicadas pelo processo de acumulação dos sedimentos calcários devido ao processo metamórfico de formação das rochas calcárias.

Conforme apresentado na Tabela 14, depois da queima da matéria-prima, o teor total de CaO somado com o MgO é igual 80,4%, indicando que o restante são impurezas. Segundo a NBR 6453 (ABNT, 2003) a quantidade não deve prevalecer 12%.

No entanto a porcentagem de impureza encontrada no resíduo de RPC é de aproximadamente 19,0%, então este subproduto deve ser denominado como resíduo de produção de cal (RPC) e não devee ser vendido como aglomerante para uso em construção civil como cal virgem. O alto valor de perda de fogo (16,2%) confirma o alto teor de água e CO₂ nos carbonatos mal queimados.

Figura 24 – Difratoograma do RPC através do DRX



Fonte: Autoria própria (2020)

A Tabela 15 apresenta a legenda do Difratoograma de Raios X do RPC:

Tabela 15 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RPC

Mineral	Fórmula
Portlandita	Ca(OH)_2
Periclase	MgO
Dolomita	$\text{CaMg(CO}_3)_2$
Quartzo	SiO_2
Calcita	CaCO_3
Cal virgem	CaO

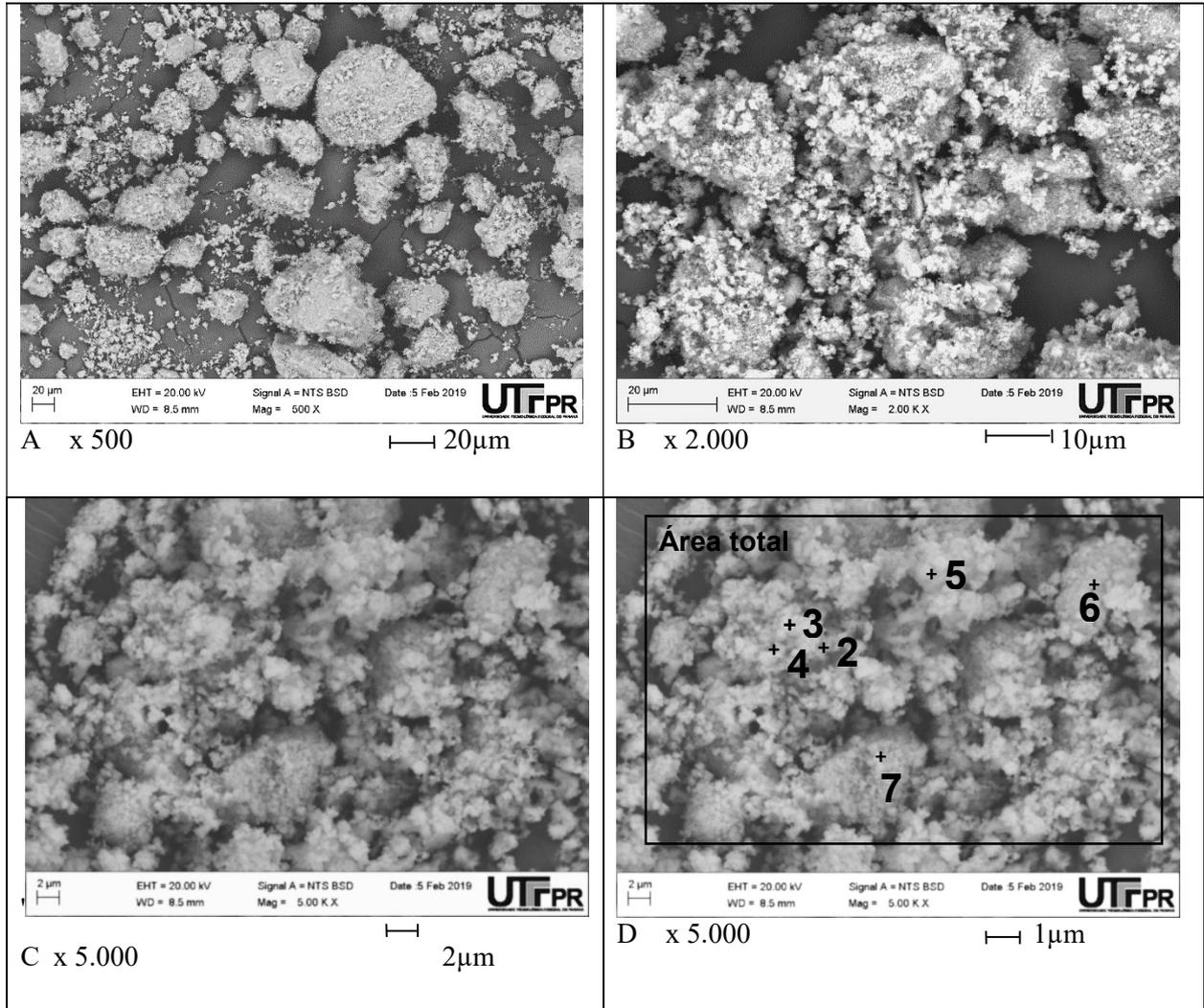
Fonte: Autoria própria (2020)

Analisando a composição mineralógica do RPC determinada através da decifração do difratograma de raios-X, conforme Figura 24. Os picos de maior intensidade pertencem aos minerais de Calcita (CaCO_3) em coincidência com o pico de Portlandite (Ca(OH)_2) com $2\theta^\circ = 44^\circ$ ou aos picos de Portlandite $2\theta^\circ = 15^\circ$ e 38° livres de coincidência com os picos de outros minerais. No DRX do RPC não existem picos livres de Cal virgem, mas só em coincidência com os picos de outros minerais, isso ocorre geralmente quando tem muito pouco teor de cal virgem e pela temperatura ou duração de queima de matéria prima (calcário) na indústria de beneficiamento em temperatura inferior a 980°C gerando assim o fim da reação de saída de CO_2 em calcário, ou até mesmo as condições de armazenagem de cal virgem, em locais com alta umidade do ar o qual transforma a cal em portlandite (Ca(OH)_2) e depois em calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg(CO}_3)_2$).

O difratograma de raios-X da Figura 24 mostra de forma significativa que o RPC utilizado nesta tese, não é cal virgem e sim um resíduo.

Na Figura 25, são apresentadas as estruturas morfológicas do RPC, ensaiadas através do MEV. Os pontos estabelecidos na Figura 25-D demonstram sua composição química.

Figura 25 - Estrutura morfológica (geometria externa) do RPC através do MEV e análise através do EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

É possível observar na Figura 25, partículas de diferentes tamanhos e que não possuem nenhuma ligação química entre si. Os materiais demonstrados na Figura 17-B medem aproximadamente 20µm em sua maior extensão, se tratam de uma partícula com superfícies irregulares e com trincas. Nas Figuras 25-C e 25-D com ampliação 5000x, observa-se a superfície ainda lisa com impurezas que podem ser o pó oriundo do rompimento da partícula, ainda é possível observar poucas elevações e considerável rede de poros irregulares.

Com os pontos pré estabelecidos na Figura 25-D foi possível construída com base no método EDS a Tabela 16, o qual possibilitou inferir a inexistência de formas cristalinas, pois a variação da composição química nos diferentes pontos e na área total é acentuada.

Tabela 16 - Composição micro-química do RPC através do EDS

Espectro	Mg	Al	Ca	Total
Área total	37.29	0.47	62.25	100.00
2	34.26	0,40	65.60	100.00
3	34.65	0.39	64.96	100.00
4	36.29	-	63.71	100.00
5	40.17	-	59.83	100.00
6	33.70	-	66.30	100.00
7	38.50	-	62.37	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme observado a Tabela 16 é evidente que se trata de uma amostra amorfa, visto que há uma grande variação na percentagem dos elementos de cálcio e magnésio que constituem a amostra.

A massa específica real do RPC definida por meio do processo do Frasco de Chapman, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009) foi 1.250 kg/m³. A Tabela 17 apresenta a distribuição granulométrica do RPC.

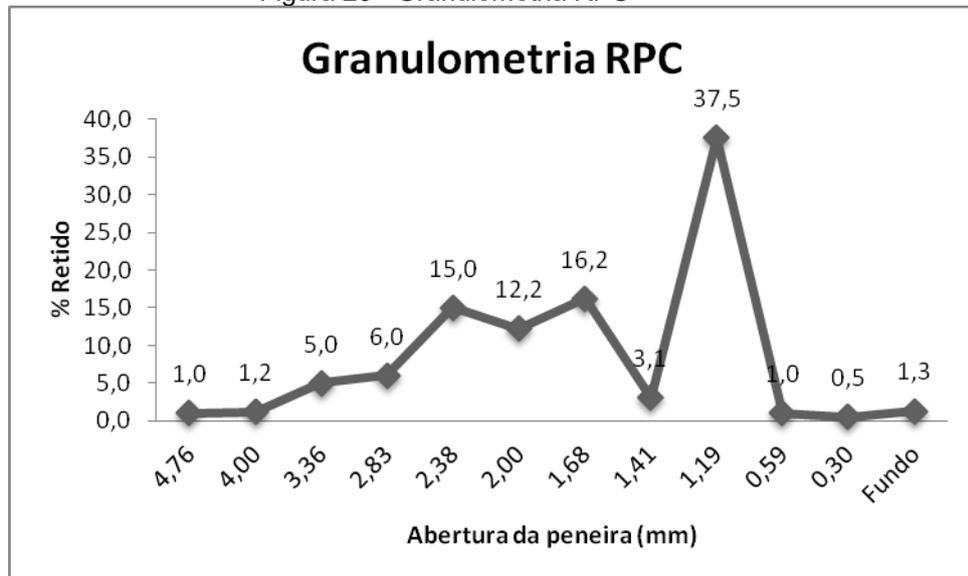
Tabela 17 – Granulometria do RPC

Abertura (mm)	Retido (g)	% Retido	Soma %
4,76	0,10	1,0	0,60
4,00	0,12	1,2	1,00
3,36	0,50	5,0	6,00
2,83	0,60	6,0	12,00
2,38	1,50	15,0	37,30
2,00	1,22	12,2	75,30
1,68	1,62	16,2	91,89
1,41	0,31	3,1	94,99
1,19	3,75	37,5	97,29
0,59	0,10	1,0	98,29
0,30	0,05	0,5	98,79
Fundo	0,13	1,3	100,00
Total	10,00	99,9	
Inicial	10,00g	100,0	

Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme ensaios realizados a composição granulométrica o RMF teve a %retido nas peneiras #4,76mm 1,0%, #4,00mm 1,2%, #3,36mm 5,0%, #2,83mm 6,0% #2,38mm 15,0%, #2,00mm 12,2%, #1,68mm 16,2%, #1,41mm 3,10%, #1,19mm 37,5% #0,59mm 1,0%, #0,297mm 0,5% e fundo 1,3%, o que representa uma distribuição descontínua.

Figura 26 - Granulometria RPC



Fonte: Autoria própria (2020)

Observou-se na Figura 26 que o resíduo foi classificado como agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, conforme a NBR 248 (ABNT, 2003), por meio da passagem do material através de peneiras, de 4,76 mm à 0,259 mm.

Este resíduo foi seco e peneirado passante na peneira #2,36 mm, em seguida foram dissolvidos em água destilada, em solução de 10%, em seguida realizada a leitura do aparelho peagômetro feita em função da leitura do eletrodo quando submerso na amostra. O pH=11,00 obtido para o resíduo da produção da cal evidencia a sua alcalinidade.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

4.2.1 Teor de Umidade

Com o objetivo de reduzir custos com o processo de secagem em uma eventual produção industrial, optou-se por moldar os corpos de prova com a umidade proveniente dos próprios resíduos, no entanto, houve a necessidade de adicionar água nas composições.

A Tabela 18 apresenta a umidade obtida para todos os traços com os quatro resíduos utilizados em suas respectivas composições.

Tabela 18 – Traços e Umidade das Composições

Umidade das Composições						
Composição	RMF	RPCEL	RC	RPC	Umidade % [*]	a/ms
1	30	30	25	15	11,33	0,11
2	20	40	25	15	12,20	0,12
3	40	20	25	15	11,21	0,11
4	25	35	25	15	11,40	0,11
5	35	25	25	15	11,57	0,12
6	10	40	25	15	11,80	0,12
7	40	10	25	15	11,35	0,11
8	30	20	30	20	10,24	0,10
9	20	30	30	20	10,45	0,10
10	25	25	30	20	10,57	0,11
11	10	40	30	20	10,22	0,10
12	40	10	30	20	10,98	0,11
13	30	20	25	25	12,35	0,12
14	20	30	25	25	12,18	0,12
15	25	25	25	25	12,11	0,12
16	10	40	25	25	12,22	0,12
17	40	10	25	25	12,80	0,13
18	35	15	25	25	12,58	0,13
19	15	35	25	25	12,20	0,12

[*] Umidade em % de massa, considerando a umidade após 48 horas da coleta.

Fonte: Autoria própria (2020)

O processo de secagem seguiu a recomendação da NBR 16097 (ABNT, 2012) e foi realizado apenas para a identificação do teor de umidade dos resíduos pesquisados em até 48 horas após o recebimento dos resíduos.

O valor encontrado da umidade foi obtido após ter sido feito as misturas das composições 1 ao 19, teve a finalidade de verificar a possibilidade de misturar,

homogenizar e moldar os corpos de prova sem a necessidade de adicionar água na mistura, no entanto, não foi possível realizar a moldagem, pois verificou-se visualmente que a água era insuficiente. Após o processo de secagem foi possível obter a quantidade de água contida em cada composição e determinar a relação água / materiais secos (a/ms).

4.2.2 Resistência à Compressão Uniaxial

O controle da resistência à compressão de um material tem por finalidade verificar a conformidade da resistência das diferentes composições empregadas. Foram ensaiados cinco corpos de prova de cada composição nas seguintes idades de cura: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365 e 720 dias.

Na Tabela 19, são apresentadas as médias resistências à compressão obtidas para todas as composições.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de resistência a compressão uniaxial

N°	Composições, %					Resistência a compressão uniaxial (MPa)/dias de cura									
	RMF	RPCEL	RC	RPC	a/ms	3	7	14	28	60	90	180	365	720	
1	30	30	25	15	0,28	1,84	2,52	2,70	2,71	2,77	3,72	4,78	5,40	5,57	
2	20	40	25	15	0,29	1,20	2,10	2,31	2,44	2,71	2,90	3,15	4,93	5,41	
3	40	20	25	15	0,27	1,83	2,67	2,75	2,86	2,93	3,03	3,80	5,06	5,26	
4	25	35	25	15	0,28	2,35	2,70	2,99	3,28	3,60	3,83	5,17	6,27	6,27	
5	35	25	25	15	0,30	2,01	2,60	2,89	2,94	3,23	3,76	4,56	5,37	5,99	
6	15	45	25	15	0,31	1,40	1,70	1,67	1,56	1,54	2,15	3,52	5,17	5,17	
7	45	15	25	15	0,27	2,62	3,40	3,45	3,61	3,88	4,43	4,78	5,70	5,90	
8	30	20	30	20	0,31	2,45	2,59	3,17	3,06	3,11	3,39	4,77	6,19	6,19	
9	20	30	30	20	0,31	1,69	2,06	2,53	2,68	2,75	3,65	4,54	6,05	6,86	
10	25	25	30	20	0,32	2,51	2,67	2,60	2,89	2,88	2,75	3,25	5,31	5,31	
11	10	40	30	20	0,33	1,33	1,56	2,00	2,77	2,92	3,10	3,79	5,09	6,11	
12	40	10	30	20	0,31	2,84	3,93	4,00	4,41	3,64	4,82	6,59	6,85	7,06	
13	30	20	25	25	0,31	2,66	3,12	3,86	4,06	3,80	4,97	5,13	6,56	7,15	
14	20	30	25	25	0,32	1,95	2,26	2,76	2,94	3,72	4,08	4,38	6,05	6,05	
15	25	25	25	25	0,33	2,99	3,60	4,31	4,55	5,35	5,56	6,08	6,52	6,82	
16	10	40	25	25	0,34	3,00	3,34	3,75	4,07	4,32	4,79	5,87	6,97	7,91	
17	40	10	25	25	0,34	4,94	5,75	6,58	6,92	7,61	7,72	9,63	10,47	11,47	
18	35	15	25	25	0,33	4,17	4,50	5,10	6,10	6,38	6,58	6,99	6,85	7,15	
19	15	35	25	25	0,34	2,86	3,08	3,11	4,05	4,24	4,45	5,58	6,02	6,38	

Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar as duas composições que obtiveram os melhores dados de comparação de resistências conforme, (Tabela 19), foram as composições 16 e 17. Percebe-se que a percentagem do RC e o RPC permaneceram iguais, alterando o RPCEL e o RMF, ainda é possível observar uma leve tendência para o aumento resistência quando a percentagem do RMF aumenta e diminui a quantidade de RPCEL.

É possível observar uma regularidade no ganho de resistência do compósito quando se aumenta a percentagem do RMF tendo em vista que em composições com percentagens maiores que 20% o resultado foi muito satisfatório e ficaram bem abaixo das composições 16 e 17 e como é o caso das composições 7,8 e 12.

Atenção especial merece ser dada a composição 17, a qual obteve um ganho constante de resistência com o aumento de seu tempo de cura.

Pode-se comparar as resistências obtidas conforme a NBR 7170 (ABNT, 1983), classifica os tijolos maciços em três classes: Classe A $> 1,5$ MPa; Classe B $> 2,5$ MPa e; Classe C $> 4,0$ MPa. Conforme observado na Tabela 19 os valores de resistência das composições variam quanto ao tempo de cura, sendo possível afirmar que o crescimento da resistência é diretamente proporcional nas composições com maior percentual de resíduo de cal nas composições.

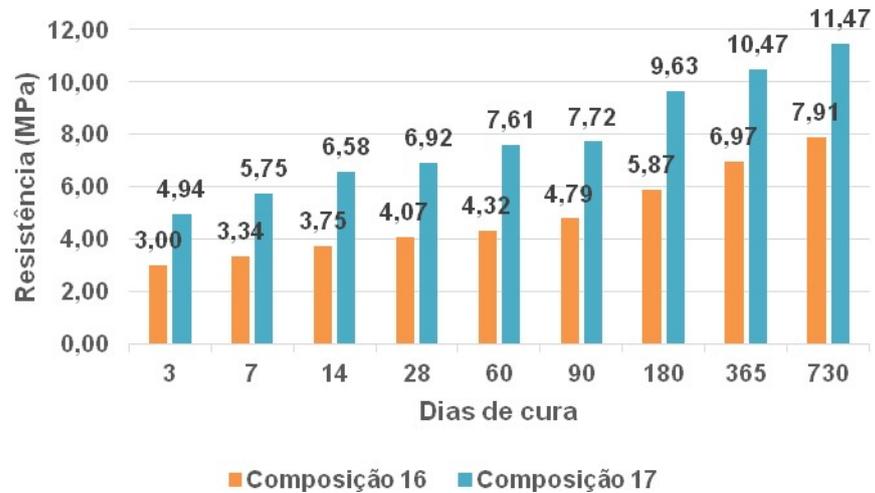
Também é possível observar na Tabela 19 que entre as dezenove composições que contém resíduos de cal, em quinze constatou-se que no terceiro dia de cura, a resistência ultrapassou significativamente as demandas da NBR 7170 (ABNT, 1983) classe A.

Aos 28 dias sete composições ultrapassaram a demanda da classe C, sendo elas as composições 12, 13, 15, 16, 17, 18 e 19.

Outra possibilidade de comparação é com a (NBR 6136) (ABNT, 2006) que regulamenta os critérios mínimos de utilização de blocos de concreto para vedação. A norma apresenta 4 classes de resistência: Classe A $\geq 2,0$ MPa, Classe B $\geq 3,0$ MPa, Classe C $\geq 4,0$ MPa e classe D $\geq 6,0$ MPa.

Pode-se observar na Tabela 19, que as composições 16 e 17 atendem aos requisitos de classificação da Classe D, a partir dos 28 dias de cura.

Figura 27 - Resistência a compressão uniaxial das composições 16 e 17



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar que na Figura 27 que a composição 17 destaca-se, visto que não incorpora um valor muito alto da porcentagem de RPCEL e sua resistência aumenta gradativamente. A composição 17 foi adotada como a composição que prevalece sobre as demandas da NBR 6136 (ABNT, 2006) e NBR 7170 (ABNT, 1983), para análises de processos físico-químicos de formação de estruturas dos materiais desenvolvidos.

4.2.3 Coeficiente de Resistência à Água

A Tabela 20 apresenta os valores do coeficiente de resistência à água (C_{RA}) dos corpos de prova com 28 e 90 dias de cura.

O C_{RA} é a divisão da resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova saturados pela resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova secos, resultando em uma variação da resistência à compressão dos materiais quando expostos à umidade, no qual, se tolera perda de até 35 % da resistência dos corpos de prova saturados em relação aos secos (GOST 9479-84, 2011).

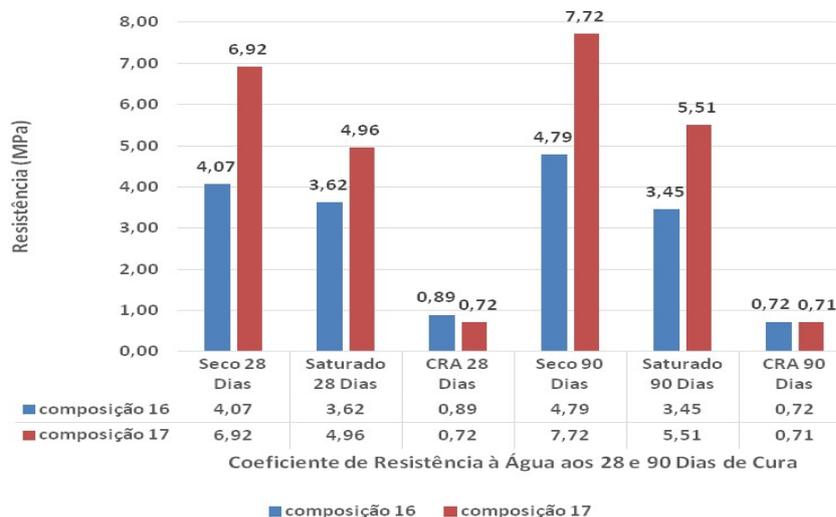
Tabela 20 – Coeficiente de Resistência à Água com 28 e 90 Dias de Cura

N°	Composições, %					28 Dias			90 Dias		
	RMF	RPCEL	RC	RPC	a/ms	Seco	Saturado	C _{RA}	Seco	Saturado	C _{RA}
1	30	30	25	15	0,28	2,71	1,95	0,72	3,72	2,93	0,79
2	20	40	25	15	0,29	2,44	1,20	0,49	2,90	1,35	0,47
3	40	20	25	15	0,28	2,86	1,77	0,62	3,03	1,96	0,65
4	25	35	25	15	0,28	3,28	2,80	0,85	3,83	1,69	0,44
5	35	25	25	15	0,30	2,94	1,95	0,66	3,76	1,81	0,48
6	15	45	25	15	0,31	1,56	1,10	0,71	2,15	1,04	0,48
7	45	15	25	15	0,29	3,61	2,11	0,58	4,43	1,82	0,41
8	30	20	30	20	0,31	3,06	1,88	0,61	3,39	1,67	0,49
9	20	30	30	20	0,31	2,68	1,56	0,58	3,65	1,36	0,37
10	25	25	30	20	0,32	2,89	1,83	0,63	2,75	1,72	0,63
11	10	40	30	20	0,33	2,77	1,28	0,46	3,10	1,31	0,42
12	40	10	30	20	0,31	4,41	3,58	0,81	4,82	3,36	0,70
13	30	20	25	25	0,31	4,06	3,59	0,88	4,97	3,57	0,72
14	20	30	25	25	0,32	2,94	1,86	0,63	4,08	2,64	0,65
15	25	25	25	25	0,33	4,55	3,65	0,80	5,56	3,73	0,67
16	10	40	25	25	0,34	4,07	3,62	0,89	4,79	3,45	0,72
17	40	10	25	25	0,34	6,92	4,96	0,72	7,72	5,51	0,71
18	35	15	25	25	0,33	6,10	4,51	0,74	6,58	4,86	0,74
19	15	35	25	25	0,34	4,05	2,91	0,72	4,45	3,21	0,72

Fonte: Autoria própria (2020)

Para a idade de cura aos 28 dias as composições 1, 4, 5, 6, 12, 15, 16, 17, 18 e 19 apresentaram resultados satisfatórios para o C_{RA} não excedendo o limite máximo de 35%.

Figura 28 Coeficiente de Resistência à Água com 28 e 90 Dias de Cura



Fonte: Autoria própria (2020)

Para a idade de cura aos 90 dias as composições 1, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 apresentaram resultados satisfatório para o C_{RA} não excedendo o limite máximo de 35%. Porém as composições 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 o C_{RA} , foi acima do tolerado, não sendo satisfatório seu resultado. A Figura 28 demonstra a eficiência das composições 16 e 17 aos 28 e 90 dias.

4.2.4 Absorção de Água

O resultado obtido para o ensaio de absorção de água é apresentado na Tabela 21. Foi realizado ensaio de imersão em água dos corpos de prova por um período de imersão de 24 horas. Os ensaios foram realizados aos 28 dias e 90 dias.

Tabela 21 – Absorção de Água dos CPs com 28 e 90 Dias de Cura

N°	Composições (%)					Absorção de Água (%)	
	RMF	RPCEL	RC	RPC	a/ms	28 dias	90 dias
1	30	30	25	15	0,28	10,45	9,85
2	20	40	25	15	0,29	9,40	9,50
3	40	20	25	15	0,27	10,53	9,23
4	25	35	25	15	0,28	11,15	10,28
5	35	25	25	15	0,30	11,68	10,15
6	15	45	25	15	0,31	12,93	12,72
7	45	15	25	15	0,27	12,39	10,85
8	30	20	30	20	0,31	9,98	9,47
9	20	30	30	20	0,31	11,52	11,44
10	25	25	30	20	0,32	11,46	10,81
11	10	40	30	20	0,33	11,04	11,97
12	40	10	30	20	0,31	10,97	9,30
13	30	20	25	25	0,31	10,32	9,46
14	20	30	25	25	0,32	11,52	10,58
15	25	25	25	25	0,33	10,76	9,61
16	10	40	25	25	0,34	10,86	9,17
17	40	10	25	25	0,34	9,62	8,33
18	35	15	25	25	0,33	11,01	9,97
19	15	35	25	25	0,34	10,84	11,90

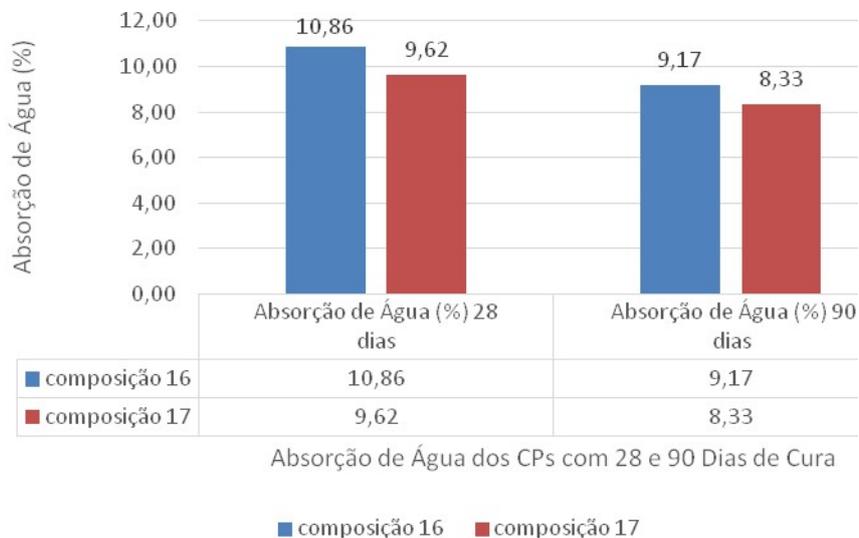
Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar na Tabela 21, que com o aumento da idade de cura dos compósitos de 28 para 90 dias, os quais foram imersos por um período de 24 horas, calculados conforme a NBR 9778 2 (ABNT, 2009) houve uma diminuição da absorção de água, isso se dá pelo fato de que possivelmente houve um crescimento da densidade aparente através da formação de novas substâncias nos poros das

amostras, diminuindo a porosidade, conseqüentemente diminuindo a permeabilidade de água exceto nas composições 2, 11, e 19.

A NBR 15270 (ABNT, 2005), define um intervalo de tolerância para o índice de absorção de água nos blocos cerâmicos de vedação entre 8% a 22%. Logo, é possível verificar na Tabela 21 que nenhuma das composições excedeu os requisitos mínimos e máximos exigidos pela norma, tanto para a idade de 28 e 90 dias de cura.

Figura 29 - Absorção de Água dos CPs com 28 e 90 Dias de Cura



Fonte: Autoria própria (2020)

Já a NBR 6136 (ABNT, 2006) estabelece como valores médios de absorção de água nos blocos de concreto de vedação um valor máximo 10% para agregados normais e 16% para agregados leves. Logo, comparando as composições a essa norma, percebe-se que as composições 8 e 18 ficaram dentro do parâmetro exigido, no entanto as composições 1, 2, 3, 4, e 16 ficaram muito próximas do valor limite, as demais composições, porém, não atenderam a esta norma aos 28 dias de cura. Na Figura 29 pode-se observar o comportamento satisfatório das composições 16 e 17.

4.2.5 Expansão ou retração das Amostras Durante o Período de Cura

Denomina-se retração ou expansão a redução ou aumento das dimensões que ocorre em um compósito, mesmo na ausência de tensões mecânicas e de variação de temperatura. Conforme observado na Tabela 22, em todas as composições ocorreu uma expansão nas primeiras idades de cura e em seguida os

corpos de prova se retraíram. Geralmente, em peças curadas ao ar livre, a retração é decorrente da evaporação parcial da água e parte da água permanece nos compósitos após seu endurecimento.

O coeficiente de expansão linear (α) é utilizado para verificar a expansão linear das amostras durante o período de cura, o diâmetro inicial (l_i) dos corpos de prova são medidos por meio de um paquímetro digital e, após cada idade de cura são submetidos às novas medições (l_f), calcula-se o coeficiente de expansão linear.

A dilatação durante o período de cura foi medida aferindo o diâmetro dos corpos de prova durante a cura e relacionando-o ao diâmetro original, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007). Os valores percentuais de variação dos diâmetros aferidos seguem apresentados na Tabela 22.

Na Tabela 22, serão apresentados os resultados da expansão ou retração média do diâmetro dos corpos de prova.

Tabela 22 - Expansão ou retração linear das amostras durante o período de cura

Variação do Diâmetro por Dias de Cura, em %														
N°	Composições, %				Dias									
	RMF	RPCEL	RC	RPC	3	7	14	28	60	90	180	365	730	
1	30	30	25	15	2,50	3,81	3,26	2,40	1,85	1,69	1,30	1,13	0,92	
2	20	40	25	15	2,45	3,34	3,32	2,18	1,70	1,62	1,36	1,06	0,91	
3	40	20	25	15	2,47	3,44	3,38	2,20	1,90	1,73	1,32	1,12	0,95	
4	25	35	25	15	2,55	3,46	3,42	2,23	1,85	1,69	1,30	1,23	0,82	
5	35	25	25	15	2,20	3,15	3,00	2,10	1,83	1,68	1,13	0,98	0,85	
6	15	45	25	15	2,32	3,28	3,22	2,21	1,78	1,64	1,28	1,11	0,97	
7	45	15	25	15	2,48	3,28	3,00	2,20	1,89	1,73	1,32	1,05	0,94	
8	30	20	30	20	2,56	3,35	3,22	2,12	1,90	1,71	1,42	1,22	0,85	
9	20	30	30	20	2,51	3,39	3,28	2,16	1,70	1,57	1,25	1,05	0,93	
10	25	25	30	20	2,70	3,62	3,55	2,25	1,95	1,77	1,34	1,16	0,98	
11	10	40	30	20	2,48	3,33	3,40	2,32	1,80	1,62	1,36	1,15	0,91	
12	40	10	30	20	2,65	3,40	3,32	2,54	1,60	1,38	1,43	1,22	0,93	
13	30	20	25	25	2,46	3,35	3,28	2,19	1,95	1,77	1,34	1,17	0,88	
14	20	30	25	25	3,04	3,87	3,65	2,35	1,55	1,24	1,11	1,05	0,70	
15	25	25	25	25	3,10	3,92	3,80	2,44	1,64	1,41	1,44	1,11	0,75	
16	10	40	25	25	2,78	3,55	3,40	2,24	1,68	1,44	1,16	1,05	0,98	
17	40	10	25	25	3,20	3,92	3,65	2,43	1,32	1,18	1,07	0,85	0,88	
18	35	15	25	25	2,89	3,58	3,32	2,98	1,49	1,32	1,19	1,00	0,92	
19	15	35	25	25	2,76	3,55	3,48	2,23	1,95	1,57	1,34	1,15	0,80	

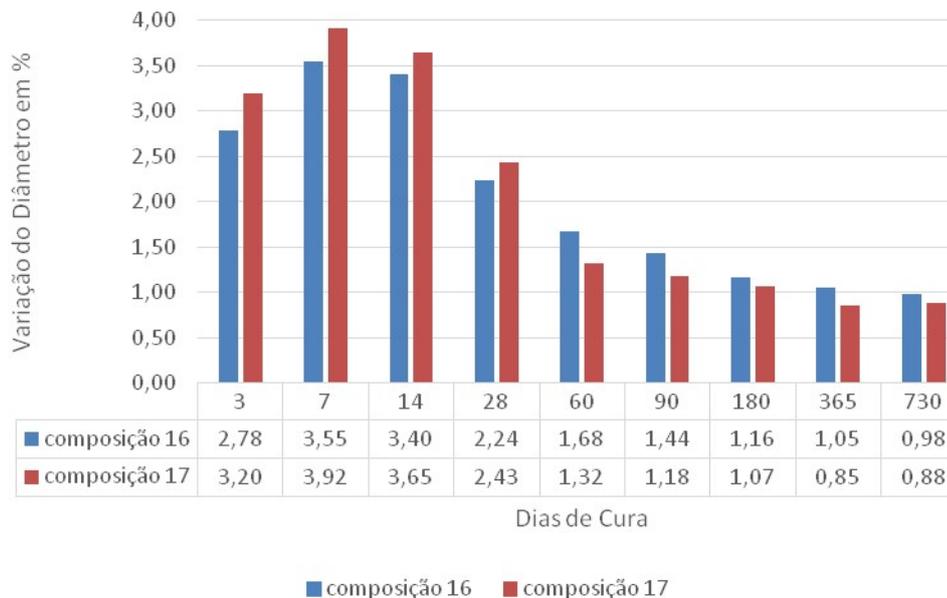
Fonte: Autoria própria (2020)

No processo de hidratação e cura do material nas primeiras idades não houve estabilidade, visto que os valores de dilatação dos CPs aos 3 dias variaram de 2,20 a 3,20% em relação aos 20mm de diâmetro quando moldados. Contudo, há mudanças contínuas durante a cura dos CPs e elas se mostram semelhantes entre si, no qual, se observa a dilatação dos CPs de 3 a 14 dias de cura e a retração aos 28, 60, 90, 180, 365 e 720 dias de cura.

Os valores percentuais de deformação, apresentados na Tabela 22, foram obtidos comparado a variação do diâmetro médio dos CPs observados durante o tempo de cura ao diâmetro original moldado de 20mm.

A dilatação inicial é provocada pela água contida no interior da mistura, as medições afirmam a dilatação durante a reações internas dos materiais constituintes nas primeiras idades principalmente até sete dias de cura. Após esta primeira semana a água contida não consumida na hidratação dos resíduos será consumida pelo ambiente externo, ocorrendo a diminuição do diâmetro, reduzindo seu volume e conseqüentemente, o diâmetro normalmente diminui novamente conforme pode ser visualizado na Figura 22 para as composições 16 e 17.

Figura 30 - Expansão ou retração linear das amostras durante o período de cura



Fonte: Autoria própria (2020)

As composições 16 e 17 apresentaram baixa amplitude de mudanças de 28 para 90 dias de cura, variando entre 2,24% a 2,43% e 1,44% a 1,18% neste período

respectivamente, o que confirma a estabilidade dos processos de hidratação e cura do material se comparados ao diâmetro de moldagem de 20 mm.

As composições 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 19 apresentaram dilatação de 3 a 28 dias de cura, após 60 dias de cura, percebe-se uma retração deste período em diante.

4.2.6 Mudanças de Redes Cristalinas de Minerais Durante a Cura

Para estudar as alterações nas composições mineralógica dos componentes iniciais, com a formação de novas estruturas e conseqüentemente novos materiais, foram identificados os compósitos de número 16 e 17, estes são responsáveis por uma melhor comparação entre as propriedades mecânicas, e por isso, é fundamental os ensaios mineralógicos e morfológicos de suas composições para pesquisar as mudanças ocorridas durante a hidratação e cura.

Foram realizados testes de Difração de Raios-X (DRX), para a mistura inicial seca, 3, 180 e 720 dias de cura. Para a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e também Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS). Realizou-se os ensaios para a mistura seca homogenizada e durante os períodos de cura de 3, 7, 28, 180 e 720 dias.

A interpretação dos resultados da análise de DRX das amostras levam em consideração a grande variedade de minerais, sendo possível ainda identificar a variação da intensidade dos picos mais significativos, e seus componentes mais usuais contidos nos resíduos.

Os resultados das comparações são necessários para gerar explicações para as mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais desenvolvidos. Conhecendo o processo físico-químico de formação das estruturas, é possível direcionar as propriedades mecânicas para produzir futuros materiais de construção com propriedades predeterminadas que obtenham os melhores resultados em uma eventual escala industrial.

Nos difratogramas de cada composição nos dias pré-determinados de cura, é possível verificar picos de diferentes minerais e intensidade tornando possível identifica-los e controlá-los.

O produto desta alteração das redes cristalinas como por exemplo do quartzo, o qual é aproveitado para síntese de novas estruturas cristalinas, aumentaram a quantidade das partículas sólidas, através de reações de sol-gel

(processo químico utilizado para a síntese de uma suspensão coloidal de partículas sólidas em um líquido) e o processo de sinerese (expulsão da água, decorrente da aproximação das moléculas devido à formação e endurecimento do gel e redução de volume), podendo transformar-se em um material sólido com propriedades mecânicas semelhantes aos de agregados naturais.

4.2.7 Análise Mineralógica das Composições 16 e 17

4.2.7.1 Aspecto Mineralógico da Mistura Inicial, aos 3, 180 e 720 dias de cura da composição 16

As mudanças mineralógicas durante o período de cura na mistura inicial seca, 3, 180 e 720 dias das composições 16 e 17 foram determinados através do método DRX.

A Figura 31 apresenta a estrutura cristalina da mistura inicial da composição 16 pelo método DRX. A composição mineralógica foi determinada através da interpretação do difratograma de raios-X, conforme Figura 31. O pico de maior intensidade pertencem ao Quartzo com o pico de incidência em 26°, também outros minerais, como por exemplo a calcita nos picos de 21° e 29° o Periclásio nos picos de 43° e 63° a magnesita nos picos de 35°, 43° e 63° a Portlandita nos picos de 43° e 63° a Brownmillerite nos picos de 21°, 33°, 39° e 48° a Alita nos picos de 12° e 23° e por último a Andradita no pico de 18°.

Figura 31 – Difratograma da mistura inicial da composição 16 através do DRX

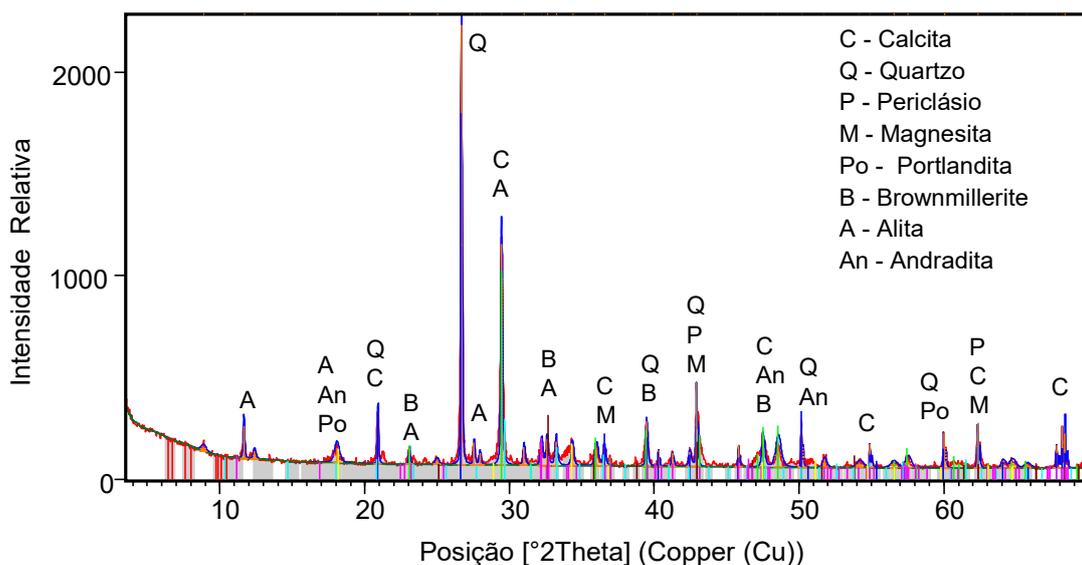


Tabela 23 – Legenda do DRX da mistura seca da composição 16

Minerais	Fórmula Química
Calcita	CaCO ₃
Quartzo	SiO ₂
Periclásio	MgO
Magnesita	MgCO ₃
Portlandita	Ca(OH) ₂
Brownmillerite	Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅ ou C ₃ AF
Alita	3CaO.SiO ₂ ou C ₃ S
Andradita	Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂

Fonte: Autoria própria (2020)

Os minerais encontrados na composição mineralógica determinada através do difratograma de raios-X, conforme Tabela 23 foram: Calcita (CaCO₃) que é o mineral constituinte do Calcário e tem o Cálcio como principal elemento formador, sendo um mineral solúvel usada na composição química de aglomerantes para construção civil como a cal e o cimento. A Calcita encontrada na mistura seca provavelmente é proveniente do resíduo da produção da cal (RPC).

Quartzo que é o segundo mineral mais abundante da Terra (aproximadamente 12 % vol.), perdendo apenas para o grupo de feldspatos. Possui estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício, SiO₂), onde cada oxigênio fica dividido entre dois tetraedros. Na construção civil o Quartzo serve de matéria prima para vários produtos como por exemplo o de agregado miúdo. Este elemento encontrado na mistura seca pode ser proveniente do agregado utilizado no resíduo de concreto (RC).

Periclásio é um óxido de magnésio (MgO), cristaliza-se no sistema cúbico, normalmente sob a forma de octaedros e raramente excedem 2 mm de comprimento. Encontrado em alguns mármoreos submetidos a metamorfismo de alta temperatura de calcários magnesianos e dolomitos. Tipicamente ocorre associado a monticellita, magnesita, brucita, hidromagnesita, hematita e anidrita.

Magnesita é um mineral de carbonato de magnésio (MgCO₃), pode conter pequenas quantidades de níquel, cobalto, cálcio e manganês. A magnesita ocorre em veios de rochas ricas em magnésio em zonas de metamorfismo.

Portlandita que é um dos principais produtos da hidratação do cimento Portland também denominado de hidróxido de cálcio Ca(OH)₂, favorecendo o surgimento de fases hidratadas de cimento, o que confere características

importantes nas pastas, como por exemplo enrijecimento e endurecimento com o consequente aumento de resistência mecânica.

Brownmillerita é um mineral com a fórmula química $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$, comumente encontradas como componentes do cimento Portland. Este mineral ocorre dentro de blocos de calcário que sofreram metamorfismo térmico. Os minerais associados incluem calcita, etringita, gehlenita, portlandita e jasmundita.

Andradita é um nesossilicato, com fórmula $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$. Ocorre em calcários impuros ou rochas ígneas cálcicas sujeitas a metamorfismo de contato, tendo como minerais associados calcita, dolomita e magnetita.

Alita está relacionada as concentrações de fases constituintes e propriedades do cimento Portland, de composição $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ e abreviada por C_3S , geralmente é o constituinte majoritário do clínquer após o processamento, pois é sua reação de hidratação que confere a resistência mecânica.

A Figura 32 apresenta a estrutura cristalina da composição 16 para os 3 dias de cura pelo método DRX. A composição mineralógica foi determinada através da decifração do difratograma de raios-X, conforme Figura 32. O pico de maior intensidade pertence ao mineral de Quartzo com o pico de incidência em 27° , também são evidentes picos de outros minerais, como por exemplo o Periclásio nos picos de 36° , 43° , 55° e 63° a Hematita nos picos de 18° , 39° , 57° , 63° e 65° a Portlandita nos picos de 18° , 34° e 60° e Alita nos picos de 18° , 49° e 68° e o Quartzo nos picos de 21° , 27° , 36° , 39° , 43° , 50° , 54° , 57° , 60° , 64° , e 68° .

Figura 32 – Digratograma da composição 16 através do DRX - 3 dias de idade

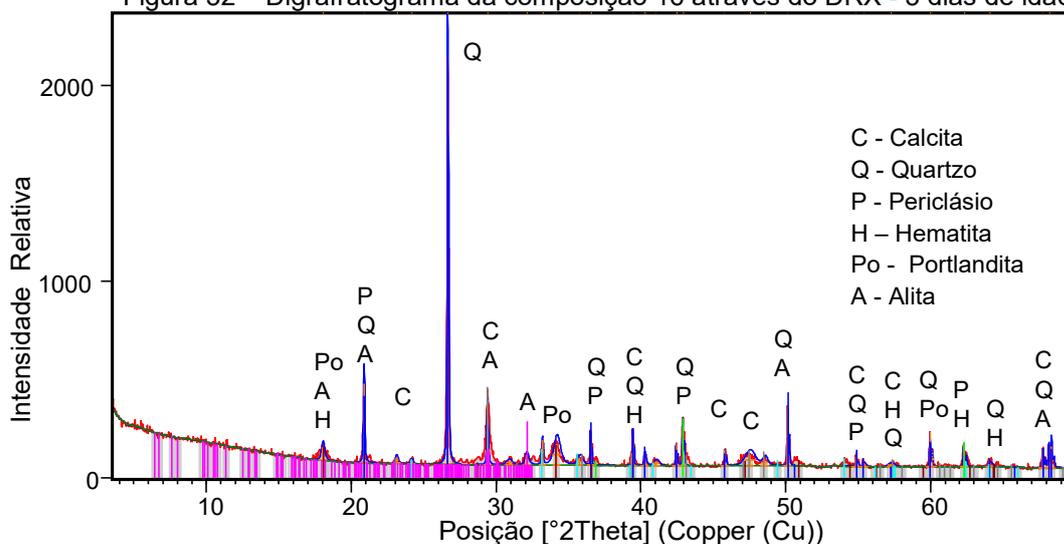


Tabela 24 – Legenda do DRX da Composição 16 com 3 dias de cura

Minerais	Fórmula Química
Calcita	CaCO ₃
Quartzo	SiO ₂
Periclásio	MgO
Hematita	Fe ₂ O ₃
Portlandita	Ca(OH) ₂
Alita	3CaO.SiO ₂ ou C ₃ S

Fonte: Autoria própria (2020)

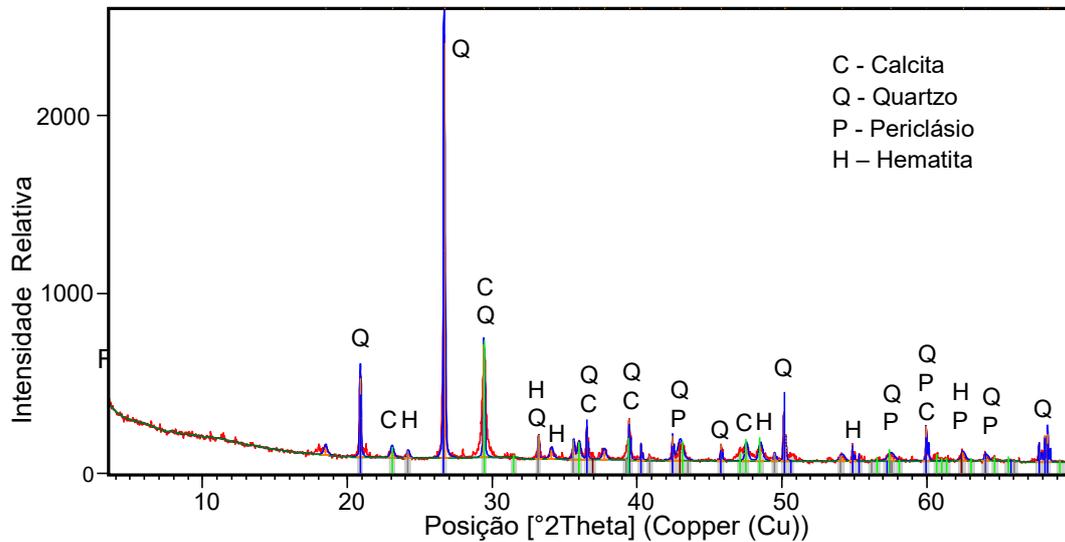
O elemento novo identificado foi a Hematita que é um mineral de fórmula química (Fe₂O₃), sendo constituído por 70% de Ferro e 30% de Oxigênio. É um mineral muito comum, sendo o principal constituinte do minério de ferro, possui brilho metálico e coloração preta, cinza, marrom, marrom avermelhado. É evidente que a sua origem na composição é proveniente do RMF.

Os demais minerais encontrados foram, Calcita (CaCO₃) provavelmente é proveniente do resíduo da produção da cal (RPC). Quartzo pode ser proveniente do agregado utilizado no resíduo de concreto (RC). Periclásio (MgO), Magnesita (MgCO₃), Portlandita que favorece o ganho de resistência enrijecendo a composição e também a Alita que está relacionada a reação de hidratação que confere a resistência mecânica a composição.

Figura 33 apresenta a estrutura cristalina da composição 16 para os 180 dias de cura pelo método DRX.

A composição mineralógica foi determinada através da decifração do difratograma de raios-X, conforme Figura 33. O pico de maior intensidade pertence ao mineral de Quartzo com o pico de incidência em 26°, também são evidentes picos de outros minerais, como por exemplo a Calcita nos picos de 23° 29°, 36°, 39°, 47° e 60° o Periclásio nos picos de 43°, 57°, 62° e 64° a Hematita nos picos de 33°, 34°, 48, 55° e 64° e o Quartzo nos picos de 21°, 26°, 29°, 36°, 39°, 43°, 46°, 50° 57° 60° e 68°.

Figura 33 – Difratoograma da composição 16 através do DRX - 180 dias de idade



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 25 – Legenda do difratograma da Composição 16 com 180 dias de cura

Minerais	Fórmula Química
Calcita	CaCO_3
Quartzo	SiO_2
Periclásio	MgO
Hematita	Fe_2O_3

Fonte: Autoria própria (2020)

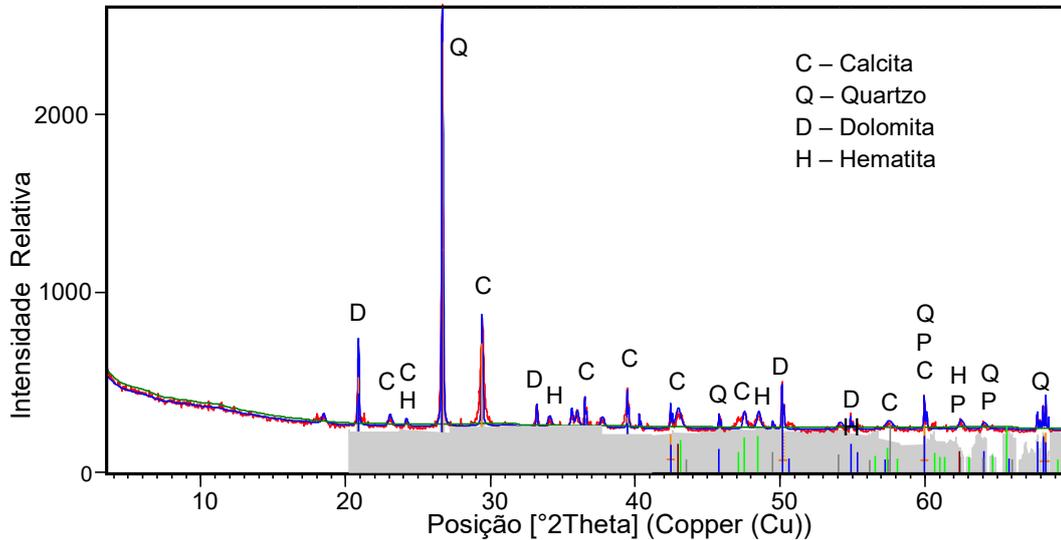
Os elementos identificados foram a Hematita (Fe_2O_3), sendo constituído por 70% de Ferro e 30% de Oxigênio, tendo sua origem na composição o RMF. Calcita (CaCO_3) usada na composição do resíduo da produção da cal (RPC). Quartzo elemento encontrado no de concreto (RC) e Periclásio normalmente associado a hematita e anidrita.

Figura 34 apresenta a estrutura cristalina da composição 16 para os 720 dias de cura pelo método DRX.

A composição mineralógica foi determinada através da decifração do difratograma de raios-X, conforme Figura 34. O pico de maior intensidade pertence ao mineral de Quartzo com o pico de incidência em 26° , também são evidentes picos de outros minerais, como por exemplo a Calcita nos picos de 23° , 24° , 29° , 36° , 39° , 43° , 47° , 57° e 60° a Dolomita nos picos de 21° , 33° , 50° e 55° a Hematita nos picos de 24° , 33° , 48° e 64° e o Quartzo nos picos de 26° , 46° , 60° , 62° e 68° .

Percebe-se na Figura 26 a elevação da quantidade de material amorfo contido nesta idade o que pode representar também a quantidade de poros internos, sendo responsável pela resistência não aumentada ainda mais.

Figura 34 – Difratoograma da composição 16 através do DRX - 720 dias de idade



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 26 – Legenda do DRX da Composição 16 com 720 dias de cura

Minerais	Fórmula Química
Calcita	CaCO_3
Quartzo	SiO_2
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Hematita	Fe_2O_3

Fonte: Autoria própria (2020)

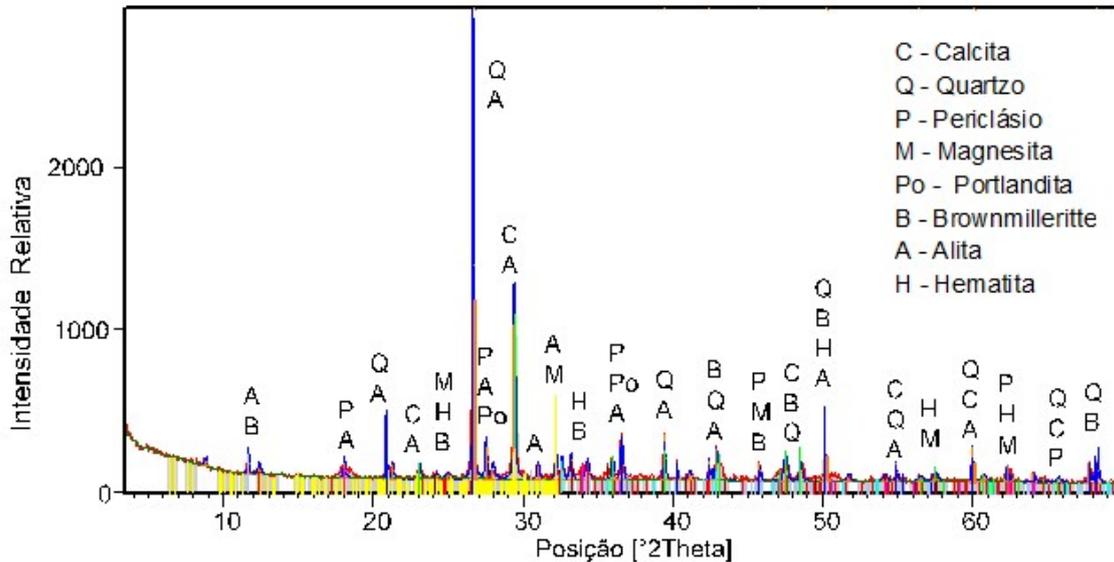
Os elementos identificados foram a Hematita (Fe_2O_3), sendo constituído por 70% de Ferro e 30% de Oxigênio, tendo sua origem na composição do RMF. A Calcita (CaCO_3) usada na composição do resíduo da produção da cal (RPC). Quartzo elemento encontrado no de concreto (RC) e a Dolomita composta por carbonato de Cálcio e magnésio.

4.2.7.2 Aspecto Mineralógico da Mistura Inicial aos 3, 180 e 720 dias de cura da Composição 17

A Figura 35 apresenta a estrutura cristalina da mistura inicial da composição 17 pelo método DRX.

A composição mineralógica foi determinada através da interpretação do difratograma de raios-X, conforme Figura 35. Os picos com maior intensidade pertencem ao mineral de Quartzo e Alita com o pico de incidência em 26°, também são evidentes picos de outros minerais, como por exemplo a Calcita nos picos de 22°, 29°, 48°, 55°, 60° e 65° o Quartzo nos picos de 21°, 26°, 39°, 43°, 48°, 50°, 55°, 60°, 65 e 68° o Periclásio nos picos de 18°, 27°, 36, 46°, 62° e 65° a Magnesita nos picos de 24°, 32°, 46°, 57° e 62° a Portlandita nos picos de 27° e 36° a Brownmillerite nos picos de 24°, 33°, 43°, 48° 50° e 68° a Alita nos picos de 12°, 18°, 21° 26°, 27°, 29°, 31°, 32°, 36°, 39°, 43°, 50°, 55° e 60° e para Hematita nos picos de 24°, 33° 50°, 57° e 63°.

Figura 35 – Difratograma da mistura inicial da composição 17 através do DRX



Fonte: Autoria própria (2020)

Os minerais encontrados na mistura inicial determinada através do difratograma de raios-X, conforme Figura 35 foram: Calcita (CaCO_3) resultante do resíduo da produção da cal (RPC).

Quartzo que é o segundo mineral mais abundante da Terra (aproximadamente 12 % vol.), elemento este provindo do agregado utilizado no resíduo de concreto (RC).

Tabela 27 – Legenda do difratograma da mistura inicial da composição 17

Minerais	Fórmula Química
Calcita	CaCO ₃
Quartzo	SiO ₂
Periclásio	MgO
Magnesita	MgCO ₃
Portlandita	Ca(OH) ₂
Brownmillerite	Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅
Alita	3CaO.SiO ₂ ou C ₃ S
Hematita	Fe ₂ O ₃

Fonte: Autoria própria (2020)

Periclásio é um óxido de magnésio (MgO), costumeiramente ocorre associado hematita. Magnesita (MgCO₃), pode conter pequenas quantidades de níquel, cobalto, cálcio e manganês. Portlandita que é um dos principais produtos da hidratação do cimento Portland.

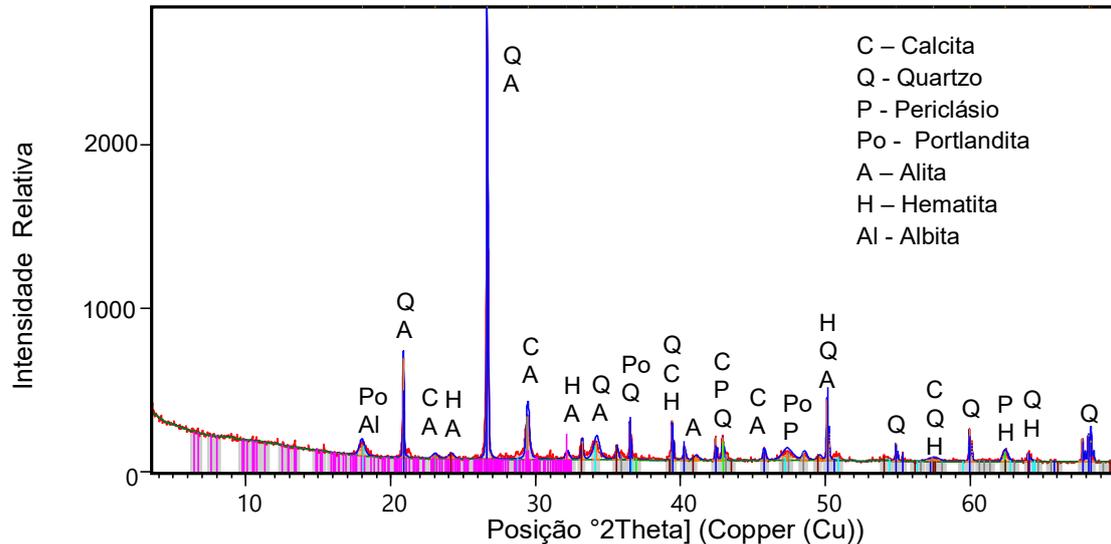
Brownmillerite é um mineral com a fórmula química Ca₂(Al,Fe)₂O₅, regularmente encontrada como componentes do cimento Portland e associados a calcita, etringita e portlandita.

Alita (3CaO.SiO₂) abreviada por C₃S, geralmente é constituinte majoritário do clínquer atribuindo a resistência mecânica ao concreto. E por último a Hematita (óxido de ferro III), provindo do resíduo RMF.

A Figura 28 apresenta a estrutura cristalina da composição 17 para os 3 dias de cura pelo método DRX.

A composição mineralógica foi determinada através da decifração do difratograma de raios-X, conforme Figura 36. Os picos com maior intensidade pertencem ao mineral de Quartzo e Alita com o pico de incidência em 26°, também são evidentes picos de outros minerais, como por exemplo a Calcita nos picos de 23°, 29°, 39°, 43°, 46° e 57° o Quartzo nos picos de 21°, 26°, 34°, 36°, 39°, 42°, 50°, 55°, 57°, 60°, 63° e 68° o Periclásio nos picos de 43°, 47° e 62° a Portlandita nos picos de 18°, 36° e 47° a Alita nos picos de 21°, 23°, 24°, 26°, 29°, 32°, 34°, 41°, 44° e 50° e para Hematita nos picos de 24°, 32°, 39°, 50°, 57°, 62° e 64°.

Figura 36 – Difratoograma da composição 17 através do DRX - 3 dias de idade



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 28 – Legenda do difratograma da composição 17 com 3 dias de cura

Minerais	Fórmula Química
Calcita	CaCO_3
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Quartzo	SiO_2
Periclásio	MgO
Portlandita	Ca(OH)_2
Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_3S
Hematita	Fe_2O_3

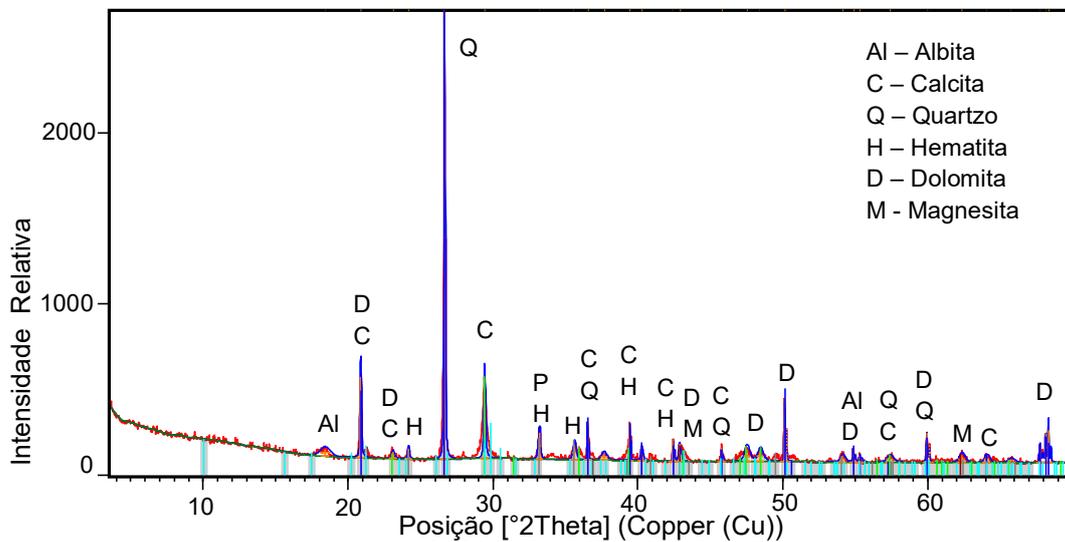
Fonte: Autoria própria (2020)

Os minerais encontrados foram, Calcita (CaCO_3) provavelmente é natural do resíduo da produção da cal (RPC). Quartzo pode ser derivado do agregado utilizado no resíduo de concreto (RC). Periclásio (MgO), Magnesita (MgCO_3), Portlandita que favorece o ganho de resistência enrijecendo a composição e também a Alita que está relacionada a reação de hidratação que confere a resistência mecânica a composição e a Hematita sendo constituído por 70% de Ferro e 30% de Oxigênio, sendo o principal constituinte do resíduo de minério de ferro.

A Figura 37 apresenta a estrutura cristalina da composição 17 para os 180 dias de cura pelo método DRX.

A composição mineralógica foi determinada através da decifração do difratograma de raios-X, conforme Figura 37. Os picos com maior intensidade pertencem ao mineral de Quartzo com o pico de incidência em 26°, também são evidentes picos de outros minerais, como por exemplo a Calcita nos picos de 21 23°, 25 29°, 36 39°, 43°, 48°, 56° e 62° o Quartzo nos picos de 26°, 36°, 46° e 56° a Albita nos picos de 18° e 55° a Dolomita nos picos de 21°, 23°, 43°, 48°, 50°, 55°, 60° e 68° e para Hematita nos picos de 25°, 36°, 39°, 42° e 44°.

Figura 37 – Difratogra da composição 17 através do DRX - 180 dias de idade



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 29 – Legenda do difratograma da Composição 17 com 180 dias de cura

Minerais	Fórmula Química
Albita	NaAlSi ₃ O ₈
Calcita	CaCO ₃
Quartzo	SiO ₂
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
Magnesita	MgCO ₃
Hematita	Fe ₂ O ₃

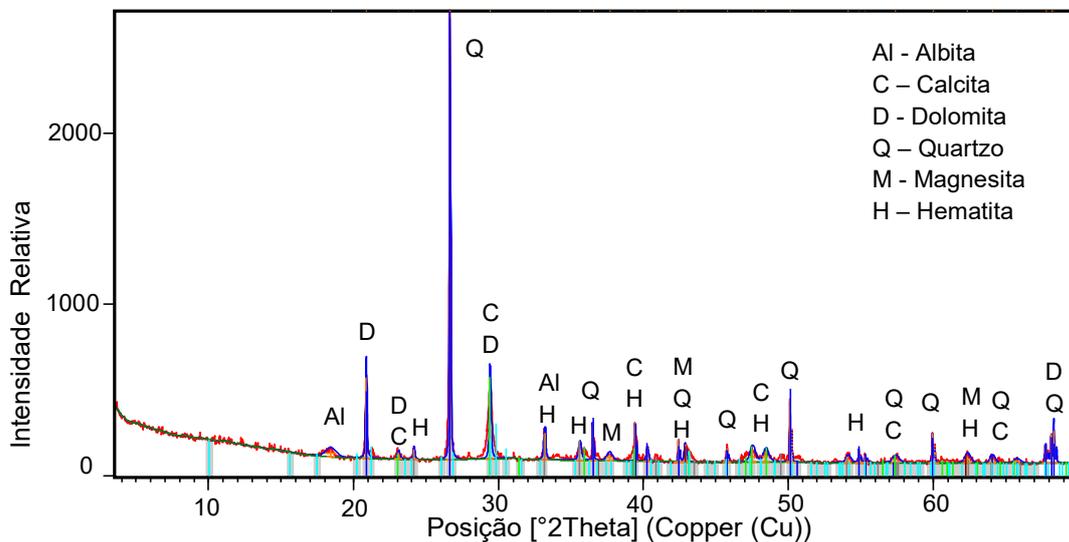
Fonte: Autoria própria (2020)

Nesta composição foram encontrados, Calcita (CaCO₃) provavelmente é natural do resíduo da produção da cal (RPC). Quartzo pode ser derivado do agregado utilizado no resíduo de concreto (RC), a Hematita sendo constituído por 70% de Ferro e 30% de Oxigênio, sendo o principal constituinte do resíduo de minério de ferro. Também foram encontrado a Dolomita a Magnesita e Albita.

A Figura 38 apresenta a estrutura cristalina da composição 17 para os 720 dias de cura pelo método DRX.

A composição mineralógica foi determinada através da decifração do difratograma de raios-X, conforme Figura 38. Os picos com maior intensidade pertencem ao mineral de Quartzo com o pico de incidência em 26°, também são evidentes picos de outros minerais, como por exemplo a Calcita nos picos de 23°, 29°, 39°, 48°, 56° e 64° o Quartzo nos picos de 26°, 36°, 43°, 46°, 50°, 56°, 60°, 63°, 65° e 68°, a Dolomita nos picos de 21°, 23°, 29° e 68° e para Hematita nos picos de 21°, 26°, 36°, 43°, 46°, 50°, 56°, 60°, 63°, 65° e 68°.

Figura 38 – Difratograma da composição 17 através do DRX - 720 dias de idade



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 30 – Legenda do difratograma da Composição 17 com 730 dias de cura

Minerais	Fórmula Química
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Calcita	CaCO_3
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Quartzo	SiO_2
Magnesita	MgCO_3
Hematita	Fe_2O_3

Fonte: Autoria própria (2020)

Nesta composição foram encontrados, Calcita (CaCO_3) provavelmente é natural do resíduo da produção da cal (RPC). Quartzo pode ser derivado do agregado utilizado no resíduo de concreto (RC). Magnesita (MgCO_3) e a Hematita

sendo constituído por 70% de Ferro e 30% de Oxigênio, sendo o principal constituinte do resíduo do minério de ferro.

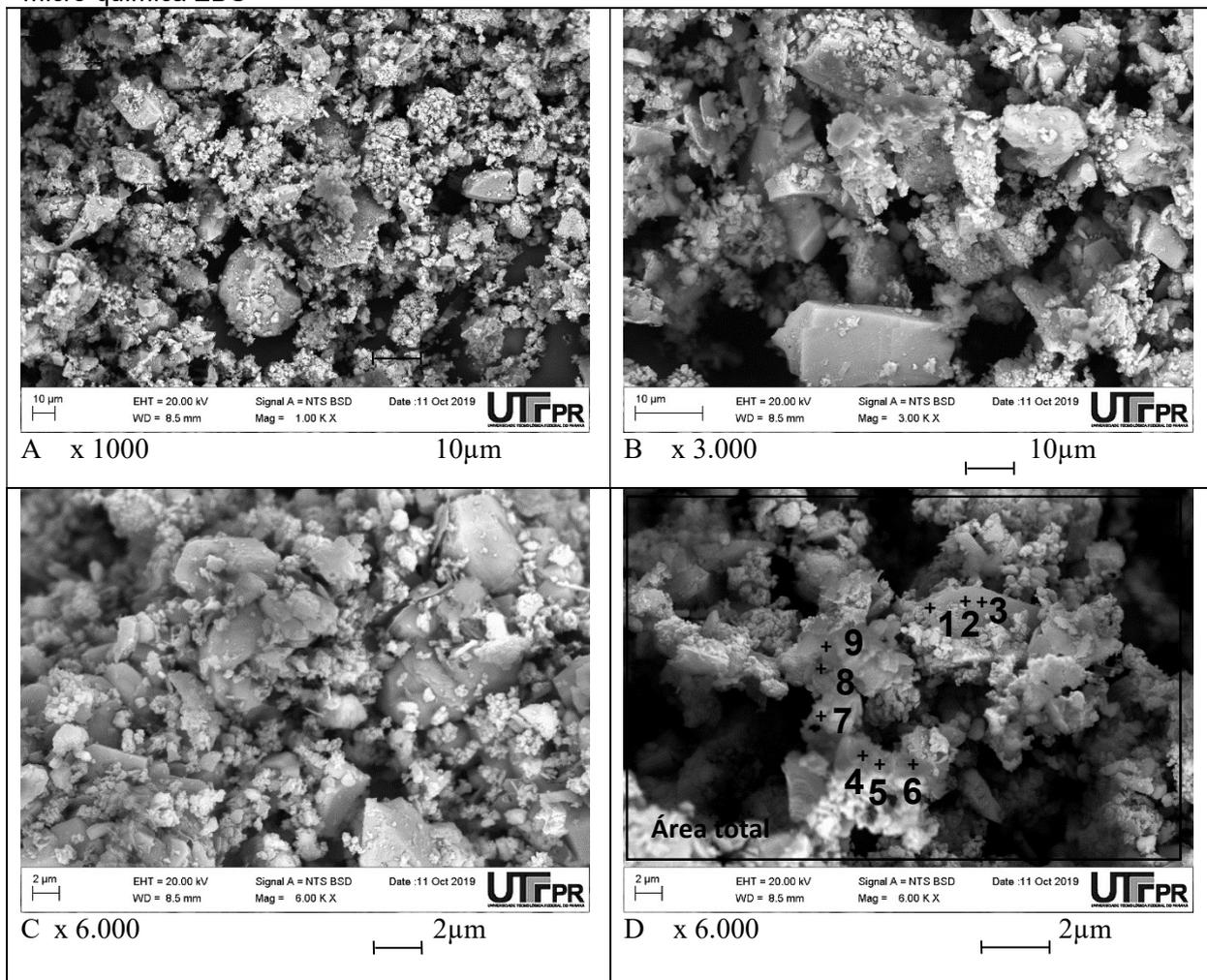
Em geral temos uma síntese de cristais que podem explicar o endurecimento das amostras até 3,92MPa durante os primeiros 28 dias e aos 720 dias de cura a composição 17 alcançou 11,47Mpa. Por isso, uma alternativa de explicação para o endurecimento das amostras em relação é a mudança das estruturas cristalinas e também a relação de síntese de materiais amorfos de sol-gel em espaço poroso das amostras entre núcleos das partículas sólidas, onde a forte ligação destes núcleos e uma transição lenta de gel em estado sólido através de reações de sinerese (envelhecimento) do gel. Este processo foi detalhadamente estudado e descrito por Mymrine (2017), no exemplo do endurecimento de quatro tipos de escórias siderúrgicas ferrosas em meio alcalino na Universidade Estadual de Moscou.

4.3 ESTRUTURA MORFOLÓGICA DA COMPOSIÇÃO 16

As estruturas morfológicas dos resíduos e suas alterações foram verificadas através do MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva).

Na Figura 39, serão apresentados os resultados obtidos para a mistura inicial da composição 16, constituída de 10% de resíduo de minério de ferro (RMF), 40% do resíduo da produção de celulose (RPCEL); 25% de resíduos de concreto (RC), e 25% de resíduos da produção da cal (RPC).

Figura 39 – Estrutura morfológica da mistura inicial da composição 16 através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 31 - Composição microquímica da mistura inicial de número 16

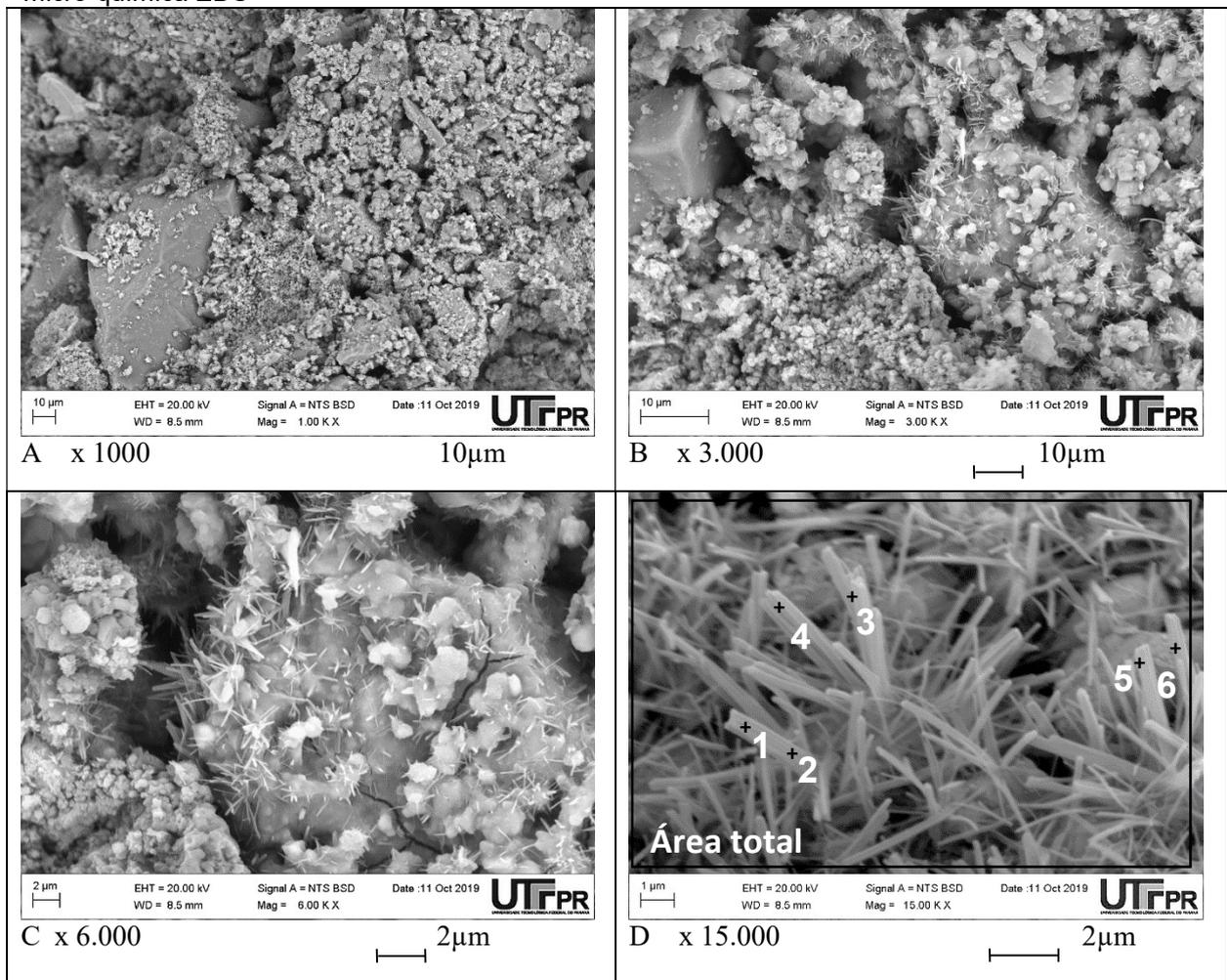
Espectro	Mg	Al	Si	Ca	Fe
Ponto 1	0.90	0.82	7.34	26.50	0.84
Ponto 2	1.55	0.20	0.33	19.73	0.28
Ponto 3	2.86	0.14	0.21	24.08	0,39
Ponto 4	6.44	0.96	3.32	21.67	2.85
Ponto 5	2.73	0.88	1.89	19.37	3.92
Ponto 6	1.89	0.43	1.01	21.44	2.17
Ponto 7	3.29	0.48	12.63	9.53	3.65
Ponto 8	2.88	0.70	21.31	9.76	3.15
Ponto 9	2.09	0.41	11.79	10.56	2.40
Área total	3.90	0.78	2.16	22.50	2.74

Fonte: Autoria própria (2020)

Podemos perceber que na Tabela 31 da mistura inicial de número 16, são identificados diversos elementos químicos, entre eles estão o Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca) e Ferro (Fe) e que conforme a Figura 39-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 9 e o de área total pode-se depreender que os valores obtidos para os pontos são bem distintos inferindo-se que se trata de matérias amorfos com estrutura molecular desorganizada.

A Figura 40 apresenta a estrutura morfológica da composição 16 aos 3 dias de cura pelo método MEV.

Figura 40 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 3 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 32 - Composição microquímica da composição 16 aos 3 dias de cura

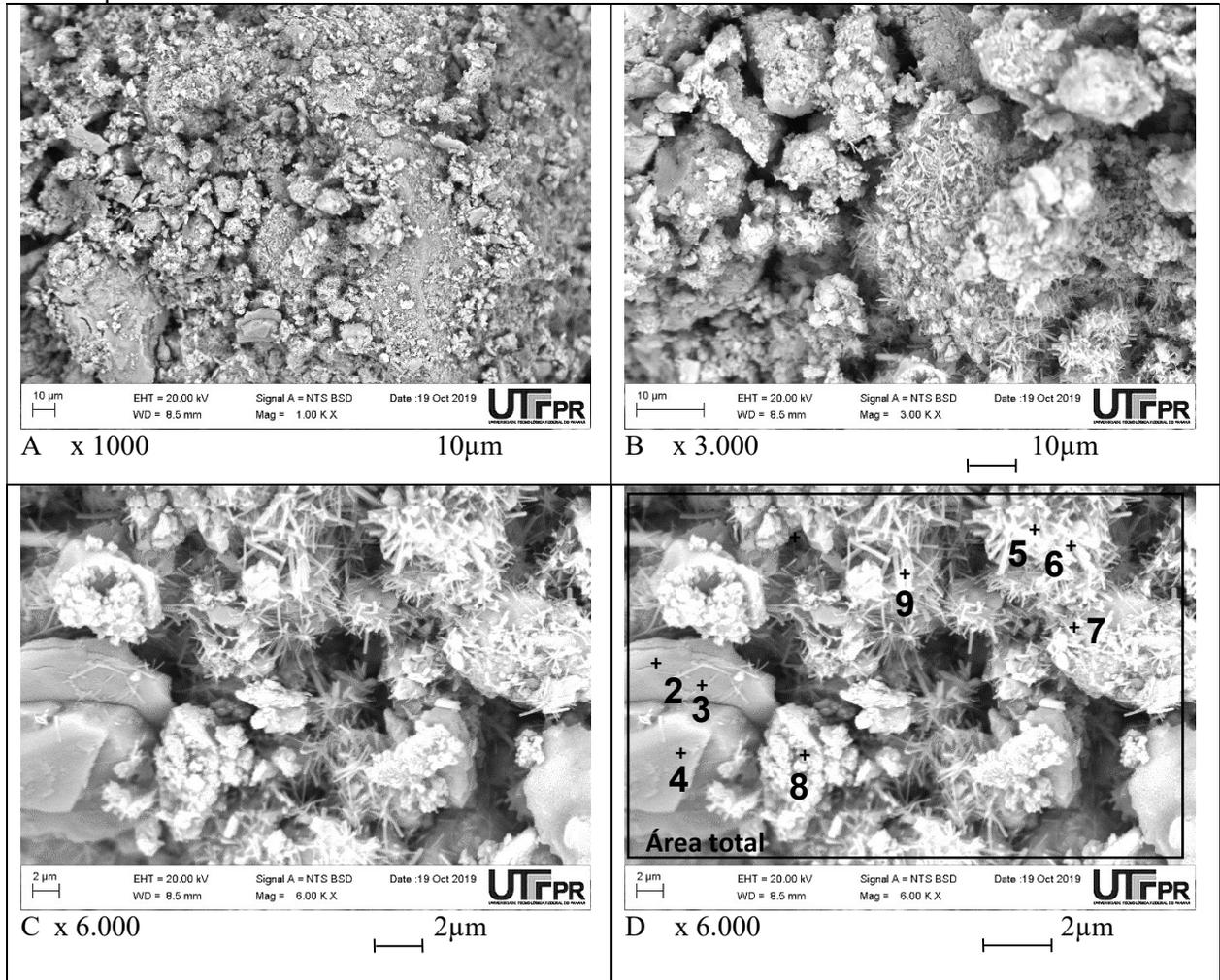
Espectro	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Total
Ponto 1	8.25	10.14	6.94	11.54	50.83	12.29	100.00
Ponto 2	6.01	10.09	5.34	13.57	53.19	11.80	100.00
Ponto 3	5.05	10.81	5.49	12.43	57.35	8.86	100.00
Ponto 4	8.19	9.83	9.12	7.41	54.47	10.99	100.00
Ponto 5	2.44	3.70	2.68	-	85.99	3.67	100.00
Ponto 6	4.82	7.62	7.37	7.78	65.93	6.46	100.00
Área total	6.80	7.69	8.59	7.26	56.47	13.19	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

Podemos perceber que na Tabela 32 da composição 16 aos 3 dias de cura, são identificados praticamente os mesmos elementos químicos, agora com a identificação do Enxofre (S) e os demais elementos, Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca) e Ferro (Fe) e que conforme a Figura 40-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 6 e área total pode-se depreender que trata-se de uma possível pasta (água + aglomerante) hidratada e que a estrutura não é homogênea, enquanto algumas são densas (Figura 40-A, 40-B e 40-C) outras são porosas. Nas regiões porosas, no entanto é possível encontrar as fases hidratadas individuais com maior ampliação, como por exemplo, os cristais maciços de hidróxido de cálcio, agulhas delgadas e longas de etringita e agregação de pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado podem ser vistos em uma ampliação de 15000x na Figura 40-D.

A Figura 41 apresenta a estrutura morfológica da composição 16 aos 7 dias de cura pelo método MEV.

Figura 41 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 7 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Aatoria própria (2020)

Tabela 33 - Composição microquímica da mistura 16 aos 7 dias de cura

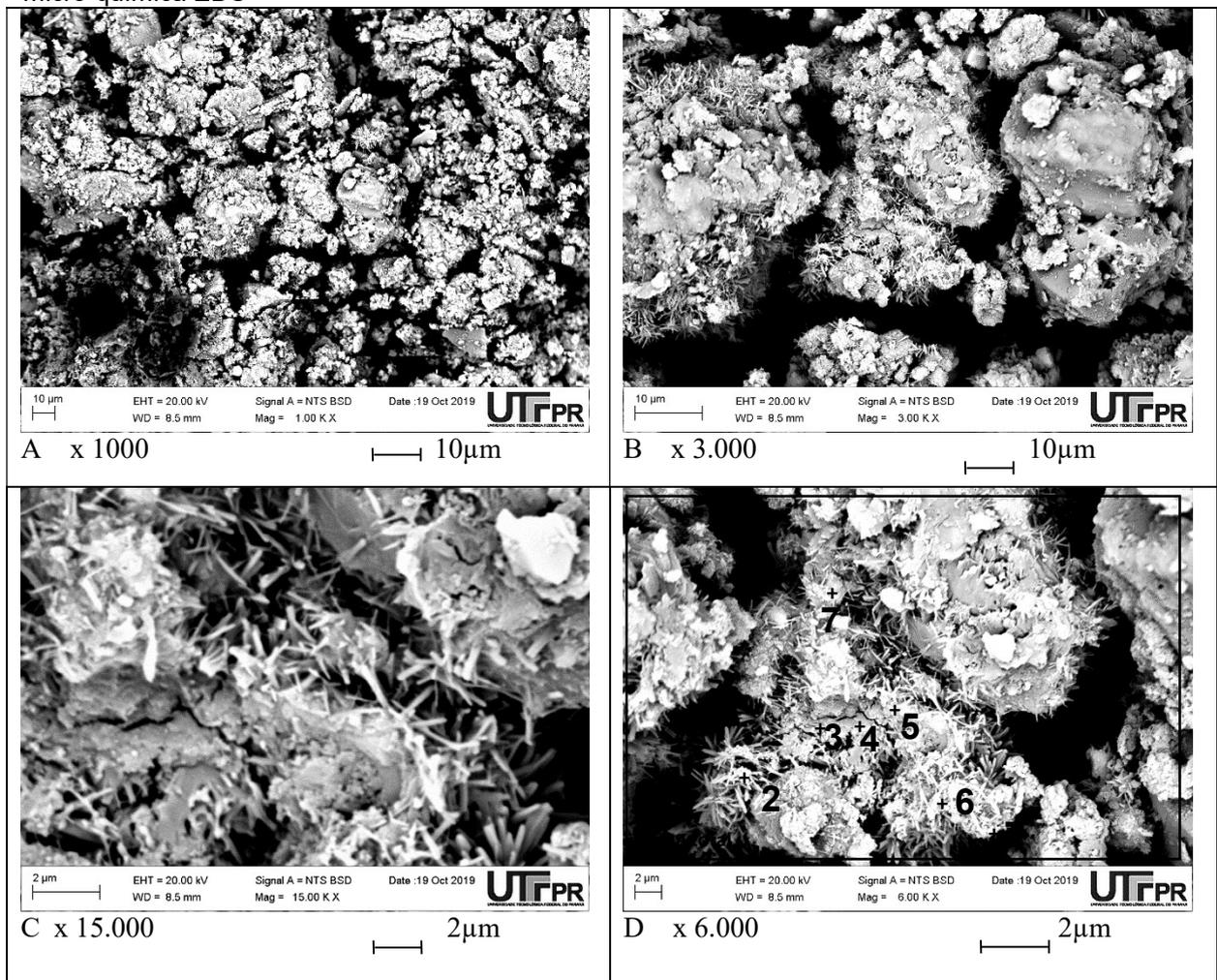
Espectro	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Cu	Total
Área total	7.78	8.13	14.89	1.88	50.92	9.46	2.93	100.00
Ponto 2	2.56	23.41	40.36	12.32	11.17	5.95	3.32	100.00
Ponto 3	1.27	26.99	44.92	16.50	3.13	5.24	0.90	100.00
Ponto 4	3.84	24.15	38.76	14.15	7.41	4.76	6.04	100.00
Ponto 5	10.17	9.74	7.14	-	45.94	5.12	9.53	100.00
Ponto 6	7.73	8.42	10.33	-	52.53	12.44	8.54	100.00
Ponto 7	13.09	6.53	11.56	1.79	51.07	4.35	2.96	100.00
Ponto 8	28.87	3.64	6.68	0.75	54.20	2.86	3.00	100.00
Ponto 9	4.92	5.78	18.58	0.68	53.18	3.75	5.91	100.00

Fonte: Aatoria própria (2020)

Podemos perceber que na Tabela 33 da composição 16 aos 7 dias de cura, são identificados praticamente os mesmos elementos químicos, o Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Potássio (K) Cálcio (Ca), Ferro (Fe) e Cobre (Cu) e que conforme a Figura 41-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 9 e área total pode-se verificar o contínuo processo hidratação através da confirmação da etringita ainda presente na ampliação de 6000x na Figura 41-D.

A Figura 42 apresenta a estrutura morfológica da composição 16 aos 28 dias de cura pelo método MEV.

Figura 42 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 28 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

Nas regiões porosas, no entanto é possível ainda encontrar agulhas de etringita e agregação de pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado podem ser vistos em na ampliação de 15000x das Figuras 42-C e 42-D. Podemos perceber que na Tabela 34 da composição 16 aos 28 dias de cura, são identificados os elementos químicos, Enxofre (S), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio

(Ca) e Ferro (Fe) e que conforme a Figura 42-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 7 e área total pode-se deprender que a estrutura se tornou homogênea e compacta.

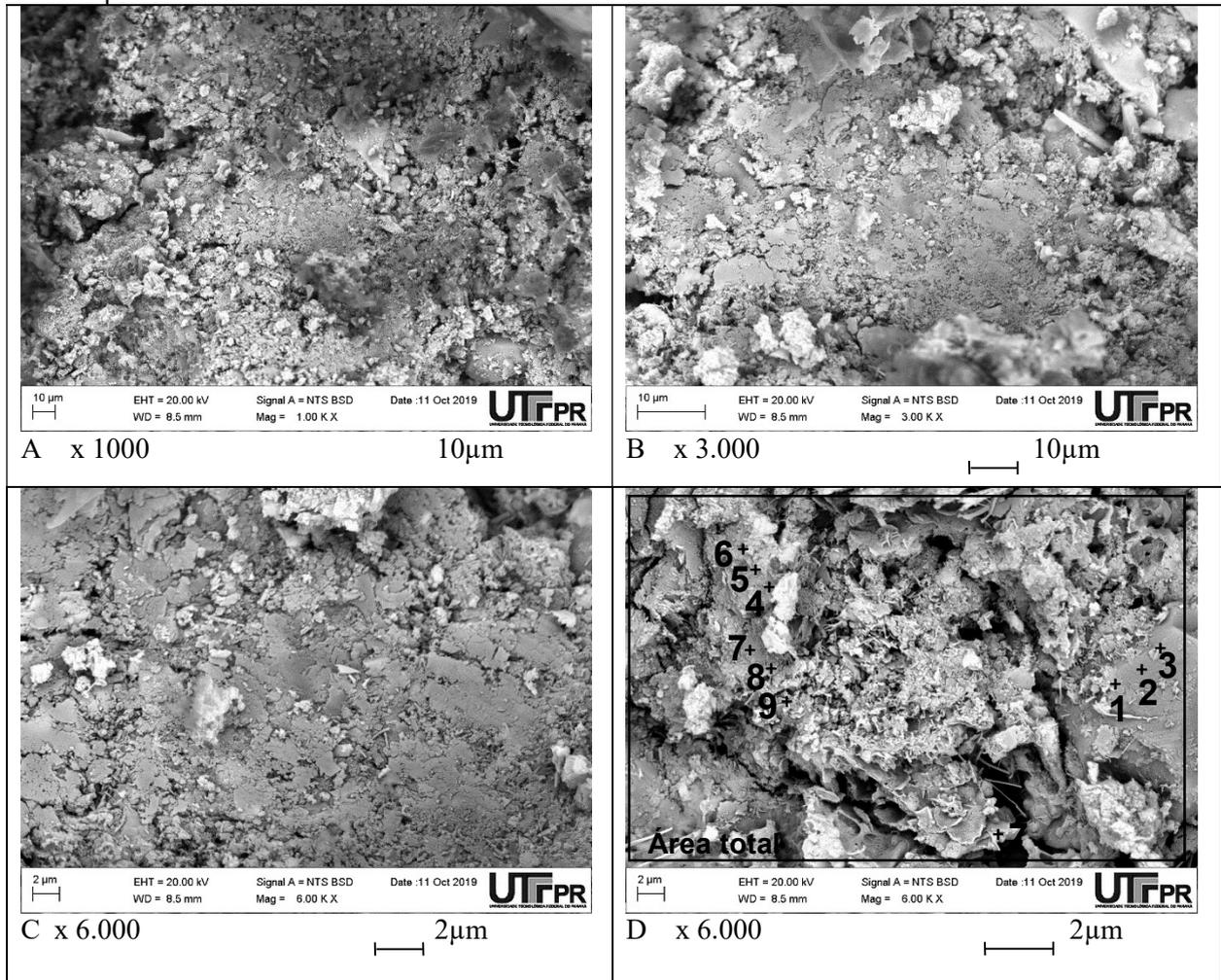
Tabela 34 - Composição microquímica da mistura 16 aos 28 dias de cura

Espectro	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Total
Área total	6.05	3.05	7.97	-	74.42	8.52	100.00
Ponto 2	3.98	5.54	2.68	-	78.13	9.66	100.00
Ponto 3	2.84	6.77	4.77	10.51	70.14	4.97	100.00
Ponto 4	2.17	5.78	5.24	8.71	72.67	5.44	100.00
Ponto 5	2.70	9.04	5.78	-	67.44	14.27	100.00
Ponto 6	3,64	8.90	4.72	7.81	63.19	11.04	100.00
Ponto 7	5.63	2.40	11.40	-	71.94	8.62	100.00

Fonte: Aatoria própria (2020)

A Figura 43 apresenta estrutura morfológica da composição 16 aos 180 dias.

Figura 43 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 180 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Aatoria própria (2020)

Tabela 35 - Composição microquímica da mistura 16 aos 180 dias de cura

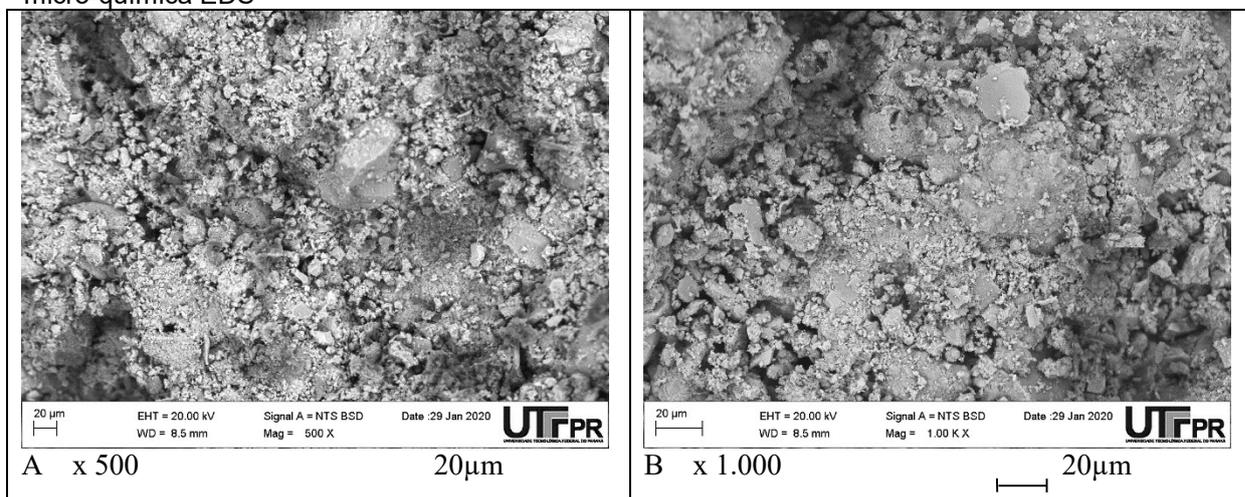
Espectro	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu	Total
Ponto 1	22,19	44.81	0.54	0.39	26.02	3.50	2.15	-	100.00
Ponto 2	22.99	44.98	0.35	-	28.64	1.45	1.03	0.56	100.00
Ponto 3	20.95	46.31	0.40	0.48	27.83	1.91	1.67	0.46	100.00
Ponto 4	11.25	36.40	4.37	1.42	7.13	33.70	4.48	1.24	100.00
Ponto 5	11.43	40.77	4.22	1.26	7.48	32.28	2.57	-	100.00
Ponto 6	15.42	41.36	3.80	1.26	7.03	28.11	3.02	-	100.00
Ponto 7	-	44.59	4.69	1.97	11.63	30.26	5.58	-	100.00
Ponto 8	14.72	40.00	3.25	1.47	7.82	28.15	4.60	-	100.00
Ponto 9	-	43.17	2.71	1.34	7.73	39.55	4.28	1.22	100.00
Ponto 10	21.56	43.78	0.68	1.02	20.60	5.43	6.41	0.55	100.00
Área total	20.32	39.73	2.19	0.93	12.99	15.04	7.87	0.92	100.00

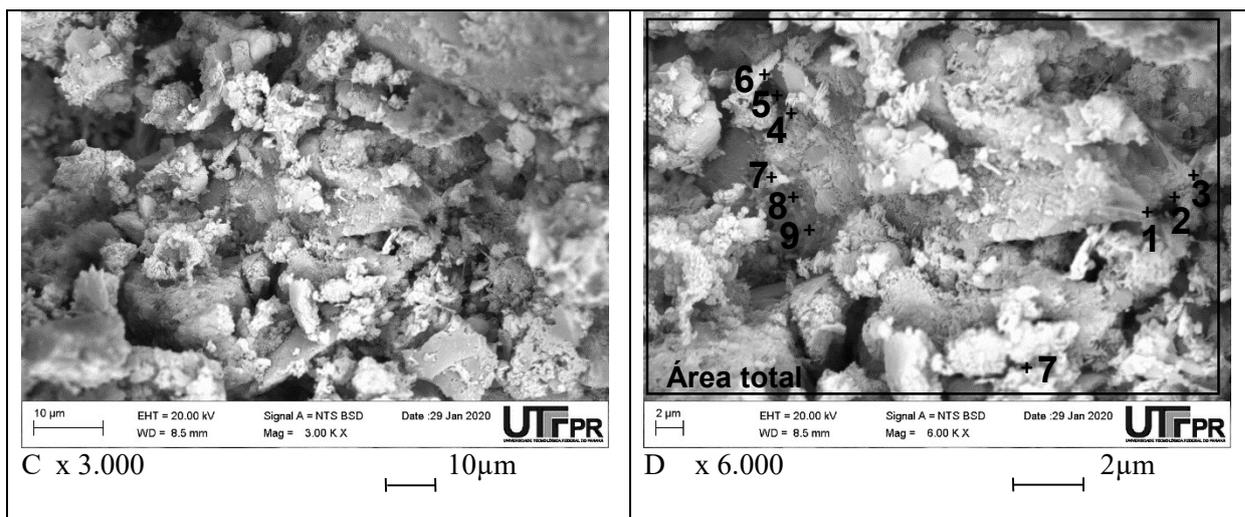
Fonte: Autoria própria (2020)

Podemos perceber que na Tabela 35 da composição 16 aos 180 dias de cura, são identificados os elementos químicos, Carbono (C), Oxigênio (O) Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca), Ferro (Fe) e Cobre (Cu) que conforme a Figura 43-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 10 e área total pode-se analisar que trata-se de uma estrutura mais sólida, compacta, homogênea e as regiões menores podendo ser vistos nas Figuras 43-A, 43-B, 43-C e 43-D.

A Figura 44 apresenta a estrutura morfológica da composição 16 aos 720 dias de cura pelo método MEV.

Figura 44 – Estrutura morfológica da composição 16 aos 720 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS





Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 44-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 10 e área total pode-se analisar que trata-se de uma estrutura mais sólida, compacta, homogênea e as regiões menores podendo ser vistos nas Figuras 44-A, 44-B, 44-C e 44-D.

Tabela 36 - Composição microquímica da mistura 16 aos 720 dias de cura

Espectro	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu	Total
Ponto 1	22,19	44.81	0.54	0.39	26.02	3.50	2.15	-	100.00
Ponto 2	22.99	44.98	0.35	-	28.64	1.45	1.03	0.56	100.00
Ponto 3	20.95	46.31	0.40	0.48	27.83	1.91	1.67	0.46	100.00
Ponto 4	11.25	36.40	4.37	1.42	7.13	33.70	4.48	1.24	100.00
Ponto 5	11.43	40.77	4.22	1.26	7.48	32.28	2.57	-	100.00
Ponto 6	15.42	41.36	3.80	1.26	7.03	28.11	3.02	-	100.00
Ponto 7	-	44.59	4.69	1.97	11.63	30.26	5.58	-	100.00
Ponto 8	14.72	40.00	3.25	1.47	7.82	28.15	4.60	-	100.00
Ponto 9	-	43.17	2.71	1.34	7.73	39.55	4.28	1.22	100.00
Ponto 10	21.56	43.78	0.68	1.02	20.60	5.43	6.41	0.55	100.00
Área total	20.32	39.73	2.19	0.93	12.99	15.04	7.87	0.92	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

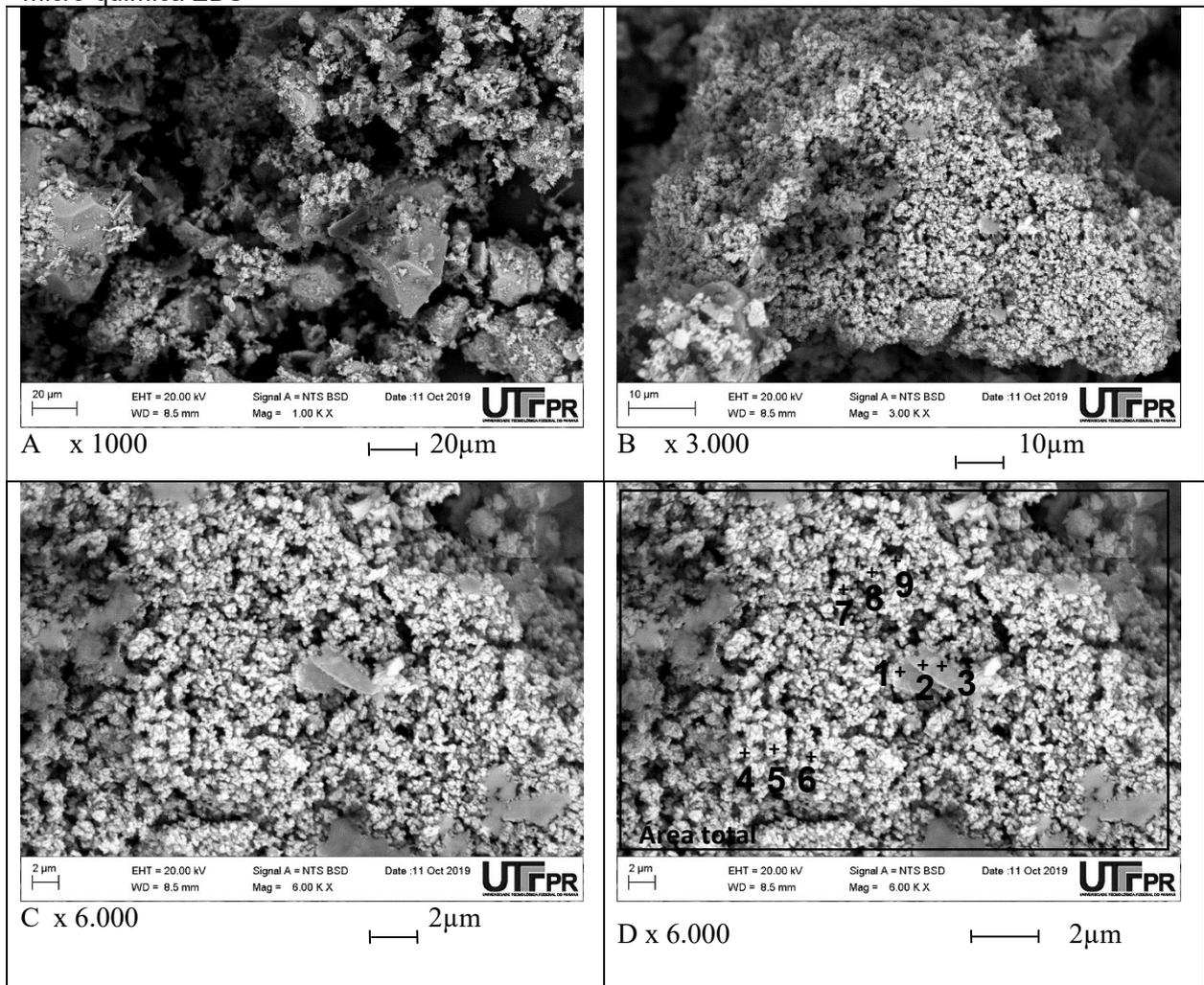
Podemos perceber que na Tabela 36 da composição 16 aos 720 dias de cura, são identificados os elementos químicos, Carbono (C), Oxigênio (O) Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca), Ferro (Fe) e Cobre (Cu).

4.4 ESTRUTURA MORFOLÓGICA DA COMPOSIÇÃO 17

As estruturas morfológicas dos resíduos e suas alterações foram verificadas através do MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva). Na Figura 45, serão apresentados os resultados obtidos para a mistura inicial da composição 17, constituída de 40% de resíduos de minério de ferro (RMF), 10% de resíduo da produção de celulose (RPEC), 25% do resíduo de concreto (RC) e 25% de resíduos da produção da cal (RPC).

A Figura 45 apresenta a estrutura morfológica da mistura inicial da composição 17 pelo método MEV.

Figura 45 – Estrutura morfológica da mistura inicial da composição 17 através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

A conforme a Figura 45-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 9 e área total pode-se depreender que há regiões porosas e a composição ainda não está homogênea como podemos observar nas Figuras 37-A, B, C e D.

Tabela 37 - Composição microquímica da mistura inicial de número 17

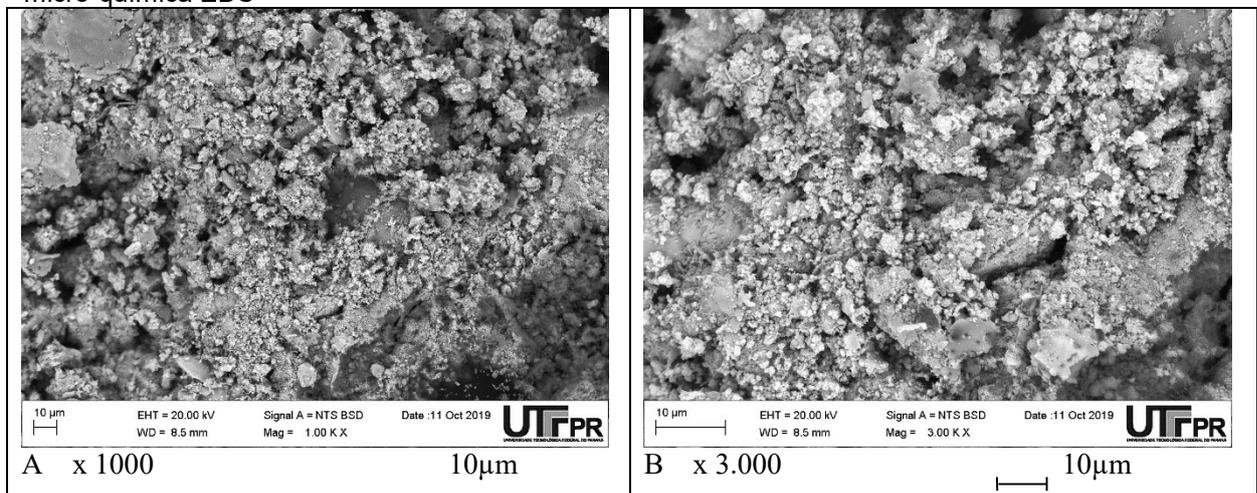
Espectro	C	O	Mg	Al	Ca	Fe	Cu	Total
Ponto 1	-	61.27	6.92	2.42	7.58	17.06	1.89	100.00
Ponto 2	-	62.98	5.34	3.23	5.39	18.23	1.45	100.00
Ponto 3	-	64.12	5.81	3.10	6.42	15.33	1.61	100.00
Ponto 4	-	56.16	15.38	0.62	22.24	0.96	4.64	100.00
Ponto 5	12.05	46.70	12.39	0.46	20.79	0.92	4.92	100.00
Ponto 6	13.68	46.14	14.69	0.32	19.64	0.74	4.30	100.00
Ponto 7	12.08	39.54	13.43	0.47	26.65	1.08	6.74	100.00
Ponto 8	11.10	44.59	18.82	0.37	19.85	0.71	4.56	100.00
Ponto 9	8.15	40.05	15.08	-	29.65	1.56	5.53	100.00
Área total	10.14	50.85	13.21	0.32	21.29	0.89	2.70	100.00

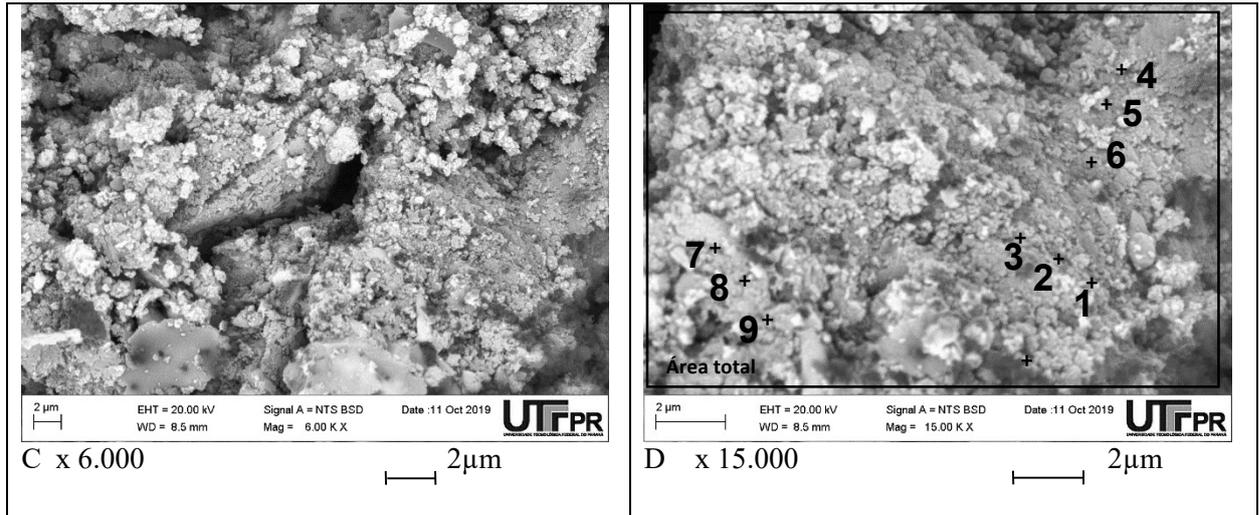
Fonte: Autoria própria (2020)

Podemos perceber que na Tabela 37 da composição 17 da mistura inicial são identificados os elementos químicos, Carbono (C) Oxigênio (O), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Ferro (Fe) e Cobre (Cu).

A Figura 46 apresenta a estrutura morfológica da composição 17 aos 3 dias de cura pelo método MEV.

Figura 46 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 3 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS





Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 46-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 9 e área total pode-se depreender que se trata de uma estrutura ainda não homogênea, enquanto algumas são densas (Figura 46- A, 46-B e 46-C) outras são porosas.

Tabela 38 - Composição microquímica da mistura 17 aos 3 dias de cura

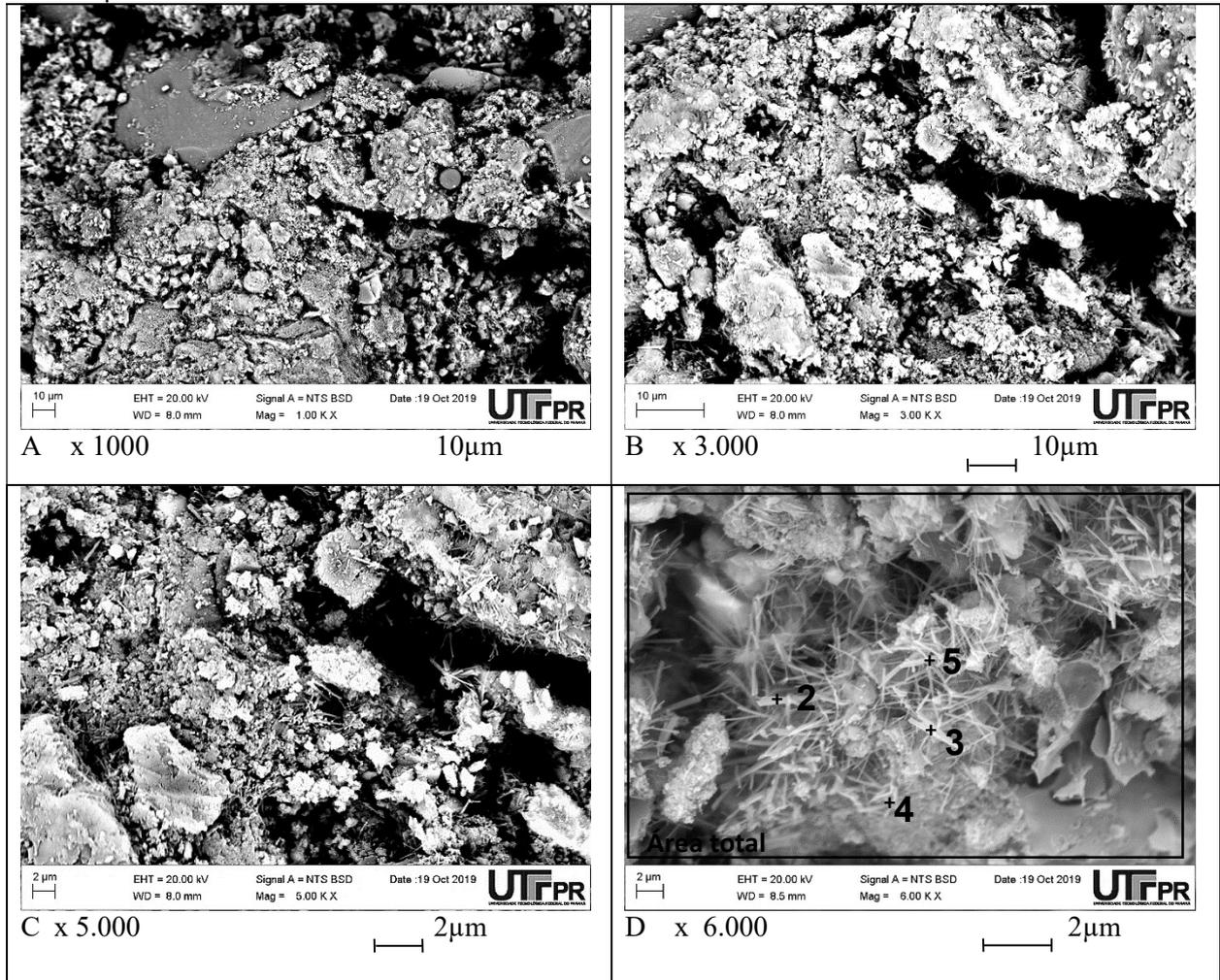
Espectro	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu	Total
Ponto 1	15.74	54.34	11.85	0.21	1.02	15.88	0.57	0.37	100.00
Ponto 2	15.48	55.60	11.99	0.24	0.95	15.01	0.40	0.31	100.00
Ponto 3	15.33	54.60	13.09	0.21	0.91	15.16	0.38	0.32	100.00
Ponto 4	13.11	52.53	12.18	-	0.74	21.17	0.26	-	100.00
Ponto 5	12.64	53.80	12.16	-	0.78	20.63	-	-	100.00
Ponto 6	14.18	53.75	12.72	-	0.73	18.00	0.26	0.36	100.00
Ponto 7	15.65	54.89	4.66	0.87	1.24	11.67	10.57	0.45	100.00
Ponto 8	15.67	55.05	4.62	0.88	1.19	11.82	10.77	-	100.00
Ponto 9	14.46	55.77	4.69	0.96	1.22	13.22	9.71	0.38	100.00
Área total	14.64	54.58	9.69	0.55	1.04	16.84	2.28	0.38	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

Podemos perceber que na Tabela 38 da composição 17 aos 3 dias de cura, são identificados os elementos químicos, Carbono (C), Oxigênio (O) Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca), Ferro (Fe) e Cobre (Cu).

A Figura 47 apresenta a estrutura morfológica da composição 17 aos 7 dias de cura pelo método MEV.

Figura 47 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 7 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 39 - Composição microquímica da mistura 17 aos 7 dias de cura

Espectro	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Total
Área total	10.30	3.65	16.18	52.03	17.84	100.00
Ponto 2	6.19	5.15	8.95	60.15	15.05	100.00
Ponto 3	11.14	7.41	11.37	61.01	9.05	100.00
Ponto 4	6.22	2.87	17.1	69.58	4.22	100.00
Ponto 5	7.94	12.09	12.38	56.05	7.81	100.00
Ponto 6	9.54	2.54	8.47	62.48	16.47	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

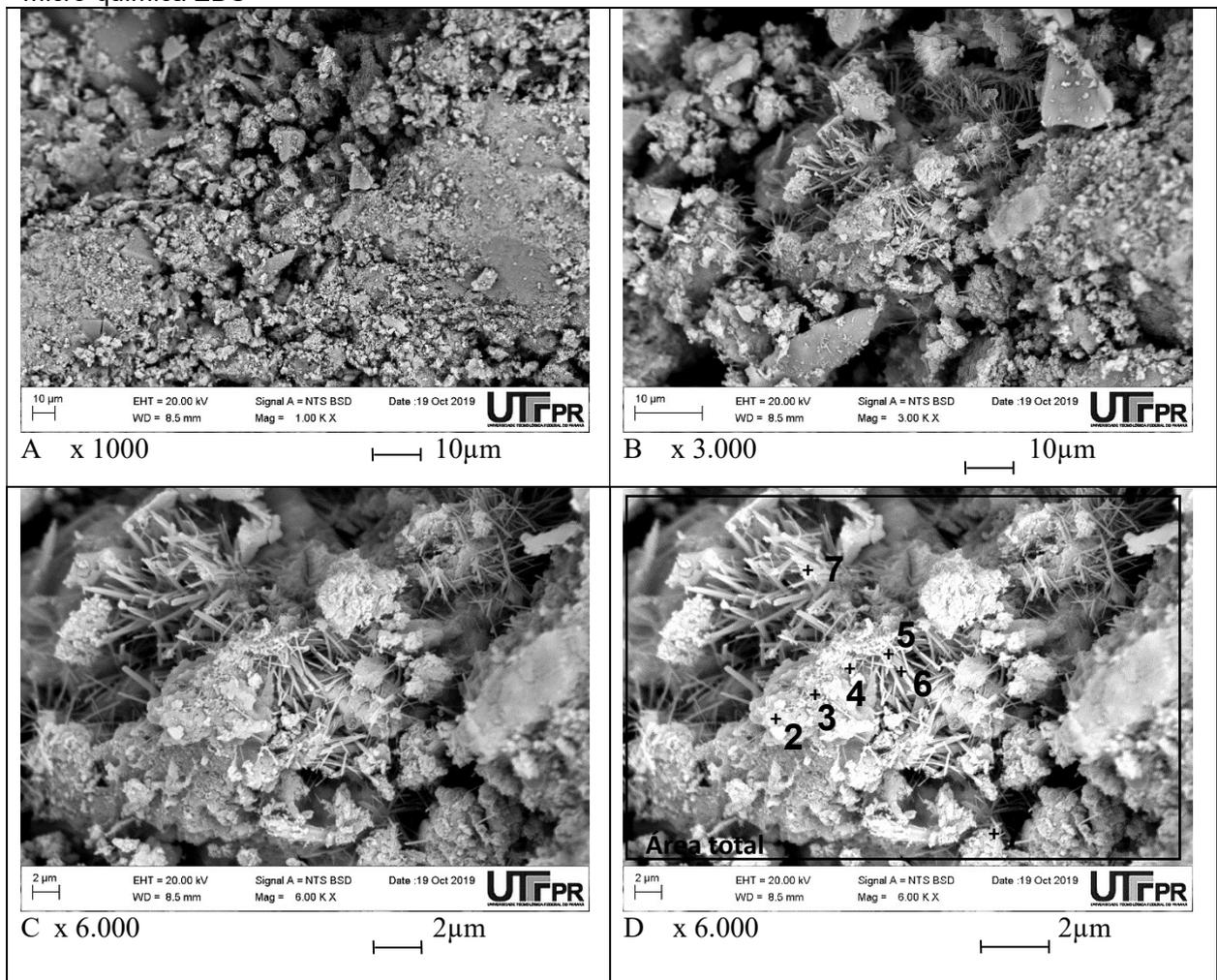
Podemos perceber que na Tabela 39 da composição 17 aos 7 dias de cura, são identificados praticamente os elementos químicos, Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca) e Ferro (Fe) e que conforme a Figura 47-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 6 e área total pode-se depreender que

aparece nesta composição uma possível pasta (água + aglomerante) hidratada e que a estrutura está se tornando cada vez mais homogênea.

É possível encontrar as fases hidratadas individuais com maior ampliação, como por exemplo os cristais maciços de hidróxido de cálcio, agulhas delgadas e longas de etringita e agregação de pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado podem ser vistos em uma ampliação de 6000x na Figura 47-D.

A Figura 48 apresenta a estrutura morfológica da composição 17 aos 28 dias de cura pelo método MEV.

Figura 48 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 28 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme a Figura 48-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 7 é possível encontrar as fases hidratadas individuais com maior ampliação, como por exemplo a etringita e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado vistos em uma ampliação de 3000x e 6000x nas Figura 48-C e D.

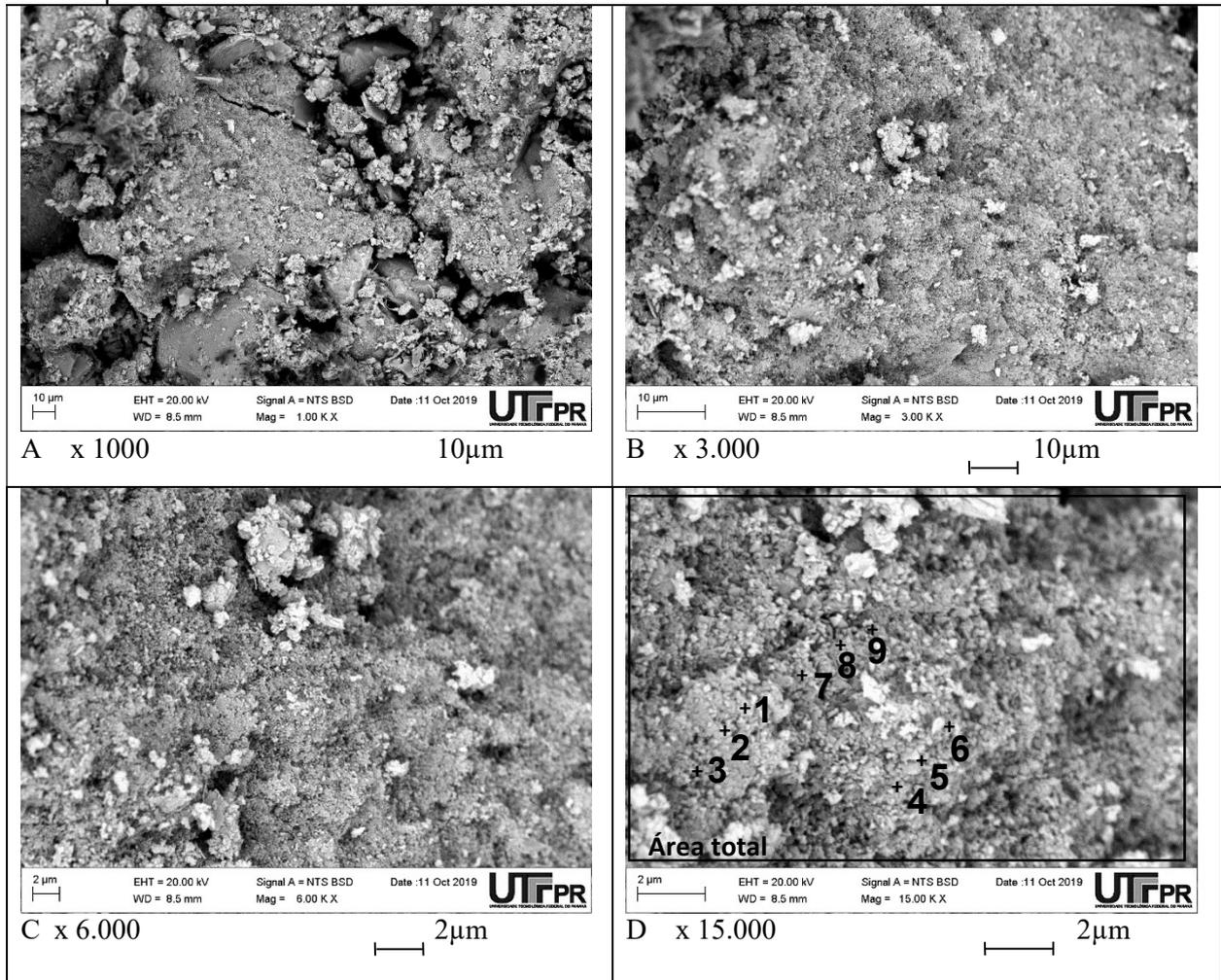
Tabela 40 - Composição microquímica da mistura 17 aos 28 dias de cura

Espectro	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu	Total
Área total	14.86	4.34	7.52	61.82	10.02	1.44	100.00
Ponto 2	28.93	2.47	10.17	53.20	2.82	2.40	100.00
Ponto 3	27.72	1.67	9.34	57.03	1.99	2.25	100.00
Ponto 4	23.28	2.65	8.00	62.25	2.50	1.33	100.00
Ponto 5	8.49	7.78	5.29	61.63	6.83	2.42	100.00
Ponto 6	5.70	5.87	4.02	71.30	5.29	1.28	100.00
Ponto 7	7.99	9.61	6.56	54.63	10.74	2.19	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

Na Tabela 40 da composição 17 aos 28 dias de cura, são identificados os elementos químicos, Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca), Ferro (Fe) e Cobre (Cu). A Figura 49 apresenta a estrutura morfológica da composição 17 aos 180 dias de cura pelo método MEV.

Figura 49 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 180 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

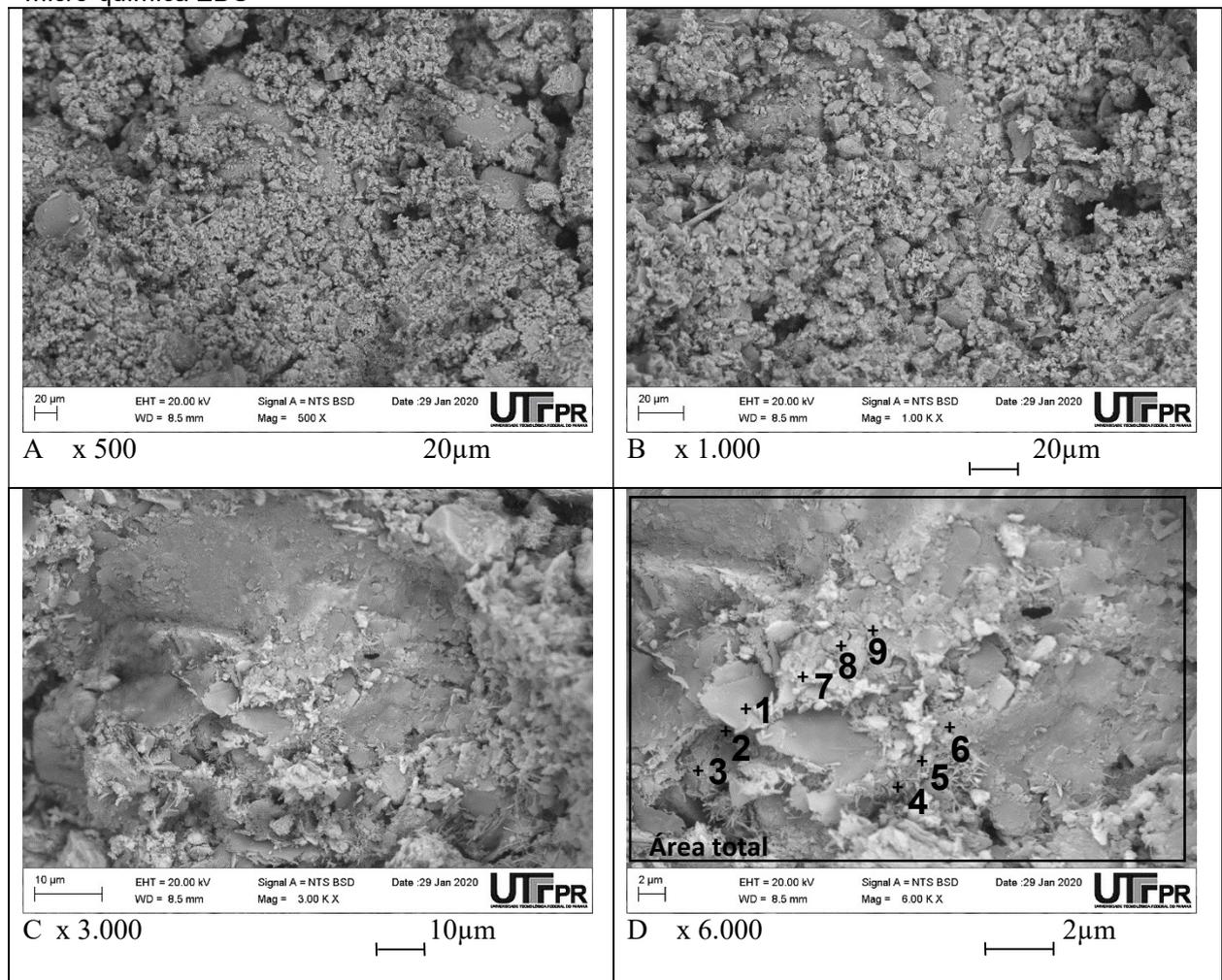
Tabela 41 - Composição microquímica da mistura 17 aos 180 dias de cura

Espectro	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu	Total
Ponto 1	17.44	53.18	10.77	0.26	0.64	16.38	0.58	0.77	100.00
Ponto 2	17.90	52.52	10.40	-	0.72	17.00	0.51	0.96	100.00
Ponto 3	16.78	51.93	11.72	-	0.67	17.90	0.42	0.60	100.00
Ponto 4	16.60	38.07	10.43	0.63	1.17	29.66	1.04	2.41	100.00
Ponto 5	17.69	38.94	10.72	0.42	1.31	27.62	1.31	2.00	100.00
Ponto 6	20.70	43.15	9.89	0.59	1.28	21.49	1.21	1.69	100.00
Ponto 7	10.65	48.82	13.61	-	0.83	26.09	-	-	100.00
Ponto 8	16.44	52.28	10.57	-	0.73	19.57	0.43	-	100.00
Ponto 9	16.93	51.37	10.55	-	0.68	19.95	0.53	-	100.00
Área total	15.80	51.28	11.09	0.30	0.75	19.33	0.69	0.76	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 50 apresenta estrutura morfológica da composição 17 aos 720 dias.

Figura 50 – Estrutura morfológica da composição 17 aos 720 dias de cura através do MEV e análise micro-química EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 42 - Composição microquímica da mistura 17 aos 720 dias de cura

Espectro	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu	Total
Ponto 1	17.44	53.18	10.77	0.26	0.64	16.38	0.58	0.77	100.00
Ponto 2	17.90	52.52	10.40	-	0.72	17.00	0.51	0.96	100.00
Ponto 3	16.78	51.93	11.72	-	0.67	17.90	0.42	0.60	100.00
Ponto 4	16.60	38.07	10.43	0.63	1.17	29.66	1.04	2.41	100.00
Ponto 5	17.69	38.94	10.72	0.42	1.31	27.62	1.31	2.00	100.00
Ponto 6	20.70	43.15	9.89	0.59	1.28	21.49	1.21	1.69	100.00
Ponto 7	10.65	48.82	13.61	-	0.83	26.09	-	-	100.00
Ponto 8	16.44	52.28	10.57	-	0.73	19.57	0.43	-	100.00
Ponto 9	16.93	51.37	10.55	-	0.68	19.95	0.53	-	100.00
Área total	15.80	51.28	11.09	0.30	0.75	19.33	0.69	0.76	100.00

Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 50 apresenta a estrutura morfológica da composição 17 aos 720 dias pelo método MEV, e na Tabela 42 são identificados os elementos químicos, Carbono (C), Oxigênio (O) Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca) Ferro (Fe) e Cobre (Cu) e que conforme a Figura 50-D com seus respectivos pontos de EDS numerados de 1 a 9 e área total pode-se depreender que a estrutura está sólida, resistente e com um número reduzido de poros, comprovando uma estrutura uniforme.

4.5 MOLDAGEM DE DOIS MATERIAS DE CONSTRUÇÃO, UTILIZANDO O TRAÇO DA COMPOSIÇÃO 17

Tendo em vista os resultados obtidos na composição 17, optou-se por moldar um tijolo e um paver confeccionados com a proporção de: 40% de RMF, 10% de RPCEL, 25% de RC e 25% de RPC.

As medidas para do tijolo foram de 90mm de largura, 57mm de altura e 190mm de comprimento. Foi utilizado uma massa de, aproximadamente, 1250g de resíduos. Na Figura 51 é possível observar o tijolo moldado com o auxílio de uma prensa manual a uma tensão de 10MPa:

Figura 51 – Tijolo confeccionado utilizando a proporção da composição 17



Fonte: Autoria própria (2020)

Também foi possível moldar uma paver, conhecido por modelo “raquete” a massa necessária foi de 3600g. Na Figura 52 é possível observar após a desmoldagem.

Figura 52 – Paver confeccionado utilizando a proporção da composição 17



Fonte: Autoria própria (2020)

Inadvertidamente os resíduos industriais causam danos ao homem e a natureza, seja por descarte impróprio ou por acidente ambiental, no entanto se estudados e proporcionados corretamente podem ainda serem transformados em novos materiais, ainda que haja um custo para isto a possibilidade existe. O que se pretendeu demonstrar é que com o reaproveitamento destes resíduos, pode haver uma significativa diminuição da parcela de rejeitos destinada ao ecossistema, diminuindo, drasticamente os possíveis danos causados os seres vivos.

5 CONCLUSÕES

Uma das principais vantagens da utilização em conjunto do resíduo de minério de ferro (RMF), resíduo de concreto (RC), resíduos da produção de celulose (RPCEL) e resíduo da produção da cal (RPC) é que foi possível neutralizar a alcalinidade, obtendo materiais não perigosos e ambientalmente corretos, tornando o reaproveitamento uma excelente ideia para que os materiais de construção possam ser de fato executados, beneficiando a sociedade sobre tudo em construções populares que tanto se necessita neste país.

Está experimentalmente provado que os compósitos de resíduo de minério de ferro (RMF), resíduo de concreto (RC), resíduos da produção de celulose (RPCEL) e resíduo da produção da cal (RPC) podem ser utilizados como matérias primas de materiais de construção civil com características e propriedades superiores às demandas das Normas Brasileiras.

Os valores de resistência uniaxial aos 3 dias de cura variaram entre 1,20 a 4,94MPa, aos 7 dias de cura variaram entre 1,56 a 5,75MPa, aos 14 dias de cura variaram entre 1,67 a 6,58MPa, aos 28 dias de cura variam entre 1,56 a 6,92MPa, aos 60 dias de cura variaram 1,54 a 7,61MPa e aos 90 dias de cura variam entre 2,15 a 7,72MPa e aos 720 dias cura variaram 5,17 a 11,47MPa. Desta forma, ficou provado que estes resíduos são indicados para a fabricação de tijolos maciços, conforme NBR 7170 (ABNT, 1983) e também para fabricação de blocos de concreto para vedação, conforme NBR 6163 (ABNT, 2006). Destaca-se a composição de número 17, que obteve os melhores resultados de resistência à compressão uniaxial.

O coeficiente de resistência à água na qual se tolera a perda de resistência à compressão uniaxial em até 35%, quando os corpos de prova são ensaiados saturados, as composições 1, 4, 5, 6, 12, 15, 16, 17, 18 e 19 obtiveram êxito em seu comportamento aos 28 dias de idade. Para o coeficiente de resistência à água aos 90 dias de idades as composições 1,12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 obtiveram êxito.

Para o ensaio de absorção de água, quando os corpos de prova ficam imersos por 24 horas, houve uma diminuição da absorção na maioria das composições, quando se compara os ensaios de 28 e 90 dias de cura entre elas estão 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 isso se ocorre pelo fato de

que, possivelmente, houve um crescimento da densidade através da formação de novas substâncias diminuindo a porosidade.

Quanto ao ensaio de expansão ou retração geralmente este fenômeno é decorrente da evaporação parcial da água de amassamento da mistura. Contudo, há mudanças contínuas durante a cura dos CPs e eventuais deformações podem ocorrer, porém, as composições 16 e 17 apresentaram baixa amplitude de variação volumétrica.

Os ensaios de resistência à água, absorção e expansão ou retração, também podem ser correlacionados com a situação destes compósitos virem a fazer parte de um bloco ou tijolo em uma alvenaria residencial sofrendo o contato direto de intempéries.

A formação de estruturas cristalinas observou-se através da Difração de Raio-X (DRX), onde a fase amorfa pode responder pelo elevado crescimento da propriedade mecânica do material desenvolvido, e as estruturas cristalinas responsável pela síntese de minerais aumentaria significativamente as propriedades mecânicas, os quais foram realizados para os resíduos, para as misturas seca e para os corpos de prova com as idades entre 3, 180 e 720 dias.

Por meio de estudos do método MEV com EDS foi determinado a interação físico-química dos componentes das misturas iniciais e os processos de formação das estruturas morfológicas de novos materiais com o aumento dos valores das propriedades mecânicas durante os períodos de cura, que ocorreram devido à dissolução em ambiente alcalino de superfícies das partículas sólidas de componentes com síntese de novas formações amorfas, acarretando provavelmente no ganho de resistência dos compósitos.

A utilização desses quatro resíduos industriais em substituição às matérias-primas naturais é economicamente viável, devido ao baixo custo dos resíduos em comparação com as matérias-primas tradicionais.

O maior beneficiado com a aplicação dos resultados obtidos neste trabalho é o meio ambiente, considerando a real possibilidade de utilização de resíduos industriais como matéria-prima, aplicando uma destinação final adequada, prevenindo uma possível contaminação do meio ambiente e, principalmente, minimizando a extração de recursos naturais devido à utilização destes resíduos.

Nesta tese os materiais trabalhados são rejeitos industriais, não são materiais com valor agregado como, por exemplo, o cimento ou agregados naturais extraídos

diretamente das jazidas, por isso não é possível fazer uma comparação de destes rejeitos com materiais e agregados naturais.

Os resíduos aqui estudados com suas respectivas composições não são para fins estruturais e sim para, primeiramente, resolver um problema ambiental das indústrias e da sociedade, podendo ser utilizados em alvenaria de vedação, artefatos de concreto, blocos de concreto e em mobiliário urbano.

REFERÊNCIAS

- ABPC. **Associação Brasileira dos Produtores de Cal**. Disponibilizado em: <<http://www.abpc.org.br/frame.htm>> Acessado em setembro de 2018.
- ACIMAC, **World production and consumption of ceramic tiles**, 2017. http://www.mec-studies.com/filealbum/655_0.pdf.
- ADAMS, T.N. **Kraft Recovery Boilers**, Tappi press, AF&PA, 2007.
- ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J; FONTANA, E. C.; COSTA, F. S.; RECH, T. D. **Propriedades físicas e químicas de solos incubados com resíduo alcalino da indústria de celulose**. Viçosa: Revista Árvore, V. 26, N° 4, p. 1065-1073, 2012. Disponível em: <<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=14483773>>. Acesso em novembro de 2018.
- AGI, 2014. **Aggregate and the Environment**. American Geological Institute. Disponibilizado em: <www.agiweb.org/environment/publications/aggregate.pdf> Acessado em agosto de 2018.
- AL-SAYED, M. H.; MADANY, I. M.; AL-KHAJA; W. A., DARWISH, A. A. **Properties of asphaltic paving mixes containing hydrated lime waste**. Waste Management & Research, v. 10, p. 183-194, 2015.
- ALANYALI H, C, ÖLI M, YILMAZ M, KARAGÖS S, **Application of magnetic separation to steelmaking slags forreclamation**. Waste Manage 2012;26:1133–9.
- ARABANI M.; AZARHOOSH A. R. **The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, v.35, p. 1-7, 2012.
- ARAUJO A.C; AMARANTE S.C, SOUZA C.C, SILVA R.R.R. **Oremineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores**. Min Proc ExtMetall (Trans Inst Mineral Metall C) 2003;112:C44–64.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003
- _____. **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 6136** - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 6453** - Cal virgem para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 7170** - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 9778 2:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15270 -** Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 16097:** Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ANICER -C ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE CERÂMICA – **Relatório Anul** - Disponível em: https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2018/12/Relatorio_2018.pdf

BEHERA M.; BHATTACHARYYA S.K.; MINOCHA A.K.; R. MAITI D.S. **Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector:** A review. *Construction and Building Materials*, v.68, p. 501-516, 2014.

BENNERT T, PAPP WJ, MAHER A, GUCUNSKI N. **Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base.** *J Transport Res Board* 2000.

BERNDT M. **Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate.** *Construction and Building Materials*, v.23, p. 2606-2613, 2009.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. C. **Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais.** Colombo: Boletim de Pesquisa Florestal, JUL/DEZ, 1998.

BELLENFANT G., GUEZENNEC A.G., BODÉANAN F., D'HUGUES P. and Cassard D. 2013. **Re-processing of mining waste: Combining environmental management and metal recovery?** *Mine Closure* 2013, Sep2013, Cornwall, United Kingdom. pp. 571–582.

BECKHOFF, B., KANNGIEßER, B., LANGHOFF, N., WEDELL, R., WOLFF, H. **Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis:** Springer. 2006, ISBN 3-540-28603-9.

BIANCHINI G.; MARROCCHINO E.; TASSINARI R.; VACCARO C., **Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical–mineralogical appraisal,** *Waste Manage.* 25 (2005) 149–159, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.09.005>.

BOLTAKOVA N. V.; FASEEVA G. R.; KABIROV R. R.; NAFIKOV R. M.; ZAKHAROV Y. A., **Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review**

of Russian experience for the years 2000–2015, Waste Manage. 60 (2017) 230–246, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.008>.

BRACELPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Florestas plantadas: oportunidades e desafios da indústria brasileira de celulose e papel no caminho da sustentabilidade**. Brasília. 2013.

BRACELPA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Dados do Setor de celulose e papel**. Brasília. 2016.

BRASIL. Lei Federal n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: 04/10/2013.

BRAND A. S.; ROESLER J. R.; SALAS A. **Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete**. Construction and Building Materials, v.79, p. 83-89, 2015.

BHATTY J.I.; GAJDA J. **Alternative materials**. World Cem 2014; 35(12):41–8.

CABRAL, F., RIBEIRO, H.M., HILÁRIO, L., MACHADO, L., VASCONCELOS, E. **Use of pulp mill inorganic wastes as alternative liming materials**. Elsevier: Bioresource Technology, vol. 99 (17), pages 8294-8298, 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408001995>. Acessado em: 29/02/2017.

CABRAL JR. M.; BOSCHI A.O.; MOTTA J. F.; TANNO L. C.; SINTONI A.; COELHO J. M.; Caridade M. S., **Panorama e perspectivas da indústria de revestimentos cerâmicos no Brasil**, Cerâmica Industrial 15 (2010) 7–18.

CALLISTER JR, WILLIAN D. **Materials Science and Engineering an Introduction – 5ª edição**. Editora LTC. 2002.

CASTRO, F.; VILARINHO, C.; TRANCOSO, D.; FERREIRA, P.; NUNES, F.; MIRAGAIA, A. **Utilisation of pulp and paper industry wastes as raw materials in cement clinker production**. In: J. Materials Engineering Innovation, Vol. 1, No. 1, 74-90 p. 2014.

CAUX, L. S. **Análise de Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduos da Indústria de Celulose KRAFT na produção de corpos cerâmicos**. Coronel Fabriciano, MG: UNILESTE – MG, 2012, 74 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, 2012.

CHIU. C.; STROPKY, D. (2014), **Advanced Process Simulation and Training, Process Simulations Ltd.**, Vancouver, www.psl.bc.ca/honeywellprocess.com/library/training

CINCOTTO, M. A. **Estudo da composição química da cal hidratada produzida no estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado em Ciências, São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002. **Dispõe diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Publicada no DOU no 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, páginas 95-96.

CONCRETE ASSOCIATION. **recycled coarse aggregate; rheographs; rheology; thixotropy; time-dependent evolution; workability loss.** , J. Cleaner Prod. 84 (2014) 411–420.

COURARD L.; MICHEL F.; DELHEZ P. **Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete.** Construction and Building Materials, v.24, p. 390-395, 2011.

CORRÊA, R.S.; **Áreas degradadas pela mineração no Distrito Federal.** Mineração e áreas degradadas no Cerrado. Brasília, Universa, 2001.p.9-21.

CHEN, Y.; ZHANG Y.; CHEN T.; LIU T.; HUANG J., **Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings,** Constr. Build. Mater. 38 (2013) 1083–1088, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.056>.

DAUCEA P.; CASTROB G.; LIMAC M.; LIMAB R., **Caracterização e concentração magnética de rejeitos de minério de ferro** , p. 197-205. In: *45º Ironmaking / 16º Iron Ore / 3º Agglomeration*, Rio de Janeiro, 2015. ISSN: 2594-357X

DAVIES, P. L.; GATHER, U.; MEISE, M.; MERGEL, D.; MILDENBERGER T. **Annals of Applied Statistics – Residual based localization and quantification of peaks in x-ray diffractograms.** Vol. 2, No. 3, 2008: 861-886. Acesso em: 26/05/2016.

Decreto Federal n. 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 23 dez. 2010. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm> Acesso em: 04/10/2013.

DELCOLLI, J.S.; OLIVEIRA, H.A.; OLIVEIRA, G.A.; TOFFOLI, S. **A Influência do Resíduo Dregs da Fabricação de Papel na Produção de Argila Expandida.** Anais do Congresso Brasileiro de Cerâmica, 46º, 2002, São Paulo.

DE JUAN M. S.; GUTIÉRREZ P. A. **Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate.** Construction and Building Materials, v.23, p. 872-877, 2012.

DNPM, **Sumario Mineral 2015**, Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasília, 2016.

DO H. S., MUN P. H., **A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime.** Waste Management, v.28, n.1, p. 191-199, abr.2017.

DUNSTER A. **The use of recycled and secondary materials in residential construction.** Milton Keynes: NHBC Foundation; 2012.

EDRAKI M.; BAUMGARTL T.; MANLAPIG E.; BRADSHAW D.; FRANKS D. M.; MORAN C. J.; **Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches,** J. Cleaner Prod. 84 (2014) 411–420, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>.

EPA. **Environmental Protection Agency.** Disponibilizado em: <<http://www.epa.gov>> Acessado em julho de 2016.

ETXEBERRIA M.; VÁZQUEZ E.; MARÍ A.; BARRA M. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete**. Cement and Concrete Research, v.37, p. 735-742, 2011.

EUROSTAT. **Waste statistics in Europe**. Disponibilizado em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics/> Acessado em agosto de 2016.

FERREIRA J.M.F.; OLHERO S.M. **Al-rich sludge treatments towards recycling**. Journal of the European Ceramic Society, v. 22, p. 2243-2249, 2002.

FEAM, **Dams inventory of Minas Gerais State**, Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, Belo Horizonte, 2017.

FIGLIARESE, M. A. Z. **Proposta de um modelo teórico de manutenção em obras com base no comportamento do concreto armado em ambientes de produção de celulose: estudo de caso**. Espírito Santo: 2009.

FOELKEL, C. **Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose KRAFT de eucalipto**. Parte 05: Resíduos Minerais. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel: Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2013.

FOELKEL, C. **Aspectos Práticos e Conceituais sobre a Fabricação de Celulose de Mercado do Tipo Kraft Branqueada a Partir de Madeira de Eucalipto**. Capítulo 31: O Processo Kraft de Fabricação de Celulose. Eucalyptus Online Book, 2013.

FONTES, W. C.; FRANCO DE CARVALHO, J. M.; ANDRADE, L. C.R. ; SEGADÃES, A. M.; PEIXOTO, R.F. **Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to -brown porcelain-**. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v. 206, p. 111-121, 2019.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL. **Debate revolução industrial, emprego, sociedade de resíduos sólidos**, Davos, Suíça, edição de 26 de outubro de 2016.

FGV PROJETOS – **FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS**. Disponível em: http://fgvprojetos.fgv.br/sites/fgvprojetos.fgv.br/files/miolo_residuos_solidos_site.pdf, consulta em 02 março 2017.

GARCIA, A. **Setor de fabricação de cimento e cal. Inspeção geral do ambiente e do ordenamento do território**. Lisboa. 2008.

GB/T21372-2008, Chinese Standard, **Portland cement clinker**(in english) <http://www.gb688.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=60CAF852A15EE8B47865F73C1EE85DEF>

GB/T1345-2005, Chinese National Standard **The test sieving method for fineness of cement**(in english) <http://www.gb688.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=FAB2326F6391D4D33C D1FED0CE73AF5D>

GEMELLI, E.; CAMARGO, H. A. C.; BRESCANSIN, J. **Evaluation of paper industry wastes in construction material**. Materials Research. Vol. 4, N° 4, 297-304, 2009.

GIURCO, D., LITTLEBOY, A., BOYLE, T., FYFE, J., WHITE, S., 2014. **Circular economy: Questions for 633responsible minerals, additive manufacturing and recycling of metals**. Resources. 3, 432–453

GHATAORA G.S.; FREER-HEWISH R.J.; JESSIC J. **Summary project report on the utilization of recycled aggregates generated from highway arising and Steel Slag fines**. Birmingham: University of Birmingham, UK; 2014.

GUIMARÃES, J.E.P. – **A Cal, fundamentos e aplicações na engenharia civil**. ABPC. Pini, 2002.

GOST 9479-84, 1985. **Natural stone blocks for facing products manufacture**. Technical Standard, Ministry of Building Materials Industry, Moscow.

HART M. L., SHAKOOR A., WILSON T. P. **Characterization of lime sludge for engineering applications**, Waste Management, v.13, p. 55-63, 2013.

IBAMA, **Relatório técnico sobre os impactos da ruptura da barragem de Fundão**, Mariana, MG, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, Brasília, 2015

ITAMBÉ - **Apostila de ensaios de concretos e agregados** material baseado no Manual Ensaios de agregados, concreto fresco e concreto edição de 06 de novembro de 2011.

ISO, 2005. Business Plan. ISO/TC 71 Concrete, **Reinforced Concrete and Prestressed Concrete**. <http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122>.

JESUS C.A.G., **Sumário Mineral Brasileiro**. Publicado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM site; 2015. Acessado: <http://www.dnpm.gov.br>

JENKINS, RON. **X Ray Fluorescence Spectrometry** 2^a. Ed. p. cm – Chemical analysis; v. 152. ISBN 0-471-29942-1. Copyright © by John Willey & Sons, inc. 1999.

JORDAN, M.; SÁNCHEZ, M. A.; PADILLA, L.; CESPEDES, R.; OSSES, M.; GONZALEZ, B. **Kraft Mill Residues Effects on Monterey Pine Growth and Soil Microbial Activity**. Journal Environ. Qual. v.31, p.1004-1009, 2002.

KISSINGER, G., M. HEROLD, V. DE SY. **Drivers of Deforestation and Forest Degradation: A Synthesis Report for REDD+ Policymakers**. Lexeme Consulting, Vancouver Canada, August 2012.

KINNUNEN, P. H. M.; KAKSONEN, A. H. **Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization**. Journal of Cleaner Production, 228, 153-160. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171>.

KIRCHHERR, J., REIKE, D., HEKKERT, M., CHARLES K. J., 2018. **Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions**. Resour. Conserv. Recycl. 127, 221–232. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302835>, Accessed date: 15 September 2019

KOSSOFF D.; DUBBIN W. E.; ALFREDSSON M.; EDWARDS S. J.; MACKLIN M. G.; HUDSON-EDWARDS K. A, **Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation**, Appl. Geochem. 51 (2014) 229–245, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>.

LANDIM, A.B. **Reciclagem de Resíduos Sólidos-Parte I: Adição de Dregs ao Efluente do Branqueamento Ácido**. O Papel, p 32-36, fevereiro de 2005.

L'EBRE O.; PERAL, M. C., TURCO, M., LLASAT, M.-C., & Martin, E. (2017). **Meteorological analysis systems in north-east Spain**. Journal of Environmental, In Press. <http://doi.org/10.3808/jei.201600335> Hydrology and Earth System Sciences 21(4), 2187–2201. DOI: 10.5194/HESS-21-2187-2017.

LIANG Y, YE Z, VERNEREY F, XI Y. **Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate**. J Mater Civil Eng 2014. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000909](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000909)

LIMBACHIYA M.; MEDDAH M. S.; OUCHAGOUR Y. **Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete**. Construction and Building Materials, v.27, p. 439-449, 2013.

LIMA R.M.F.; LOPES G.M.; GONTIJO C.F. **Aspectos mineralógicos, físicos e químicos na flotação catiônica inversa de minério de ferro de baixos teores, do Quadrilátero Ferrífero – MG**. Tecnologia Metalurgia Materiais e Mineracão2011;8(2):126–31

LIU W. Y.; XU X. L.; AN Y. Y.; **Study on the sprayed concrete with iron tailings**, Adv. Mater. Res. 347–353 (2012) 1939–1943, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.1939>.

LIU H.; PROBST A.; LIAO B., **Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)**, Sci. Total Environ. 339 (1) (2005) 153–166, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.07.030>.

LOUZADA, D. M.; BIZINOTO, M. B.; RAMONICH, E. V. **Ativação de escórias com resíduos de celulose**. São Paulo, SP: ABTCP-PI, 2009. 42° Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel, de 26 a 29 de outubro de 2011. Transamérica Expo Center, São Paulo, Brasil.

LUDENBERG, J. **Bibliometrics as a research assessment tool – impact beyond the impact factor**. Karolinska Institutet, (2016). Acesso em: 26/04/2018. Disponível em: <http://diss.kib.ki.se/2006/91-7140-965-3/thesis.pdf>

LUO L.; ZHANG Y.; BAO S.; CHEN T. **Utilization of iron ore tailings as raw material for portland cement clinker production**, Adv. Mater. Sci. Eng. 2016 (2016), <https://doi.org/10.1155/2016/1596047>.

LONG Y, PAN J, FAROOQ S, BOER H. **A sustainability assessmentsystem for Chinese iron and steel firms**. J Clean Prod 2016; 125:133–44.

LOTTERMOSER B.G, Mine wastes: **characterization, treatment and environmental impacts**. Berlin Heidelberg. 2017.

MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; LIMA, D.C.; CARVALHO, C. A. B.; PIRES, J. **Caracterização Tecnológica da mistura solo-grits para pavimento de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas**. Viçosa: Revista Árvore, V.31, N°3, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010067622007000300014&script=sci_arttext >. Acesso em: 05/11/2016.

MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; LIMA, D.C. **Compactação de misturas solo-grits para emprego em estradas florestais: influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica**. Viçosa: Revista Árvore, V.30, N°3, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622006000300012&lng=en>. Acesso em: 02/02/2017.

MA B, CAI L, LI X, JIAN S. **Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products.** J Clean Prod 2016; 127:162–71.

MARTINS, F. M. **Caracterização química e mineralógica de resíduos sólidos industriais minerais do Estado do Paraná.** Curitiba, PR: UFPR, 2006, 154p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, 2006.

MANSKINEN, K.; NURMESNIEMI, H.; PÖYKIÖ, R. **Total and extractable non-process elements in green liquor dregs from the chemical recovery circuit of a semichemical pulp mill,** Chem. Eng. J. 166 (2011) 954–961.

MAGALHÃES, **Minha casa no país do carro zero.** O Globo, Rio de Janeiro, p. 21, 27 abr. 2013.

MEYER C. **The greening of the concrete industry.** Volume 31, Issue 8, September 2009, Pages 601-605.

MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2017: U.S. **Geological Survey**, 200 p., <https://doi.org/10.3133/70202434> U.S, 2017.

MOHAMMED H. A.; ISMAIL M. M.; WAHEEB A. K.; ABDULHANNAN D. **Properties of asphaltic paving mixes containing hydrated lime waste.** Waste Management & Research, v.10, p. 183-194, 2002.

MORALES M. M.; ZAMORANO M.; MOYANO A. R.; ESPINOSA I. V. **Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08.** Construction and Building Materials, v.25, p. 742-748, 2011.

MONTE M.C; FUENTE, E.; BLANCO, A.; NEGRO, C. **Waste management from pulp and paper production in the European Union,** Waste Manage. (Oxford) 29 (2009) 293–308.

MUKHARJEE B. B.; BARAI S. V. **Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 55, p. 29-37, 2014.

MYMRINE, V. **The influence of loading on the structure and properties of ashes. Proceedings of Warsaw University, Bulletin of Geology,** Warsaw, Poland, v. 24, p. 183-196, 1981.

MYMRIN V.; CORREA S.M. **New construction material from concrete production and demolition wastes and lime production waste.** Construction and Building Materials, v. 21, p. 578-582, 2007.

MYMRIN V.; PONTE H. A.; YAMAMOTO C.I. **Synthesis of new colloidal formations during the strengthening of different activated hydrated metallurgical slags.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v.220, p.211-221, 2003.

MYMRIN, V. MOLINETTI, A. ALEKSEEV, K., AVANCI, M. A., KLITZKE, W., SILVA, D. A., FERRAZ, F. A., IAROZINSKI, A. CATAI, R. E. **Characterization of construction materials on the base of mortar waste, activated by aluminum anodization sludge and lime production waste,** Construction and Building Materials, Volume 212, 2018, p. 202-209.

- MYMRIN V., PRESOTTO A. P., ALEKSEEV K., AVANCI M. A, ROLIM P. H.B., PETUKHOV V., TASKIN A., **Application of hazardous serpentine rocks' extraction wastes in composites with glass waste and clay-sand mix to produce environmentally clean construction materials** Construction and Building Materials 234 (2020) 117319
- NAGATA, N.; BUENO, M. I. M. S.; PERALTA-ZAMORA, P. G. **Métodos Matemáticos para Correção de Interferências Espectrais e Efeitos Interelementos na Análise Quantitativa por Fluorescência de Raios-X.** Química Nova, v. 24, n. 4, p. 531-539, 2001.
- NIELSEN C.V, GLAVIND M. **Concrete for energy efficient and comfortable**, 2007. A technical breakthrough and a success for the Danish. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete 2007.
- NUSS, P., BLENGINI, G.A., 2018. **Towards better monitoring of technology critical elements in Europe: Coupling of natural and anthropogenic cycles.** Science of The Total Environment 613–614, 569–578. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.117.
- OATES J. A. H. **Lime and limestone**, Chemistry and technology. Production and uses, Wiley-VCH verlag GmbH, Weiheim, 2008.
- OGAWA H.; NAWA T. **Improving the quality of recycled fine aggregate by selective removal of brittle defects.** Journal Of Advanced Concrete Technology, v.10, p. 395–410, 2012.
- OLIVIER J.; MAENHOUT J. G.; PETERS J. **Trends in global CO₂ emissions**, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012.
- PASANDÍN A.R.; PÉREZ I. **Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion.** Construction and Building Materials, v.55, p.350-358, 2014.
- PAIVI, H. A., Kinnunen, P. H. M., & Kaksonen, A. H. (2019). **Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization.** Journal of Cleaner Production, 228, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171>.
- Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, **Directiva 2006/118/CE relativa à protecção das águas subterrâneas contra a poluição e a deterioração do meio ambiente** Jornal Oficial L 372/19, Estrasburgo, 12 de Dezembro de 2006.
- PETTI, J. J. **Rocas Sedimentarias**. 3ª edição. Buenos Aires: Edigraf, 1976. p.419 - 420.
- PEREIRA R. F.; BALL R. J.; ROCHA J.; LABRINCHA J.A.; ALLEN G. C. **New waste based clinkers: Belite and lime formulations.** Cement and Concrete Research, v.38, p. 511-521, 2008.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 2ª edição. Porto Alegre. Editora Globo, 1976. p. 270.
- PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na indústria de celulose e papel – estudo de caso.** São Paulo, 2013. 379 p.
- POTTS, P.J. **Handbook of Silicate Rock Analysis**, Blackie & Son , 1992, 622 p.

POON C. S.; LAM C. S. **The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks.** Cement and Concrete Composites, v.30, p. 283-289, 2008.

RAMACHANDRAN, V. S. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, Techniques, and Applications.** Edited by V. S. Ramachandran and James J. Beaudoin. Norwich, New York, U.S.A, 2001 . 963 p. ISBN 0-8155-1437-9. disponível em: < http://sci-lib.org/books_1/R/ramachandran.pdf > . Acesso em: 26/05/2013.

REBELO, A. M. A.; GUIMARÃES, S. B.; NETO, J. M. R. **A Exploração Mineral e o Desenvolvimento Paranaense: O Setor de Calcário na Região Metropolitana de Curitiba.** Boletim Paranaense de Geociências, n. 53, p. 13-26, 2003. UFPR.

RIBEIRO M.J; TULYAGANOV D.U.; FERREIRA J.M.; LABRINCHA J.A. **Recycling of Al-rich industrial sludge in refractory ceramic pressed bodies.** Ceramics International, v.28, p.319-326, 2002.

RITTER, W.F., MCDERMOTT, J.G., CHIRNSIDE, A.E.M., 2012. **Use of paper mill residuals as soil amendments.** Commun. Soil Sci. Plant Anal. 23, 469–488.

SARAIVA T. S.; BORGES M. M.; FILHO A. C. **The importance of recycling of construction and demolition waste.** In: Proceeding: 28th conference, opportunities, limits & needs towards an environmentally responsible architecture Lima; 2012.

SALCUDEAN, M.; STROPKY, D.; BIBEAU, E.; YUAN, J. (2004), **Advanced Process Modeling saves Money**, Process Simulations Limited (PSL), www.psl.bc.ca

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry.** Cement and Concrete Research, v. 114, p. 2-26, 2018. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015

SCHOENBERGER E. **Assessing the impacts of uncertain future closure costs when evaluating strategies for tailings management.** Resources Policy Volume 49, September 2016, Pages 119-128 <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.009>

SENAI-CETCEP (Centro de Tecnologia de Celulose e Papel). **Módulos de Fabricação de Matéria Prima apresentado em cd-rom**, Telêmaco Borba-PR.

SHETTIMA A. U.; HUSSIN M. W.; AHMAD Y.; J. MIRZA, **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete**, Constr. Build. Mater. 120 (2016) 72–79, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>.

SILVA JR., W. S. **Estudo para a utilização de resíduos da fabricação de papel na construção rodoviária.** São Paulo, SP: USP, 2010, 210 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, 2010.

SILVA R.V.; BRITO J.; DHIR R.K. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.** Construction and Building Materials, v.65, p. 201-217, 2014.

SLOTTE M.; ROMÃO I.; ZEVENHOVEN R. **Integration of a pilot-scale serpentinite carbonation process with an industrial lime kiln.** Energy, Finlândia, v. 62, p. 142-149, 2013.

SNISB, **Sistemas Nacional de Registros de Barragens**, Sistema Nacional de Informações sobre Segurança da Barragens - SNISB, Brasília, 2018

SCHULZ, K.J., DEYOUNG, J.H., Jr., SEAL, R.R., II, BRADLEY, D.C., eds., 2017, **Critical mineral resources of the United States**—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, 797 p., <http://doi.org/10.3133/pp1802>.

STROEVEN, P.; VU, D.D.; BUI, D.D.; DONG, A.V. **Research on cementitious materials to promote sustainable developments in Vietnam**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE AND DEVELOPMENT, 1, Tehran, 2011. Proceedings. Building and Housing Research Center, 2001.

SOUZA L M. **Déficit habitacional no Brasil 2015: resultados preliminares** / Fundação João Pinheiro, Diretoria de Estatística e Informações. – Belo Horizonte : FJP, 2017.

SOLOMONS, I., 2017. **Mine tailings recovery can be value generator, says Council for Geoscience**. 726Min. Wkly. 9.6.2017. <http://www.miningweekly.com/article/mine-tailings-recovery-can-be-value-727generator-reduces-enviro-impact-2017-06-09>

TAM V. W. Y.; GAO X.F.; TAM C.M. **Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1195-1203, 2005.

TAM V. W. Y.; TAM L.; LE K. N. **Cross-cultural comparison of concrete recycling decision-making and implementation in construction industry**. Waste Management, v.30, p. 291-297, 2010.

TOIKKA, M. **Minimization and utilization of green liquor dregs and ashes in pulp and paper**. Regional Environment Publication no: 82, Southeast Finland Regional Environment Centre. Oy Edita Ab, Helsinki, Finland, pp. 1–82, 2013.

TOSIC N.; MARINKOVIC S.; DASIC T.; STANIC M. **Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use**. Journal of Cleaner Production, v. 87, p. 766-776, 2015.

TSAKIRIDIS P.; PAPADIMITRIOU G.; TSIVILIS S.; KORONEOS C., **Utilization of steel slag for Portland cement clinker production**, J. Hazard. Mater. 152 (2) (2008) 805–811, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.

ULMGREN, P.; RAADESTROEM, R. **The composition of calcium phosphates precipitated from green and white liquors**, Nord. Pulp Pap. Res. J. Swed. 12 (2013).

UNEP **Published by the United Nations Environment Programme**, November 2016 Copyright © UNEP 2016. Nairobi, Kenya.

UTAMA N. A.; MCLELLAN B.; GHEEWALA S. H.; ISHIHARA K. N. **Embodied impacts of traditional clay versus modern concrete houses in a tropical regime**. Building and Environment, v. 57, p. 362-369, 2012.

UCHECHUKWU, E. A.; EZEKIEL A. Z, **Evaluation of the iron ore tailings from Itakpe in Nigeria as concrete material**, Adv. Mater. 3 (2014) 27–32. <https://doi.org/10.11648/j.am.20140304.12>.

UNGER C.; LEDERWASCH A.; RAZIAN, H.; WYNNE, L, GIURCO, D, 2013, **Adapting to climate risks and extreme weather: a guide for mining and minerals industry professionals** National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast, pp.79.

VAN HEININGEN, A. **Converting a Kraft Pulp Mill into an Integrated Forest Biorefinery.** *Pulp & Paper Canada* 107 (6): T141-146, 2016. Disponível em: <http://www.pulpandpapercanada.com/paptac/PDFs/June06/biorefining4.pdf>. Acessado em 03/09/2018.

WANG C., HARBOTTLE D., LIU Q., XU Z. 2014. **Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice.** *Minerals Engineering* 58: 113–131.

WALTRICK, CARLOS E. **Elaboração e caracterização de compósitos para a construção civil a base de resíduos de argamassa, entulho e cal residual.** Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010. 92 p.

WANNA C. F., AZEVEDO C. F., BRIGOLINI G. J. SCHMIDT W., **Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates** *Journal of Cleaner Production* Volume 257, 1 June 2019, 120530

WEBSTER, M. D., MERYMAN H., TONATIUH A. S., LEMAY L., SIMONEN K, MACLISE H. T. **“Structure and Carbon – How Materials Affect the Climate.”** SEI Sustainability Committee; Carbon Working Group , November 2012.

WENZL, H. **The Chemical Technology of Wood.** Elsevier: Academic Press, p. 270, 2012. Disponível em: <http://books.google.com.br>. Acessado em 09/10/2017.

WILLIAMS D. V., Chapter 37 - **Tailings Storage Facilities, Waste Manage.** 60 (2017) 230–246, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00037-2>

WOLFF, E.; SANTANA-GRECO, J. A.; GRECO, M. **Uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grist e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha.** Belo Horizonte, MG: UFMG, 2008, 188p. - Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

WORLD ECONOMIC FORUM, 2016. **Mapping Mining to the Sustainable Development Goals: An Atlas.** 760 Available at: http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2016/11/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas.pdf

WBCSD, 2013. **The Cement Sustainability Initiative. World Business Council for Sustainable Development.** Disponibilizado em: http://www.wbcscement.org/pdf/CSIRecycling_Concrete_FullReport.pdf> Acessado em fevereiro de 2017.

YELLISHETTY M.; MUDD G.M.; **Substance flow analysis of steel and long term sustainability of iron ore resources in Australia, Brazil, China and India,** *J. Clean. Prod.* 84 (2014) 400–410, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.046>.

YELLISHETTY M.; KARPE V.; REDDY E. H.; SUBHASH K. N.; RANJITH P. G. **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study,** *Resour. Conserv. Recycl.* 52 (2008) 1283–1289, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.007>

ZUCCHERATTE A.; FREIRE C.; LAMEIRAS F.; **Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethylthephtalate.** *Construction and building materials* , 2017.

ZHAO S.; FAN J.; SUN W., **Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultrahigh performance concrete,** *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 540–548, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019>.