

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

DANIELA EVANIKI PEDROSO

**APROVEITAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM
COMPÓSITOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

TESE

CURITIBA
2020

DANIELA EVANIKI PEDROSO

**APROVEITAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM
COMPÓSITOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

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

Orientador: Prof.º Ph.D. Vsévolod Mymrin

Coorientador: Prof.º Dr. Alfredo Iarozinski Neto

**CURITIBA
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Pedroso, Daniela Evaniki

Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil [recurso eletrônico] / Daniela Evaniki Pedroso. -- 2020.

1 arquivo texto (115 f.): PDF; 12,4 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 13 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: p. 108-115.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Minérios de ferro - Rejeitos. 3. Concreto - Eliminação de resíduos. 4. Cal - Eliminação de resíduos. I. Mymrine, Vsévolod, orient. II. Iarozinski Neto, Alfredo, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Manguera

TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº 10

A Tese de Doutorado intitulada: **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil**, defendida em sessão pública pela Candidata **Daniela Evaniki Pedroso**, no dia 02 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 A. Mymrine - Presidente - UTFPR

Prof.Dr.André Nagalli - UTFPR

Profª.Drª.Sonia Zanello - UTFPR

Profª.Drª.Elizabete Yukiko Nakanishi Bavastri - UFPR

Prof.Dr. Haroldo de Araújo Ponte - UFPR

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 meu orientador, Prof. Ph.D. Vsévolod Mymrin e coorientador Prof. Dr. Alfredo Iarozinski Neto, por todo apoio, dedicação e comprometimento que tiveram durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao LAMIR (Laboratório de Minerais e Rochas) da UFPR, pela colaboração no desenvolvimento das análises químicas e mineralógicas.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica de Varredura da UTFPR, pelas análises microquímicas realizadas.

À minha família pelo imenso carinho e incentivo, em especial aos meus pais, meu irmão, meu esposo e filhos.

A todos os professores do PPGEC que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

À todas as pessoas que se preocupam com o futuro do meio ambiente, e têm a consciência que os recursos naturais irão se extinguir, não na nossa geração, mas na geração de nossos filhos, netos ou bisnetos.

E por fim, agradeço a Deus, por todas as oportunidades, pela saúde e força na conquista diária de nossos objetivos.

RESUMO

PEDROSO, Daniela E. Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil. 2020. 115 f. Tese (Doutorado na área de concentração de Construção Civil.) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

A geração de grandes quantidades de resíduos, juntamente com a restrição de locais para destinação de resíduos industriais, a escassez de minerais naturais, as altas taxas de emissões de gases de efeito estufa e o grande consumo de energia, incentivaram pesquisadores e profissionais a refletir sobre alternativas sustentáveis, de forma a minimizar o impacto ao meio ambiente e reduzir os problemas da gestão de resíduos. Este trabalho teve como objetivo desenvolver compósitos a base de rejeito de minério de ferro, lodo da anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduos da produção da cal, para produção de novos materiais a serem utilizados na construção civil com propriedades que atendam às exigências das Normas Brasileiras. Para isso foram pesquisadas as mudanças nas propriedades mecânicas e nas estruturas morfológicas durante os períodos de cura de: 3, 7, 14, 28, 60 e 90, 180, 360 e 720 dias. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água, variação diametral e massa específica aparente atenderam os requisitos das normas brasileiras. Dentre todas as composições destaca-se a composição com 40 % de rejeito de minério de ferro, 10% de lodo da anodização de alumínio, 30% de resíduo de concreto, e 20% de resíduo da produção da cal. Esta composição obteve resistência à compressão de 7,15MPa aos 28 dias de cura e 8,93MPa aos 365 dias de cura. Quanto as alterações no arranjo mineralógico na composição 10 observou-se uma maior quantidade de sínteses dos minerais, sendo está uma das explicações da maior resistência deste material. Também foi observado as mudanças na estrutura morfológica da composição e verificou-se uma maior interação entre as partículas, além de algumas áreas com superfície plana e densa.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; Resíduos de concreto; Lodo da anodização de alumínio; Resíduos da produção de cal.

ABSTRACT

PEDROSO, Daniela E. Utilization of iron ore tailings in composites for civil construction. 2020. 115 f. Thesis (doctorate in Civil Construction concentration area) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2020.

The generation of large amounts of waste, together with the restriction of places for the disposal of industrial waste, the scarcity of natural minerals, the high rates of greenhouse gas emissions and the large consumption of energy, encouraged researchers and professionals to reflect on sustainable alternatives, in order to minimize the impact on the environment and reduce the problems of waste management. This work aimed to develop composites based on iron ore tailings, aluminum anodizing sludge, concrete residues and residues from the production of lime, for the production of new materials to be used in civil construction with properties that meet the requirements of the Brazilian Standards. For this, changes in mechanical properties and morphological structures were investigated during the curing periods of: 3, 7, 14, 28, 60 and 90, 180, 360 and 720 days. The results of the tests of resistance to axial compression, water absorption, diametrical variation and apparent specific mass met the requirements of Brazilian standards. Among all the compositions, the composition with 40% of iron ore tailings, 10% of aluminum anodizing sludge, 30% of concrete residue, and 20% of waste from lime production stands out. This composition obtained compression resistance of 7.15MPa at 28 days of cure and 8.93MPa at 365 days of cure. Regarding the changes in the mineralogical arrangement in composition 10, a greater amount of mineral syntheses was observed, which is one of the explanations for the greater resistance of this material. Changes in the morphological structure of the composition were also observed and there was a greater interaction between the particles, in addition to some areas with a flat and dense surface.

Keywords: Iron ore tailings, Concrete waste; Sludge from anodizing aluminum process; Waste of lime production

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da metodologia de trabalho.....	32
Figura 2 - Materiais utilizados na confecção dos compósitos.....	33
Figura 3 - Coleta do RMF da Barragem de Fundão - Mariana/MG	34
Figura 4 - Cominuição do RMF	35
Figura 5 - Jogo de peneiras utilizado para realização do ensaio de granulometria...36	
Figura 6 - Determinação da massa específica real do RMF	37
Figura 7 - Medição do pH do RMF	38
Figura 8 - Panela de carboneto de tungstênio.....	39
Figura 9 - Argamassadeira mecânica utilizada para das argamassas	41
Figura 10 - Índice de consistência medido na argamassa com RMF	42
Figura 11 - Cura dos corpos de prova à temperatura de 55°C por 6 dias	43
Figura 12 - Verificação do índice de desempenho da pozolana aos 28 dias.....	44
Figura 13 - Forno mufla utilizado para ensaio de PF dos resíduos	45
Figura 14 - Fixação das amostras nos stubs para posterior metalização.....	46
Figura 15 - 17 composições executadas na pesquisa.....	49
Figura 16 - Ensaio de resistência à compressão axial da composição 10	50
Figura 17 - Ensaio de absorção de água nos corpos de prova	51
Figura 18 - Medição do diâmetro em um corpo de prova aos 28 dias de cura.....	52
Figura 19 - Medição da massa de um corpo de prova aos 90 dias	53
Figura 20 - Moldagem do tijolo ecológico	55
Figura 21 - Tijolo ecológico após desmoldagem	55
Figura 22 - Paver ecológico.....	56
Figura 23 - Paver ecológico após desmoldagem	56
Figura 24 - Composição granulométrica do RMF.....	58
Figura 25 - Intensidades dos elementos mineralógicos do RMF através do DRX.....	60
Figura 26 - Estrutura morfológica do RMF através do MEV e pontos de análise microquímica da composição através do EDS.....	61
Figura 27 - Mapeamento dos elementos químicos do RMF.....	62
Figura 28 - Composição granulométrica do LAA.....	63
Figura 29 - Intensidades dos elementos mineralógicos do LAA através do DRX.....	65
Figura 30 - Estrutura morfológica do LAA através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS.....	66
Figura 31 - Mapeamento dos elementos químicos do LAA.....	67
Figura 32 - Composição granulométrica do RC	68
Figura 33 - Intensidades dos elementos mineralógicos do RC através do DRX.....	69
Figura 34 - Estrutura morfológica do RC através do MEV e pontos de análise microquímica da composição através do EDS.....	71
Figura 35 - Mapeamento dos elementos químicos do RC	72
Figura 36 - Composição granulométrica do RPC.....	73
Figura 37 - Intensidades dos elementos mineralógicos do RPC através do DRX.....	75
Figura 38 - Estrutura morfológica do RPC através do MEV e pontos de análise microquímica da composição através do EDS.....	76
Figura 39 - Mapeamento dos elementos químicos do RPC.....	77
Figura 40 - Resistência à compressão axial das composições 10 e 15	79
Figura 41 - Resistência à compressão axial das composições 09 e 10	80
Figura 42 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura inicial da	

composição 09	87
Figura 43 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 3 dias da composição 09	87
Figura 44 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 180 dias da composição 09	88
Figura 45 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 720 dias da composição 09	88
Figura 46 - Estrutura morfológica da mistura inicial através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 9.....	91
Figura 47 - Estrutura morfológica da mistura aos 3 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 9.....	92
Figura 48 - Estrutura morfológica da mistura aos 180 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 9.....	93
Figura 49 - Estrutura morfológica da mistura aos 720 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 9.....	95
Figura 50 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura inicial da composição 10	98
Figura 51 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 3 dias da composição 10	98
Figura 52 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 180 dias da composição 10	99
Figura 53 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 720 dias da composição 10	99
Figura 54 - Estrutura morfológica da mistura inicial através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 10	102
Figura 55 - Estrutura morfológica da mistura aos 3 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 10	103
Figura 56 - Estrutura morfológica da mistura aos 180 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 10	104
Figura 57 - Estrutura morfológica da mistura aos 720 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 10	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem dos resíduos utilizados em cada composição	48
Tabela 2 - Composição química do RMF	58
Tabela 3 - Atividade pozolânica de argamassas de cal com incorporação do RMF aos 7 dias.....	59
Tabela 4 - Atividade pozolânica de argamassas de cimento com incorporação do RMF aos 28 dias	59
Tabela 5 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RMF	60
Tabela 6 - Composição microquímica do RMF	62
Tabela 7 - Composição química do LAA	64
Tabela 8 - Legenda do Difratoograma de Raios X do LAA.....	64
Tabela 9 - Composição microquímica do LAA.....	67
Tabela 10 - Composição química do RC	69
Tabela 11 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RC.....	70
Tabela 12 - Composição microquímica do RC	71
Tabela 13 - Composição química do RPC.....	74
Tabela 14 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RPC	75
Tabela 15 - Composição microquímica do RPC	77
Tabela 16 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial (MPa).....	78
Tabela 17 - Resultado dos ensaios de absorção de água.....	82
Tabela 18 - Coeficiente de variação diametral das amostras durante o período de cura	83
Tabela 19 - Massa específica aparente das amostras durante período de cura	84
Tabela 20 - Mudança de intensidades dos picos de elementos cristalinos na composição 9	86
Tabela 21 - Minerais presentes na composição 9	89
Tabela 22 - Composição microquímica da mistura inicial da composição 9.....	91
Tabela 23 - Composição microquímica da mistura aos 3 dias de cura da composição 9	93
Tabela 24 - Composição microquímica da mistura aos 180 dias de cura da composição 9	94
Tabela 25 - Composição microquímica da mistura aos 720 dias de cura da composição 9	96
Tabela 26 - Mudança de intensidades dos picos de elementos cristalinos na composição 10	97
Tabela 27 - Minerais presentes na composição 10	100
Tabela 28 - Composição microquímica da mistura inicial da composição 10	102
Tabela 29 - Composição microquímica da mistura aos 3 dias de cura da composição 10	104
Tabela 30 - Composição microquímica da mistura aos 180 dias de cura da composição 10	105
Tabela 31 - Composição microquímica da mistura aos 720 dias de cura da composição 10	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA	16
1.5	METODOLOGIA	16
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (RMF)	18
2.2	LODO DE ANODIZAÇÃO DE ALUMÍNIO (LAA)	21
2.3	RESÍDUO DE CONCRETO (RC)	25
2.4	RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA CAL (RPC)	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	SELEÇÃO E COLETA DOS RESÍDUOS	33
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	35
3.2.1	Composição granulométrica	36
3.2.2	Massa específica real	37
3.2.3	Potencial Hidrogeniônico (pH)	38
3.2.4	Composição química por Fluorescência de Raios X	39
3.2.5	Atividade pozolânica com a cal aos 7 dias	40
3.2.6	Índice de desempenho pozolânico com o cimento Portland aos 28 dias	43
3.2.7	Perda ao fogo	45
3.2.8	Exploração dos elementos mineralógicos por Difratomia de raios-X (DRX)	45
3.2.9	Investigação da estrutura morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura	46
3.2.10	Análise microquímica por Espectroscopia por energia dispersiva de Raios-X	47
3.2.11	Mapeamento por cores dos elementos químicos	47
3.3	DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES	47
3.4	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	48
3.5	ANÁLISES DAS COMPOSIÇÕES	49
3.5.1	Resistência à compressão axial	49
3.5.2	Absorção de água	50
3.5.3	Variação dimensional	51
3.5.4	Massa específica aparente	52
3.6	ENSAIOS PARA ACOMPANHAMENTO DOS PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS COMPOSIÇÕES	53

3.6.1	Mudanças de redes cristalinas dos elementos mineralógicos por DRX	53
3.6.2	Mudanças na estrutura morfológica por MEV e EDS	54
3.7	EXECUÇÃO DE UM TIJOLO E PAVER ECOLÓGICO.....	54
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	57
4.1.1	Rejeito de Minério de Ferro (RMF)	58
4.1.2	Lodo de anodização de alumínio (LAA).....	63
4.1.3	Resíduo de concreto (RC)	68
4.1.4	Resíduo da produção da cal (RPC).....	73
4.2	ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES	78
4.2.1	Resistência à compressão axial	78
4.2.2	Absorção de água.....	82
4.2.3	Variação diametral.....	83
4.2.4	Massa específica aparente	84
4.3	ACOMPANHAMENTO DOS PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS MELHORES COMPOSIÇÕES	85
4.3.1	Composição 9 (10% de RMF, 40% de LAA, 30% de RC e 20% de RPC).....	85
4.3.2	Composição 10 (40% de RMF, 10% de LAA, 30% de RC e 20% de RPC)....	96
4.4	EXECUÇÃO DE UM TIJOLO E PAVER ECOLÓGICO.....	107
5	CONCLUSÕES.....	108
	REFERÊNCIAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

A vasta geração de resíduos industriais causa uma série de impactos adversos na sociedade e no meio ambiente, tais como: a ocupação inadequada do solo, a escassez dos recursos naturais e a alta emissão de gases de efeito estufa. Paralelo a estas situações, o descarte inadequado dos resíduos industriais e sua alta produção inconsciente tem agravado consideravelmente os problemas nos grandes centros urbanos. Tal cenário remete maior atenção tanto do Estado quanto das empresas privadas no que se refere ao aproveitamento dos resíduos industriais de uma forma geral. As novas metodologias e tecnologias voltadas à reciclagem e/ou reutilização desses insumos são soluções de extrema importância em relação as futuras gerações.

Evitar a geração de resíduos é a melhor maneira para minimizar os impactos ambientais e resolver os problemas da gestão de resíduos. Para Sáez e Osmani (2020), a prevenção é a principal prioridade no gerenciamento de resíduos, seguida por reutilização, reciclagem e aterro, sendo a última a opção menos desejável.

Propício dos fatores citados acima, bem como acerca das bibliografias sobre o uso de resíduos industriais como subprodutos na construção civil, o presente trabalho teve por objetivo a formulação de um compósito para construção civil a partir do rejeito de minério de ferro (RMF), lodo de anodização de alumínio (LAA), resíduo de concreto (RC) e resíduo da produção de cal (RPC). Esses compósitos oferecem uma oportunidade de usar e combinar materiais reciclados em produtos com novas propriedades, ou propriedades que atendam às exigências das normas brasileiras, para uso na construção civil.

Nos últimos quatro anos houveram dois grandes desastres irreparáveis no Brasil, sendo um o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG (2015) em que aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro vazaram e atingiram o Rio Doce e depois o rompimento da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG (2019) que despejou aproximadamente 13 milhões de metros cúbicos de RMF sobre o Rio Paraopeba. O RMF é um resíduo sólido gerado durante o processo de beneficiamento do minério de ferro e é uma das principais preocupações de poluição na indústria de mineração.

Sob o mesmo ponto de vista, o processo de anodização do alumínio gera uma grande quantidade de resíduo na forma de lodo que, apesar de ser classificado como

resíduo inerte, precisa ser destinado a aterros sanitários. O LAA, é proveniente do tanque de fosqueamento, em que as peças são tratadas com solução alcalina, aditivada com inibidores de ataque.

O resíduo de concreto, também conhecido como agregado reciclado, quando corretamente selecionado e classificado, é proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras em concreto, pode ser utilizado em pavimentação, na fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, na fabricação de concretos não estruturais e peças pré-moldados, tais como blocos, peças de meio-fio e manilhas e outros.

O resíduo da produção da cal é resultante da má calcinação da rocha calcária, que está diretamente associado a experiência do operador, a temperatura de queima e tecnologia de fornos. Esses resíduos são, geralmente, comercializados como subprodutos, constituídos, essencialmente, de elementos não calcários como: Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , entre outros, em quantidade total superior a 12% segundo a NBR 6453 (ABNT, 2003) se designam esses como resíduos da cal.

As indústrias, independente do ramo, geram enormes quantidades de resíduos com uma composição diversificada ao longo das múltiplas etapas de produção. A geração de grandes quantidades de resíduos, juntamente com a restrição de locais para destinação de resíduos industriais, a escassez de minerais naturais, as altas taxas de emissões de gases de efeito estufa e o grande consumo de energia, incentivaram pesquisadores e profissionais a refletir sobre alternativas sustentáveis, de forma a minimizar o impacto ao meio ambiente e reduzir os problemas da gestão de resíduos.

Os resíduos industriais produzidos por um determinado setor muitas vezes podem ser considerados como matérias-primas para outros setores, reduzindo, desta maneira, o impacto ambiental, associado a aterros sanitários e preservação de recursos naturais não renováveis.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Os resíduos industriais: rejeito de minério de ferro, lodo de anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduo da produção de cal, podem ser utilizados como matérias-primas para confecção de um novo compósito para construção civil?

1.2 JUSTIFICATIVA

A relevância desse estudo se encontra no fato de que a economia e o meio ambiente devem andar juntos quando o assunto é a utilização de tecnologias que minimizem os impactos ao meio ambiente. 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 se obter um compósito com funções semelhantes a um material já existente por um valor mais atrativo.

Almeja-se, também, que este estudo venha contribuir para que seja conhecido o potencial de uso do rejeito de minério de ferro, lodo da anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduos da produção da cal, em forma de compósitos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver compósitos a base de rejeito de minério de ferro, lodo da anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduos da produção da cal, para produção de novos materiais a serem utilizados na construção civil com propriedades que atendam às exigências das Normas Brasileiras.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização física e química do rejeito de minério de ferro, lodo de anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduo da produção de cal;
- Desenvolver novos compósitos para a construção civil com características físicas, químicas e mecânicas que atendem as exigências das Normas Brasileiras;
- Analisar as alterações nos arranjos mineralógicos e as mudanças nas estruturas morfológicas dos melhores compósitos durante os períodos de cura;
- Executar um tijolo e um paver ecológico utilizando a melhor composição estudada.

1.4 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

Estudo experimental de nível laboratorial de compósitos confeccionados com resíduos industriais já descritos, em que suas propriedades químicas e físicas podem se alterar em função dos processos existentes em cada indústria.

1.5 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho se deu inicialmente pela seleção e coleta dos resíduos industriais, sendo eles: Rejeito de Minério de Ferro (RMF), Lodo de Anodização de Alumínio (LAA), Resíduo de Concreto (RC) e Resíduo de Produção da Cal (RPC). Em seguida, foi realizada a caracterização dos mesmos, através dos ensaios de: composição granulométrica, massa específica real, potencial hidrogeniônico (pH), composição química através da Fluorescência de Raios X (FRX), perda ao fogo, exploração dos elementos mineralógicos por meio da Difratomia de raios-X (DRX), investigação da estrutura morfológica por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), análise microquímica da amostra por meio da Espectroscopia por energia dispersiva de Raios-X (EDS) e mapeamento por cores dos elementos químicos por meio da Espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X (EDS). Ainda na caracterização, quanto as características pozolânicas, os resíduos que obtiveram somatório em sua composição química de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ superior a 70% e que a perda ao fogo fosse de no máximo de 10%, realizou-se os ensaios para requisitos físicos, sendo: atividade pozolânica com a cal aos 7 dias e atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias. Após a caracterização dos resíduos, passou-se a definição das composições, sendo dosadas 17 composições, variando: RMF (10 - 40) %, LAA (10 - 40) %, RC (25 - 30) % e RPC (15 - 25) %. Posteriormente, foram moldados 60 corpos de prova por composição, sendo eles de 20x20mm (diâmetro x altura), misturados manualmente com auxílio de uma almofariz e pistilo de porcelana e compactados com uma prensa manual com aplicação de uma força 3.150N. A cura dos corpos de prova foi realizado em ambiente aberto com umidade aproximada de 87% e temperatura aproximada de 20°C. Para a definição das melhores composições, realizou-se em todos os corpos de prova os ensaios de: resistência à compressão axial, absorção de água, variação diametral e massa

específica aparente. Com esses resultados, deliberou-se o estudo aprofundado das composições 9 e 10, visto que a composição 9 utilizou o teor máximo de LAA (40%) e mínimo de RMF (10%) e obteve resultados não satisfatórios nos ensaios e a composição 10 utilizou o teor máximo de RMF (40%) e mínimo de LAA (10%) e obteve resultados satisfatórios nos ensaios. Nessas duas composições realizou-se o acompanhamento das mudanças de redes cristalinas dos elementos mineralógicos por meio Difratoograma de raios-X (DRX), acompanhamento das mudanças na estrutura morfológica por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e análise microquímica da amostra por meio Espectroscopia por energia dispersiva de Raios-X (EDS). Por fim, foi confeccionado um tijolo e um paver ecológico utilizando a melhor composição: 40%RMF, 10% LAA, 30%RC e 20%RPC.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, incluindo este primeiro, o qual apresenta os aspectos gerais do tema tratado: uma breve introdução, os objetivos da pesquisa, metodologia e justificativa.

No segundo capítulo é disposto o estado da arte do tema, contemplando o processo de geração dos resíduos, suas características químicas e físicas, produções, destinações e aproveitamentos já realizados.

No capítulo três discorre-se sobre os métodos e materiais, apresentação dos procedimentos de escolha e coleta dos resíduos, ensaios de caracterização dos resíduos, definição das composições, moldagem dos corpos de prova e ensaios para definição das melhores composições e acompanhamento das mudanças das características e propriedades dos compósitos desenvolvidos.

No quarto capítulo são analisados os resultados, primeiramente, a caracterização das matérias-primas, em seguida, foram analisadas as 17 composições confeccionadas, suas características físicas, químicas e mecânicas e definido as melhores composições, sendo elas as composições 9 e 10 e nessas duas foram acompanhadas as mudanças de composição mineralógica e estruturas morfológicas durante os períodos de cura.

No capítulo cinco, foram expressas as conclusões deste trabalho.

E ao final, encontram-se as referências utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (RMF)

O rejeito de minério de ferro (RMF) é um resíduo sólido gerado durante o processo de beneficiamento do minério de ferro e é uma das principais preocupações de poluição na indústria de mineração. O RMF é um material fino, denso e cristalino e sua composição é formada principalmente por óxidos de ferro, sílica e alumina, e não apresentam características perigosas (BASTOS *et al.* 2016; FONTES *et al.* 2016; GALVÃO *et al.* 2018).

De acordo com dados oficiais, o descarte anual de RMF na China foi de 300 milhões de toneladas em 2009 e o aproveitamento desse rejeito ainda é inferior a 10% (XIONG, WANG e HUANG, 2011). Na maioria dos países o armazenamento ainda é a maneira mais comum e econômica de administrar o RMF, no entanto, a enorme quantidade de desse rejeito armazenado traz uma série de problemas ambientais e sociais.

A Malásia também produz grandes quantidades de RMF por ano, uma pesquisa estatística mostrou que a produção anual é de cerca de 625.000 toneladas (XIONG, WANG e HUANG, 2011).

Para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2019), para cada tonelada de minério de ferro processado no Brasil são gerados cerca de 400 kg de RMF. Isso quer dizer que há um volume muito grande desse rejeito sendo descartado a cada ano.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2019) menciona ainda que, as reservas mundiais de minério de ferro, em 2016, foram da ordem de 170 bilhões de toneladas e que as reservas brasileiras, representam 16,8% das reservas mundiais, correspondendo a 28,6 bilhões de toneladas, se dividindo em: Minas Gerais (81,6%), Pará (10,6%) e Mato Grosso do Sul (2,7%). A produção mundial de minério de ferro em 2016 foi estimada em 2,2 bilhões de toneladas e a produção brasileira foi a segunda maior, produzindo 421 milhões de toneladas (18,9% desse total).

Segundo dados do Inventário de Resíduos da Mineração cerca de 289 milhões de toneladas de RMF são gerados anualmente no Brasil, dos quais 94,58% são destinados para as barragens e 2,87% para as pilhas de rejeitos e somente 0,003% ou cerca de 9,9 mil toneladas são reutilizadas (FEMA, 2018).

O RMF pode ser aproveitado na produção de blocos cerâmicos, base e sub-base de pavimentos, telhas, ladrilhos hidráulico, madeiras plástica, concretos, argamassas, pigmento para tintas entre outras aplicações, e há muitas outras pesquisas sendo desenvolvidas para o aproveitamento deste rejeito como material de construção, porém nos últimos quatro anos houveram dois grandes desastres irreparáveis no Brasil, sendo um o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG em que aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de RMF vazaram e atingiram o Rio Doce e depois o rompimento da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG que despejou aproximadamente 13 milhões de metros cúbicos de RMF sobre o Rio Paraopeba. Neste sentido, percebe-se a importância da aplicação deste rejeito como subproduto para construção civil.

Da mesma maneira, a segurança de barragens de RMF é um desafio nos dias atuais, isso se dá por diferentes motivos: a construção de diques para armazenamento de rejeitos feito com o material residual das atividades de mineração, a altura das encostas da barragem é modificada à medida que a quantidade de resíduos é gerado, não há regulamentação para projetos de construção de barragens que visem a diminuição dos riscos principalmente nos países em desenvolvimento, o custo de manutenção após o encerramento da área explorada é extremamente alto, falta de monitoramento contínuo das barragens e falta de fiscalização por parte dos órgãos responsáveis (AZAM e LI, 2010; LI *et al.* 2010; RICO *et al.* 2008). E por último, e não menos importante, a falta de utilização de um processo de tratamento que reduza o volume de RMF em barragens evitando prejuízos não só ao meio ambiente, mas a toda a sociedade.

Embora as falhas nas barragens de rejeitos sejam consideradas eventos extremamente raros, elas são muito mais comuns do que se imagina. Wise Uranium (2018) publicou que entre os anos de 2000 a meados de 2017, ocorreram 36 casos, uma média de dois por ano e a maioria das ocorrências se deu por razões técnicas e causaram grandes danos ambientais.

Estudos demonstram que o RMF tem potencial para ser utilizado na produção de cimento e compósitos cimentícios, além de propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas semelhantes à um aglomerante, a disponibilidade e o baixo custo do RMF tornam atraente a utilização desse rejeito:

Luo *et al.* (2016) relataram que o RMF pode substituir completamente a argila como uma matéria prima alternativa de alumina-silicato para a produção de clínquer

de cimento Portland. Além disso, outro benefício é que o calor de hidratação do cimento Portland preparado com RMF é menor.

Shettima *et al.* (2016) pesquisaram sobre a substituição da areia do rio por RMF em concretos convencionais, as substituições foram de: 25%, 50%, 75% e 100%. E a relação a/c em todas as composições foi de 0,5. Os resultados dos ensaios indicaram que a trabalhabilidade do concreto foi reduzida com as adições de RMF, isso se deu devido a maior área superficial e textura áspera dos rejeitos. O concreto contendo 25% de RMF mostrou consideravelmente maior resistência à compressão do que o concreto de referência (0% de substituição) em todas as idades.

Zhao *et al.* (2014) investigaram a possibilidade de utilização de RMF na substituição do agregado miúdo natural para preparação de concreto de ultra alto desempenho sob dois diferentes regimes de cura. Verificou-se que a substituição de até 40% do rejeito ofereceu resultados satisfatórios em corpos de prova com idades de 180 dias em cura padrão equiparados a cura a vapor em 2 dias. Além disso foi observado a diminuição de poros nos concretos que utilizaram RMF.

O RMF tem sua composição química semelhante à de argilas e pode ser utilizado como matéria-prima na fabricação de tijolos. Yellishetty *et al.* (2008) avaliaram o efeito do tamanho das partículas desses rejeito para adequação como matéria-prima nos processos de fabricação de tijolos, e concluíram que partículas com diâmetros inferiores a 4,75 mm eram adequados.

Fontes *et al.* (2016) produziram três misturas: argamassa convencional, argamassa com substituição de agregado natural por RMF e argamassas que substituíram a cal por RMF em proporções de 10% até 100%. Os resultados indicaram que o uso de RMF em proporção não superior a 20% na substituição de cal é viável, devido a manutenção de sua trabalhabilidade. As argamassas produzidas com substituição de agregado natural por RMF consumiram maiores teores de água para obter mesma trabalhabilidade que as argamassas convencionais. Ainda, os autores sugerem uma caracterização adicional das composições para verificar sua aplicabilidade, durabilidade e testes de aderência.

Mendes *et al.* (2019) estudaram uma nova alternativa para reutilizar o RMF com alto teor de silício, aplicando-os em tijolos cerâmicos. Para isso, foi desenvolvido composições variando em massa o RMF e dois materiais argilosos, com as respectivas faixas de incorporação: 0% a 40% e 30% a 70%, além disso as amostras

foram queimadas a temperatura de 850°C, 950°C e 1050°C. Como resultado os autores verificaram que composição ótima continha 29,1% de RMF e que essa composição apresentou 20,94% de absorção de água e resistência à compressão axial de 4,27MPa, comprovando seu potencial para ser usado em alvenaria de vedação.

Para Galvão *et al.* (2018), a utilização do RMF na construção civil é uma alternativa vantajosa. Os autores pesquisaram sobre o uso de RMF como pigmento na produção de tintas sustentáveis para edifícios. A tinta sustentável apresentou cor avermelhada, opacidade adequada e resultados satisfatórios em relação à durabilidade a um custo significativamente menor.

Xiong *et al.* (2017) desenvolveram pastas de cimento com adições do RMF para melhorar a resistência ao ataque de sulfatos. Foram executadas sete composições com cimento misturado com diferentes conteúdos de RMF e estas foram expostas a dois tipos de ataques externos de sulfato (uma solução de Na₂SO₄ a 5% em peso e uma solução de MgSO₄ a 5% em peso). Como resultados tem-se que o RMF melhorar a capacidade das pastas contra ataques externos de sulfato.

Li *et al.* (2017) realizaram um processo de recuperação do ferro em RMF através de uma técnica utilizando o processo de separação magnética. Como resultado os autores demonstraram que utilizando este método uma grande quantidade de ferro pode ser reutilizada, os autores encontraram uma taxa de recuperação de 88,2% de ferro.

O uso de RMF como matérias-primas alternativas em concretos, argamassas, tijolos, tintas, entre outros materiais de construção reduzirá a extração de materiais naturais, além de diminuir o número de impactos ambientais da disposição desses resíduos.

2.2 LODO DE ANODIZAÇÃO DE ALUMÍNIO (LAA)

De acordo com a norma NBR 15329 (ABNT, 2014), a anodização tem por finalidade promover a formação, na superfície do metal, de uma camada controlada e uniforme de óxido de alumínio, em banhos eletrolíticos, sob agitação e temperatura controladas, aumentando a resistência do material já que a superfície é bastante vulnerável à corrosão, por se tratar de um metal muito reativo que ao entrar em contato

com a superfície atmosférica se degrada com facilidade, pois não tem naturalmente uma proteção suficientemente eficaz que evite o rápido desgaste de tal material.

O processo de anodização normalmente é feito por pequenas e médias empresas que possuem uma ou duas linhas de produção (ÁLVAREZ-AYUSO, 2009).

O processo de anodização é composto por diversas etapas, resumidamente explicado pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA, 2019):

- Enganchamento: Consiste em fixar os perfis nas gancheiras de alumínio, de tal maneira que as áreas de contato não fiquem localizadas em pontos críticos da superfície de trabalho;
- Desengraxe: promove a limpeza das superfícies, com solução aquosa, levemente alcalina, para eliminação de possíveis óleos e graxas oriundos do processo de extrusão;
- Lavagens: após esta etapa e após cada uma das etapas subsequentes é feita uma lavagem com água, para garantir a ausência de resíduos na superfície das peças que possam contaminar os banhos seguintes.
- Fosqueamento: para conferir uniformidade à superfície do metal e proporcionar um acabamento fosco acetinado característico, as peças são imersas num banho que permite o afloramento de óxidos indesejáveis (Si, Mg, Mn) que possam vir a interferir no processo de anodização propriamente.
- Neutralização: as partículas de intermetálicos ou hidróxidos que ficam na superfície do alumínio, decorrentes das reações químicas dos elementos de liga durante a fase de fosqueamento, são removidas pela ação da Neutralização, deixando as peças prontas para a anodização.
- Anodização: Processo eletroquímico que promove a formação de uma camada controlada e uniforme de óxido na superfície do alumínio. Segundo Gomes (2005), a operação apresenta altíssimas concentrações de alumínio e o pH é fortemente ácido.

O lodo da anodização de alumínio, que foi estudado no presente trabalho, é proveniente do tanque de fosqueamento, onde as peças são tratadas com uma solução alcalina, aditivada com inibidores de ataque.

O processo de fosqueamento ocorre em uma solução de hidróxido de sódio, cuja concentração deverá ser aumentada de acordo com a quantidade de alumínio dissolvido, com a adição de outros produtos, com a finalidade de aumentar a vida útil

do banho, aglomerando o alumínio dissolvido, tais como: hexametáfosfato, polifosfato, gluconato e glucoheptanato, todos de sódio. A temperatura utilizada geralmente é entre 50 e 65°C, a concentração de hidróxido de sódio varia entre 60 à 100 g/l e a taxa de aluminato de sódio entre 80 e 120 g/l, sendo que a proporção de hidróxido de sódio é de 80% da taxa de aluminato (ABAL, 2015).

Um aditivo deve ser utilizado juntamente com o hidróxido de sódio para dar maior sobrevida ao banho, este é um líquido a base de hexametáfosfato e gluconato de sódio, que tem a função de aglomerar o alumínio dissolvido não deixando formar pedras no fundo do tanque (ABAL, 2015).

O banho nunca deve estar abaixo de 40°C, pois pode precipitar formando hidróxido de alumínio (ABAL, 2015).

Hoje, devido às exigências ambientais, custo com transporte e deposição final vem-se realizando novos estudos para a aplicação deste resíduo.

Outra possibilidade de adquirir uma solução alcalina é também através das indústrias de anodização que utilizam uma soda cáustica concentrada para remoção do alumínio das extrusora matriz. Este processo produz efluentes alcalinos que contêm quantidades elevadas de alumínio (TANSENS *et al.* 2011).

O lodo de anodização de alumínio é classificado como sendo de Classe II – A, não perigoso, não inerte (SARTOR, 2006).

Segundo Ferreira e Olhero (2002), o lodo de anodização de alumínio possui uma estrutura amorfa e é, principalmente, constituído por hidróxido de alumínio e sulfatos de sódio e cálcio também estão presentes como constituintes menores.

Por meio da calcinação do hidróxido de alumínio é possível obter o óxido de alumínio, também conhecido como alumina calcinada. Essa é fundamental na produção de vidros, fibras de vidro, refratários, concretos refratários, cerâmicas técnicas, revestimentos cerâmicos, isoladores elétricos aluminosos, abrasivos, alumina eletrofundida branca e massas de polimento (ALCOA, 2014).

O alto teor de alumina presente após calcinação das lamas resultantes, e a constância de composição ao longo do tempo, fazem deste resíduo um material de alto potencial para reciclagem em produtos baseados nos compostos de alumínio (RIBEIRO e LABRINCHA, 2008; SARTOR, 2006; PEREIRA, 2006).

A indústria de anodização de alumínio é um importante setor industrial que gera grande quantidade de resíduos. No processo industrial de anodização de alumínio,

para produzir 1 kg de alumínio anodizado, é gerado também 1 kg de lodo (ABAL, 2015).

O processo de anodização de alumínio consome grandes quantidades de água e gera grandes quantidades de lamas, segundo Ribeiro e Labrincha (2008), cerca de 100.000 toneladas por ano são produzidas nos países da União Europeia.

De acordo com Pereira *et al.* (2002), a produção mundial anual é de 450.000 toneladas distribuídas entre Japão (39%), EUA (22%), União Europeia (22%) e outros (17%).

Diferentes aplicações para o lodo de anodização de alumínio foram realizadas, tais como o seu emprego como cola para a produção de papel (BROOK, 1991), e como agente floculador ou coagulante no tratamento de águas residuais industriais (PAJUNEN, 1999). A viabilidade desses produtos depende principalmente de seu custo. Logo, aqueles que requerem altas temperaturas de calcinação, ou seja, consomem alta energia, devem ser descartados.

Ribeiro *et al.* (2002) moldaram diferentes composições utilizando resíduos industriais, sendo uma das composições formada por 100% de lodo de anodização de alumínio (50% lodo úmido e 50% lodo calcinado). Foram moldados corpos de prova com diferentes formas e dimensões, retangular de 62x20 mm e circular com diâmetro de 25 mm e cerca de 3 mm de espessura, depois foram consolidados por prensagem axial com força de 32 MPa e queimados em 1650°C. Os resultados demonstraram elevada resistência elétrica e mecânica, além de boa refratariedade.

Ribeiro *et al.* (2004) pesquisaram sobre a incorporação do resíduo de alumínio produzido a partir de processos de anodização e tratamento de superfícies industriais. Diferentes composições foram preparadas utilizando materiais naturais contendo sílica, tais como a argila e caulim juntamente com o resíduo de alumínio. Resultados demonstraram que as propriedades finais são dependentes do método de moldagem e sinterização, uma vez que ambas as etapas afetam fortemente a evolução microestrutural e formação de fase cristalina, que por sua vez determinam o desempenho dos corpos sinterizados.

Pereira *et al.* (2006) realizaram estudos com diversos resíduos industriais e subprodutos naturais com base em SiO_2 - Al_2O_3 - CaO , destinados à produção de materiais cerâmicos de interesse industrial. Resultados mostraram que a combinação de diversos resíduos industriais e procedimentos corretos é uma forma promissora para a produção de refratários e materiais do tipo cimento.

Outros estudos realizados utilizando a alumina obtiveram bons resultados como composto principal em tijolos refratários (RIBEIRO *et al.* 2002; TULYAGANOV *et al.* 2002; FERREIRA e OLHERO, 2002).

Gomes (2005) desenvolveu e caracterizou pigmentos cerâmicos baseados em alumina e mulita obtidos a partir de lama de anodização de alumínio.

Colonetti (2014) estudou tintas inorgânicas de cura fosfática a partir de resíduos de anodização de alumínio, no qual o hidróxido de alumínio apresentou boa reatividade, sendo possível produzir o ligante mono alumínio fosfato.

2.3 RESÍDUO DE CONCRETO (RC)

O resíduo de concreto (RC) é um subproduto obtido do beneficiamento de detritos gerados a partir da construção, demolição, reformas e reparos de edificações, composto, segundo a NBR15116 (NBR, 2004), de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland de rochas naturais. Algumas vezes, quando não há um controle tecnológico nas edificações que geram o resíduo, esse pode vir contaminado com matéria orgânica, terra.

No topo da cadeia de produção e geração de resíduos sólidos se encontram os resíduos da construção e demolição (RCD). Diferentes autores investigam sobre essa alta geração, que atinge de 30% a 40% do total de resíduos gerados em todo o planeta (AKHTAR e SARMAH, 2018; ISLAM, *et al.* 2019). Esse alto valor se dá pela urbanização acelerada das cidades, falta de planejamento, controle e fiscalização nas obras (JIN *et al.* 2017).

A *Environmental Protection Agency's (EPA)* mostrou que no ano de 2014, foram gerados cerca de 548 milhões de toneladas de RCC nos Estados Unidos da América e deste número, 70% era composto por concreto, 15% de concreto asfáltico, 7% produtos de madeira, 3% de telhas asfálticas, 2% de tijolos e telhas de barro, 2% de *drywall* e gessos e 1% de aço (EPA, 2016).

Também, o RCD está entre os maiores resíduos sólidos gerados na União Europeia, estimado em 25 a 30% do total de resíduos sólidos (SORMUNEN e KÄRKI, 2019). No entanto, a taxa de reciclagem na União Europeia em 2018 foi de aproximadamente 46% (EUROPEAN COMMISSION, 2018).

Por outro lado, nos países em desenvolvimento, ainda há um atraso na reciclagem e reutilização de RCD (DUAN *et al.* 2019; HUANG *et al.* 2018). A justificativa pode se dar pela ausência de instalações de processamento com capacidades adequadas, falta de tecnologias de reciclagem, incentivo em políticas públicas, etc.

Os países em desenvolvimento, incluindo a Índia e a China, produziram a maior quantidade de RCDs no mundo (LU, 2014). Entre esses, a China contribui com aproximadamente 3 bilhões de toneladas devido a seus programas de urbanização e renovação urbana em larga escala (ZHENG *et al.* 2017). Essa grande quantidade de RCD não só afetam negativamente o meio ambiente, mas também ocupam um grande volume em aterros.

Componentes típicos no RCD são materiais inertes, tais como concretos, argamassas e cerâmicas, provaram ser um substituto para os agregados naturais (FATEMI e IMANINASAB, 2016; AL-FAKIH *et al.* 2019).

Cada vez mais a geração de resíduos vem aumentando, muitos pesquisadores investigam sobre a utilização do RCD em diferentes materiais. Neste sentido, Xuan *et al.* (2018) discutem estratégias para o aproveitamento de resíduos de concreto, tais como: aproveitamento do resíduo em artefatos de concreto (não estrutural); reaproveitamento em novas misturas de concreto com ou sem aditivos químicos; reciclagem do resíduo de concreto como agregados e recuperação por um processo mecânico de lavagem para resgate do agregado natural e da água cinzenta.

As atuais metodologias utilizadas para reciclar concreto fresco são caracterizadas por sua complexidade, custos mais altos e maior tempo de trabalho, além de promover uma série de questões ambientais (TANG *et al.* 2017).

Liang *et al.* (2014) desenvolveram três diferentes traços de concreto utilizando agregados reciclados, variando métodos de pré-tratamento da superfície para melhorar a resistência à compressão. Os resultados experimentais mostraram que o pré-tratamento de superfície pode melhorar a qualidade do concreto. A resistência à compressão de um concreto com 100% de agregado graúdo reciclado atingiu 43,3 MPa em 28 dias.

Brand *et al.* (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 revelaram que as propriedades de resistência

melhoraram quando os agregados reciclados foram, pelo menos, parcialmente saturados.

Mukharjee e Barai (2014) investigaram as características da zona de transição de concretos contendo agregados reciclados e nano-sílica. Para isso, foram dosados concretos com agregados naturais e reciclados com ou sem nano-sílica. Os resultados evidenciaram que a substituição completa de agregados graúdos naturais pelos reciclados diminuem a resistência característica à compressão do concreto. Isso poderia ser atribuído à inferior qualidade dos agregados reciclados. No entanto, a incorporação de nano-sílica faz com que haja redução da porosidade na zona de transição, aumentando a resistência do concreto.

Courard *et al.* (2010) pesquisaram sobre a substituição de agregados naturais por agregados reciclados em concretos compactados a rolo. Os resultados mostraram que o concreto com agregado reciclado apresentou bom desempenho mecânico.

Pasandín e Pérez (2014) incorporaram resíduos de concreto em uma mistura de asfalto 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 as propriedades mecânicas foram semelhantes aos obtidos para misturas convencionais.

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 todas apresentaram resultados satisfatórios.

Em pavimentação, o RCD é considerado um agregado alternativo, normalmente utilizados em base ou sub-bases granulares, seja elas de pavimento flexível ou rígido (CARDOSO *et al.* 2016; SHI *et al.* 2019, GU *et al.* 2019).

Bassani *et al.* (2019) utilizaram diferentes subprodutos (cinzas volantes, poeira de fornos de cimento) como ligantes alternativos para a estabilização de bases e sub-bases utilizando agregados de resíduos de concreto, o apresentou resultados positivos para a construção de camadas de pavimentos.

O processo de produção de cimento Portland e extração de agregados naturais resulta em significativos impactos ambientais. Em particular, fabricação de cimento Portland libera grandes quantidades dióxido de carbono na atmosfera. Ghataora *et al.* (2004), afirmam que para a produção de uma tonelada de cimento Portland é emitido cerca de 1 tonelada de dióxido de carbono. O dióxido de carbono é o principal

contribuinte para as emissões de gases de efeito estufa que estão agravando o aquecimento global. Segundo Oliver *et al.* (2012), a produção de cimento representa cerca de 8% 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, comparado com o agregado reciclado (LIMBACHIYA, MEDDAH e OUCHAGOUR, 2012; UTAMA *et al.* 2012; RAMESH, PRAKASH e SHUKLA, 2010). Portanto, a utilização do resíduo de concreto representa uma redução significativa na emissão de CO₂.

Outro problema é a saturação de aterros sanitários 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 se argumente que as operações de reciclagem também geram problemas ambientais devido ao meio de transporte e processos de reciclagem (SARAIVA, BORGES e FILHO, 2012).

2.4 RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA CAL (RPC)

Para Petti (1976), as rochas carbonatadas ou calcários são rochas constituídas, basicamente, por minerais de carbonato de cálcio (CaCO₃) denominados calcita e/ou aragonita. Esses minerais, combinados com o carbonato de magnésio (MgCO₃), 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 cujas propriedades são governadas pelo carbonato de cálcio (CaCO₃) que têm boa resistência mecânica e média durabilidade.

A produção da cal é uma grande fonte de emissões de CO₂. A cal produzida 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 CO₂ (gás carbônico) (SLOTTE; ROMÃO; ZEVENHOVEN, 2013). O calor necessário para a reação de calcinação é gerado através da combustão, sendo sua reação representada na Equação 1.



De acordo com Guimarães (2002), o processo de transformação dos blocos de rochas calcárias em componentes 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 disposição e granulométrica, além da distribuição e carga do calor ao longo das zonas de aquecimento e calcinação, é frequente encontrar no material 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 de fornos (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, constituídos, essencialmente, de elementos não calcários como: Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, entre outros, em quantidade total superior a 12%, classificação esta dada pela NBR 6453 (ABNT, 2003), e por isso se designam resíduos da produção da cal.

Os resíduos da produção da cal utilizados neste trabalho são provenientes da má calcinação; sua escolha foi fundamentada em três itens: suas propriedades aglomerantes, sua disponibilidade em grande quantidade e pela minimização de impactos junto ao meio ambiente.

A cal virgem provém de rochas carbonatadas puras, caracterizada por uma coloração branca, podendo ainda ser creme, amarelada e levemente cinza, o que pode indicar a presença de impurezas (GUIMARÃES, 2002).

De acordo com Cincotto (1977), as principais variáveis que influenciam na qualidade da cal são: qualidade da matéria prima (características físicas e químicas), tamanho e distribuição granulométrica da pedra, 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.

A cal possui propriedades de reagente químico ligante devido às inúmeras funções químicas e físico-químicas, tendo como função principal provocar a ligação eficiente e duradoura, de blocos construtivos naturais ou artificiais (GUIMARÃES, 2002).

Segundo o Mineral Industry Surveys (2018), os maiores produtores mundiais de cal são: 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.

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. A cal também é empregada 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, a cal é fundamental 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 clinquerização para a conservação de energia térmica e otimização da produção (BHATTY e GAJDA, 2004).

Outras aplicações para o resíduo da produção de cal também estão sendo estudadas:

Stroeven *et al.* (2001) 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.* (2004) aplicaram o resíduo da produção de cal como matéria-prima em pavimentos de concreto e verificaram que as misturas atenderam as exigências mínimas.

Mohammed *et al.* (1992) pesquisaram sobre a utilização do resíduo da produção de cal como um material de enchimento em misturas de pavimentação asfálticas.

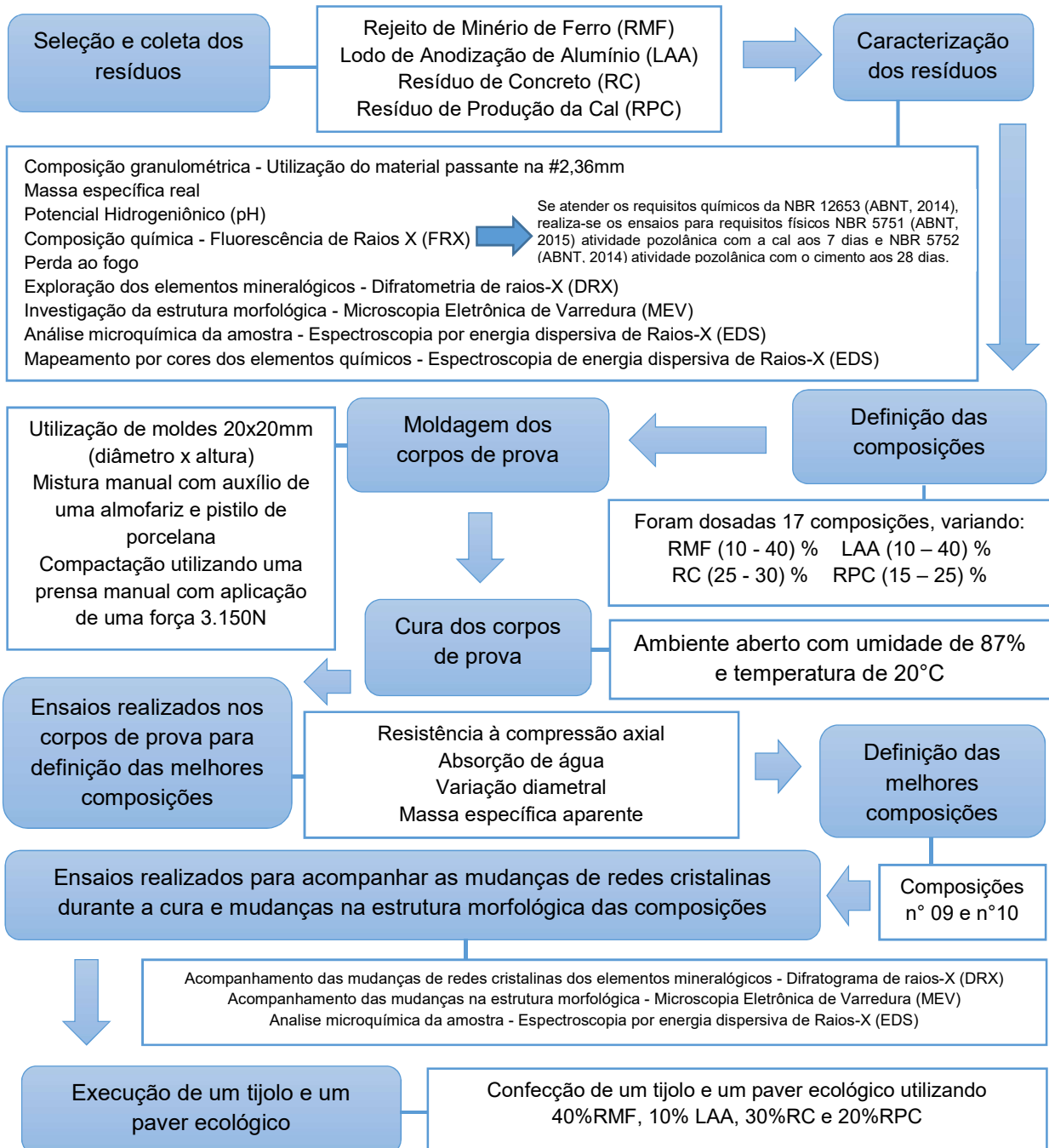
Do, Mun e Keun (2007) estudaram as características do resíduo da produção de cal (subproduto da produção de carbonato de sódio - Na_2CO_3) incorporado ao concreto asfáltico. Os resultados demonstraram que houve melhora nas características de deformação permanente, rigidez e resistência à fadiga do concreto asfáltico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram descritos os procedimentos adotados para a realização do trabalho, com o intuito de desenvolver novos compósitos a partir dos resíduos industriais já citados.

A Figura 1 apresenta todas as etapas do trabalho, desde a escolha dos resíduos até os procedimentos para confecção de um tijolo e um paver ecológico.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia de trabalho



Fonte: Autoria própria (2020)

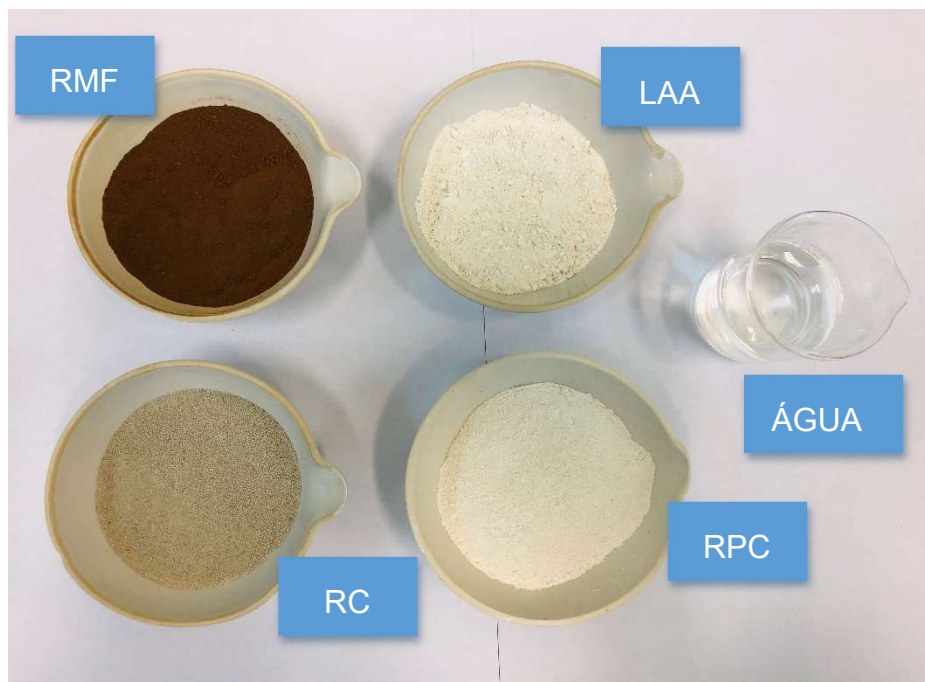
3.1 SELEÇÃO E COLETA DOS RESÍDUOS

A seleção dos resíduos se fundamentou no princípio de que os aglomerantes reagem em ambiente alcalino, logo a escolha de resíduos com pH alto proporcionaria um ambiente propício para que houvesse reação químicas. A utilização de resíduos de concreto e resíduos da produção da cal, se faz necessária, visto que nestes podem haver resquícios de materiais aglomerante e outros subprodutos industriais, que se classifiquem como pozolanas. Inicialmente, foram realizados ensaios de potencial hidrogeniônico e todos os resíduos selecionados obtiveram pH alcalino. Além disso os resíduos foram classificados conforme a norma NBR 12653 (ABNT, 2014) quanto as exigências químicas, que determina se o material se enquadra na Classe N, ou seja, em materiais pozolânicos, para isso utilizou-se o método de FRX, adaptando a NBR 12653 (ABNT, 2014), e para os requisitos físicos foi realizado os ensaios de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias e com o cimento aos 28 dias.

De acordo com NBR 12653 (ABNT, 2014) cataloga-se em Classe N quaisquer pozolanas naturais e artificiais, sendo as naturais de origem vulcânica ou sedimentar e as artificiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais.

A Figura 2 indica os materiais utilizados na pesquisa.

Figura 2 - Materiais utilizados na confecção dos compósitos



Fonte: Autoria própria (2020)

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) as pozolanas são definidas como material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante mas, numa forma finamente pulverizada e na presença de umidade, reage quimicamente com o Ca(OH)_2 a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes. Por esse motivo, deliberou-se a utilização de resíduos passantes na peneira de #2,36mm, facilitando desta maneira o poder aglomerante de cada insumo.

O RMF foi coletado nas proximidades de um dos maiores desastres ambientais irreparáveis do Brasil, sendo ele o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em que aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de RMF vazaram e atingiram o Rio Doce. Na Figura 3 é possível observar o local em que foi coletado o RMF.

Figura 3 - Coleta do RMF da Barragem de Fundão - Mariana/MG



Fonte: Autoria própria (2020)

O RMF foi coletado a uma profundidade de 50cm com objetivo de retirar a camada eventualmente contaminada com impureza.

O LAA foi coletado em uma empresa de anodização de alumínio localizada na Região Metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. O lodo é proveniente do tanque de fosqueamento, em que as possibilidades de se obter o resíduo alcalino são maiores.

O RC é proveniente de uma usina de reciclagem de resíduos de concreto localizada em Curitiba, Paraná, Brasil, que tem capacidade de processamento instalada de 6.000m³/mês. A usina processa apenas os resíduos cimentícios, podendo ser eles sobras de usinas de concretagem, elementos estruturais em concreto ou provenientes de artefatos de concreto, tais como blocos, lajotas, etc.

O RPC foi coletado em uma indústria de cal localizada na Região Metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Para a caracterização e moldagem dos compósitos, todos os resíduos foram secos em estufa em temperatura de $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Após, foi realizado o destorroamento manual do material com o auxílio de um almofariz e pistilo de porcelana, com o objetivo de cominuir os torrões eventualmente existentes na amostra. Esse procedimento pode ser verificado na Figura 4, com o rejeito de minério de ferro.

Figura 4 - Cominuição do RMF



Fonte: Autoria própria (2020)

3.2.1 Composição granulométrica

Para a determinação da composição granulométrica dos resíduos foi utilizado os procedimentos descritos na NBR 248 (ABNT 2003), em que se utilizou as peneiras da série normal: 2,36mm, 1,18mm, 600 μ m, 300 μ m, 150 μ m e fundo. As peneiras foram previamente limpas e encaixadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, de maneira a formar um conjunto único. O material foi separado em duas amostras de 300g cada, estas foram colocadas no conjunto de peneiras e agitado manualmente em cada peneira por aproximadamente 3 minutos. Em seguida, foi determinado a massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. Na Figura 5, é possível observar o jogo de peneiras utilizado para a realização do ensaio.

Figura 5 - Jogo de peneiras utilizado para realização do ensaio de granulometria



Fonte: Autoria própria (2020)

3.2.2 Massa específica real

Para a determinação da massa específica de cada um dos resíduos foi utilizado a norma NBR 16605 (ABNT, 2017). Primeiramente, o frasco de *Le Chatelier* foi preenchido com um reagente (querosene) entre as marcas de zero e 1cm^3 . Após, o conjunto foi colocado em um banho termorregulador com água em temperatura ambiente por 30 minutos com o objetivo de equalizar as temperaturas dos líquidos do frasco e do banho, após esse procedimento foi realizada a primeira leitura (V_1). Em seguida, foi introduzido em pequenas porções, aproximadamente, 65g do resíduo no frasco, de forma que o deslocamento do reagente ficasse entre as marcas de 18cm^3 e 24cm^3 . Realizou-se suaves movimentos circulares de forma a eliminar possíveis bolhas existentes na massa, em seguida o frasco foi tampado e colocado novamente no banho termorregulador com água em temperatura ambiente por 30 minutos e registrou-se nova leitura (V_2). A Figura 6 demonstra o ensaio de massa específica realizado no RMF utilizando o frasco de *Le Chatelier*.

Figura 6 - Determinação da massa específica real do RMF



Fonte: Autoria própria (2020)

A massa específica real dos resíduos foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

onde:

ρ é a massa específica do resíduo ensaiado, em g/cm³;

m é a massa do resíduo ensaiado, em g;

V é o volume deslocado pela massa do resíduo ensaiado ($V_2 - V_1$), em cm³.

3.2.3 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Foi utilizado um peagômetro, aparelho que mede a condutividade elétrica de uma solução e possui uma escala já graduada em valores de pH. O pH expressa o "potencial Hidrogeniônico", uma escala logarítmica que mede o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma determinada solução. Na Figura 7, pode-se observar a realização do ensaio utilizando o RMF.

Figura 7 - Medição do pH do RMF



Fonte: Autoria própria (2020)

Inicialmente, os resíduos foram secos e peneirados na peneira passante na #2,36mm, em seguida foram dissolvidos em água destilada, em solução de 10%, e a leitura no peagâmetro foi realizada em função da leitura da tensão, em milivolts, que o eletrodo gera quando submerso na amostra. A intensidade da tensão medida é convertida para uma escala de pH. A escala de pH compreende valores entre 0 e 14 na temperatura de 25°C, sendo que o 7 é considerado o valor neutro, valores menores que 7 corresponde a acidez e maiores que 7 alcalinidade.

3.2.4 Composição química por Fluorescência de Raios X

Foi utilizado o método de Fluorescência de Raio X (FRX), técnica não destrutiva, para determinação da composição química de cada resíduo. Desta maneira foi possível classificar os resíduos quanto a sua atividade pozolânica ou não, além disso foi possível identificar a existência ou não de metais pesados. Assim, as amostras foram secas em estufa por aproximadamente 2 horas em temperatura de 50°C. Em seguida, o resíduo foi peneirado e moído com objetivo de transforma-lo em uma mistura homogenia com granulometria de #325 mesh. A moagem foi realizada com o auxílio de uma panela de carboneto de tungstênio, que pode ser observada na Figura 8, juntamente com o RPC.

Figura 8 - Panela de carboneto de tungstênio



Fonte: Autoria própria (2020)

Utilizou-se a panela confeccionada de carboneto de tungstênio para evitar contaminação com outros elementos químicos presentes na amostra, a panela permaneceu no moinho pulverizador por aproximadamente um minuto. Em seguida foi moldado uma pastilha com cerca de 7gramas da amostra do resíduo e 1,4gramas de cera orgânica. Este composto foi homogeneizado e prensado. Usou-se como base o ácido bórico, com o intuito de não danificar a pastilha na desforma da amostra. As leituras das amostras foram realizadas com o auxílio do equipamento *Axios* da marca *Malvern Panalytical*, no laboratório de Minerais e Rochas da UFPR.

Após a realização das leituras, caso a análise realizada em cada resíduo, quanto à suas atividades pozolânicas ou não, atendesse os requisitos químicos indicados pela NBR 12653 (ABNT, 2014), realiza-se as análises de características físicas indicadas pela NBR 5751 (ABNT, 2015) que determina a atividade pozolânica com a cal aos 7 dias e a NBR 5752 (ABNT, 2014) que indica o índice de desempenho do material pozolânico com cimento Portland aos 28 dias. Caso não atendesse aos requisitos químicos indicados pela NBR 12653 (ABNT, 2014) o resíduo é classificado como não pozolânico.

3.2.5 Atividade pozolânica com a cal aos 7 dias

Esse ensaio foi realizado apenas com o RMF, visto que foi o único que atendeu aos requisitos químicos indicados pela NBR 12653 (ABNT, 2014), quanto à sua atividade pozolânica. Para a determinação da atividade pozolânica do RMF com a cal aos 7 dias foi utilizado os procedimentos indicados na NBR 5751 (ABNT, 2015). Para a moldagem de três corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, utilizou-se, em massa, 104g de hidróxido de cálcio, 310,4g de RMF, 936g de agregado miúdo natural e 200g de água. A argamassa foi preparada em argamassadeira mecânica, seguindo as especificações da NBR7215 (ABNT, 2019). Inicialmente foi colocado na cuba toda a quantidade de água e adicionando o hidróxido de cálcio e o RMF e misturado esses materiais em velocidade baixa, durante 30s. Após este tempo, e sem paralisar a operação de mistura, iniciou-se a colocação do agregado miúdo, com o cuidado de que todo o material fosse colocado gradualmente durante o tempo de 30s. Imediatamente após o término da colocação do agregado miúdo, mudou-se para a velocidade alta, misturando-se os materiais nesta velocidade durante 30s. Após este tempo, desligou-se o misturador durante 1 min e 30s, nos

primeiros 30s, retirou-se, com auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e que não foi suficientemente misturada, durante o tempo restante (60s), a argamassa ficou em repouso na cuba, coberta com pano limpo e úmido. Por fim, ligou-se o misturador na velocidade alta, por mais 1 min. Na Figura 9, é possível observar a argamassadeira utilizada no processo.

Figura 9 - Argamassadeira mecânica utilizada para das argamassas



Fonte: Autoria própria (2020)

O ensaio para determinação do índice de consistência foi realizado conforme a as especificações da NBR7215 (ABNT, 2019). Primeiramente foi limpo e seco o tampo da mesa para índice de consistência e a parede do molde troncônico. Em seguida da preparação da argamassa, o molde foi centralizado sobre a mesa e preenchido com 3 camadas de alturas iguais, com respectivamente, 15, 10 e 5 golpes. Após, foi realizado o rasamento do topo com movimentos curtos e foi acionado manualmente a manivela 30 vezes (subida e descida) em 30 segundos. Por fim, realizou-se 3 medições do espalhamento da argamassa sobre o tampo, com paquímetro, em pontos distribuídos ao longo do diâmetro, sendo o índice de espalhamento à média das três medições. A NBR 5751 (ABNT, 2015) recomenda um índice de consistência de 225 ± 5 mm, que pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Índice de consistência medido na argamassa com RMF



Fonte: Autoria própria (2020)

Imediatamente após a confecção da argamassa, conforme recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019), foram moldados três corpos de prova. Primeiramente foi passado desmoldante nos moldes cilíndricos, com a finalidade de facilitar o desmolde no final do processo. A colocação da argamassa nas fôrmas cilíndricas foi realizada com o auxílio de uma espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, com cada camada recebendo 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos com o soquete normal. Em seguida os corpos de prova foram rasados e identificados.

A cura dos corpos de prova foi realizada por 7 dias, conforme orientação da NBR 5751 (ABNT, 2015), sendo as primeiras 24 horas em ambiente à temperatura de 23°C e as próximas 144 horas em temperatura de 55°C. Para garantir a temperatura de 50°C os corpos de prova foram mantidos dentro dos moldes em uma estufa, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Cura dos corpos de prova à temperatura de 55°C por 6 dias



Fonte: Autoria própria (2020)

Por fim foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova com velocidade de carregamento de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

Conforme requisitos físicos da 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.

3.2.6 Índice de desempenho pozolânico com o cimento Portland aos 28 dias

Esse ensaio foi realizado apenas para o RMF, visto que foi o único que atendeu aos requisitos químicos indicados pela NBR 12653 (ABNT, 2014), quanto à sua atividade pozolânica. Para a determinação do índice de desempenho pozolânico do RMF com cimento Portland aos 28 dias foi utilizado os procedimentos indicados na NBR 5752 (ABNT, 2014). Foram executados dois traços de argamassas utilizando os mesmos processos já indicados pela NBR 7215 (ABNT, 2019) no item anterior, sendo o primeiro traço uma argamassa de referência com 100% de cimento (624g de cimento, 1872g de agregado miúdo e 300g de água) e um segundo traço com substituição de 25% de RMF sob a quantidade de cimento (468g de cimento, 156g de

RMF, 1872g de agregado miúdo e 300g de água). Para as duas argamassas realizou-se o ensaio de índice de consistência e a moldagem de corpos de prova para verificação da resistência à compressão axial. Na Figura 12 observa-se os corpos de prova moldados para cada traço, sendo argamassa padrão (100% de cimento) na parte superior e a argamassa com RMF (75% de cimento e 25% de RMF) na parte inferior da imagem.

Figura 12 - Verificação do índice de desempenho da pozolana aos 28 dias



Fonte: Autoria própria (2020)

Os corpos de prova, ainda nos moldes, foram colocados em câmara úmida, onde permaneceram por 24 h. Após esse período inicial de cura, os corpos de prova foram desmoldados e imerso em água saturada de cal, onde permaneceram até a data de ruptura.

O ensaio de resistência à compressão axial nos corpos de prova foi realizados aos 28 dias de cura e utilizou-se a velocidade de carregamento de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

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%, em relação a argamassa padrão (100% cimento).

3.2.7 Perda ao fogo

Para a determinação da perda ao fogo (PF) dos resíduos foi utilizado o Método nº1 - Determinação direta – Método de referência da NM 18 (ABNT, 2012). Para a realização do ensaio de PF foram pesados 2g do resíduo em um cadinho de massa conhecida e o conjunto foi colocado em um forno mufla à temperatura de 1000°C, por um período de 2 horas. Em seguida, o conjunto é pesado novamente e a diferença de massa é o material volátil presente na amostra, geralmente H₂O ou CO₂. Na Figura 13 observar-se o forno mufla utilizado no ensaio.

Figura 13 - Forno mufla utilizado para ensaio de PF dos resíduos



Fonte: Autoria própria (2020)

3.2.8 Exploração dos elementos mineralógicos por Difractometria de raios-X (DRX)

A Difractometria de Raios-X (DRX) corresponde a uma das principais técnicas de caracterização da microestrutura dos materiais pelas substâncias cristalinas. A identificação dos picos presentes no difratograma, por comparação com bancos de dados específicos, permite a avaliação sobre o quanto uma amostra possui

características amorfa ou cristalina. Para a realização deste ensaio os resíduos foram secos em estufa por aproximadamente 2 horas em temperatura de 50°C. Posteriormente, os resíduos foram peneirados e moídos com objetivo de transformá-los em uma mistura homogênea com granulometria de #325 mesh. A moagem foi realizada com o auxílio de uma panela de carboneto de tungstênio que permaneceu no moinho pulverizador por aproximadamente um minuto. Em seguida a amostra é colocada diretamente no porta amostra tipo *spinner* que é o suporte do equipamento, a massa utilizada é de aproximadamente 1,5g do material a ser analisado utilizando radiação Cu $K\alpha$ $\lambda=1,54184\text{\AA}$, tensão = 40 kV, corrente = 30 mA, varredura $2\theta= 3,5$ a 70° , tamanho do passo: 0,016 e tempo do passo 10,1s.

3.2.9 Investigação da estrutura morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura

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. Na Figura 14 é possível visualizar a preparação da amostra nos stubs para serem posteriormente metalizadas.

Figura 14 - Fixação das amostras nos stubs para posterior metalização



Fonte: Autoria própria (2020)

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.

3.2.10 Análise microquímica por Espectroscopia por energia dispersiva de Raios-X

Espectrometria de raios-x por dispersão de energia (EDS) é uma análise realizada por um equipamento acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) que permite determinar com precisão a composição química de qualquer material sólido contendo elementos da tabela periódica. Para este ensaio utilizou-se a mesma amostra utilizada no MEV.

3.2.11 Mapeamento por cores dos elementos químicos

O mapeamento dos elementos químicos constatados em uma amostra (MAP), é realizada no equipamento do MEV, em que a identificação dos elementos químicos pode ser visualizada por diferentes cores de cada respectivo mineral encontrado na área analisada. Na pesquisa realizada, o MAP foi executado em todas as amostras de resíduos.

3.3 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

Foram elaboradas 17 composições variando os teores de resíduos, sendo: Rejeito de Minério de Ferro (RMF) de 10 a 40%, Lodo de Anodização de Alumínio (LAA) de 10 a 40%, Resíduo de Concreto (RC) de 25 a 35% e Resíduo de Produção da Cal (RPC) de 15 a 25%, todos em massa. Para cada composição foram compactados 5 corpos de prova para cada idade de ruptura, sendo: 3, 7, 14, 21, 28, 90 e 180, 360 e 720 dias, além de 5 corpos de prova para realização do ensaio de absorção de água aos 28 dias e 5 corpos de prova aos 90 dias, totalizando 55 corpos de prova para cada composição. A Tabela 1 indica a porcentagem de resíduos utilizados para a confecção de cada composição e a relação água/materiais secos utilizada para a moldagem dos corpos de prova.

Tabela 1 - Porcentagem dos resíduos utilizados em cada composição

Composição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
RMF (%)	30	20	40	25	35	30	20	25	10	40	30	20	25	10	40	35	15
LAA (%)	30	40	20	35	25	20	30	25	40	10	20	30	25	40	10	15	35
RC (%)	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	25	25	25	25	25	25	25
RPC (%)	15	15	15	15	15	20	20	20	20	20	25	25	25	25	25	25	25
Água / materiais secos	0,22	0,24	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24	0,22	0,24	0,22	0,22	0,23	0,24	0,23	0,22	0,22	0,23

Fonte: Autoria própria (2020)

A definição das composições e a metodologia utilizada para moldagem dos corpos de prova, tomaram como princípio os trabalhos realizados por: Mymrin *et al.* (2007); Mymrin *et al.* (2014) e Mymrin *et al.*, (2019).

3.4 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Foram utilizados para o experimento moldes metálicos cilíndricos medindo 20 mm de altura por 20 mm de diâmetro, visando à utilização de menos resíduos por experimento.

As composições foram dosadas e a homogeneização dos resíduos foi executada manualmente com o auxílio de um almofariz e pistilo de porcelana e hidratadas com água potável. A massa para a confecção de cada corpo de prova foi pesada em balança eletrônica, com precisão $\pm 0,01g$, de acordo com cada composição previamente definida.

A compactação dos corpos de prova foi realizada manualmente, em uma camada única, com o auxílio de uma prensa manual com aplicação de uma força 3.150N., com tempo de permanência desta força por 30 segundos.

A cura dos corpos de prova foi realizada em ambiente aberto com umidade ambiente, aproximada, de 87% e temperatura ambiente, aproximada, de 20°C. Foi escolhido esse tipo de cura, pois os resquícios de hidróxido de cálcio presente na RPC é considerado um aglomerante aéreo, ou seja é necessário a evaporação da água presente na mistura e a penetração do gás carbônico do ar atmosférico, para que haja o ganho de resistência.

Na Figura 15 é possível visualizar as 17 composições executadas, cada qual com suas respectivas quantidades de resíduos.

Figura 15 - 17 composições executadas na pesquisa



Fonte: Autoria própria (2020)

Os corpos de prova foram curados e para cada idade pré estabelecida foi realizado ensaio de resistência à compressão axial, absorção de água, determinação da variação dimensional e massa específica aparente.

3.5 ANÁLISES DAS COMPOSIÇÕES

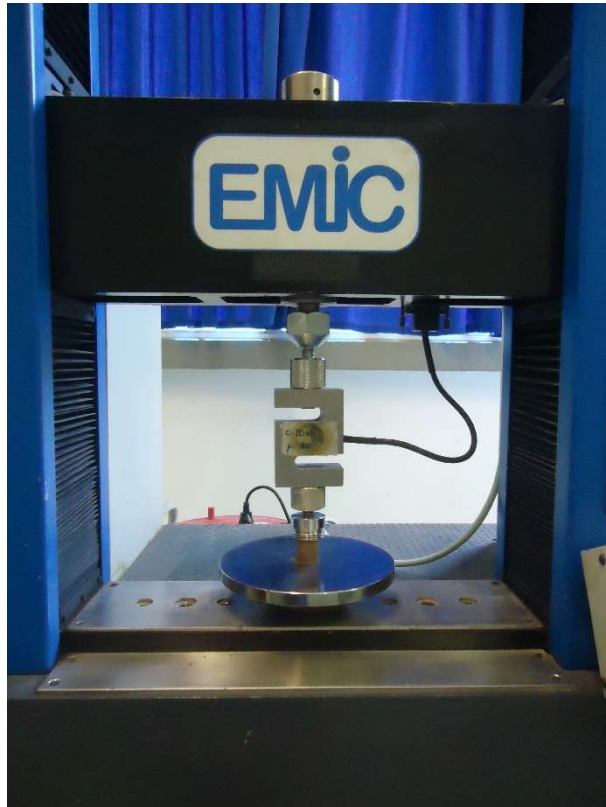
Após a moldagem de todos os corpos de prova, foram definidos alguns ensaios para a seleção das melhores composições, sendo:

3.5.1 Resistência à compressão axial

Após os períodos de cura de 3, 7, 14, 21, 28, 90 e 180, 360 e 720 dias, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial. Os corpos de prova produzidos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial através de uma prensa mecânica de acordo com parâmetros determinados na NBR 5739 (ABNT, 2018).

A carga de ensaio foi aplicada continuamente e sem choques, durante todo o ensaio, com velocidade de carregamento de 0,15 MPa/s. Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados no laboratório de materiais da UTFPR - Ecoville, utilizando a prensa EMIC modelo DL10000N. Na Figura 16 é possível verificar o rompimento de um corpo de prova.

Figura 16 - Ensaio de resistência à compressão axial da composição 10



Fonte: Autoria própria (2020)

3.5.2 Absorção de água

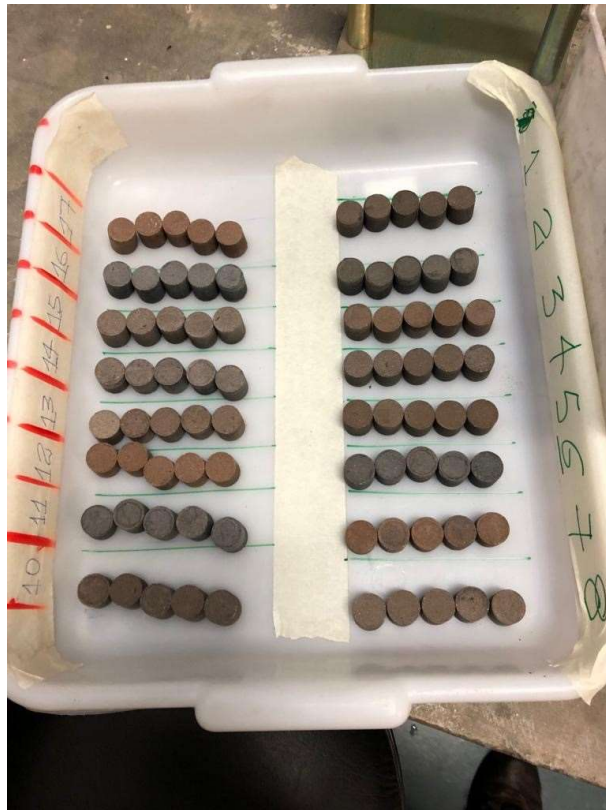
Para determinação da absorção de água nos corpos de prova foi seguida as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2009), a qual determina o percentual de água absorvida pelo corpo de prova em um período de 24 horas à temperatura ambiente. A absorção de água pelos corpos de prova é determinada conforme Equação 3.

$$AA = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde, AA é a absorção de água pelo corpo de prova (%), M_{sss} massa do corpo de prova saturado superfície seca (g) e M_s massa seca (g).

O ensaio procede da seguinte maneira: foram selecionados 5 corpos de provas, com idades de 28 e 90 dias, e os mesmos foram levados a estufa à temperatura de 110°C, após 24 horas, e constância de massa, foi determinado a massa de cada corpo de prova (M_s). Em seguida, os corpos de prova foram resfriados naturalmente (em contato com o ar) e imergidos em água à temperatura 23°C, por 24h, em seguida os corpos de prova foram retirados da água e pesados em condição de saturado com superfície seca, que é obtida drenando o corpo de prova durante 60s e removendo a água superficial visível com um pano úmido, anotando a sua massa saturada (M_{sss}). Na Figura 17 é possível visualizar os corpos de prova após retirados da água:

Figura 17 - Ensaio de absorção de água nos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2020)

3.5.3 Variação dimensional

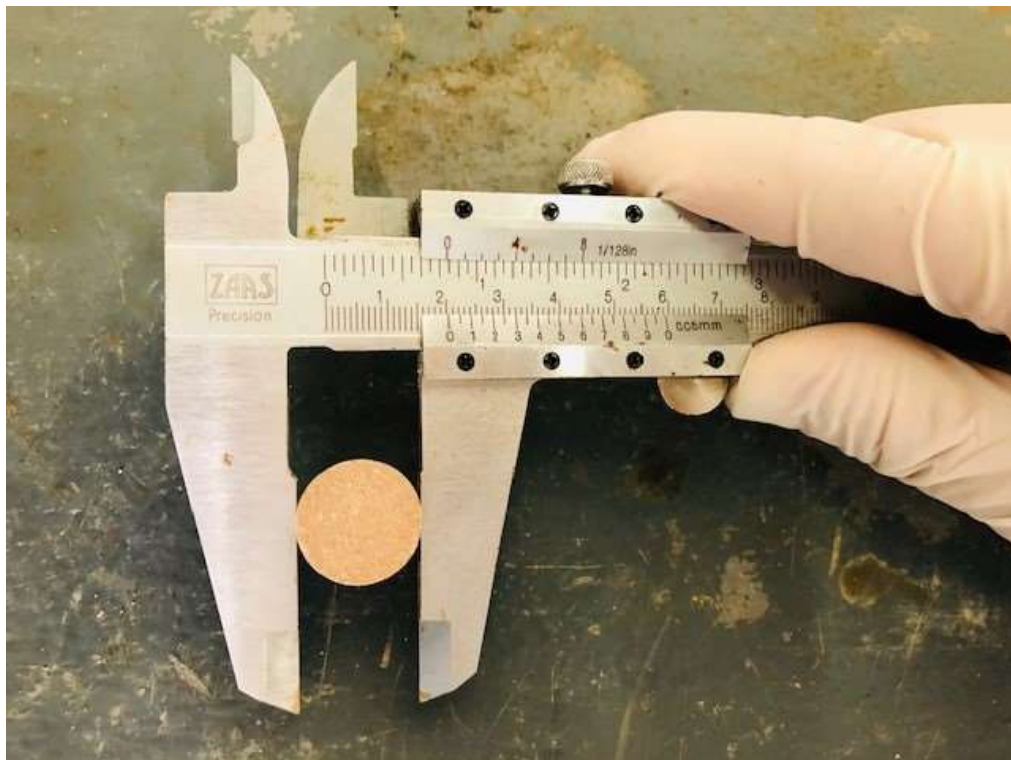
A determinação da variação dimensional (ϵ) foi utilizada para verificar a expansão ou retração nos diâmetros das amostras durante seus períodos de cura,

para isso adaptou-se as recomendações da NBR15261 (ABNT, 2005). O diâmetro inicial (l_i) dos corpos de prova foi medido por meio de um paquímetro e, após cada idade de cura, foi submetido à nova medição (l_f). Calculou-se a variação dimensional, conforme a Equação 4.

$$\varepsilon = \frac{(l_f - l_i)}{l_i} \times 100 \quad (4)$$

Na Figura 18 pode-se observar a medição realizada no diâmetro em um corpo de prova na idade de 28 dias.

Figura 18 - Medição do diâmetro em um corpo de prova aos 28 dias de cura



Fonte: Autoria própria (2020)

3.5.4 Massa específica aparente

Massa específica aparente (μ) é uma propriedade física que resulta da divisão da massa compacta de um material, considerando seu volume de vazios, pelo volume que ele ocupa. A massa específica aparente de cada corpo de prova foi calculada através da Equação 5.

$$\mu = \frac{m}{v} \quad (5)$$

Onde, μ : massa específica aparente (g/cm^3), m : massa do corpo de prova (g) e v : volume (cm^3).

Na Figura 19 é possível observar a medição da massa de um dos corpos de prova:

Figura 19 - Medição da massa de um corpo de prova aos 90 dias



Fonte: Autoria própria (2020)

3.6 ENSAIOS PARA ACOMPANHAMENTO DOS PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS COMPOSIÇÕES

3.6.1 Mudanças de redes cristalinas dos elementos mineralógicos por DRX

A difratometria de raios-X foi realizada com o objetivo de acompanhar as mudanças de redes cristalinas dos minerais em diferentes idades de cura dos corpos de prova. Os procedimentos de ensaio foram os mesmos realizados nas matérias-primas, ou seja, nos resíduos RMF, LAA, RC e RPC. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR) da UFPR.

3.6.2 Mudanças na estrutura morfológica por MEV e EDS

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a espectroscopia por energia dispersiva de Raios-X (EDS) foram realizadas com o objetivo de acompanhar as mudanças na estrutura morfológica das composições. Os procedimentos de ensaio foram os mesmos realizados nas matérias-primas, ou seja, nos resíduos RMF, LAA, RC e RPC. Esses ensaios foram realizados no Centro de Microscopia Eletrônica de Varredura da UTFPR.

3.7 EXECUÇÃO DE UM TIJOLO E PAVER ECOLÓGICO

Uma das alternativas para aplicação das composições estudadas foi a execução de um tijolo e um paver ecológico confeccionados com os resíduos da composição 10, sendo eles: 40% de rejeito de minério de ferro, 10% de lodo de anodização de alumínio, 30% de resíduo de concreto e 20% de resíduo da produção da cal. A relação água/ materiais secos também foi mantida. A escolha da composição 10, se deu pelas melhores características físicas e químicas, em comparação as demais composições.

O molde (fôrma) para o tijolo ecológico foi confeccionado em madeira de maneira que ao final obtivesse medidas de 90mm de largura, 57mm de altura e 190mm de comprimento. Para cada tijolo foi utilizado uma massa total de, aproximadamente, 1,2kg de resíduos.

A compactação do tijolo ecológico foi realizada manualmente, em uma camada única, com o auxílio de uma prensa manual com aplicação de uma força 171KN., com tempo de permanência desta força por 60 segundos.

A cura do tijolo ecológico foi realizada em ambiente aberto com umidade ambiente, aproximada, de 87% e temperatura ambiente, aproximada, de 20°C. Foi escolhido esse tipo de cura, pois os resquícios de hidróxido de cálcio presente na RPC é considerado um aglomerante aéreo, ou seja é necessário a evaporação da água presente na mistura e a penetração do gás carbônico do ar atmosférico, para que haja o ganho de resistência.

Na Figura 20 é possível observar a compactação do tijolo ecológico que foi realizada em prensa manual:

Figura 20 - Moldagem do tijolo ecológico



Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 21 é possível averiguar o tijolo ecológico após suas desmoldagem:

Figura 21 - Tijolo ecológico após desmoldagem



Fonte: Autoria própria (2020)

O paver ecológico, com formato conhecido por modelo “ossinho” foi confeccionado em um molde plástico de modo que ao final obtivesse massa superior a 4kg. A moldagem e cura se deu da mesma maneira que o tijolo ecológico. Na Figura 22 é possível contemplar o paver após sua moldagem.

Figura 22 - Paver ecológico



Fonte: Aatoria própria (2020)

Na Figura 23 é possível averiguar o paver ecológico após suas desmoldagem.

Figura 23 - Paver ecológico após desmoldagem



Fonte: Aatoria própria (2020)

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), os pavers se classificam em tipo I, II, III e IV, sendo este classificado em tipo III, peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triedros, etc. com peso superior a 4 kg.

É importante salientar que a moldagem tanto do tijolo como do paver se restringiu a uma unidade de cada devido a dificuldade de se obter o RMF na região de Curitiba/PR.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo foram expostos e analisados os resultados de caracterização dos resíduos utilizados nesta pesquisa: rejeito de minério de ferro, lodo de anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduo da produção da cal. Em seguida, foram apresentados e analisados os ensaios realizados nas 17 composições para a definição das melhores, sendo esses: resistência à compressão axial, absorção de água, determinação da variação dimensional e massa específica aparente das amostras. Após definido das melhores composições, foram acompanhadas as mudanças de redes cristalinas dos minerais durante a cura pelo método de Difração de Raios-X e as mudanças na estrutura morfológica durante a cura através do Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectrometria de Energia Dispersiva.

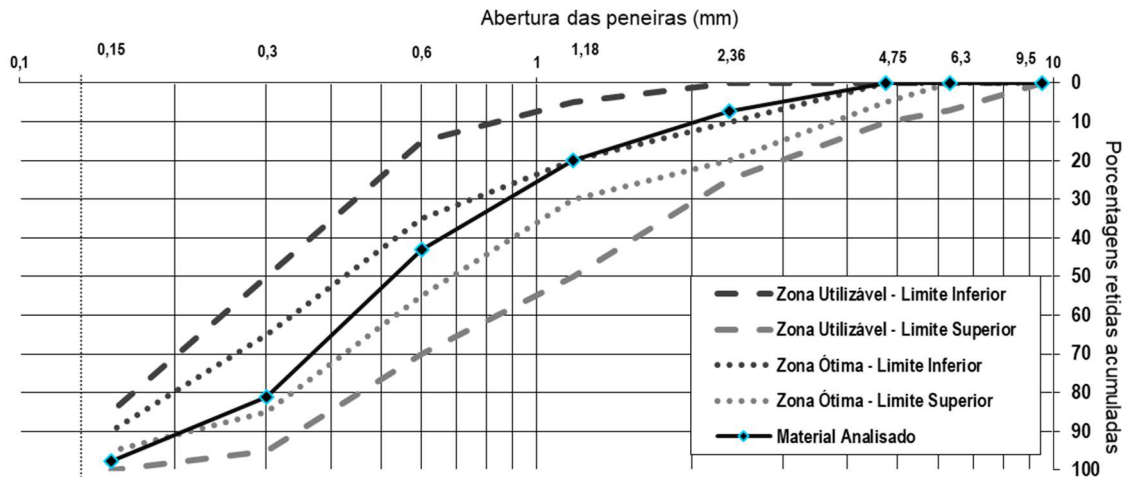
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Para a caracterização dos resíduos foram realizados os seguintes ensaios: determinação da composição granulométrica, determinação da massa específica, determinação do pH, identificação da composição química pelo método de Fluorescência de Raios X (FRX), exploração dos elementos mineralógicos pelo método de Difractometria de raios-X (DRX), investigação da estrutura morfológica pelo método de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), análise microquímica da amostra pelo método de Espectroscopia por energia dispersiva de Raios-X (EDS), mapeamento por cores dos elementos químicos pelo método de Espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X (EDS). Além disso, após a identificação da composição química pelo método de FRX, se o resíduo atendesse os requisitos químicos quanto à atividade pozolânica da NBR 12653 (ABNT, 2014), realizou-se os ensaios para requisitos físicos: atividade pozolânica com a cal aos 7 dias segundo a NBR 5751 (ABNT, 2015) e atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014). Esses dois ensaios foram realizados apenas para o RMF, pois foi o único que atendeu os requisitos químicos da NBR 12653 (ABNT, 2014).

4.1.1 Rejeito de Minério de Ferro (RMF)

A Figura 24 indica a análise granulométrica realizada no RMF:

Figura 24 - Composição granulométrica do RMF



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar na Figura 24 que a distribuição granulométrica do RMF é contínua, mantendo-se dentro da zona ótima.

A massa específica real do RMF determinada foi de $3,298\text{g/cm}^3$, muito semelhante a massa específica real do cimento CII-Z-32, que fica em torno de $2,960\text{g/cm}^3$ e o Ph do RMF foi de 10,07, o que remete a um pH alcalino.

A composição química do RMF, determinada através do método de FRX, é 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
La ₂ O ₃	<0,1
ZnO	<0,1
P.F	3,08

Fonte: Autoria própria (2020)

Observa-se pelos resultados que a amostra é constituída quase em sua totalidade por óxido de ferro (48,1%), dióxido de silício (41,9%) e óxido de alumínio (6,3%). A amostra analisada de RMF atende as condições da NBR 12653 (ABNT, 2014) quanto as exigências químicas, que determina que o somatório das quantidades de Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 deve ser superior a 70% e que a perda ao fogo deve ser no máximo de 10%, para que este material se enquadre na Classe N de materiais pozolânicos.

Desta forma, o RMF atendeu os requisitos químicos quanto à material pozolânico da NBR 12653 (ABNT, 2014), logo, realizou-se os ensaios de caracterização física, sendo eles: atividade pozolânica com a cal aos 7 dias segundo a NBR 5751 (ABNT, 2015) e atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014). O ensaio para determinação do índice de atividade pozolânica é uma maneira direta de aferir o grau de pozolanicidade através da determinação da resistência à compressão simples em argamassas de hidróxido de cálcio e de cimento. Na Tabela 3 pode-se observar os resultados obtidos para as argamassas confeccionadas de hidróxido de cálcio com incorporação de RMF:

Tabela 3 - Atividade pozolânica de argamassas de cal com incorporação do RMF aos 7 dias

Resistência média à compressão axial (MPa)	6,56
--	------

Fonte: Autoria própria (2020)

A NBR 12653 (ABNT, 2014), especifica que a resistência à compressão axial dos corpos de prova deve alcançar, no mínimo, 6,0 MPa aos 7 dias de cura, o que foi atingido pelo ensaio realizado. Isso indica que o RMF pode ser apontado como um material pozolânico.

Na Tabela 4 pode-se observar os resultados obtidos para as argamassas confeccionadas apenas com cimento e cimento com incorporação de RMF:

Tabela 4 - Atividade pozolânica de argamassas de cimento com incorporação do RMF aos 28 dias

Resistência média à compressão axial - 100%cimento (MPa)	8,52
Resistência média à compressão axial - 75%cimento e 25% RMF (MPa)	8,17

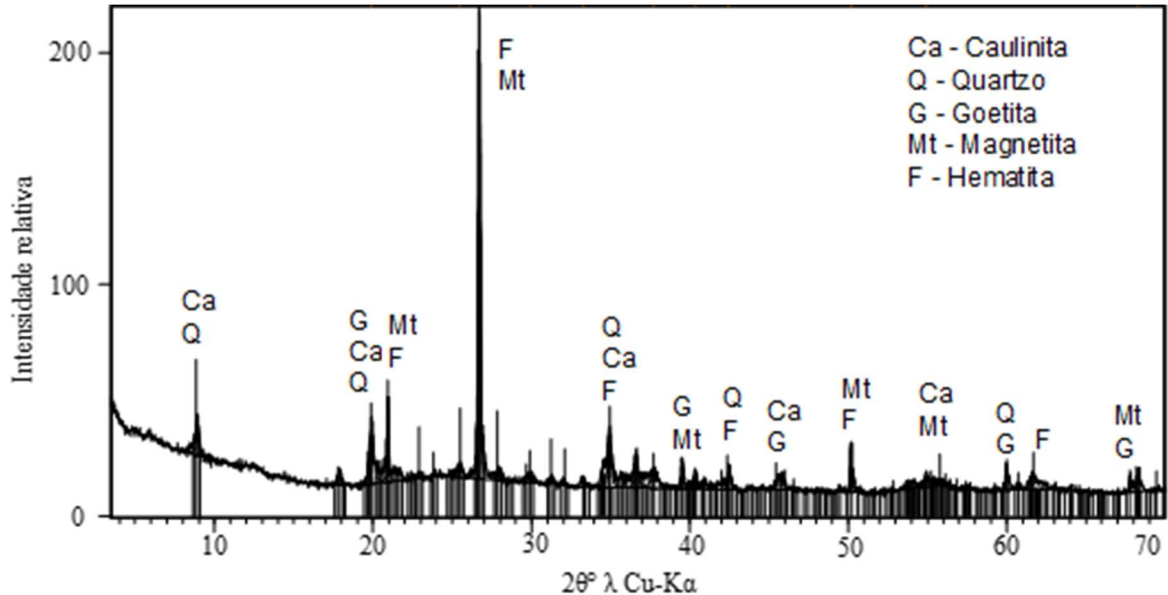
Fonte: Autoria própria (2020)

A NBR 12653 (ABNT, 2014), especifica que o índice de desempenho das argamassas seja maior ou igual à 90%, o que foi atingido pelo ensaio realizado. O

índice de desempenho das argamassas obtido foi de 95,89% o que assinala que o RMF pode ser considerado como um material pozolânico.

O difratograma de raios-X da amostra de RMF é apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Intensidades dos elementos mineralógicos do RMF através do DRX



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se averiguar através do difratograma de raios-X do RMF, que há presente na amostra alguns minerais que comprovam a origem do resíduo, tais como o quartzo presente no solo no processo de beneficiamento na extração do minério de ferro e outros minerais, tais como a hematita e a magnetita, que possuem em sua constituição um expressivo teor de ferro, aproximadamente 70%. Além disso, o conteúdo encontrado de hematita, magnetita, goetita, quartzo e da caulinita, estão de acordo com os resultados da composição química obtida por FRX.

Na Tabela 5, são identificados os minerais encontrados no RMF, através do Difratograma de Raios X:

Tabela 5 - Legenda do Difratograma de Raios X do RMF

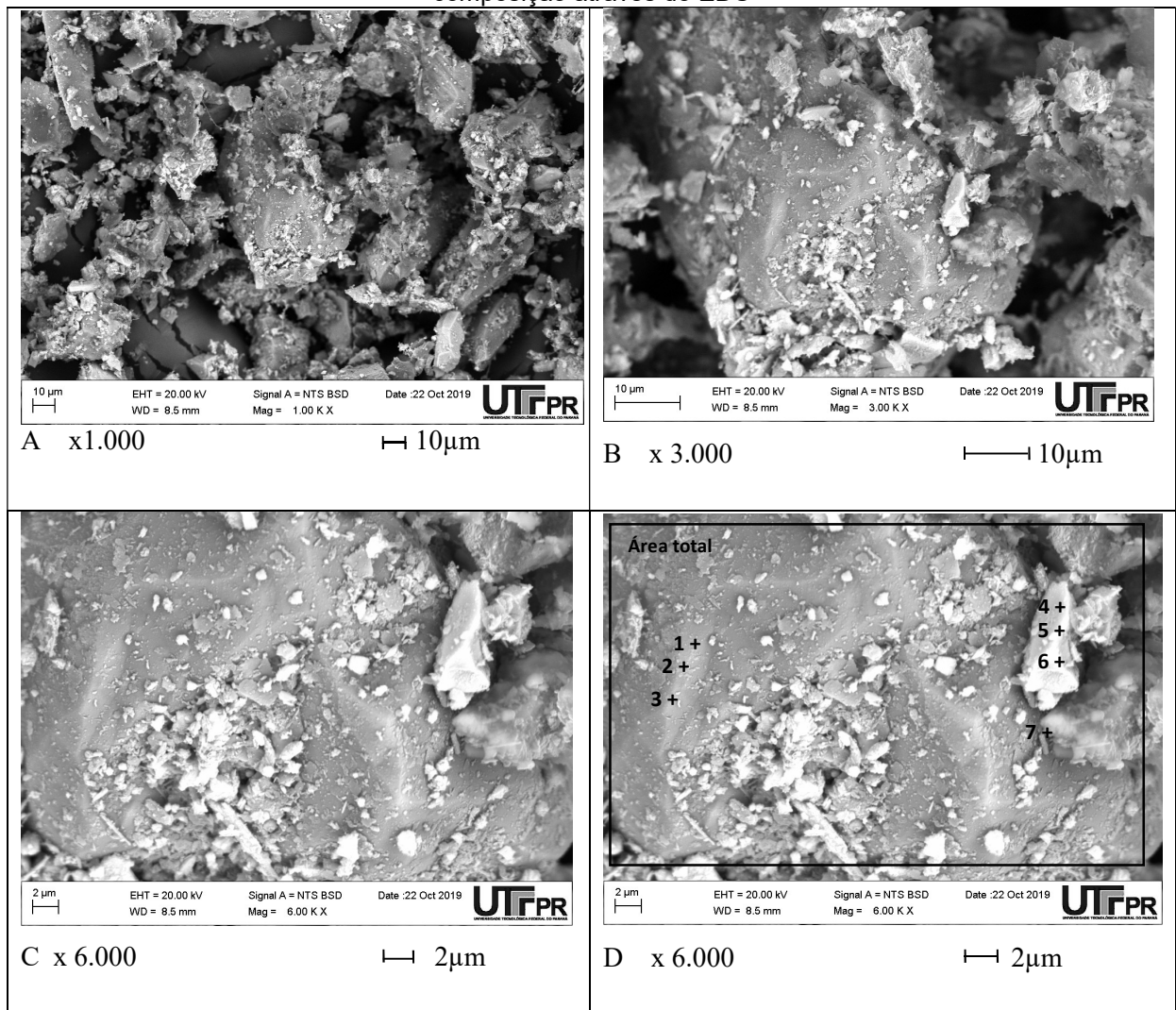
Símbolo	Mineral	Fórmula
Ca	Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Q	Quartzo	SiO_2
G	Goetita	$FeO(OH)$
Mt	Magnetita	Fe_2O_4
H	Hematita	Fe_2O_3

Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 26 é apresentada a estrutura morfológica do RMF, pesquisadas através dos métodos MEV.

É possível observar na Figura 26-A que a amostra possui uma diversidade granulométrica e que as partículas são irregulares. Um grão de cimento possui diâmetro médio de 30 μm , já as partículas analisadas possuem, em sua maioria, diâmetros menores a este, à vista disso, as reações químicas podem ocorrer muito mais rápido, devido à alta área específica do material. Nas Figura 26-B e 26-C é possível observar a presença de materiais finos aderidos a uma partícula maior, essas pequenas partículas possuem diâmetro aproximado de 0,5 μm .

Figura 26 - Estrutura morfológica do RMF através do MEV e pontos de análise microquímica da composição através do EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

A imagem da análise pelo método EDS (espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X) é apresentada na Figura 26-D e exibe a área em que foi feita a varredura.

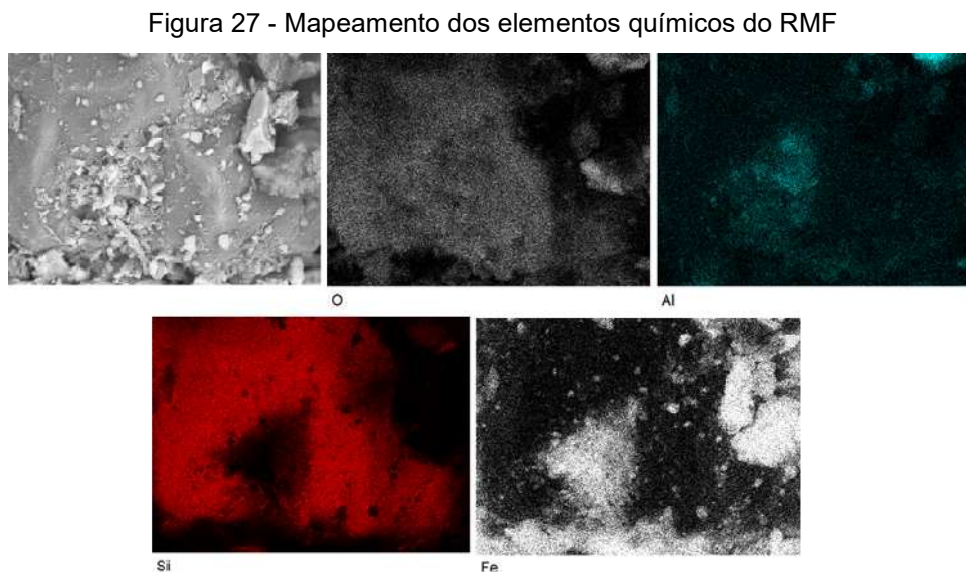
A Tabela 6 pontua os elementos encontrados no RMF:

Espectro	Fe	Si	Al	Total
Área total	32,59	64,70	2,71	100,00
1	2,89	97,11	-	100,00
2	2,87	97,13	-	100,00
3	2,91	97,09	-	100,00
4	86,06	10,70	3,24	100,00
5	86,45	10,78	2,77	100,00
6	88,24	8,83	2,93	100,00
7	90,04	7,12	2,84	100,00

Fonte: Autoria própria (2020)

A Tabela 6 evidencia que se trata uma amostra de rejeito de minério de ferro, visto que algumas partículas possuem alto teor de sílica, proveniente do processo de beneficiamento na extração do minério, o que pode ser comprovado pelos espectros 1, 2 e 3 da Tabela 6 e outras partículas, apresentam alto teor de ferro, proveniente de minerais tais como: hematita (Fe_2O_3), a magnetita (Fe_3O_4), a limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e a siderita (FeCO_3), o que pode ser comprovado pelos espectros 4, 5, 6 e 7 da Tabela 6.

Na Figura 27, é identificado através do mapeamento por cores, os elementos químicos do RMF:



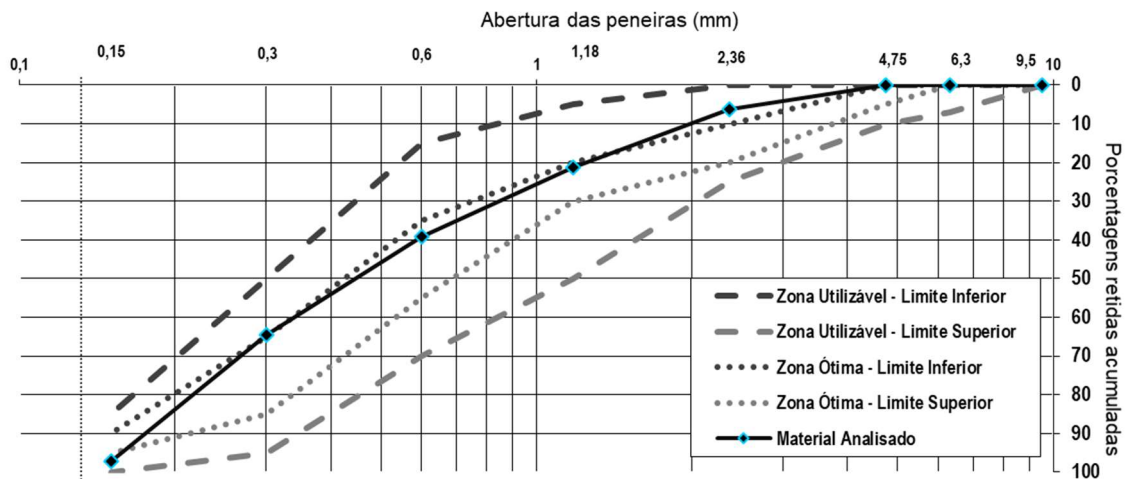
Fonte: Autoria própria (2020)

Nota-se na amostra analisada de RMF a distribuição dos átomos de silício e ferro, em maiores quantidades, porém alumínio também é identificado, em menor intensidade.

4.1.2 Lodo de anodização de alumínio (LAA)

A Figura 28 indica a análise granulométrica realizada no LAA:

Figura 28 - Composição granulométrica do LAA



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar que o LAA possui distribuição granulométrica contínua, ficando no limite superior da zona ótima. Percebe-se pela curva granulométrica que 80% da amostra analisada possui granulometria menor que o diâmetro de 1,18mm e 60% menor que 0,6mm.

Foi determinado o pH do LAA e encontrou-se um pH alcalino no valor de 13,27. O pH do LAA foi o mais alcalino encontrado entre os resíduos analisados e este pode colaborar nas reações químicas dos aglomerantes. A massa específica real do LAA foi de 2,347g/cm³.

A composição química do LAA foi investigada através do método de Fluorescência de Raios X (FRX) e na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos:

Tabela 7 - Composição química do LAA

Elementos	Teor de elementos em % de peso
Al ₂ O ₃	65,9
Na ₂ O	8,7
Fe ₂ O ₃	0,4
SO ₃	0,3
Cl	0,2
K ₂ O	0,2
ZnO	0,2
P ₂ O ₅	0,1
CaO	0,1
MnO	<0,1
CuO	<0,1
TiO ₂	<0,1
NiO	<0,1
PbO	<0,1
Br	<0,1
P.F	24,00

Fonte: Autoria própria (2020)

O LAA é composto basicamente por 65,9% de Al₂O₃ e 8,7% de Na₂O, isso confirma a origem do material, proveniente este do banho de fosqueamento. Ainda, é considerável ressaltar que a confiabilidade dos resultados, segundo a análise pelo método FRX, é mais significativa para os elementos que apresentam presença maior que 5% do total da amostra, logo os pequenos teores de MnO, CuO, TiO₂, NiO, PbO e Br apontados com porcentagens menores que 1%, evidenciam a limitação de interpretação do equipamento utilizado.

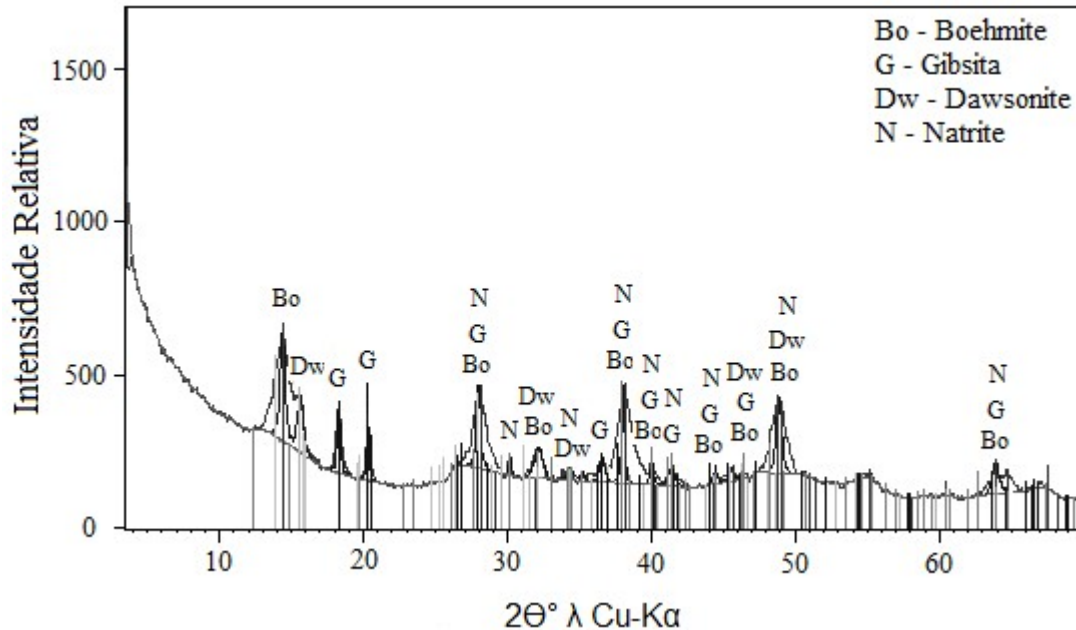
O difratograma de raios-X da amostra de LAA é apresentada na Figura 29 e os minerais encontrados são apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 - Legenda do Difratograma de Raios X do LAA

Símbolo	Mineral	Fórmula
Bo	Boemita	AlO(OH)
G	Gibbsite	Al(OH) ₃
Dw	Dawsonite	NaAlCO ₃ (OH) ₂
N	Natrite	Na ₂ CO ₃

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 29 - Intensidades dos elementos mineralógicos do LAA através do DRX



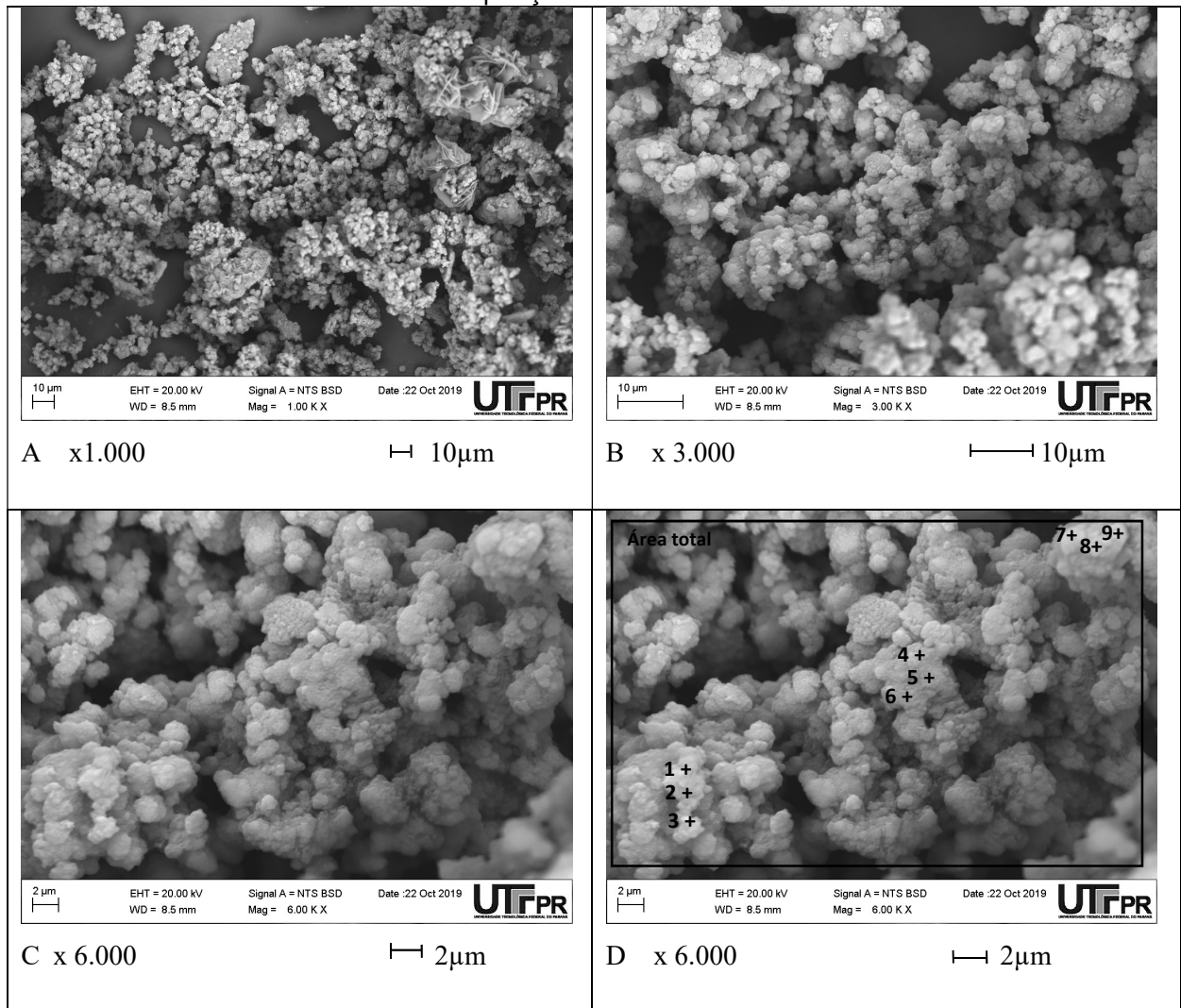
Fonte: Autoria própria (2020)

Analisando a amostra de LAA na Figura 29, é possível perceber a presença dos seguintes minerais: boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$), gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), natrita (Na_2CO_3) e dawsonita ($\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$). Todos esses minerais são provenientes da bauxita, os minerais boehmita e gibsita são diferentes formas de hidróxido de alumínio (Al_2O_3), a natrita é um sedimento residual da soda cáustica (Na_2CO_3) que funciona como eletrólito do processo de anodização de alumínio, no banho de fosqueamento, já a dawsonita é o produto de interação química entre o hidróxido de alumínio (Al_2O_3) com soda cáustica (Na_2CO_3).

A pequena quantidade de picos cristalinos e a baixa intensidade destes indica um pequeno teor de cristais de minerais na amostra. Também é possível observar na Figura 29, um alto teor de material amorfo no LAA, isso devido ao alto fundo do difratograma (distância entre eixo horizontal e áreas mais baixas da curva quase igual a intensidade dos picos de cristais).

Na Figura 30 são demonstradas as estruturas morfológicas do LAA através dos métodos MEV e pontos do EDS:

Figura 30 - Estrutura morfológica do LAA através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar nas Figuras 30-A e 30-B que se trata de um material com presença de poros, com partículas arredondadas muito parecidas umas às outras, com aspecto de nuvens, típicos para substâncias amorfas, em concordância com o DRX demonstrado na Figura 29. Na Figura 30-C é possível constatar que algumas partículas estão muito próximas umas às outras, entretanto essas estão apenas mecanicamente encostadas, apresentando ausência de ligações químicas entre elas.

A imagem da análise pelo método EDS (espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X) é apresentada na Figura 30-D e exibe a área total e os pontos em que foi feita a varredura, na mesma partícula. A Tabela 9 apresenta os resultados da determinação da composição microquímica do LAA:

Espectro	Tabela 9 - Composição microquímica do LAA					Total
	Al	Na	Mg	Cl	Fe	
Área total	85,57	13,34	-	1,09	-	100,00
1	89,25	10,75	-	-	-	100,00
2	90,64	9,36	-	-	-	100,00
3	89,62	10,38	-	-	-	100,00
4	87,74	10,00	0,65	0,87	0,74	100,00
5	88,37	9,55	0,64	0,77	0,67	100,00
6	87,23	10,85	0,59	0,79	0,54	100,00
7	87,27	12,73	-	-	-	100,00
8	86,06	11,76	-	-	2,18	100,00
9	87,37	10,82	-	-	1,81	100,00

Fonte: Autoria própria (2020)

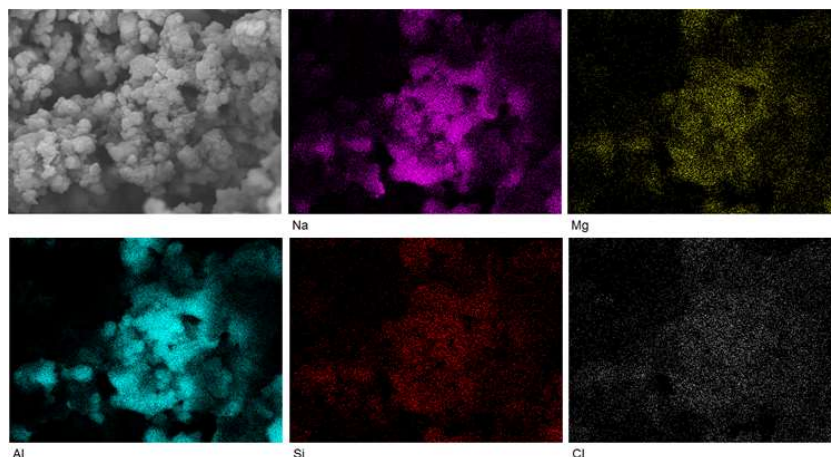
A comparação química dos pontos analisados é bastante parecida aos minerais boehmita e gibbsita, esses são dois importantes minérios de alumínio, presentes na bauxita. Os principais componentes presentes na bauxita são a gibbsita, boehmite e o diásporo, misturado com os dois óxidos de ferro (goethita e a hematita), além de caulinita, argila mineral e pequenas quantidades de TiO_2 .

A ausência de qualquer simetria morfológica na estrutura das partículas na Figura 30-D e oscilações nas percentagens de substâncias nas composições química em diferentes pontos na Tabela 9, permite sugerir que a partícula pesquisada se encontra na forma amorfa.

Por via de regra, um material amorfo é aquele cujos átomos não conservam qualquer tipo de organização ou regularidade em sua disposição espacial, ou ainda, não possui constância da composição química em diferentes pontos.

A disposição dos átomos do LAA foram mapeados por cores conforme apresentado na Figura 31:

Figura 31 - Mapeamento dos elementos químicos do LAA



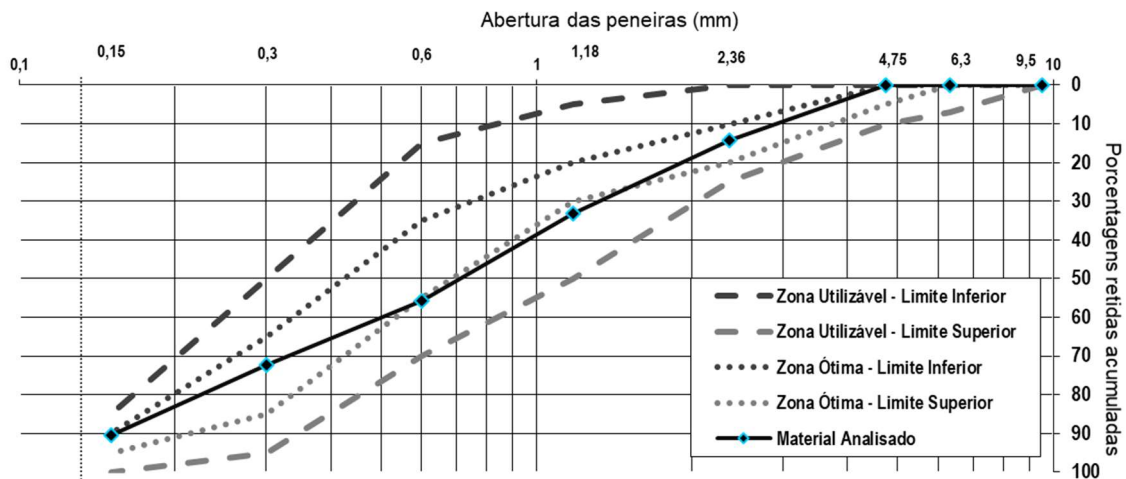
Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se verificar que o amostra analisada de LAA possui, basicamente, em sua composição alumínio e sódio, elementos estes utilizados no tanque de fosqueamento da anodização de alumínio.

4.1.3 Resíduo de concreto (RC)

A Figura 32 indica a análise granulométrica realizada no RC:

Figura 32 - Composição granulométrica do RC



Fonte: Autoria própria (2020)

Quanto a composição o RC apresentou distribuição granulométrica contínua. A granulometria contínua apresenta todas as frações em sua curva de distribuição granulométrica sem mudança de curvatura, é considerada ideal da norma, visto que é a melhor granulometria para proporcionar o empacotamento das partículas.

Foi determinado o pH do RC e encontrou-se um pH alcalino no valor de 10,34.

A massa específica real do RC determinada foi de $2,439\text{g/cm}^3$, percebe-se que a massa específica do RC é mais baixa do que um agregado natural, isso se dá, pois, os agregados reciclados possuem uma composição heterogênea e suas partículas possuem alguns poros, devido a capa de argamassa que os envolvem. Essa porosidade pode influenciar na trabalhabilidade de concretos e argamassas, visto que absorve maior quantidade de água, além de influenciar na resistência mecânica desses materiais.

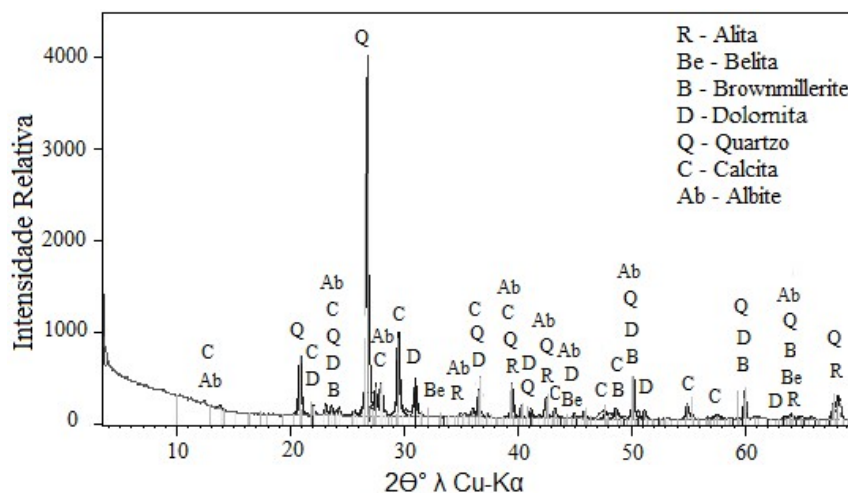
Pode ser analisada na Tabela 10, a composição química do RC, investigada através do método de FRX. Nota-se, substancialmente, a presença de SiO₂ (45,12%), CaO (31,86%), Al₂O₃ (4,52%), MgO (1,2%) e Fe₂O₃ (1,0%). A alta porcentagem de sílica deve-se basicamente porque é o principal componente dos agregados naturais e também é usada na fabricação de cimentos. O alto valor de perda ao fogo (P.F. =15,04%) exprime a perda de massa após aquecimento do material a 1000°C e pode ser explicado pela evaporação da água e ao dióxido de carbono (CO₂) presente em concretos em formas calcita, dolomita, entre outros.

Elementos	Teor de elementos em % de peso
SiO ₂	45,12
CaO	31,86
Al ₂ O ₃	4,52
MgO	1,2
Fe ₂ O ₃	1,0
K ₂ O	0,7
Na ₂ O	0,5
SO ₃	0,4
TiO ₂	0,3
P ₂ O ₅	0,1
MnO	<0,1
P.F	15,04

Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 33, é decifrado o Difratoograma de Raio-X (DRX) do RC:

Figura 33 - Intensidades dos elementos mineralógicos do RC através do DRX



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se verificar a presença dos seguintes minerais na amostra: alita (Ca_3SiO_5), belita (Ca_2SiO_4), brownmillerite ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{FeO}_3$), 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 e dolomita confirma o alto valor de perda ao fogo (15,04%), conforme Tabela 10. Além disso, o aparecimento de importantes minerais do cimento Portland como alita, belita e brownmillerite ainda não hidratados sugere possibilidade de hidratação desses durante a cura dos compósitos desenvolvidos, acarretando no ganho de resistência. A maior intensidade de pico com $2\theta = 26,7^\circ$ pertence ao quartzo (SiO_2), oriundo dos agregados naturais utilizados no concreto, ademais, o alto valor de intensidade do quartzo, próximo de 4000 pulsos/segundo, comparando com escala de 1000 pulsos/segundo, da Figura 33, mascara o alto teor de materiais amorfo, visto que os picos de outros minerais são muito baixos.

A Tabela 11 apresenta a legenda do Difratoograma de Raios X do RC:

Tabela 11 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RC

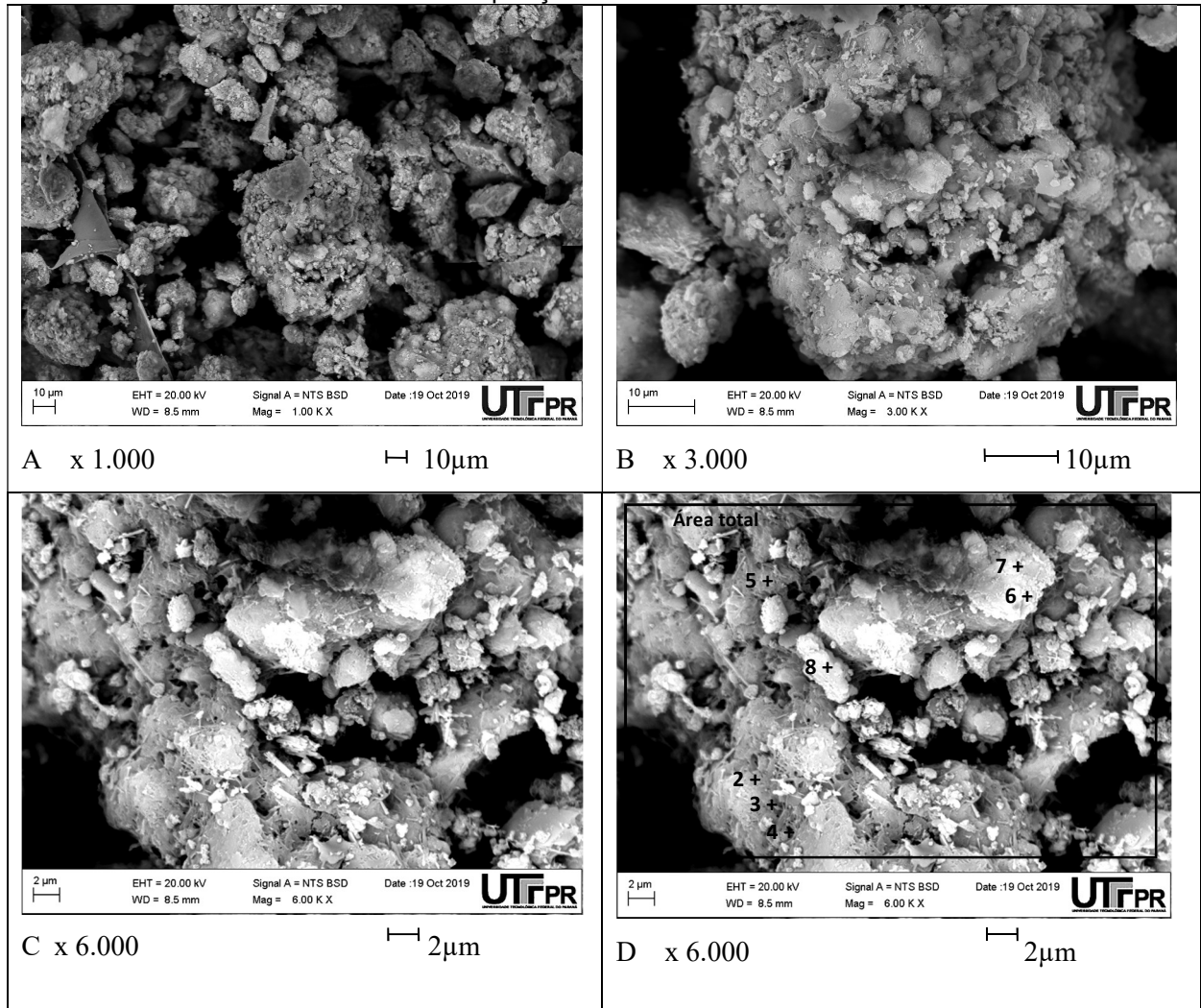
Símbolo	Mineral	Fórmula
R	Alita	Ca_3SiO_5
Be	Belita	Ca_2SiO_4
B	Brownmillerite	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{FeO}_3$
D	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Q	Quartzo	SiO_2
C	Calcita	CaCO_3
Ab	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 34 é demonstrada a estrutura morfológica do RC pelo método MEV. A composição química da área total demonstra repetição dos elementos principais, determinados através do método de FRX, demonstrado na Tabela 10.

No DRX, apresentado na Figura 33, foi possível observar alguns picos de quartzo, que se evidenciam no MEV devido suas típicas partículas maciças e por seus altos teores do elemento silício. Por outro lado, o ponto 8, apresentado na Tabela 12 destoa do restante do conjunto, devido a sua composição pode-se afirmar que está é uma partícula de óxido de cálcio.

Figura 34 - Estrutura morfológica do RC através do MEV e pontos de análise microquímica da composição através do EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

A imagem da análise pelo método EDS (espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X) é apresentada na Figura 34-D e exibe a área em que foi feita a varredura.

A Tabela 12 pontua os elementos encontrados:

Tabela 12 - Composição microquímica do RC

Espectro	Ca	Mg	Al	Si	K	Fe	S	Total
Área total	55,47	3,18	8,53	27,84	0,98	4,00	-	100,00
2	52,94	2,90	8,06	28,27	0,41	2,61	4,81	100,00
3	44,79	7,13	12,75	32,42	-	2,91	-	100,00
4	41,44	2,30	16,17	36,47	0,52	3,10	-	100,00
5	48,54	7,10	9,58	30,72	0,56	3,50	-	100,00
6	57,14	3,31	11,09	22,94	0,96	4,56	-	100,00
7	57,38	2,61	11,04	22,80	0,70	5,47	-	100,00
8	80,26	1,93	4,32	11,83	0,30	1,36	-	100,00

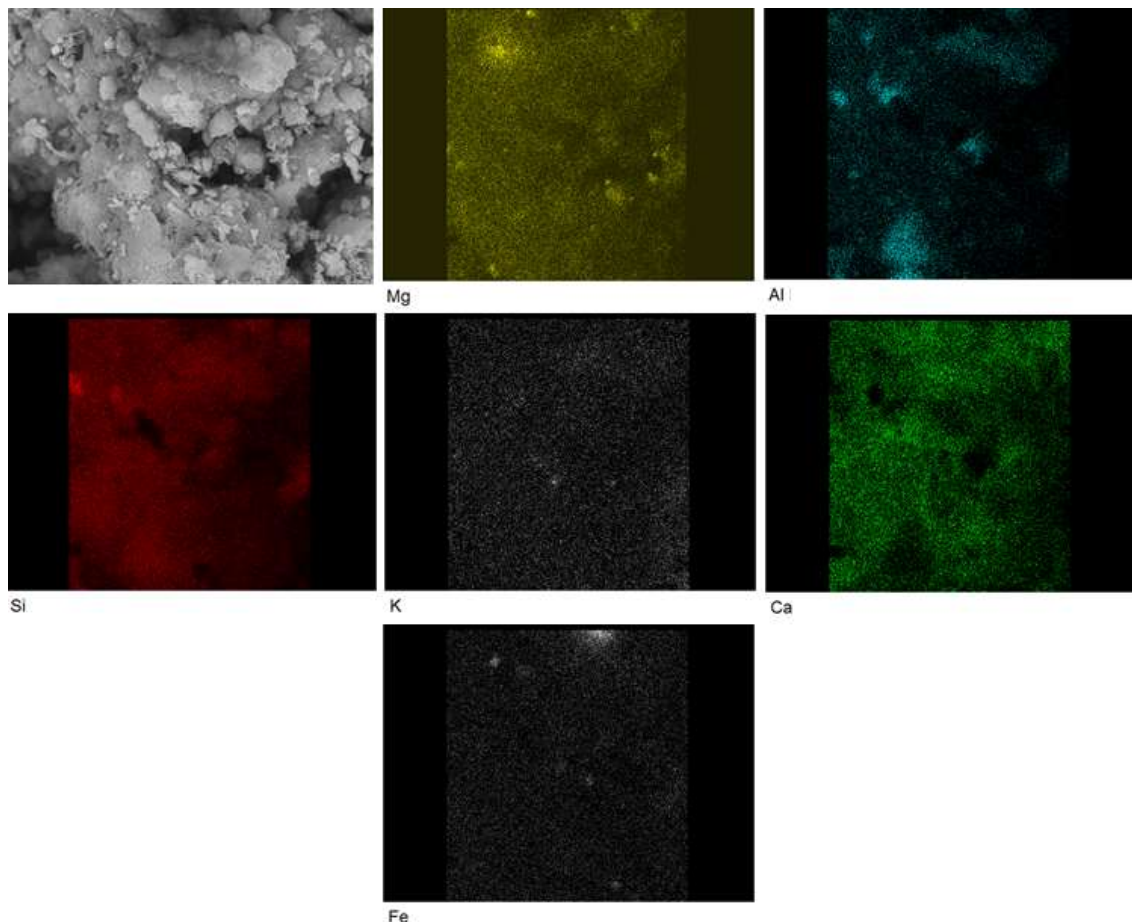
Fonte: Autoria própria (2020)

Ainda pelas análises do método EDS é possível observar na Tabela 12 que os pontos 6 e 7 possuem diferença máxima de 0,91% no teor de ferro. Essa diferença pode ser justificada por erros experimentais, possivelmente esse corpo pode ser classificado como um cristal anédrico, não só por sua forma estrutural, mas sim pela sua constância de composição química. Os cristais anédricos, são sólidos que possuem uma simetria no arranjo de seus átomos, porém sua morfologia externa não apresenta faces, isto é, não é delimitado por superfícies planas. Nos cristais anédricos a estrutura interior não se manifesta exteriormente.

Já os pontos 2, 3 e 4 da Tabela 12 a variação nos elementos químicos é bastante alta, podendo desta maneira interpretá-lo como um corpo amorfo. Os elementos amorfos são caracterizados por possuir uma estrutura que não têm ordenação espacial a longa distância (em termos atômicos), como os sólidos regulares, ou seja não possuem estrutura atômica definida.

Os elementos químicos do RC foram mapeados por cores conforme apresentado na Figura 35:

Figura 35 - Mapeamento dos elementos químicos do RC

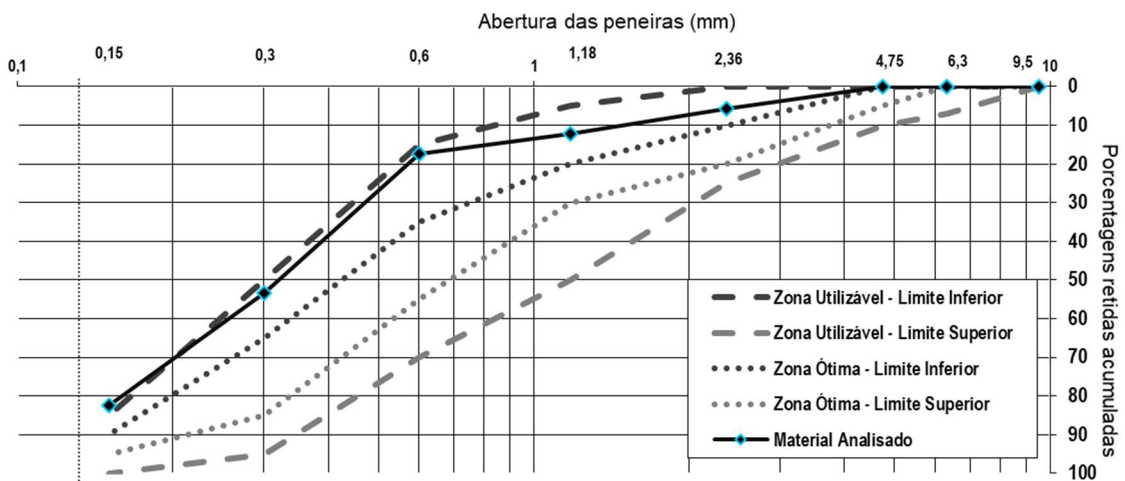


Percebe-se na Figura 35 uma distribuição homogênea dos átomos sílica, cálcio e magnésio, elementos clássicos do resíduo de concreto, esses podem ser encontrados tanto em agregados como em aglomerantes (cimento) que foram vistos na FRX apresentado na Tabela 10 e no DRX apresentado na Figura 33.

4.1.4 Resíduo da produção da cal (RPC)

A Figura 36 indica a análise granulométrica realizada no RPC:

Figura 36 - Composição granulométrica do RPC



Fonte: Autoria própria (2020)

Quanto a composição granulométrica o RPC obteve uma distribuição contínua, porém mantendo-se no limite inferior da zona utilizável. A curva contínua envolve uma maior abrangência de diâmetros, o que colabora para o empacotamento de partículas. Por outro lado, a amostra possui partículas com diâmetro muito grande, quando se trata de um possível aglomerante, não é o ideal, visto que demanda maior tempo para a reação química do material. Percebe-se pela Figura 36 que aproximadamente 10% do material possui diâmetro maior ou igual a 1,18mm.

O pH determinado para o RPC foi alcalino no valor de 11,62.

A massa específica real encontrada foi de 2,592g/cm³, massa específica esta semelhante à um agregado natural.

A composição química do RPC, determinada através do método de FRX, é apresentada na Tabela 13:

Tabela 13 - Composição química do RPC

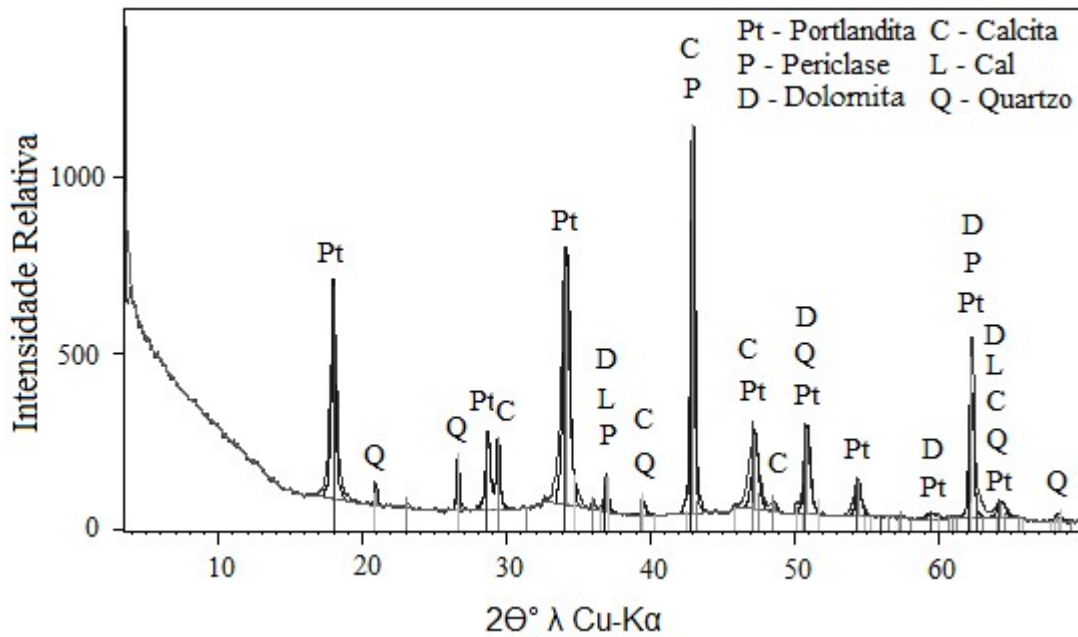
Elementos	Teor de elementos em % de peso
CaO	51,6
MgO	29
SiO ₂	1,5
Fe ₂ O ₃	0,2
Al ₂ O ₃	0,1
K ₂ O	<0,1
SO ₃	<0,1
MnO	<0,1
P.F	17,49

Fonte: Aatoria própria (2020)

Observando a Tabela 13, verifica-se que o RPC é formado basicamente por CaO e MgO com proporções de 51,6% e 29%, respectivamente. Isso confirma que a produção da cal foi oriunda do calcário dolomítico ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) da região sul do Brasil. A presença de SiO₂, Fe₂O₃ e outras impurezas pode ser explicada pelo processo de acumulação dos sedimentos calcários no fundo dos oceano devido o processo metamórfico de formação das rochas calcárias. Conforme apresentado na Tabela 13, depois da queima de matéria-prima, o teor total de CaO e MgO é igual 80,6%, indicando que o restante são impurezas, cuja quantidade não devem prevalecer 12%, conforme NBR 6453 (ABNT, 2003). Caso contrário, como ocorreu na matéria-prima pesquisada, com o valor de impurezas em cerca de 19,4%, este material deve ser classificado como resíduo de produção de cal (RPC) e não pode ser vendido para uso em construção civil como cal virgem ligante. O RPC pode ser usado para neutralização de solos ácidos, para produção de cimento Portland, etc. O alto valor de perda ao fogo (17,49%) confirma alto teor de água e CO₂ nos carbonatos mal queimados. Essa má queima se dá por diferentes motivos, sendo eles: falta de tecnologia empregada nos fornos, falta de experiência do operador, falta de temperatura ideal ou não proporcional em diferentes partes da rocha, queima de rochas com diâmetros muito altos impossibilitando a chegada de temperatura no núcleo do mesmo, ou ainda mau armazenamento do aglomerante (possibilitando a obtenção de umidade posteriormente a queima).

A composição mineralógica do RPC foi determinada através da decifração do difratograma de raios-X, conforme demonstrado na Figura 37:

Figura 37 - Intensidades dos elementos mineralógicos do RPC através do DRX



Fonte: Autoria própria (2020)

A Tabela 14 apresenta a legenda do Difratoograma de Raios X do RPC:

Tabela 14 - Legenda do Difratoograma de Raios X do RPC

Símbolo	Mineral	Fórmula
Pt	Portlandita	Ca(OH) ₂
P	Periclase	Ca ₂ SiO ₄
D	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
Q	Quartzo	SiO ₂
C	Calcita	CaCO ₃
L	Cal virgem	CaO

Fonte: Autoria própria (2020)

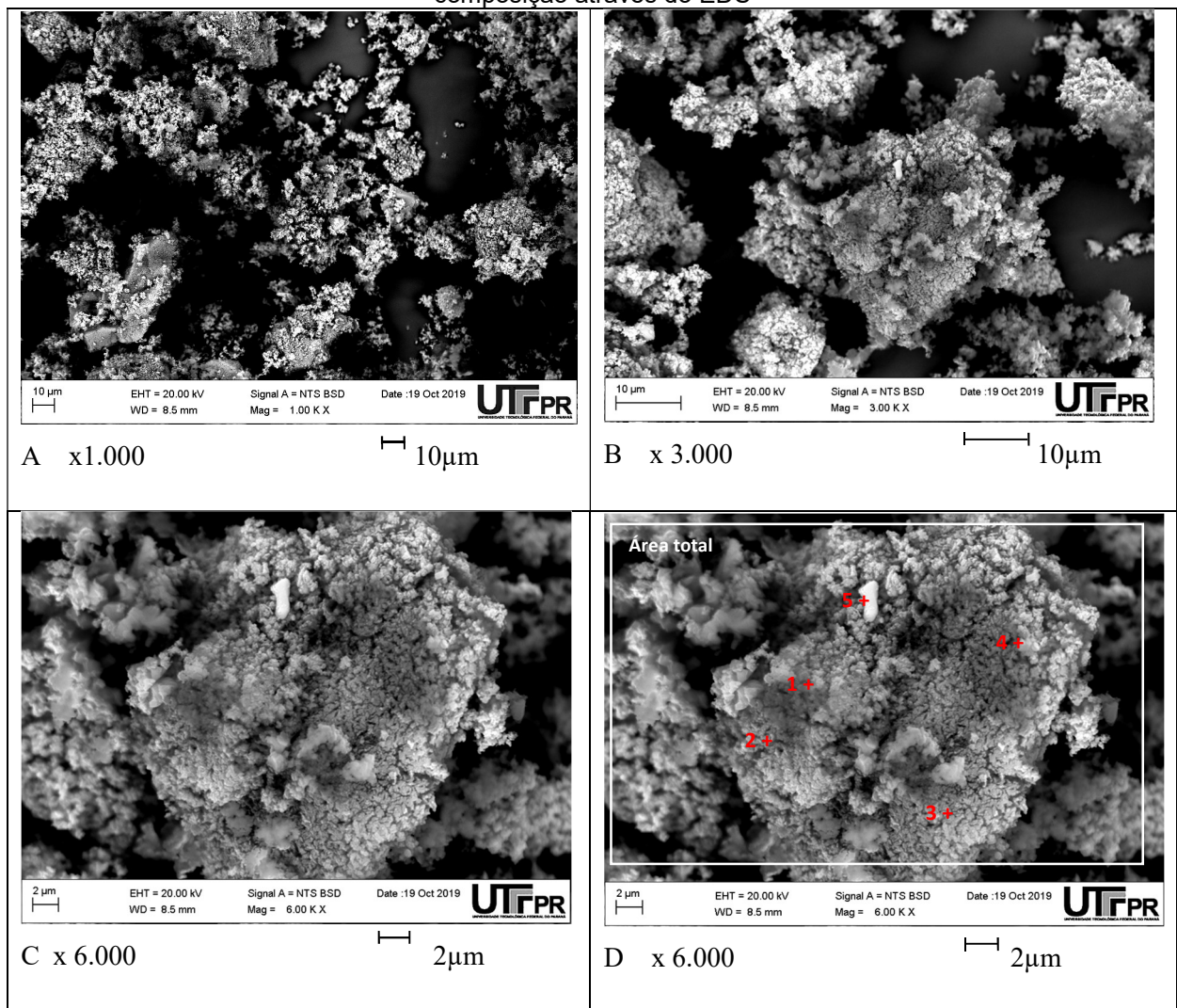
Pode-se observar na Figura 37 que os picos de maior intensidade pertencem aos minerais de calcita (CaCO₃) em coincidência com o pico de portlandite (Ca(OH)₂) com $2\theta = 43^\circ$ ou aos picos de portlandite com $2\theta = 18^\circ$ e $34,2^\circ$ livres de coincidência com os picos de outros minerais. Observa-se ainda a inexistência de picos apenas com cal virgem (CaO), estes sempre estão coincidindo com picos de outros minerais, isso ocorre quando há um teor muito baixo de cal virgem, e pode ser explicado por dois motivos: primeiro, a temperatura ou duração da calcinação da matéria prima (rocha calcária) muito menor que 960°C , a essa temperatura ocorre o fim da reação de saída de CO₂ de calcário; e segundo, as condições de armazenagem da cal virgem não são ideais, apresentam alta umidade do ar e isso transforma da cal em portlandite

(Ca(OH)₂) e depois em calcita (CaCO₃) e dolomita (CaMg(CO₃)₂). O difratograma de raios-X da Figura 37 é a comprovação referente à qualidade de ligante usado neste projeto, ou seja, o RPC e não cal virgem.

A morfologia da amostra de RPC, estudada por meio (MEV), é apresentada na Figura 38. É possível observar na Figura 38-A, 38-B e 38-C, partículas muito semelhantes umas às outras, porém com extremidades assimétricas. As partículas demonstram não possuem formas cristalinas visíveis. As formas assimétricas são mais evidenciadas na Figura 38-C, com formas semelhantes a estruturas amorfas.

A imagem da análise pelo método EDS (espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X) é apresentada na Figura 38-D e exibe a área em que foi feita a varredura. A Tabela 15 pontua os elementos encontrados:

Figura 38 - Estrutura morfológica do RPC através do MEV e pontos de análise microquímica da composição através do EDS



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 15 - Composição microquímica do RPC

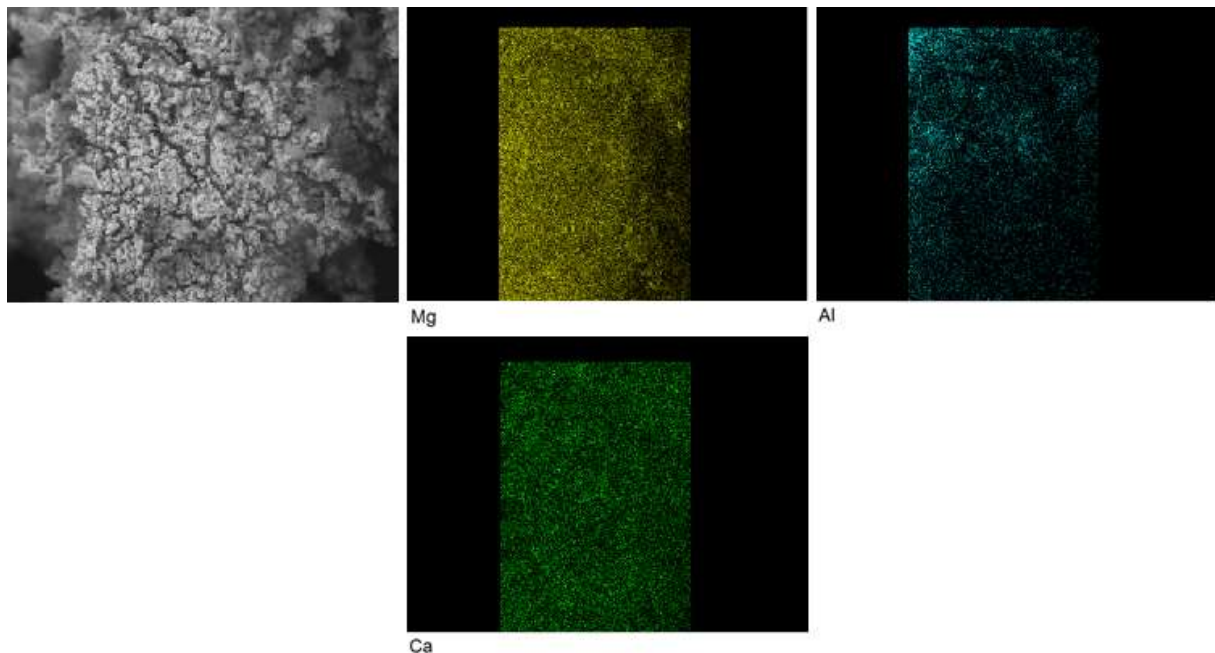
Espectro	Ca	Mg	Al	Total
Área total	60,82	37,74	1,44	100,00
2	61,88	36,34	1,78	100,00
3	58,95	38,94	2,11	100,00
4	60,70	38,23	1,07	100,00
5	61,04	38,29	0,67	100,00

Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme observando a Tabela 15 é evidente que se trata de uma amostra amorfa, ou seja, não há formas cristalinas presente, visto que há uma pequena variação na porcentagem dos elementos de cálcio e magnésio que constituem a amostra, no entanto essas variações não são significativas, pois coincidem com o resultado da composição química do RPC em geral, apresentada na Tabela 13.

A distribuição dos átomos do RPC, apresentado na Figura 39, foi mapeado por cores:

Figura 39 - Mapeamento dos elementos químicos do RPC



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar na Figura 39 que o maior percentual de material visto no resíduo da produção de cal é o elemento cálcio, seguido de magnésio, com distribuição uniforme pela amostra.

4.2 ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES

Para a escolha das melhores composições, foram analisados os resultados de: resistência à compressão axial, absorção de água, determinação da variação dimensional e massa específica aparente.

4.2.1 Resistência à compressão axial

Foram analisados os ensaios de resistência à compressão axial aos 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 360 e 720 dias de cura, conforme apresentado na Tabela 16:

Tabela 16 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial (MPa)

Nº	Composições, %					Resistencia à compressão axial (MPa), após dias de cura									
	RMF	LAA	RC	RPC	A/MS	3	7	14	28	60	90	180	360	720	
1	30	30	25	15	0,22	1,33	1,83	2,61	2,69	2,74	2,71	3,25	3,49	3,71	
2	20	40	25	15	0,24	0,79	1,18	1,68	1,71	1,81	2,10	3,20	3,27	3,47	
3	40	20	25	15	0,22	2,10	3,06	3,55	3,59	3,64	3,02	4,04	4,13	4,43	
4	25	35	25	15	0,22	1,09	2,15	2,26	2,29	2,32	2,62	2,87	3,05	3,28	
5	35	25	25	15	0,23	1,67	2,24	2,79	2,83	2,86	3,09	3,23	3,73	3,96	
6	30	20	30	20	0,24	4,16	4,69	3,42	3,76	3,81	3,98	4,14	4,22	4,46	
7	20	30	30	20	0,24	1,27	1,59	1,80	2,34	2,41	2,53	2,56	2,71	2,95	
8	25	25	30	20	0,22	1,50	1,67	1,74	1,77	2,03	2,40	2,89	3,19	3,48	
9	10	40	30	20	0,24	0,84	0,92	1,29	1,70	1,71	1,72	1,85	1,94	2,13	
10	40	10	30	20	0,22	4,33	6,07	6,99	7,15	7,24	7,31	8,45	8,93	9,23	
11	30	20	25	25	0,22	3,26	3,41	2,96	3,16	3,32	3,42	3,50	3,77	4,02	
12	20	30	25	25	0,23	0,95	1,08	1,13	1,34	1,36	1,51	1,60	1,75	2,06	
13	25	25	25	25	0,24	1,43	1,46	1,59	1,75	2,05	2,42	3,06	4,53	4,76	
14	10	40	25	25	0,23	1,24	1,23	1,36	1,42	1,75	1,80	2,03	2,20	2,41	
15	40	10	25	25	0,22	4,49	6,79	8,10	8,56	8,67	8,81	10,28	11,00	11,24	
16	35	15	25	25	0,22	4,40	4,51	4,52	4,56	4,99	5,16	5,58	5,95	6,18	
17	15	35	25	25	0,23	0,84	1,09	1,43	1,48	1,53	1,54	1,60	1,72	1,93	

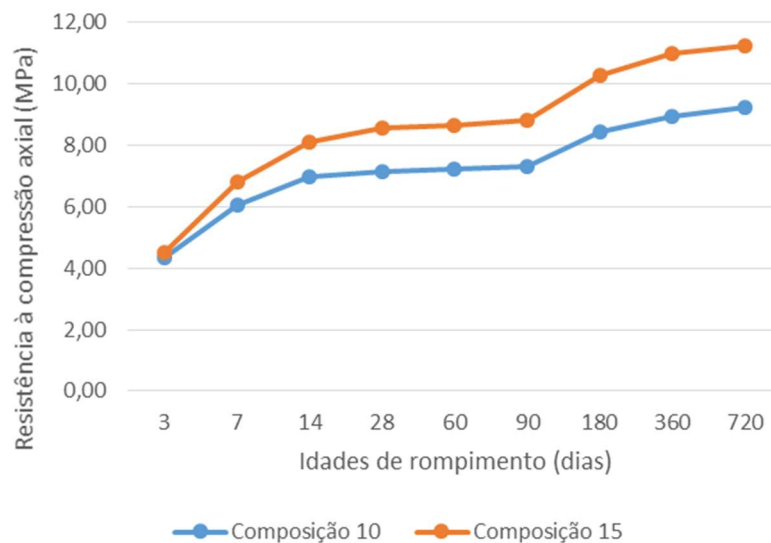
Fonte: Autoria própria (2020)

A verificação da resistência à compressão axial de um material é um dos parâmetros mais importantes de aceitação deste. Pode-se observar na Tabela 16, que não há uma regularidade no ganho de resistência dos compósitos quando se aumenta a porcentagem de lodo de anodização de alumínio, pelo contrário o lodo de anodização diminui a resistência à compressão dos compósitos. Por outro lado, pode-

se perceber o ganho da resistência nos compósitos quando se aumenta os teores do rejeito de minério de ferro, tanto quanto no aumento de suas idades.

Analisando a Figura 40 pode-se constatar uma comparação entre as composições 10 e 15, ambas com teores máximos de RMF (40%) e teores mínimos de LAA (10%), esses compósitos obtiveram resistências crescentes ao longo de suas idades de cura:

Figura 40 - Resistência à compressão axial das composições 10 e 15

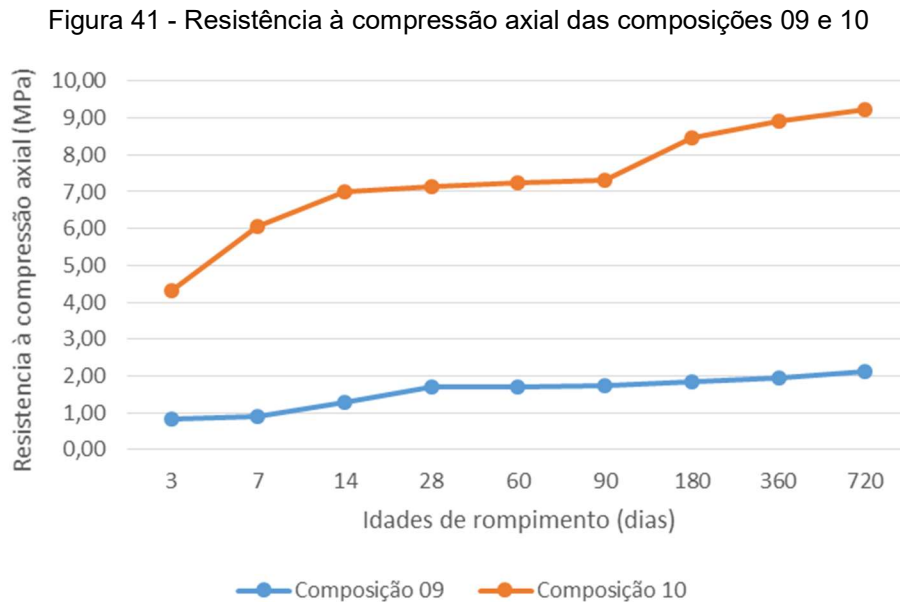


Fonte: Autoria própria (2020)

Analisando a Figura 40 percebe-se um aumento proporcional nas resistências à compressão axial, entre as duas composições, 10 e 15, respectivamente, de 3 para 7 dias de 46,97% e 55,95%, de 7 para 14 dias de 15,10% e 19,30%, de 14 para 28 dias de 2,38% e 5,65%, de 28 para 60 dias de 1,14% e 1,3%, de 60 para 90 dias de 1,05% e 1,6%, de 90 para 180 dias de 15,51% e 16,67%, de 180 para 360 dias de 5,66% e 7,05% e de 350 para 720 dias de 3,41% e 2,18%. Ainda é possível atestar que o uso de RPC contribui para o ganho de resistência, visto que na composição 10 foi utilizado 20% e na composição 15 25%.

Outra correlação que se pode realizar é por meio das resistências à compressão entre as composições 9 e 10, a composição 9 é constituída de 10% de RMF, 40% de LAA, 30% de RC e 20% de RPC, já a composição 10 é constituída de 40% de RMF, 10% de LAA, 30% de RC e 20% de RPC, ou seja, na composição 9 utiliza-se o máximo da porcentagem de LAA e o mínimo de RMF e na composição 10 o máximo da porcentagem de RMF e o mínimo de LAA, nas duas RC e RPC são

constantes. As resistências à compressão das duas amostras podem ser verificadas na Figura 41:



Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar na Figura 41, que a resistência à compressão aos 28 dias na composição 9 é de 1,9MPa e na composição 10 de 7,15MPa, essa diferença se dá em função da porcentagem de RMF e LAA nas composições e pode-se admitir que o ganho de resistência é inversamente proporcional ao uso do LAA.

Uma alternativa de comparação dos compósitos confeccionados é com a NBR 6136 (ABNT, 2016) que regulamenta os critérios mínimos de utilização de blocos vazados de concreto simples para alvenaria. A norma apresenta três classes de resistência característica à compressão axial aos 28 dias, sendo elas: Classe A $f_{bk} \geq 8,0$, Classe B $4,0 \leq f_{bk} < 8,0$ e Classe C $f_{bk} \geq 3,0$. Logo, observando a Tabela 16, pode-se concluir que apenas a composição 15 com 8,56MPa atende as exigências da norma quanto Classe A, já as composições 10 e 16 com 7,15MPa e 4,56MPa, respectivamente, se enquadram na Classe B e as composições 3 com 3,59MPa, 6 com 3,76MPa e 11 com 3,16MPa na classe C, todos avaliadas aos 28 dias de cura. Percebe-se ainda que as composições que se enquadram na classe C têm teores máximos de LAA de 20% e teores mínimos do RMF de 30%, podendo utilizar esses resultados como indicativos de que a resistência à compressão axial não aumenta em função da utilização do LAA. As classes são diferenciação dos blocos segundo o seu uso, nomeando: classes A e B com função estrutural, nas larguras de 140 e 190mm,

sendo que abaixo do nível do solo usa-se exclusivamente o classe A, já o classe C tem função estrutural na largura de 90mm para edificações de no máximo um pavimento, com largura de 115mm para edificações de no máximo dois pavimentos, com larguras de 140 mm e 190 mm para edificações de até cinco pavimentos e os com largura de 65 mm têm seu uso restrito para alvenaria sem função estrutural.

A NBR 15270-1 (ABNT, 2017) classifica os blocos cerâmicos em blocos de vedação e em blocos estrutural, os blocos de vedação se catalogam em VED15 com resistência mínima de 1,5MPa, VED30 3,0MPa e VED40 4,0MPa, com isso pode-se atestar, conforme Tabela 16, que todos os compósitos se enquadram na classe VED15 e que os compósitos 3, 6 e 11 se delimitam a VED30, esses com teores máximos de LAA de 20% e teores mínimos do RMF de 30%, já os compósitos 10, 15 e 16 se classificam em VED40. A norma fragmenta os blocos estruturais em: EST60, com resistência mínima de 6,0MPa, EST80 8,0MPa, EST100 10,0MPa, EST120 12,0MPa, EST140 14,0MPa, EST160 16,0MPa, EST180 18,0MPa e EST200 20,0MPa, dos compósitos confeccionados, de acordo com Tabela 16, pode-se atestar que a composição 10 se enquadra na classe EST60 e que a composição 15 se enquadra na classe EST80.

Além disso, os compósitos podem ser contrapostos a NBR 9781 (ABNT, 2013) que regulamenta a produção de componentes pré-moldado de concreto, utilizado como material de revestimento em pavimento intertravados. A norma especifica uma resistência mínima de 35MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais e resistência mínima de 50MPa para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados. Dentre as composições estudadas nenhuma satisfaz a norma referenciada.

Dentre todas as composições destaca-se a de número 10 e 15, visto que essas obtiveram maiores resistências à compressão axial em todas as idades de cura, além disso essas composições prevalecem perante as demandas das normas NBR 6136 (ABNT, 2016) e 15270-1 (ABNT, 2017), nessas foram os processos físico-químicos de formação de estruturas dos materiais. No entanto também foram analisados os processos físico-químicos da composição 9, isso porque incorpora alto teor LAA e as resistências não evoluem.

4.2.2 Absorção de água

O objetivo do ensaio de absorção de água é verificar o percentual de água absorvida pelo corpo de prova em um período de 24 horas à temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados em 5 corpos de prova aos 28 e 5 corpos de prova aos 90 dias. A média do 5 corpos de prova no ensaio de absorção de água se encontram na Tabela 17:

Tabela 17 - Resultado dos ensaios de absorção de água

N°	Composições, %					Absorção de água (%)	
	RMF	LAA	RC	RPC	A/MS	28	90
1	30	30	25	15	0,22	8,19	8,11
2	20	40	25	15	0,24	8,63	8,54
3	40	20	25	15	0,22	7,53	7,38
4	25	35	25	15	0,22	8,25	8,17
5	35	25	25	15	0,23	8,09	8,01
6	30	20	30	20	0,24	7,71	7,56
7	20	30	30	20	0,24	8,47	8,39
8	25	25	30	20	0,22	8,19	8,11
9	10	40	30	20	0,24	8,95	8,86
10	40	10	30	20	0,22	7,32	7,17
11	30	20	25	25	0,22	7,63	7,48
12	20	30	25	25	0,23	8,51	8,42
13	25	25	25	25	0,24	8,28	8,20
14	10	40	25	25	0,23	8,92	8,83
15	40	10	25	25	0,22	7,17	7,03
16	35	15	25	25	0,22	7,42	7,27
17	15	35	25	25	0,23	8,83	8,74

Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar na Tabela 17, que com o aumento da idade de cura do compósito de 28 para 90 dias ocorreu uma diminuição da absorção de água, isso advém, supostamente, porque com o passar do tempo ocorre a formação de novas substâncias nos poros das amostras, diminuindo a porosidade, e com isso absorvendo menor água.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) que regulamenta os critérios mínimos de utilização de blocos vazados de concreto simples para alvenaria, apresenta 3 classes de absorção de água, sendo: Classe A $\leq 8,0\%$, Classe B $\leq 9,0\%$ e Classe C $\leq 10,0\%$. Logo, observando a Tabela 14, que os compósitos 3, 6, 10, 11, 16 e 16 se enquadram Classe A $\leq 8,0\%$, esses compósitos são constituídos de teores máximos de RMF (de

30 a 40%) e teores mínimos de LAA (de 10 a 20%). O restante dos compósitos se enquadram na Classe B $\leq 9,0\%$, incluindo a composição 9.

A NBR 15270-1 (ABNT, 2017) classifica os blocos cerâmicos em blocos de vedação e em blocos estrutural, os blocos de vedação VED15 e VED40 podem obter absorção de água mínima de 8% e máxima de 25%, já o VED30 absorção de água mínima de 8% e máxima de 21%. Pela mesma norma os blocos estruturais EST60, EST80, EST100, EST120, EST140, EST160, EST180 e EST200 podem obter absorção de água mínima de 8% e máxima de 21%, logo, conclui-se que, de acordo com Tabela 14, os compósitos 3, 6, 10, 11, 16 e 16 não se enquadram na classificação da norma para nenhum tipo de bloco, já o restante das composições se enquadram para qualquer tipo de bloco, visto que possuem absorção maior que 8%.

4.2.3 Variação diametral

Na Tabela 18, são apontados os resultados do coeficiente de variação diametral médio, de 5 corpos de prova de cada composição:

Tabela 18 - Coeficiente de variação diametral das amostras durante o período de cura

Nº	Composições, %					Coeficiente de variação diametral (%), após dias de cura									
	RMF	LAA	RC	RPC	A/MS	3	7	14	28	60	90	180	360	720	
1	30	30	25	15	0,22	2,10	2,35	2,40	2,05	1,90	1,85	1,85	1,80	1,75	
2	20	40	25	15	0,24	2,15	2,30	2,35	2,10	2,05	1,90	1,75	1,75	1,70	
3	40	20	25	15	0,22	1,30	1,70	1,90	1,85	1,80	1,80	1,75	1,75	1,70	
4	25	35	25	15	0,22	2,15	2,35	2,45	2,30	2,25	2,20	2,10	2,05	2,05	
5	35	25	25	15	0,23	2,40	2,45	2,50	2,40	2,35	2,25	2,15	2,15	2,10	
6	30	20	30	20	0,24	1,25	1,60	2,00	1,95	1,85	1,80	1,75	1,60	1,55	
7	20	30	30	20	0,24	2,25	2,35	2,40	2,35	2,30	2,20	2,10	2,05	2,05	
8	25	25	30	20	0,22	2,05	2,30	2,45	2,45	2,30	2,10	2,05	2,05	2,00	
9	10	40	30	20	0,24	2,35	2,45	2,50	2,35	2,25	2,15	2,10	1,95	1,95	
10	40	10	30	20	0,22	1,00	1,15	1,80	1,75	1,70	1,65	1,55	1,45	1,45	
11	30	20	25	25	0,22	1,35	1,40	2,05	2,05	2,00	1,90	1,85	1,80	1,70	
12	20	30	25	25	0,23	2,05	2,30	2,45	2,15	2,15	2,10	2,05	2,05	2,00	
13	25	25	25	25	0,24	2,20	2,35	2,40	2,30	2,25	2,20	2,10	2,05	1,95	
14	10	40	25	25	0,23	2,25	2,30	2,45	2,40	2,35	2,25	2,10	1,95	1,90	
15	40	10	25	25	0,22	0,95	1,05	1,70	1,65	1,55	1,50	1,45	1,40	1,35	
16	35	15	25	25	0,22	1,35	1,45	1,95	1,90	1,85	1,75	1,60	1,60	1,50	
17	15	35	25	25	0,23	2,00	2,35	2,40	2,35	2,25	2,20	2,10	2,05	1,95	

Fonte: Autoria própria (2020)

A retração ou expansão é o processo de redução ou aumento de volume que ocorre em um compósito. Nos compósitos em estudo foi realizado o acompanhamento dos diâmetros e pode-se perceber na Tabela 18, que nas primeiras idades há uma expansão nos corpos de prova, isso se dá devido a água de amassamento existente nas misturas, porém com o passar do tempo os corpos de prova se retraíram, geralmente, em peças curadas ao ar livre, a retração é decorrente da evaporação parcial da água existente nos compósitos após seu endurecimento.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) que regulamenta os critérios mínimos de utilização de blocos vazados de concreto simples para alvenaria, recomenda os limites de retração dos corpos de prova divididos em 3 classes, sendo: Classe A, Classe B e Classe C $\leq 0,065\%$, logo, pode-se observar na Tabela 18, que nenhum dos compósitos atende a especificação da norma.

4.2.4 Massa específica aparente

Na Tabela 19, estão expostos os resultados de massa específica aparente dos compósitos durante o período de cura.

Tabela 19 - Massa específica aparente das amostras durante período de cura

N°	Composições, %					Massa específica aparente (g/cm ³), após dias de cura									
	RMF	LAA	RC	RPC	A/MS	3	7	14	28	60	90	180	360	720	
1	30	30	25	15	0,22	3,38	3,38	3,39	3,38	3,41	3,44	3,46	3,48	3,51	
2	20	40	25	15	0,24	3,37	3,37	3,38	3,36	3,39	3,40	3,43	3,46	3,48	
3	40	20	25	15	0,22	3,53	3,53	3,53	3,52	3,52	3,54	3,55	3,57	3,58	
4	25	35	25	15	0,22	3,38	3,38	3,40	3,37	3,36	3,39	3,43	3,44	3,47	
5	35	25	25	15	0,23	3,45	3,46	3,45	3,45	3,47	3,48	3,49	3,51	3,53	
6	30	20	30	20	0,24	3,50	3,49	3,50	3,51	3,51	3,55	3,57	3,59	3,61	
7	20	30	30	20	0,24	3,34	3,35	3,39	3,41	3,41	3,44	3,47	3,48	3,49	
8	25	25	30	20	0,22	3,37	3,40	3,39	3,40	3,42	3,43	3,45	3,46	3,48	
9	10	40	30	20	0,24	3,35	3,36	3,35	3,36	3,38	3,40	3,43	3,46	3,48	
10	40	10	30	20	0,22	3,51	3,53	3,53	3,55	3,55	3,58	3,59	3,62	3,65	
11	30	20	25	25	0,22	3,48	3,48	3,49	3,49	3,47	3,48	3,50	3,53	3,56	
12	20	30	25	25	0,23	3,43	3,43	3,40	3,38	3,36	3,37	3,40	3,42	3,45	
13	25	25	25	25	0,24	3,46	3,44	3,45	3,45	3,48	3,51	3,53	3,56	3,58	
14	10	40	25	25	0,23	3,56	3,58	3,56	3,54	3,55	3,57	3,60	3,61	3,62	
15	40	10	25	25	0,22	3,67	3,68	3,68	3,67	3,69	3,70	3,71	3,74	3,75	
16	35	15	25	25	0,22	3,42	3,42	3,41	3,40	3,40	3,41	3,45	3,46	3,49	
17	15	35	25	25	0,23	3,31	3,30	3,32	3,32	3,32	3,36	3,39	3,40	3,42	

Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar na Tabela 19 que não há uma constância no crescimento da massa específica aparente nas primeiras idades, isso se dá pela água de amassamento presente nos poros, todavia a partir dos 60 dias de cura essa variação não é mais percebida, mas sim o aumento da massa específica aparente, o que pode ser justificado pelo preenchimento de vazios devido a novas formações entre os elementos. Além disso, pode-se constatar que as composições que obtiveram maiores resistências, são as de maior massa específica aparente, sendo esta a consequência do preenchimento de vazios por novas formações.

Também é importante salientar que a moldagem dos corpos de prova foi por meio de um processo de compactação, e esse recurso visa melhorar as propriedades do compósito através da redução dos seus vazios pela aplicação de uma força sobre a área, resultando no aumento da massa específica aparente.

4.3 ACOMPANHAMENTO DOS PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS MELHORES COMPOSIÇÕES

Para acompanhar as mudanças físicas e químicas nos corpos de prova, foi realizado um acompanhamento nas mudanças de redes cristalinas dos minerais durante a cura pelo método de Difração de Raios-X e as mudanças na estrutura morfológica durante a cura através do Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectrometria de Energia Dispersiva.

Para este estudo foram selecionados a composição 9 com teor mínimo de RMF (10%) e máximo de LAA (40%) e a composição 10 com teor máximo de RMF (40%) e mínimo de LAA (10%) e suas análises foram realizadas em: mistura inicial seca e compósitos com períodos de cura de 3 e 180 e 720 dias.

4.3.1 Composição 9 (10% de RMF, 40% de LAA, 30% de RC e 20% de RPC)

Os difratogramas com os principais picos de cada idade: mistura inicial seca, 3, 180 e 720 dias de cura, da composição 9, com 10% de RMF, 40% de LAA, 30% de RC e 20% de RPC, estão decifrados e apresentados na Tabela 20:

Tabela 20 - Mudança de intensidades dos picos de elementos cristalinos na composição 9

2 Θ °	d, Å	Mudança de intensidades (%) dos picos após hidratação e cura (dias)							
		Mistura Inicial		3		180		720	
		I, %	Minerais	I, %	Minerais	I, %	Minerais	I, %	Minerais
17,9	4,9	1,34	Pt	1,38	Pt	3,3	Pt	3,9	Pt
20,9	4,3	23,01	Q, La	19,97	Q	19,38	Q	19,21	Q
23,0	3,9	1,51	C	1,55	C	1,67	C	1,72	C
24,2	3,7	1,89	F, A	1,44	F, A	1,05	F, A	0,98	F, A
26,7	3,3	100,00	Q	100,00	Q	100	Q	100	Q
27,6	3,2	3,93	La	-	-	-	-	-	-
29,5	3,0	17,42	C, La	6,21	C	15,65	C	16,02	C
31,0	2,9	2,19	P	1,06	B	1,08	M	1,12	M
33,2	2,7	5,03	D, F, La	4,46	D, F	6,21	D, F	6,57	D, F
34,4	2,6	2,42	Pt, F	2,31	F	5,1	F	5,32	F
36,6	2,5	5,57	Q,	5,19	Q	8,69	Q	9,02	Q
39,5	2,3	8,44	Q, C	8,51	F, Q, C	9,09	F, Q, C	9,81	F, Q, C
42,9	2,1	11,74	Q, P, La	4,99	B, Q	11,73	M, Q	12,52	M, Q
45,8	2,0	5,58	Q, F	2,97	Q, F	3,99	Q	4,07	Q
48,6	1,9	2,78	C, La	1,00	C	1,66	C	1,72	C
50,2	1,8	12,71	Q, D, La	12,83	Q, D	14,66	Q, D	17,92	Q, D
51,8	1,8	0,70	Pt, La	-	-	-	-	-	-
55,4	1,7	4,57	F, Q, Pt, La	3,62	F, Q, Pt	0,91	Q	1,03	Q
57,4	1,6	1,35	Q, C, F, La	-	-	-	-	-	-
60,0	1,5	13,31	Q, A, La	4,26	Q, A	4,03	Q, A	3,98	Q, A
62,3	1,5	6,51	P, C, F	1,40	D, F	5,66	D, F	6,27	D, F
64,1	1,5	3,76	Q, F, C, La	1,87	Q, F, C	1,12	Q, F, C	2,28	Q, F, C
68,3	1,4	11,56	Q, D, M, La	6,88	Q	5,26	Q	5,17	Q

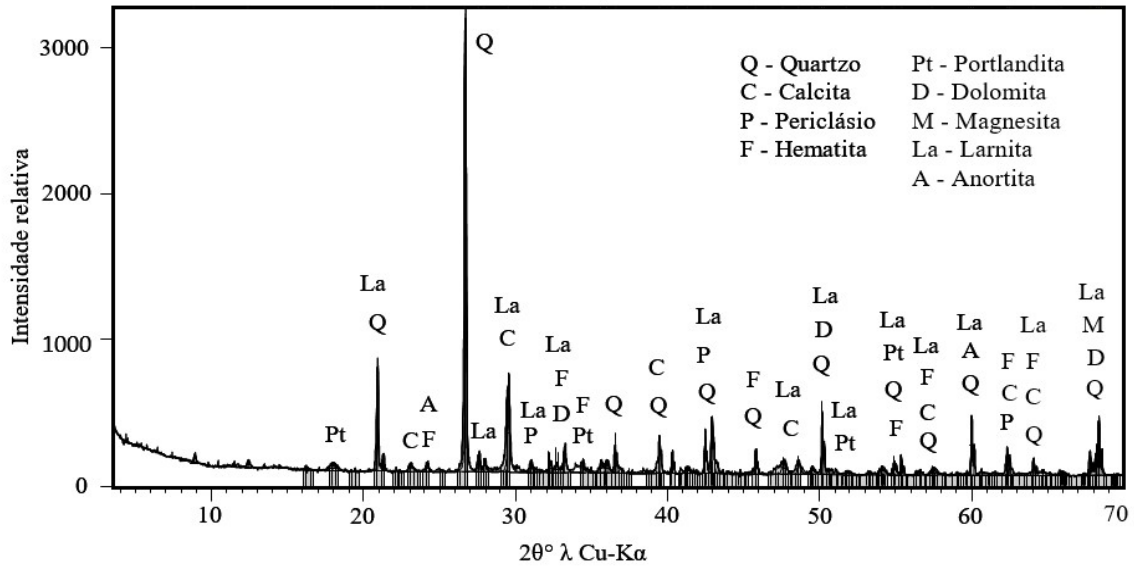
Fonte: Autoria própria (2020)

A interpretação dos resultados da análise de DRX das amostras com multiplicidade de minerais em um único pico não é exata, para alguns casos, visto que não é possível afirmar o percentual que representa cada mineral. No entanto, apesar dessas limitações, é possível identificar a variação da intensidade dos picos mais significativos, como por exemplo: periclásio [MgO], brucita [Mg(OH)₂], portlandita [Ca(OH)₂], calcita [CaCO₃], dolomita [CaMg(CO₃)₂], anortita [CaAl₂Si₂O₈] e quartzo [SiO₂].

Decifrados todos os difratogramas da composição 9, mistura inicial seca apresentado na Figura 42, aos 3 dias de cura apresentado na Figura 43, aos 180 dias de cura apresentado na Figura 44 e aos 720 dias de cura apresentado na Figura 45, foi possível observar a ausência de grandes mudanças nas posições de picos cristalinos dos minerais na escala horizontal 2 Θ ° dos difratogramas.

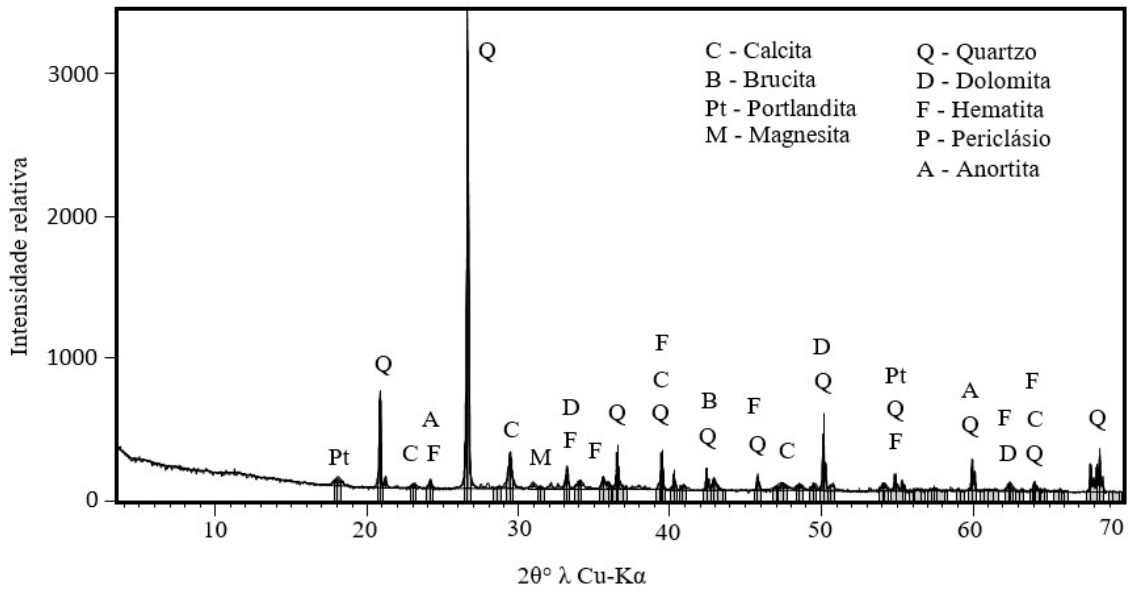
A Tabela 20 tem por intuito auxiliar a compreensão das análises, juntamente com as Figuras 42, 43, 44 e 45, em suas respectivas idades de cura.

Figura 42 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura inicial da composição 09



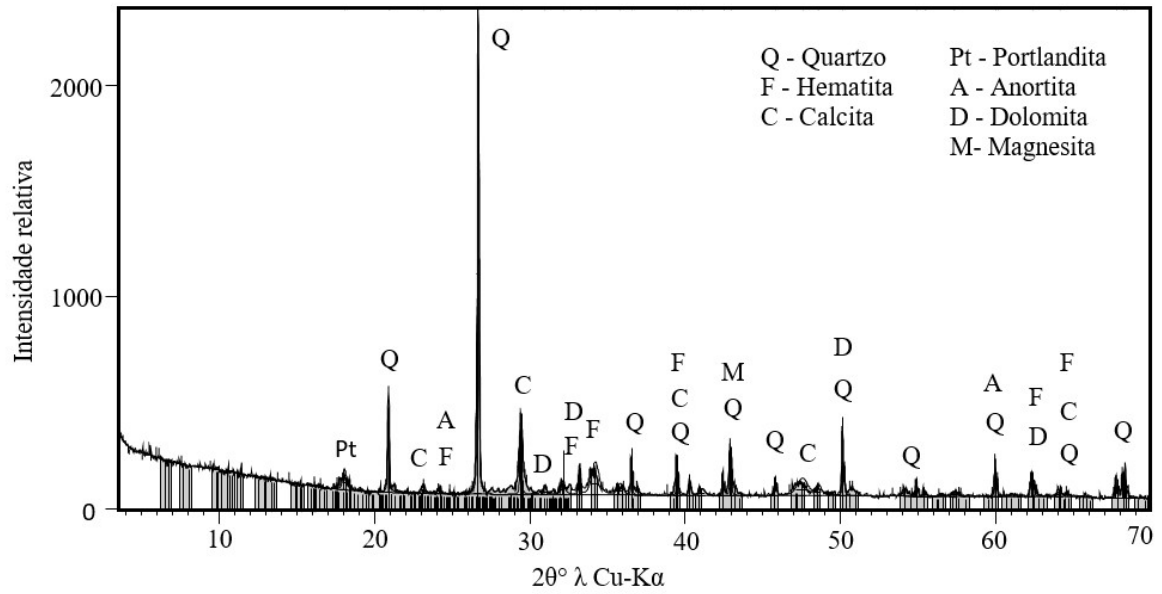
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 43 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 3 dias da composição 09



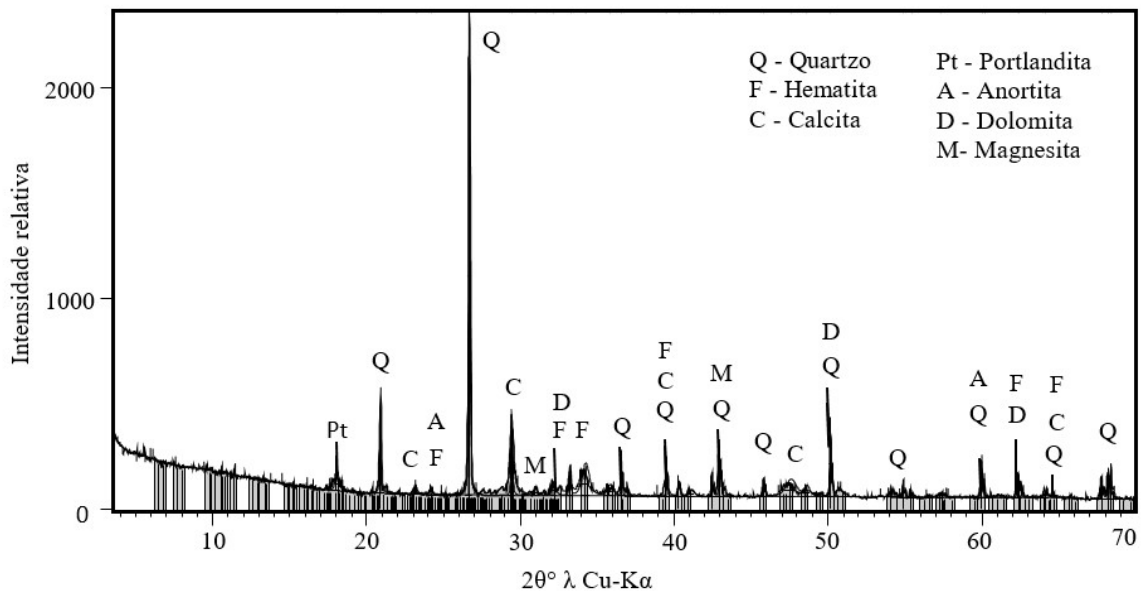
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 44 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 180 dias da composição 09



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 45 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 720 dias da composição 09



Fonte: Autoria própria (2020)

Na Tabela 21 é apresentado a legenda utilizada nos difratogramas:

Tabela 21 - Minerais presentes na composição 9

Símbolo	Mineral	Fórmula
Q	Quartzo	SiO ₂
C	Calcita	CaCO ₃
P	Periclásio	MgO
F	Hematita	Fe ₂ O ₃
Pt	Portlandita	Ca(OH) ₂
D	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
M	Magnesita	MgCO ₃
La	Larnita	Ca ₂ SiO ₄
Br	Brucita	Mg(OH) ₂
A	Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈

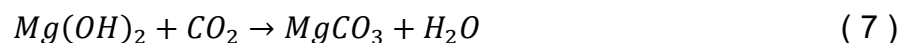
Fonte: Autoria própria (2020)

Comparando os difratogramas da mistura inicial seca e aos 3 dias de cura da composição 9, decifrados na Figura 42 e 43 é possível verificar muitos picos coincidindo com diferentes minerais. Deste modo, a mudança de intensidade pode ser verificada, com certeza, apenas através do controle do restante dos picos, pois nestes há apenas um mineral por pico, o que representa, de maneira certa, 100% aquele mineral. Esse fato pode ser verificado em $2\theta^\circ = 23,0^\circ$, em que há um pequeno aumento no pico da calcita [CaCO₃], desde a mistura inicial (1,51%) até aos 720 dias de cura (1,72%), o que comprova a utilização de RPC.

Outra contemplação a ser realizada, foi que ao entrar em contato com a água durante a mistura dos compósitos, devido à exposição à umidade, o periclásio [MgO] hidrata-se facilmente, resultando na formação da brucita [Mg(OH)₂], esse processo foi observado em $2\theta^\circ = 31,0^\circ$ e $2\theta^\circ = 42,9^\circ$. Essa reação é demonstrada na equação 6.



Também se observou que ao entrar em contato com o dióxido de carbono [CO₂] na cura dos corpos de prova em ambiente aberto, a brucita [Mg(OH)₂] resulta na formação da magnesita [MgCO₃], processo observado $2\theta^\circ = 31,0^\circ$ e $42,9^\circ$. Essa reação é demonstrada na equação 7.



A maior intensidade, 100%, em todos os difratogramas de DRX, tem o pico de Quartzo de $2\theta^\circ = 26,7^\circ$, revelando que o quartzo tem o melhor nível de cristalização da amostra.

Também é constatado nos difratogramas que os picos de anortita [$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$] com $2\theta^\circ = 24,2^\circ$ diminuíram suas intensidades de 1,89% na mistura inicial para 0,98% na composição aos 720 dias de cura e com $2\theta^\circ = 60,0^\circ$ diminuíram suas intensidades de 13,31% na mistura inicial para 3,98% na composição aos 720 dias de cura, isso se deve principalmente porque grande parte das camadas superiores da estrutura das partículas estão mecanicamente danificadas, logo se cria um desnível, absorvendo e dispersando os Raios-X difratados, e assim reduzindo a intensidade dos picos no difratograma.

O produto desta destruição de redes cristalinas, por exemplo do quartzo, não foi aproveitada para síntese de novas estruturas, mas apenas para aumentar a quantidade das matérias amorfas nos poros entre partículas sólidas, através do processo Sol-gel (processo químico utilizado para a síntese de uma suspensão coloidal de partículas sólidas em um líquido) e o processo de sinérese (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 completamente sólido com propriedades mecânicas semelhantes aos das rochas naturais.

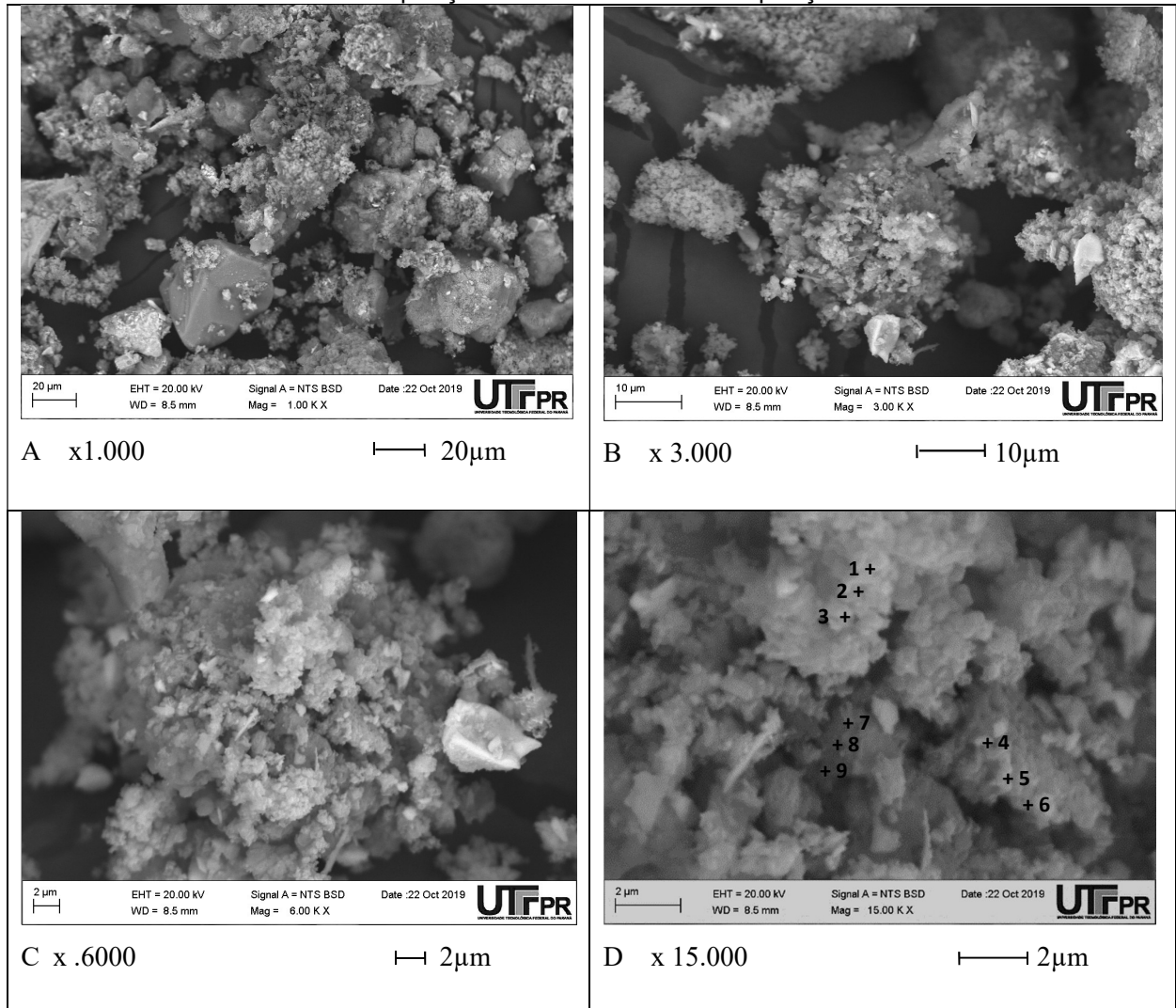
Além da DRX, conforme descrito no capítulo 3, também foram analisadas as estruturas morfológicas dos compósitos e suas alterações através do MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva).

Na Figura 46, são apresentados os resultados obtidos para a mistura inicial (composição 9), constituído de 40% de LAA, 10% de RMF, 30% de RC e 20% de RPC.

Na Figura 46-D e no Tabela 22, são verificados os resultados do EDS da composição química da composição 9 da mistura seca.

Pode-se verificar na Figura 46-A a existência de muitos vazios capilares entre as partículas. Na Figura 46-B e 46-C é possível verificar que as partículas são de diferentes tamanhos e morfologia e que os vazios capilares entre as partículas são evidentes.

Figura 46 - Estrutura morfológica da mistura inicial através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 9



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 22 - Composição microquímica da mistura inicial da composição 9

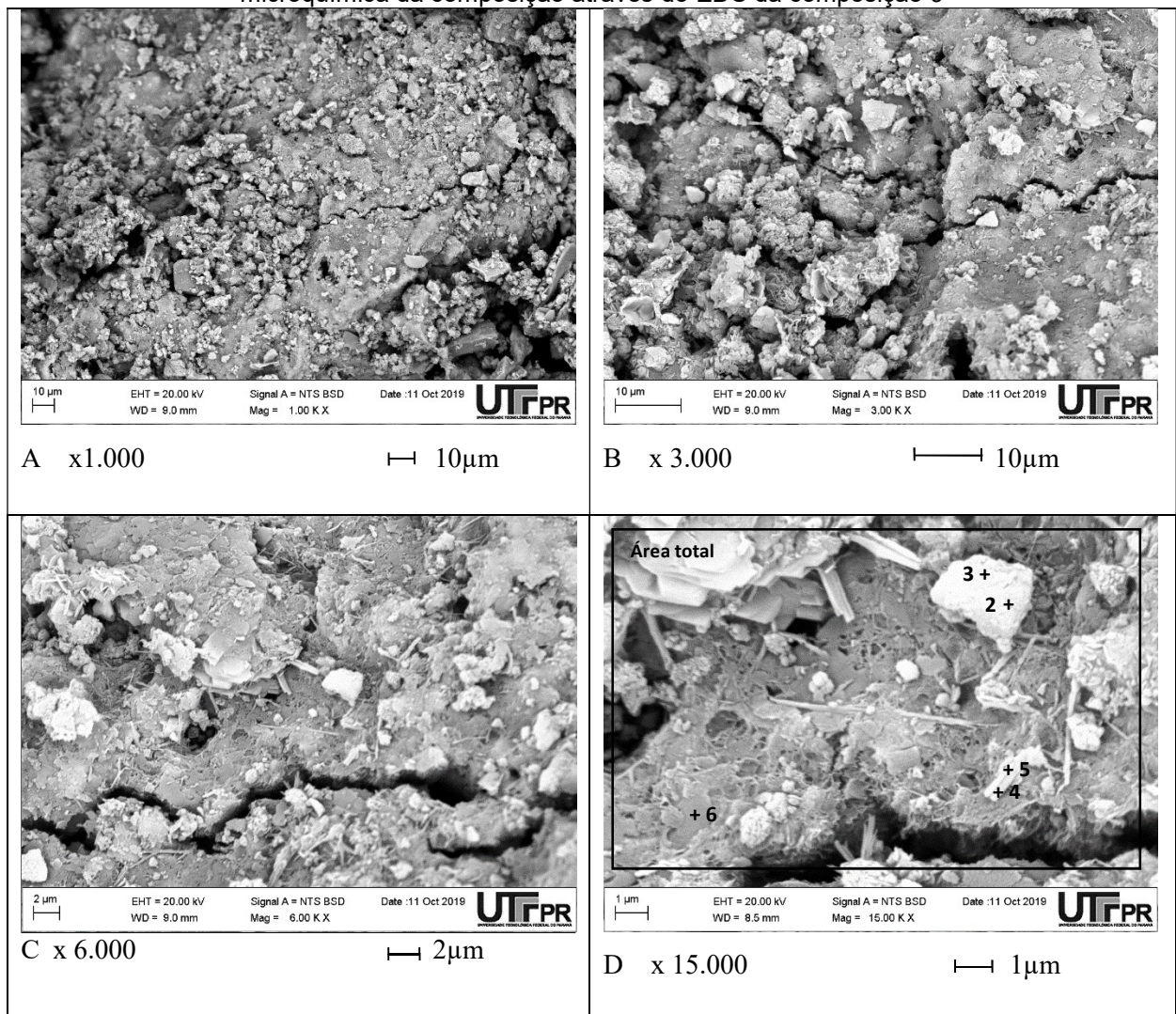
Composição química, % de peso						
Espectro	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Total
1	56,45	12,22	13,23	13,07	5,03	100,00
2	55,89	13,55	13,31	11,94	5,31	100,00
3	51,88	13,99	12,98	15,04	6,11	100,00
4	54,09	17,26	5,88	20,72	2,05	100,00
5	51,57	21,72	4,86	20,04	1,81	100,00
6	45,93	24,97	6,34	20,62	2,14	100,00
7	22,64	52,36	6,31	15,77	2,92	100,00
8	25,00	37,09	5,14	30,54	2,23	100,00
9	46,60	17,20	7,32	26,09	2,79	100,00

Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se observar na Tabela 22 que se trata de um material amorfo, pois a porcentagem entre os elementos químicos da amostra varia bruscamente, isso pode ser observado no espectro 7 e 8, em que são partículas que estão muito próximas, mas que os teores de ferro e alumínio variam em torno de 15%, cada elemento químico.

Na Figura 47, são apresentados os resultados obtidos para a composição 9 aos 3 dias de cura.

Figura 47 - Estrutura morfológica da mistura aos 3 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 9



Fonte: Autoria própria (2020)

É possível verificar nas Figuras 47-A, 47-B e 47-C a heterogeneidade entre as partículas constituintes do material, isso se comprova pela Figura 47-D e pelos pontos de EDS apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Composição microquímica da mistura aos 3 dias de cura da composição 9

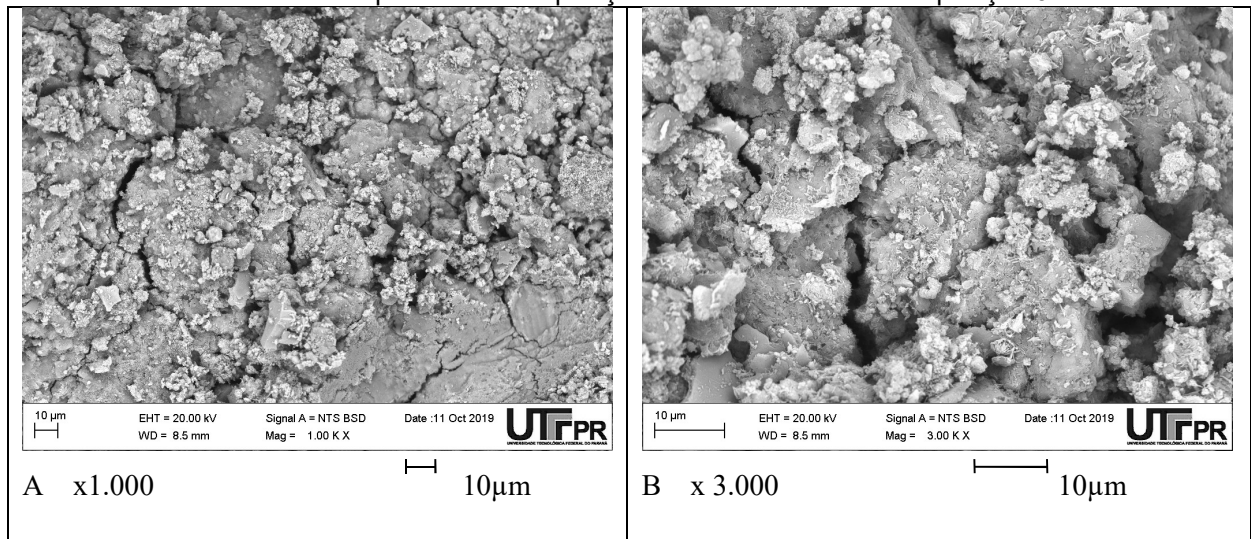
Composição química, % de peso						
Espectro	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Total
Área total	30,12	25,32	12,47	8,02	24,07	100,00
2	63,33	3,52	21,42	5,19	6,54	100,00
3	63,89	2,87	22,11	5,02	6,11	100,00
4	5,21	61,48	6,21	11,92	15,18	100,00
5	4,25	61,12	7,14	12,07	15,42	100,00
6	10,31	1,85	6,83	8,17	72,84	100,00

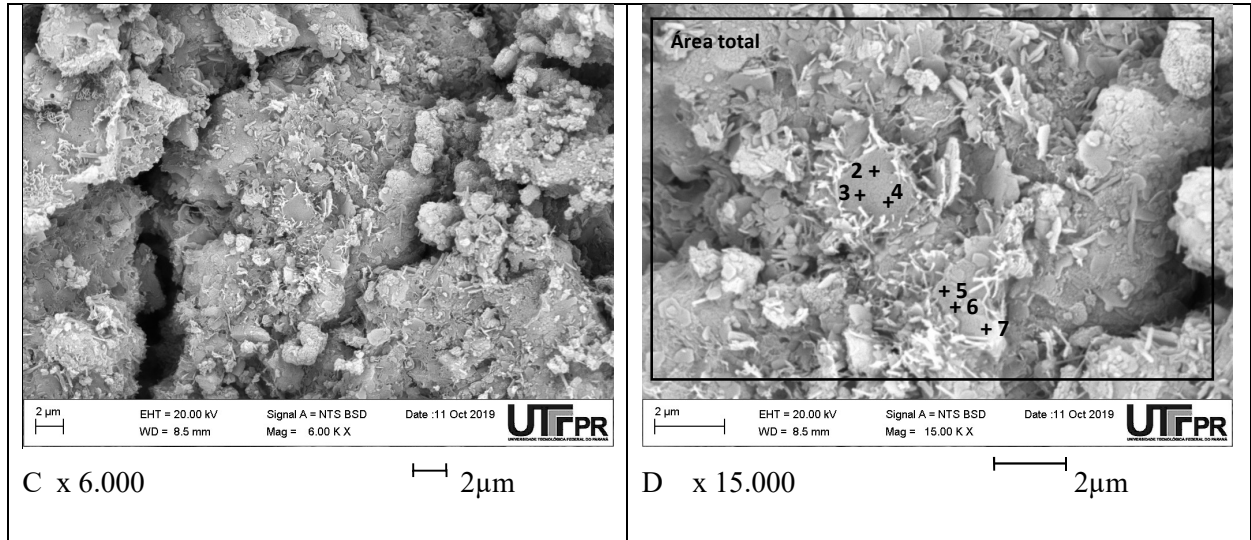
Fonte: Autoria própria (2020)

Percebe-se, na Tabela 23, que a partícula identificada pelo espectros 2 e 3 se trata de uma dolamita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], visto que sua composição predominante é o cálcio e o magnésio. Já a partícula identificada pelos espectros 4 e 5 refere-se a uma hematita [Fe_2O_3], pois a predominância dos elementos mineralógicos é o ferro. Já a partícula identificada pelo espectro 6 se trata do mineral de quartzo [SiO_2], visto que sua composição principal é do silício.

Na Figura 48, são apresentados os resultados obtidos para a composição 9 aos 180 dias de cura.

Figura 48 - Estrutura morfológica da mistura aos 180 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 9





Fonte: Autoria própria (2020)

Nas Figura 48-A, 48-B e 48-C são constatadas partículas soltas na amostra e a falta de interligação entre os elementos, isso pode esclarecer o não ganho de resistência da composição. Na Figura 48-D são observados os pontos de EDS e na Tabela 24 a composição química da amostra.

Tabela 24 - Composição microquímica da mistura aos 180 dias de cura da composição 9

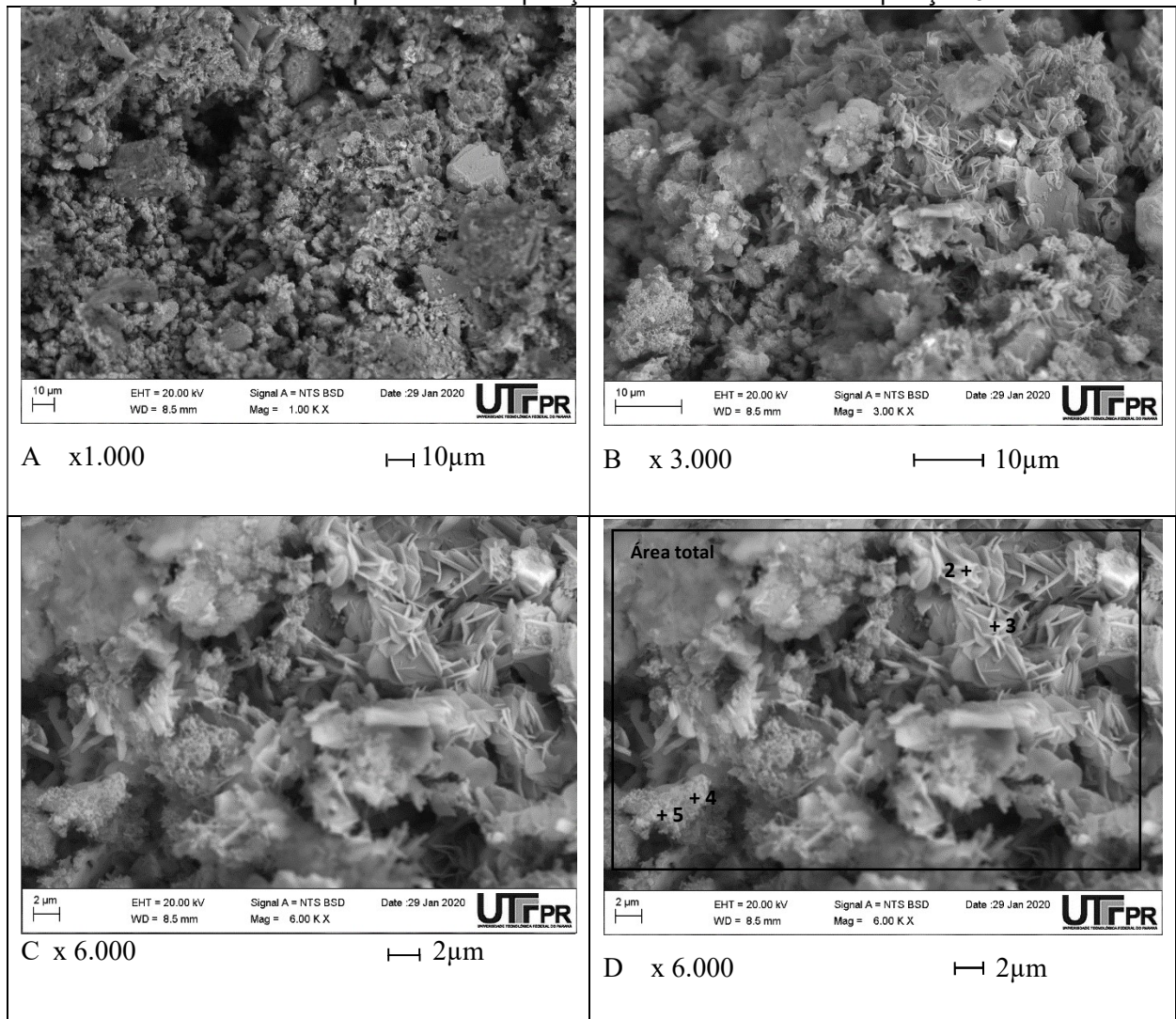
Composição química, % de peso								
Espectro	Ca	Si	Al	Na	Mg	Fe	K	Total
área total	45,36	27,89	8,61	5,48	5,32	4,74	2,60	100,00
2	52,83	24,39	7,60	6,01	3,45	4,00	1,72	100,00
3	57,40	21,62	7,18	5,42	3,89	3,28	1,21	100,00
4	58,65	21,13	7,08	5,83	3,28	3,04	0,99	100,00
5	57,30	22,27	5,02	8,65	2,72	3,18	0,86	100,00
6	56,62	23,60	4,38	8,75	2,57	3,39	0,69	100,00
7	56,95	23,30	4,89	8,50	2,36	3,34	0,66	100,00

Fonte: Autoria própria (2020)

Pode-se detectar na Tabela 24 a predominância do resíduo de concreto na amostra, visto que este é composto, principalmente, por cálcio e silício, e já foi identificado na DRX. Por outro lado, no DRX aos 180 dias não foi reconhecido nenhum componente de sódio [Na], já no MEV sim, porém como o MEV se trata de uma análise microquímica, pode se tratar de resquícios do lodo de anodização de alumínio. Por fim, pode se afirmar que se trata de uma amostra amorfa, visto que a variação entre os elementos extrapola 1%, como observado no espectro 5 e 6, no elemento Si.

Na Figura 49, são expostos os resultados obtidos para a composição 9 aos 720 dias de cura.

Figura 49 - Estrutura morfológica da mistura aos 720 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 9



Fonte: Autoria própria (2020)

Verifica-se na Figura 49-A que após 720 dias de cura a morfologia do compósito 9 ainda apresenta vazios capilares e os mesmos estão vinculados com a resistência à compressão axial, esta que foi de 2,13MPa. Na Figura 49-B e 49-C é possível identificar algumas partículas em formato de estrelas, o que pode ser identificado como a mineral aragonita, devido sua composição química.

Na Figura 49-D e no Tabela 25, são verificados os resultados do EDS da composição química da composição 9 da mistura aos 720 dias de cura.

Tabela 25 - Composição microquímica da mistura aos 720 dias de cura da composição 9

Composição química, % de peso						
Espectro	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Total
Área total	30,12	25,32	12,47	8,02	24,07	100,00
2	76,63	4,11	11,97	-	7,29	100,00
3	75,94	4,53	12,32	-	7,21	100,00
4	65,75	2,16	15,19	3,92	12,98	100,00
5	63,42	2,02	17,19	4,07	13,30	100,00

Fonte: Autoria própria (2020)

Nos espectros 2 e 3, da Tabela 25, pode-se identificar um alto teor de cálcio, o que leva a concluir ser uma aragonita, esta que forma cristalina é parecida a calcita, constituída de carbonato de cálcio. A aragonita pode se apresentar sob forma de agulhas entrelaçadas, conforme verificado na Figura 49-D, ao contrário da calcita, que cristaliza em blocos isolados. Além disto, a aragonita se apresenta em formato cristalino, visto que a variação entre os elementos mineralógicos é menor que 1%.

4.3.2 Composição 10 (40% de RMF, 10% de LAA, 30% de RC e 20% de RPC)

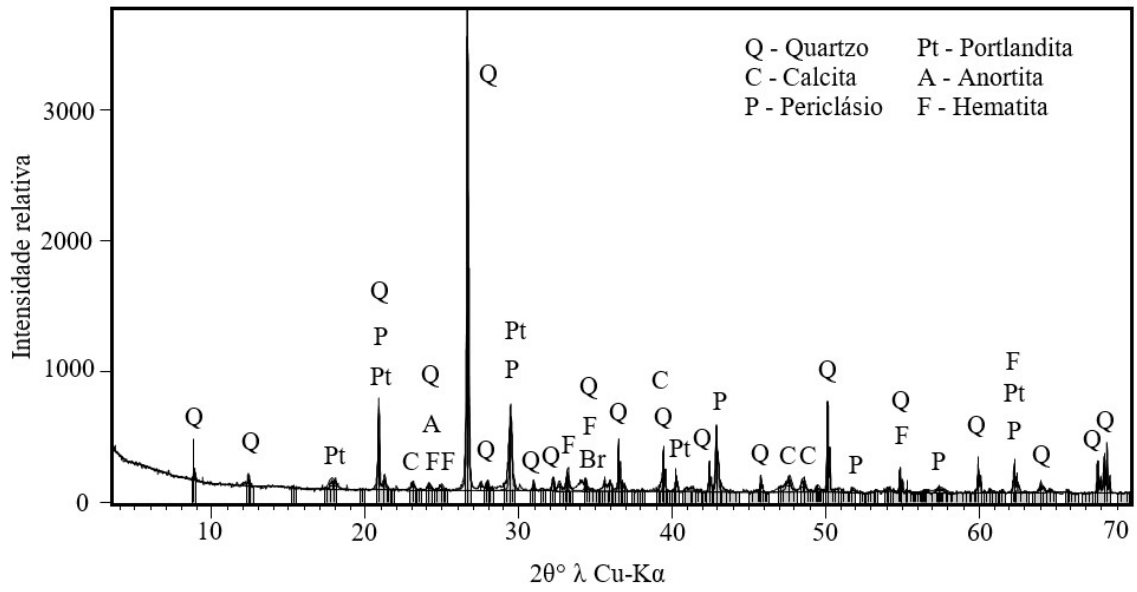
Para melhor compreensão e identificação dos compostos cristalinos das composições em estudo e suas mudanças com o decorrer do tempo, foi realizado o mesmo procedimento com a composição 10 com 40% de RMF, 10% de LAA, 30% de RC e 20% de RPC. A difração de raio X foi realizada e os resultados estão decifrados e apresentados na Tabela 26, assim como estão decifrados e apresentadas as intensidades de picos dos elementos mineralógicos da mistura na Figura 50, da composição aos 3 dias de cura na Figura 51, da composição aos 180 dias de cura na Figura 52 e da composição aos 720 dias de cura na Figura 53, através do DRX.

Tabela 26 - Mudança de intensidades dos picos de elementos cristalinos na composição 10

2 θ °	d, Å	Mudança de intensidades (%) dos picos após hidratação e cura (dias)							
		Mistura Inicial		3		180		720	
		I, %	Minerais	I, %	Minerais	I, %	Minerais	I, %	Minerais
8,9	8,9	1,80	Q	-	-	-	-	-	-
12,4	12,4	2,04	Q	-	-	-	-	-	-
17,8	17,8	1,74	Pt	1,67	Pt, A	-	-	-	-
20,9	20,9	16,98	Q, P, Pt	22,82	Q, B, Pt	17,39	Q, D	25,83	Q, D
23,1	23,1	1,40	C	0,80	C	2	C	2,12	C
24,1	24,1	1,11	Q, F, A	1,23	Q, F	1,57	Q, F	2,49	Q, F
24,9	24,9	0,97	F	-	-	-	-	-	-
26,6	26,6	100,00	Q	100,00	Q	100	Q	100	Q
28,0	28,0	1,83	Q	-	-	-	-	-	-
29,5	29,5	16,02	Pt, P	9,22	Pt, B	16,74	D	23,84	D
31,0	31,0	1,87	Q	1,36	A	-	-	-	-
32,2	32,2	2,87	Q	1,21	A	-	-	-	-
33,2	33,2	3,90	F	4,95	F	5,29	F	7,19	F
34,4	34,4	2,81	Q, F, Br	2,77	Q, Br	3,76	Q	4,12	Q
36,6	36,6	11,24	Q	7,95	Q	7,31	Q	7,25	Q
39,5	39,5	9,51	C, Q	8,26	C, Q	9,01	C, Q, F	9,37	C, Q, F
40,3	40,3	3,65	Pt	3,41	C	3,67	C	5,93	C
42,5	42,5	6,90	Q	5,34	Q	5,9	Q	6,16	Q
42,9	42,9	14,50	P	14,69	B	12,61	M	14,92	M
45,8	45,8	3,67	Q	5,27	Q, R	4,23	Q	4,51	Q
47,6	47,6	2,72	C	1,24	C	2,59	C	2,72	C
48,5	48,5	2,46	C	2,21	C	2,14	C	3,18	C
50,1	50,1	20,06	Q	13,76	Q	13,26	Q	13,52	Q
51,8	51,8	0,83	P	-	-	-	-	-	-
54,9	54,9	5,34	Q, F	3,69	Q, F	1,7	Q	1,98	Q
55,0	55,0	2,92	P	1,12	B	3,8	M	4,17	M
60,0	60,0	6,57	Q	9,58	Q, R	7,42	Q	7,53	Q
62,3	62,3	6,38	F, Pt, P	1,98	F, Pt, B	1,78	F, D	5,18	F, D
64,1	64,1	1,46	Q	2,08	Q	2,48	Q, C	2,72	Q, C
67,8	67,8	7,15	Q	5,73	Q	5,32	Q, C	5,54	Q, C
68,2	68,2	8,06	Q	6,00	Q	7,16	Q	7,79	Q, C

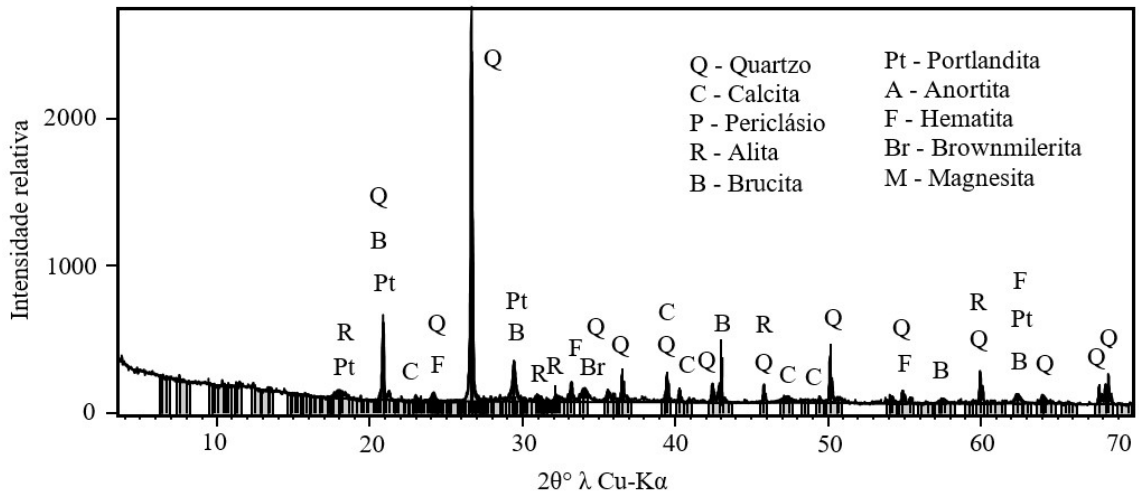
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 50 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura inicial da composição 10



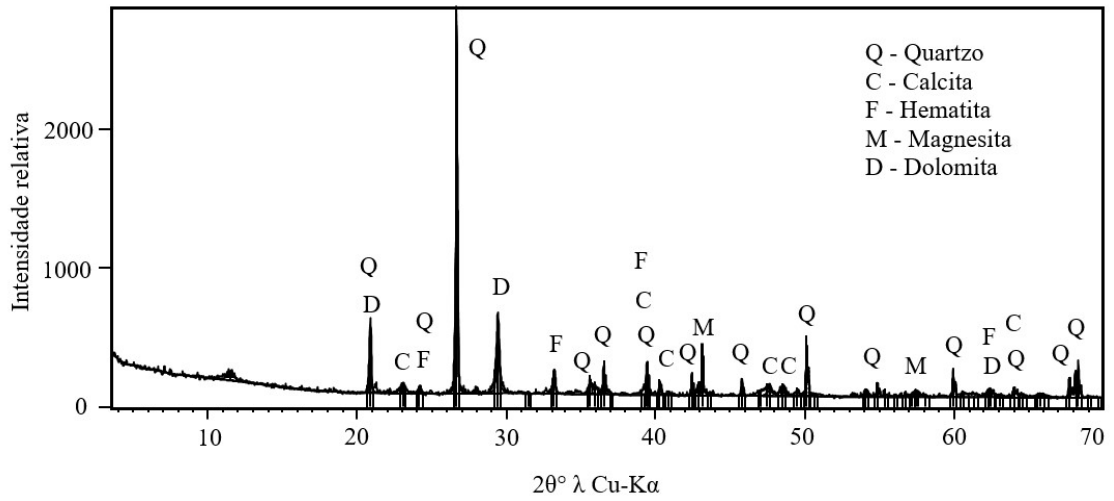
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 51 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 3 dias da composição 10



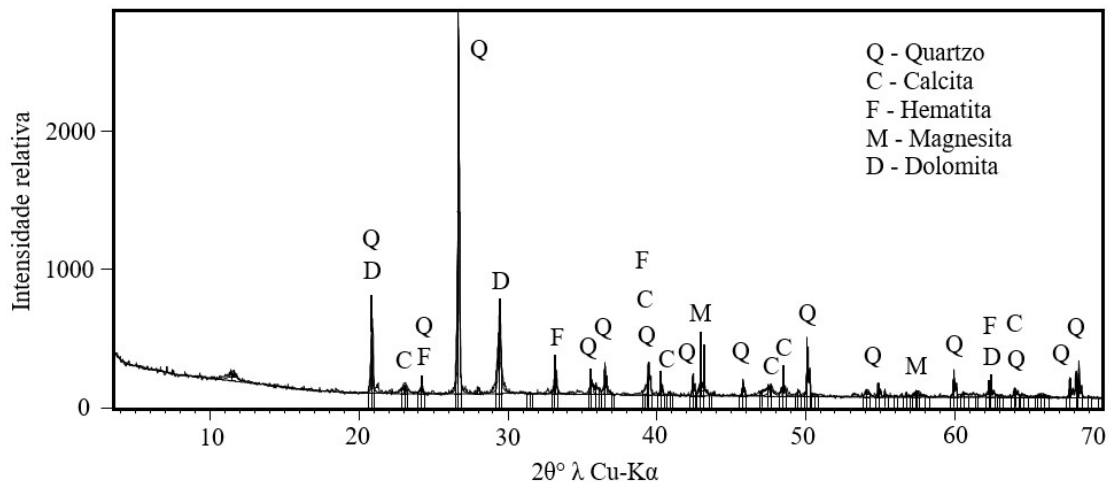
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 52 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 180 dias da composição 10



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 53 - Intensidades dos elementos mineralógicos da mistura aos 720 dias da composição 10



Fonte: Autoria própria (2020)

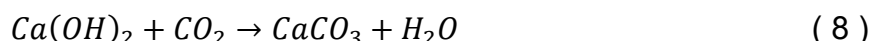
Na Tabela 27 é apresentado a legenda utilizada nos difratogramas:

Tabela 27 - Minerais presentes na composição 10

Símbolo	Mineral	Fórmula
Q	Quartzo	SiO ₂
C	Calcita	CaCO ₃
P	Periclásio	MgO
F	Hematita	Fe ₂ O ₃
Pt	Portlandita	Ca(OH) ₂
D	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
M	Magnesita	MgCO ₃
La	Larnita	Ca ₂ SiO ₄
A	Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
B	Brucita	Mg(OH) ₂
Bw	Brownmillerita	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃

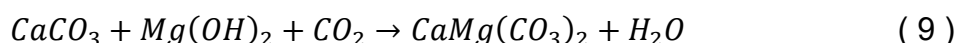
Fonte: Autoria própria (2020)

Contemplando a Tabela 26 e as Figuras 50, 51, 52 e 53 é possível verificar um maior número de síntese dos elementos na composição 10, comparado a composição 9, sendo está uma das explicações da maior resistência deste material. A síntese de cristais acontece com os carbonatos, por exemplo com a calcita [CaCO₃], que é resultado da interação da portlandita [Ca(OH)₂] com o dióxido de carbono [CO₂], dada pela reação apresentada na equação 8.



Esse processo foi observado na composição 10, através do crescimento lento dos picos, em $2\theta^\circ = 20,9^\circ$ (16,98% mistura inicial até 22,82% aos 3 dias de cura), $2\theta^\circ = 29,5^\circ$ (16,02% mistura inicial até 16,74% aos 3 dias de cura) e $2\theta^\circ = 40,3^\circ$ (3,65% mistura inicial até 5,93% aos 720 dias de cura).

Em seguida, pode-se detectar a sintetização da calcita [CaCO₃], com a brucita [Mg(OH)₂] e o dióxido de carbono [CO₂] resultando na dolomita [CaMg(CO₃)₂], através da reação:



Este fato pode ser comprovado observando a Tabela 26, através do crescimento lento de intensidades dos picos, em $2\theta^\circ = 20,9^\circ$ (16,98% mistura inicial

até 25,83% aos 720 dias de cura), $2\theta^\circ = 29,5^\circ$ (16,02% mistura inicial até 23,84% aos 720 dias de cura) e $2\theta^\circ = 62,3^\circ$ (1,98% aos 3 dias de cura até 5,18% aos 720 dias de cura).

A síntese de cristais pode ser observada nos picos $2\theta^\circ = 42,9^\circ$ e $2\theta^\circ = 55,0^\circ$ em que se tem na mistura inicial os minerais periclásio [MgO] que em contato com a água, na hidratação dos materiais, se transforma em brucita [Mg(OH)₂] aos 3 dias de cura e ao final de 720 dias, em contato com o CO₂ presente na atmosfera, devido a cura em ambiente aberto, se transforma em magnesita [MgCO₃].

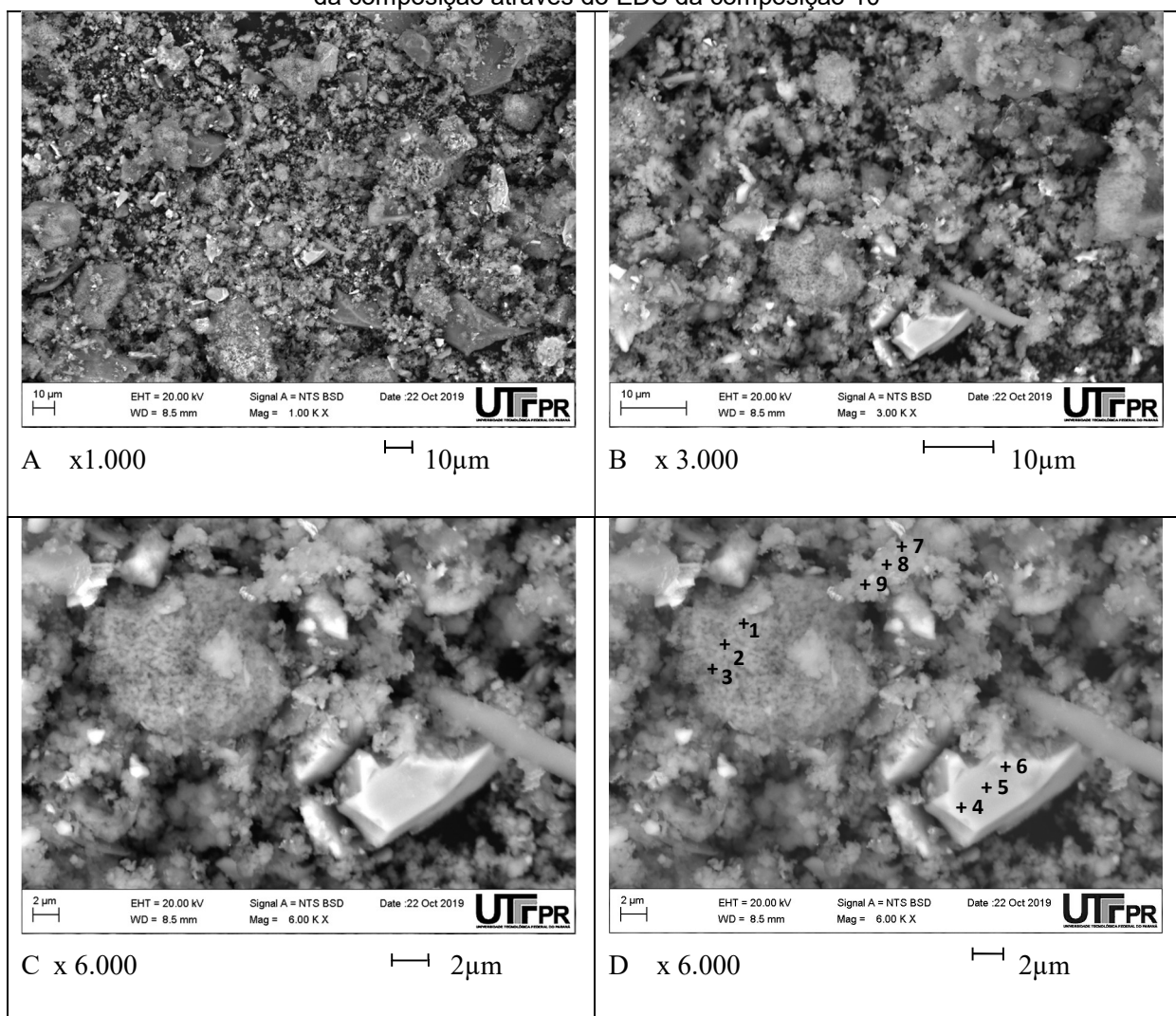
Esses fatos evidenciam todos os processos de endurecimento de materiais, razão mais importante do aparecimento, crescimento, fortalecimento e o aperfeiçoamento de estruturas cristalinas de carbonatos.

Ademais, nos picos de $2\theta^\circ = 23,1^\circ$ e $2\theta^\circ = 39,5^\circ$, $2\theta^\circ = 47,5^\circ$ e $2\theta^\circ = 48,5^\circ$ o mineral de calcita [CaCO₃] é presente desde a mistura inicial até 720 dias de cura, o que comprova a utilização do RPC.

Na Figura 54, são apresentados os resultados obtidos para a composição 10 para mistura inicial.

Nas Figuras 54-A, 54-B e 54-C é possível observar uma grande heterogeneidade na amostra e isso se confirma na composição química de cada ponto, interpretados pelo EDS na Tabela 28. Nos espectrogramas 1, 2 e 3, da Figura 54-D é possível identificar alto teor de magnésio e cálcio, o que confirma o DRX no aparecimento de alguns picos de periclásio e outros de portlandita. Nos espectrogramas 4, 5 e 6 é verificado grande teor de ferro, o que também confirma o DRX com o aparecimento de hematita.

Figura 54 - Estrutura morfológica da mistura inicial através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 10



Fonte: Aatoria própria (2020)

Tabela 28 - Composição microquímica da mistura inicial da composição 10

Composição química, % de peso							
Espectro	Mg	Ca	Fe	Si	Al	Na	Total
1	45,39	49,10	1,90	0,94	2,01	0,66	100,00
2	40,39	55,72	1,13	0,79	1,30	0,67	100,00
3	36,18	56,80	1,39	2,43	2,60	0,60	100,00
4	14,71	16,55	65,39	2,07	1,28	-	100,00
5	23,30	22,13	48,84	2,61	2,36	0,76	100,00
6	21,54	15,10	57,06	3,30	2,34	0,66	100,00
7	31,75	46,72	13,30	3,11	3,87	1,25	100,00
8	37,57	44,93	9,27	3,43	3,86	0,94	100,00
9	33,14	49,48	8,60	3,07	4,40	1,31	100,00

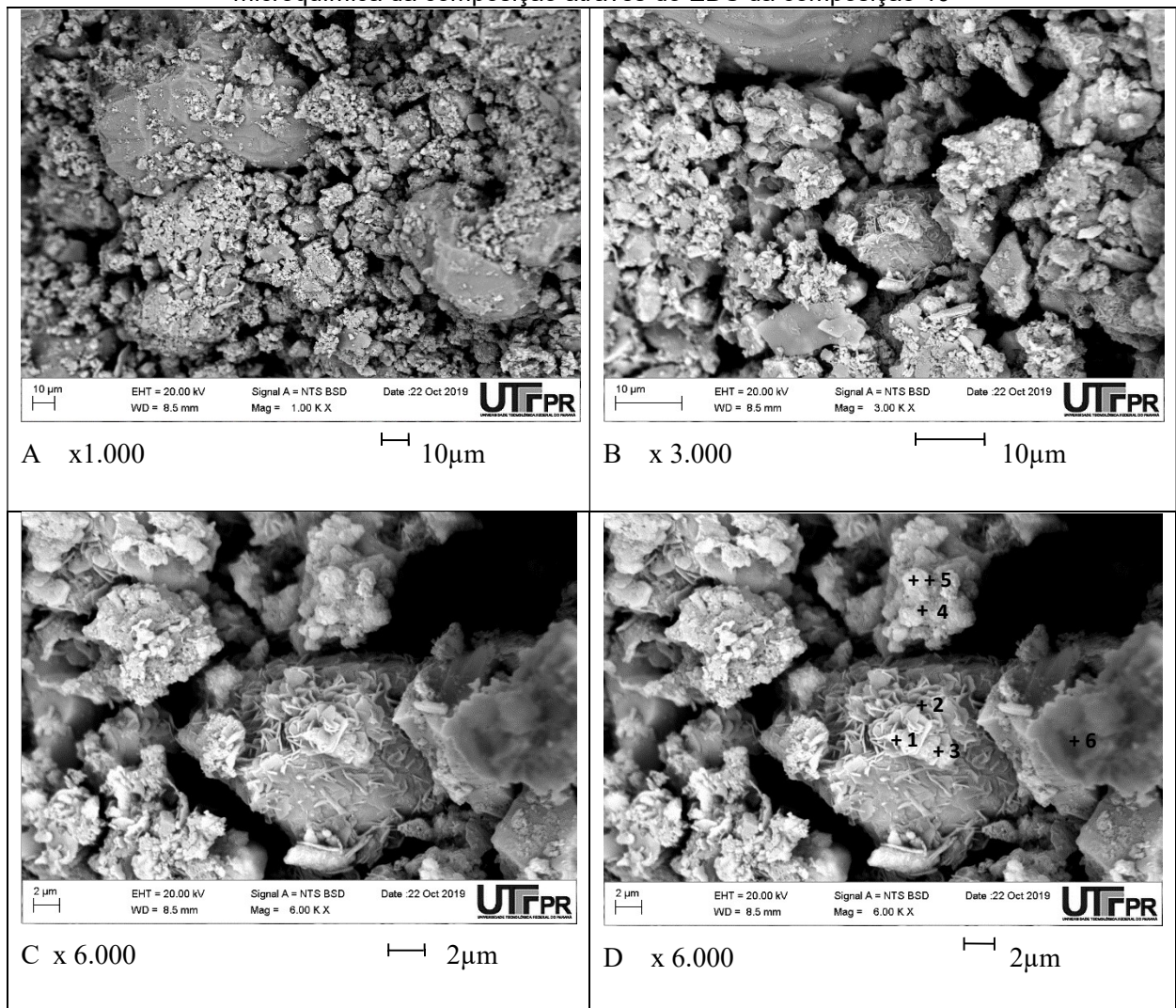
Fonte: Aatoria própria (2020)

Ainda sobre os pontos analisados e possível observar algumas impurezas, tais como alumínio e sódio que provavelmente é proveniente do lodo de anodização de alumínio, mais especificamente do tanque de fosqueamento.

Além disso, não é observado a presença de nenhum corpo cristalino, pois a diferença entre as porcentagens de cada espectro é alta.

Na Figura 55, são apresentados os resultados obtidos para a composição 10 aos três dias de cura.

Figura 55 - Estrutura morfológica da mistura aos 3 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 10



Fonte: Autoria própria (2020)

Nas Figuras 55-A e 55-B é possível observar muitos vazios capilares entre as partículas, isso pode ser justificado pela baixa idade de cura. Na Figura 55-C é possível identificar algumas partículas em formato de estrelas, o que pode ser

identificado como a mineral aragonita, devido sua composição química, constituída de carbonato de cálcio.

Na Figura 55-D, com ampliação de 6.000x, são apresentados os pontos de EDS e na Tabela 29 a composição química da amostra.

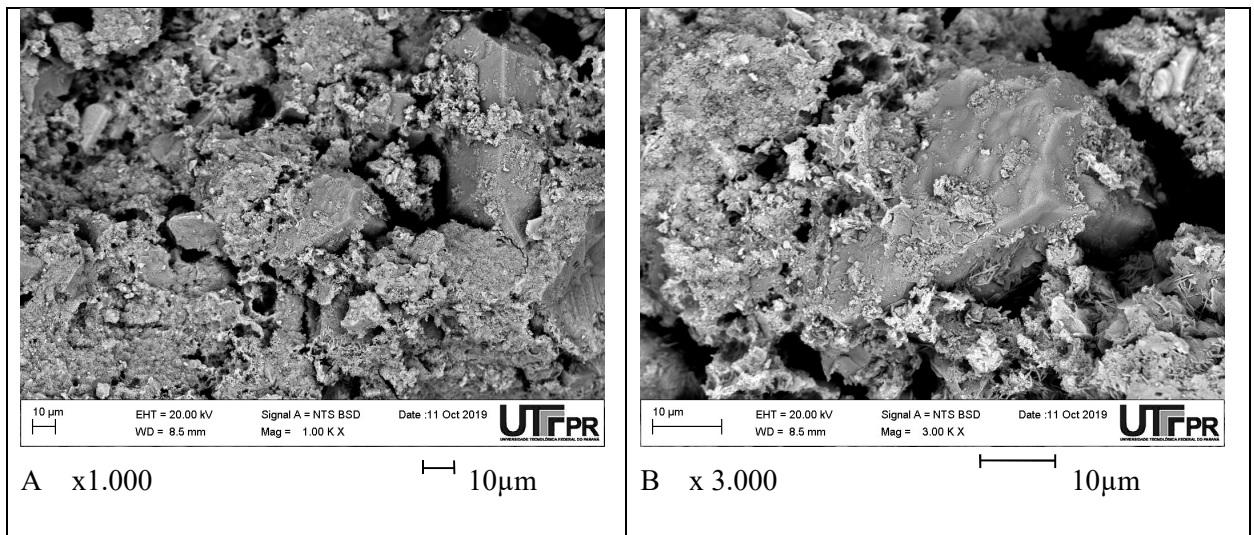
Tabela 29 - Composição microquímica da mistura aos 3 dias de cura da composição 10

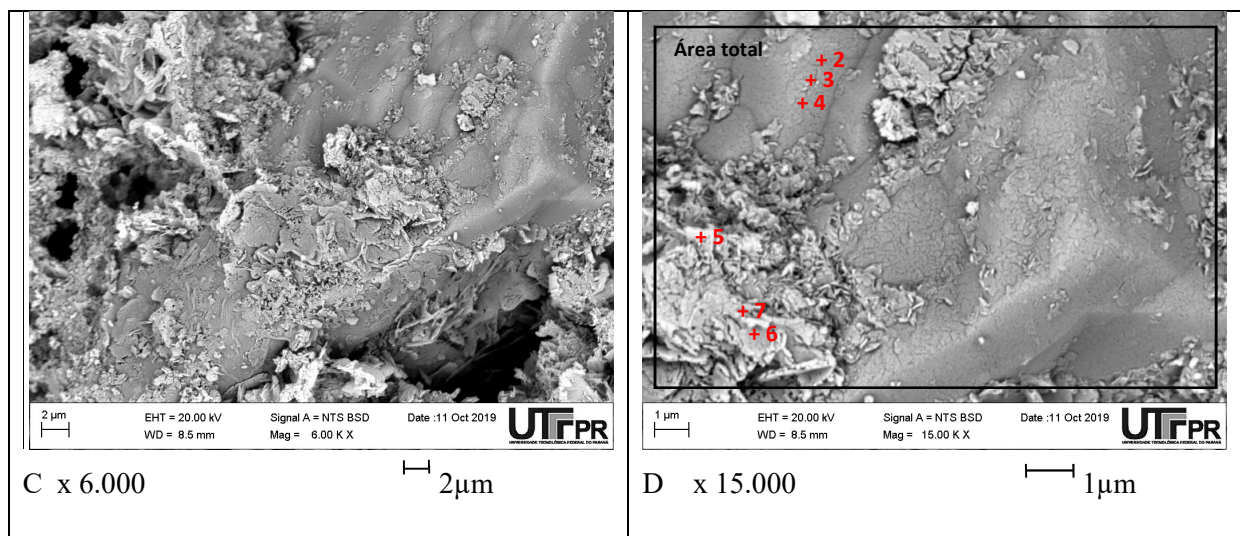
Composição química, % de peso						
Espectro	Mg	Ca	Fe	Si	Al	Total
1	12,23	67,23	6,18	9,75	4,61	100,00
2	12,72	66,98	5,98	9,69	4,63	100,00
3	12,68	67,65	5,72	9,97	3,98	100,00
4	23,61	42,28	17,83	10,09	6,19	100,00
5	24,98	45,22	14,06	11,87	3,87	100,00
6	3,54	16,59	-	78,89	0,98	100,00

Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 56, são apresentados os resultados obtidos para a composição 10 aos 180 dias de cura.

Figura 56 - Estrutura morfológica da mistura aos 180 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 10





Fonte: Autoria própria (2020)

É possível identificar uma maior regularidade na estrutura do material, proveniente da interação entre os componentes da mistura. Nas Figuras 56-A, 56-B e 56-C é possível verificar uma interação entre as partículas, além de algumas áreas com superfície plana e densa. Quanto mais denso esse material, maior sua resistência, como por exemplo, sua resistência à compressão aos 180 dias: 8,45MPa. Na Figura 56-D, com ampliação de 15.000x, são apresentados os pontos de EDS e na Tabela 30 a composição química da amostra.

Tabela 30 - Composição microquímica da mistura aos 180 dias de cura da composição 10

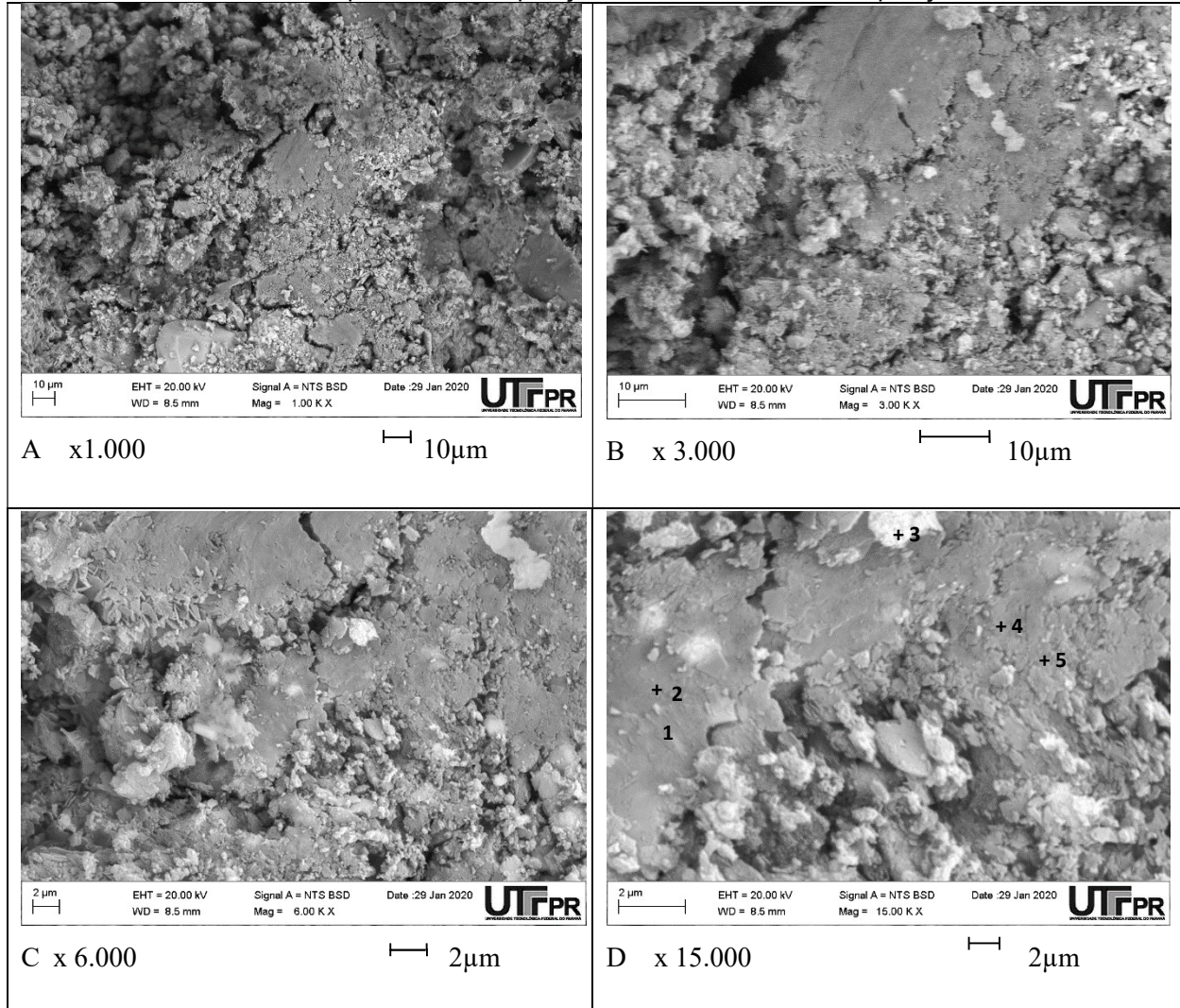
Composição química, % de peso						
Espectro	Si	Ca	Mg	Fe	Al	Total
1	15,42	45,12	32,18	5,72	1,56	100,00
2	65,84	21,87	9,18	1,18	1,93	100,00
3	64,79	22,15	10,32	0,98	1,76	100,00
4	64,44	21,98	10,92	1,43	1,23	100,00
5	22,39	3,17	1,12	73,32	-	100,00
6	13,62	52,19	29,16	3,89	1,14	100,00
7	12,95	51,94	30,42	3,58	1,11	100,00

Fonte: Autoria própria (2020)

É verificado nas Figuras 56-C e 56-D que quantidade de poros é muito menor e que a estrutura é muito mais densa que nas idades iniciais. Na Tabela 30, observando o espectro 5 pode ser identificado como hematita e os espectros 6 e 7 podem ser identificados como o mineral dolomita, confirmando o DRX realizado aos 180 dias de cura.

Na Figura 57, são apresentados os resultados obtidos para a composição 10 aos 720 dias de cura.

Figura 57 - Estrutura morfológica da mistura aos 720 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica da composição através do EDS da composição 10



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 31 - Composição microquímica da mistura aos 720 dias de cura da composição 10

Composição química, % de peso							
Espectro	Mg	Ca	Fe	Si	Al	Na	Total
1	8,14	33,94	34,58	5,78	15,01	2,55	100,00
2	9,09	51,84	14,63	5,59	16,69	2,16	100,00
3	10,77	3,22	64,44	12,15	7,82	1,60	100,00
4	12,72	35,18	16,21	21,12	11,32	3,45	100,00
5	13,09	34,92	15,98	23,18	11,01	1,82	100,00

Nas Figuras 57-A, 57-B e 57-C é possível observar algumas áreas em que apresentam uma maior interação entre as partículas, já outras áreas com regiões bastante densas, o que acarreta em uma maior resistência, como por exemplo, sua resistência à compressão aos 720 dias: 9,23MPa. Na Figura 57-D, com ampliação de 15.000x, são apresentados os pontos de EDS e na Tabela 31 a composição química da amostra.

4.4 EXECUÇÃO DE UM TIJOLO E PAVER ECOLÓGICO

A problemática da geração de resíduos industriais se agrava a cada dia, logo a utilização desses resíduos como matérias-primas para a confecção de novos materiais na construção civil se torna viável devido a possível diminuição de locais de destinação incorreta, além de diminuir a extração de recursos naturais.

Quanto à confecção de um tijolo e um paver ecológico, observou-se que as características visuais são satisfatórias, porém deve-se realizar outros ensaios mais específicos, que não foram realizados neste trabalho devido a limitação da quantidade disponível de RMF nessa fase da pesquisa.

5 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a utilização de rejeito de minério de ferro, lodo de anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduo da produção da cal é viável em compósitos para construção civil, desde que nas proporções corretas e que as características desses insumos sejam conhecidas, uma vez que, por se tratar de resíduos industriais, esse podem sofrer alterações físicas e químicas.

Quanto às características físicas e químicas, todos os resíduos possuem suas características particulares, porém vale ressaltar a identificação da atividade pozolânica do rejeito de minério de ferro.

Dos 17 compósitos desenvolvidos, variando os teores de resíduos, se destacaram os que em sua composição possuem maiores teores do rejeito de minério de ferro, obtendo resistência à compressão axial de 7,15MPa e 8,56MPa aos 28 dias e 8,93MPa e 11MPa aos 365 dias de cura, sendo estas as composições 10 e 15, respectivamente. As características de absorção de água, variação diametral e massa específica aparente também foram melhores para as composições com maiores teores de rejeito de minério de ferro e todas atendendo as exigências das normas Brasileiras.

Também foram observadas as composições 9 com maior teor de LAA (40%) e menor teor de RMF (10%) e composição 10 com maior teor de RMF (40%) e menor teor de LAA (10%), quanto as alterações no arranjo mineralógico e observou-se um maior número de síntese dos minerais na composição 10, comparado a composição 9, sendo está uma das explicações da maior resistência deste material. Também foi observado as mudanças na estrutura morfológica das composições e verificou-se uma maior interação entre as partículas na composição 10, além de algumas áreas com superfície plana e densa.

Quanto à confecção de um tijolo e um paver ecológico, observou-se que as características visuais são satisfatórias, porém deve-se realizar outros ensaios mais específicos, que não foram realizados neste trabalho devido a limitação da quantidade disponível de RMF nessa fase da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Guia técnico do Alumínio: Tratamento de Superfície. 2ª Ed. São Paulo: Ed. Técnica Comunicação Industrial Ltda., 2015.

AKHTAR, A., SARMAH, A.K. C&D waste generation and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective. *J. Clean. Prod.* v.186, p. 262–281, 2018.

AL-FAKIH, AMIN, MOHAMMED, BASHAR S., LIEW, MOHD SHAHIR, NIKBAKHT, EHSAN, 2019. **Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: an update review.** *J. Build. Eng.* 21, 37–54.

ABPC. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Disponibilizado em: <<http://www.abpc.org.br/frame.htm>> Acessado em setembro de 2018.

ALCOA. **Principais utilidades para a Alumina.** Disponibilizado em: <www.alcoa.com/brazil/pt/product_category.asp?cat_id=873> Acessado em 10 jul. 2014.

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, 2004.

ÁLVAREZ-AYUSO E. **Approaches for the treatment of waste streams of the aluminium anodizing industry (Review).** *Journal of Hazardous Materials*, v. 164, p. 409-414, 2009.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 5751:** Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6453:** Cal virgem para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

_____. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

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

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2014.

BASSANI, M., TEFA, L., RUSSO, A., PALMERO, P. **Alkali-activation of recycled construction and demolition waste aggregate with no added binder**. *Construction and Building Materials* 205 (2019) 398 – 413.

BASTOS L. A. C.; SILVA G.C.; MENDES J. C.; PEIXOTO R. A. F. **Using iron ore tailings from tailing dams as road material**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016.

BHATTY J.I.; GAJDA J. Alternative materials. *World Cem* 2004; 35(12):41–8.

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.

BROOK R.J. *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, Pergamum Press, New York, 1991.

CARDOSO, R., SILVA, R., BRITO, J., DHIR, R., 2016. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: a literature review. *Waste Manag.* 49, 131e145.

CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Anodização** São Paulo (Catálogo impresso). Setembro. 2019.

CHIU. C.; STROPKY, D. (2004), *Advanced Process Simulation and Training*, Process Simulations Ltd., Vancouver, www.psl.bc.ca

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, 1977.

COLONETTI E. **Desenvolvimento de tinta inorgânica de cura fosfática a partir de resíduo de anodização de alumínio. Criciúma, SC, 2014**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, 2014.

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, 2010.

DO H. S., MUN P. H., KEUN R. S. A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime. **Waste Management**, v.28, n.1, p. 191-199, abr.2007.

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

DUAN, H., MILLER, T.R., LIO, G., TAM, V.W.Y., 2019. Construction debris becomes growing concern of growing cities. *Waste Manage.* 83, 1–5.

European Commission, *EU Construction and Demolition Waste Protocol and Guidelines*, (2018) <https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-anddemolition-waste-protocol-0_en> Acessado em 17 de julho de 2019.

FATEMI, S., IMANINASAB, R., 2016. Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials. *Constr. Build. Mater.* 120, 450–456.

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.

FEMA, *Inventário de barragens do estado de Minas Gerais ano 2017*, FEAM, Belo Horizonte, 2018.

FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; SILVA, S. N. D.; PEIXOTO, R. A. F. **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams**. *Construct. Build. Mater.* v. 112, p. 988-995, 2016.

GALVÃO, J. L.; B. ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES. J. C. **Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints**. *Journal of Cleaner Production.* v. 200, p. 412-422, 2018.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.313>> Acesso em: 07 jun. 2019.

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

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; 2004.

GOMES, V. **Desenvolvimento e caracterização de pigmentos cerâmicos baseados em alumina e mulita obtidos a partir de lama de anodização de alumínio**. Florianópolis, SC, 2005. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.

GU, F., MA, W., WEST, R., TAYLOR, A., ZHANG, Y., 2019. Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: a case study. *J. Clean. Prod.* 208, 1513 e 1523.

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

HUANG, B., WANG, X., KUA, H., GENG, Y., BLEISHWITZ, R., REN, J., 2018. Construction and demolition waste management in china through the 3r principle. *Resour., Convers. Recycling* 129, 36–44.

IPT, Rejeitos de mineração. Disponibilizado em: <http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043>. Acesso em: 08 set. 2019.

ISLAM, R., NAZIFA, T. H., YUNIARTO, A., SHANAWAZ, A. S. M., SALMIATI, S., SHAHID, S. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. *Waste Management*, Volume 95, 15 July 2019, Pages 10-21.

JIN, R., LI, B., ZHOU, T., WANATOWSKI, D., PIROOZFAR, P., 2017. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. *Resour. Conserv. Recycling* 126, 86–98.

LI C., SUN; H., BAI J.; LI L. **Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting**. *Journal of Hazardous Materials*. v. 174, p.71–77, 2010.

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, 2012.

LU, WEISHENG, 2014. Estimating the Amount of Building-Related Construction and Demolition Waste in China. Springer, Berlin Heidelberg.

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).

MENDES, B. C., PEDROTI, L. G., FONTES, M. P. F., RIBEIRO, J. C. L., VIEIRA, C. M. F., PACHECO, A. A., AZEVEDO, A. R. G. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. *Construction and Building Materials* v.27, p. 166-179, 2019.

Mineral Industry Surveys. Disponibilizado em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/>> Acessado em setembro de 2018.

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, 1992.

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.

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. ; MEYER, S.A.S. ; ALEKSEEV, K.P. ; PAWLOWSKY, U. ; FERNANDES, L.H. ; SCREMIM, C.B. ; CATAI, R.E. . **Manufacture of a construction material using the physicochemical properties of ash and sludge wastes from MDF board production**. *Construction & Building Materials*, v. 50, p. 184-189, 2014.

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, 2019, p. 202-209.

OATES J. A. H. Lime and limestone, Chemistry and technology. Production and uses, Wiley-VCH verlag GmbH, Weiheim, 1998.

OLIVIER J.; MAENHOUT J. G.; PETERS J. Trends in global CO₂ emissions, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012.

PAJUNEN P., Chemical Recovery for Aluminum Finishers, Workshop on Cleaner Production in the Metal Finishing Industry, Taipei, Taiwan, April, 1999.

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.

PEREIRA D.A.; COUTO D.M.; LABRINCHA J.A. Incorporation of aluminium – rich residues in refractory bricks, **Ceram. Forum** v.77 p. 21–25, 2002.

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.

PEREIRA R. F.; HOTZA, D.; SEGADÃES A. M.; LABRINCHA J.A. Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products. **Ceramics International**, v.32, p. 173–179, 2006.

PETTI, J. J. **Rocas Sedimentarias**. 3ª edição. Buenos Aires: Edigraf,1976. p.419 - 420.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 2ª edição. Porto Alegre. Editora Globo, 1976. p. 270.

RAMESH T.; PRAKASH R.; SHUKLA K.K. Life cycle energy analysis of buildings: an overview. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1592-1600, 2010.

RICO, M., BENITO, G., SALGUEIRO, A.R., DÍEZ-HERREIRO, A., PEREIRA, H.G., **Reported tailings dam failures A review of the European incidents in the worldwide contexto**. *J. Hazard. Mater.* v.152, p. 846-852, 2008.

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.

RIBEIRO M.J.; ABRANTES J.C.C.; FERREIRA J.M.; LABRINCHA J.A. Predicting processing-sintering-related properties of mullite–alumina ceramic bodies based on Al-rich anodising sludge by impedance spectroscopy. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24p. 3841-3848, 2004.

RIBEIRO M. J.; LABRINCHA J.A. Properties of sintered mullite and cordierite pressed bodies manufactured using Al-rich anodizing sludge. **Ceramics International**, v.34, p.593-597, 2008.

SÁEZ, Paola V.; OSMANI, Mohamed. **A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union**. *Journal of Cleaner Production*, v. 241, pp. 118400, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118400>> Acesso em: 13 jan. 2020.

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.

SARTOR, Morgana Nuernberg. **Utilização do resíduo de anodização do alumínio como matéria-prima para o desenvolvimento de produtos cerâmicos**. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

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

SHETTIMA, A. U.; HUSSIN, M. W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. 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>.

SHI, X., MUKHOPADHYAY, A., ZOLLINGER, D., GRASLEY, Z., 2019. Economic input- output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *J. Clean. Prod.* 225, 414-425.

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.

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, 2001. **Proceedings**. Building and Housing Research Center, 2001.

SORMUNEN, P., KÄRKI, T. **Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing.** *Journal of Building Engineering* v.24 p.100742 - 2019 <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100742>

TANG, P., FLOREA, M.V.A., BROUWERS, H.J.H., 2017. Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash. *J. Clean. Prod.* 165, 1371e1384.

TANSENS P.; RODAL A. T.; MACHADO C. M. M.; SOARES M.V.M. H. Recycling of aluminum and caustic soda solution from waste effluents generated during the cleaning of the extruder matrixes of the aluminum industry. **Journal of Hazardous Materials**, v. 187, p. 459-465, 2011.

TULYAGANOV D.U.; OLHERO S.M.H.; RIBEIRO M.J.; J.M.F.; FERREIRA J.M.F.; LABRINCHA J.A. Mullite-alumina refractory ceramic obtained from mixtures of natural common materials and recycled Al-rich anodizing sludge, **J. Mater.** v. 10, p.311–318, 2002.

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.

XIONG, W. P.; WANG, J. Z.; HUANG, J. Z. The 2009 Annual Development Report of Comprehensive Utilization of Bulk Industrial Solid Wastes: China, Light Industry Press, Beijing, 2011.

XIONG, C.; LI, W.; JIANG, L.; WANG, W. GUO, Q. **Use of ground iron ore tailings (GIOTs) and BaCO₃ to improve sulfate resistance of pastes.**

Construction and Building Materials. v.150, p. 66 - 76, 2017.

XUAN, D., POON, C. S., ZHENG, W., 2018. Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: a review. *Resour. Conserv. Recycl.* 136, 238–247.

Wise Uranium, 2018. The Los Frailes Tailings Dam Failure (Aznalcóllar, Spain).

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.* v. 52, p.1283-1289, 2008.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultrahigh performance concrete, *Constr. Build. Mater.* v. 50, p. 540–548, 2014
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019>.

ZHENG, L.N., WU, H.Y., ZHANG, H., DUAN, H.B., WANG, J.Y., JIANG, W.P., SONG, Q.B., 2017. **Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China.** *Constr. Build. Mater.* 136, 405–413.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055>.