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

ANA ESTER POVALUK

COMPÓSITO PARA MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE RESÍDUO DE TRATAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO, DE CONCRETO E DE PRODUÇÃO DA CAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA
2021

ANA ESTER POVALUK

COMPÓSITO PARA MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE RESÍDUO DE TRATAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO, DE CONCRETO E DE PRODUÇÃO DA CAL

Composite for civil construction material, from iron ore tailing ,concrete and construction residues and lime production waste

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Dr. Vsevolod Mymrine

CURITIBA

2021

4.0 Internacional

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

Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba

ANA ESTER POVALUK

COMPÓSITO PARA MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE RESÍDUO DE TRATAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO, DE CONCRETO E DE PRODUÇÃO DA CAL.

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

Data de aprovação: 30 de Abril de 2021

Prof Vsevolod Mymrine, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Andre Nagalli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Haroldo De Araujo Ponte, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/04/2021.

Para Vsevolod Mymrine,
Ao Adelio, a quem confio o meu destino,
À Helena e à Sophia, presentes de Deus.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao cientista e orientador, doutor das ciências, Dr. Vsevolod Mymrine, Seva, pela oportunidade ímpar de permitir e incentivar a minha evolução no conhecimento científico, arquitetando e conduzindo todo o rumo desta jornada e mudando para sempre o meu modo de ver e entender as coisas. Fazendo-me enxergar coisas não tão evidentes, para observadora pouco experiente que sou e, imprimindo-me a sua maneira ao mesmo tempo técnica e humanista de ser. Atraves do conhecimento científico, regado de senso comum e filosófico, tive a experiência extraordinária a qual devo, com muita reverência e afeto, a ele.

Agradeço também à minha amiga Luana Checin, que plantou a semente da inspiração para que eu cursasse o lato sensu na UTFPR, durante um bate papo, em um bar ucraniano aqui em Curitiba, com amigas em comum, onde comentou sobre seu orientador, professor Seva... Inspiração Divina? Talvez!

Agradeço ainda ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e, por conseguinte, a todos os professores do PPGEC pela transmissão do conhecimento.

Não deixo de agradecer à professora e coordenadora do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UTFPR, Profª. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig, pelo auxilio nas questões burocráticas e também nos momentos difíceis desta desafiadora trajetória acadêmica.

À monitora Bruna Marcon da Plataforma de Microscopia e Laboratório de Biologia Celular da Rede de Plataformas da Fundação Oswaldo Cruz - Fiocruz, por realizar a preparação das amostras atravez da metalização, durante o período de pandemia da Covid-19. Quanta dedicação!

O agradecimento vai também ao Alexandre Gonçalves, técnico do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM), que executou o ensaio de Microscopia Eletronica de Varredura, e demais colaboradores dos laboratórios da UTFPR que executaram os ensaios nos materiais estudados, complementando os resultados para esta pesquisa.

Quero agradecer também aos integrantes da banca, professores Dr. Andre Nagalli, Dr. Haroldo Ponte e Dr. Urivald Pawlowsky, pelo tempo e contribuição dedicados a presente dissertação.

Agradeço muito ao professor Dr. Wellington Mazer, por me conduzir nas atividades de estágio da Livre Docência.

E de forma generalista, agradeço a todos os que por de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

De forma heterodoxa, porém muito importante na minha formação como indivíduo, agradeço à minha maestrina, Isabel Krevey, a qual desde a tenra idade me ensinou, através da música, conhecimento científico, religioso, de senso comum e filosófico, me tornando uma pessoa mais humana. Sem dúvida alguma, de forma a me tornar uma pessoa melhor. Devo tudo isto a ela, também!

Ao meu pai, José Povaluk, aquele que me gerou, juntamente de minha mãe. Ele trabalhou na UTFPR por 27 anos e foi a inspiração para que eu frequentasse uma universidade técnicológica, fazendo encartar-me pela instituição deste a primeira infância. O venerarei por toda a minha vida, por ser o exemplo de integridade, caráter, simplicidade e amor. Que saudades de nossas conversas, pai!

Ao meu esposo, Adelio Baruffi Neto, por me auxiliar em atividades laborais desta pesquisa de mestrado e, principalmente por manter a ordem e tranquilidade em nosso lar, oferecendo à nossa família, toda a subsistência durante todo este processo do meu aprendizado. A você, o meu eterno amor e a minha eterna gratidão.

As minhas filhas, Helena e Sophia as quais foram geradas no decorrer desta empreitada acadêmica, por permitirem que eu dividisse a minha atenção com à Universidade. Quanta paciência, meninas! Amo vocês para sempre!

E por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), agência de fomento, Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa de mestrado.

“Não existem resíduos industriais,
mas sim, falta de conhecimento ou vontade
em utilizar estes materiais valiosos”.
Vsevolod Mymrine

“Enquanto há vida, há esperança” - Stephen Hawking

RESUMO

POVALUK, Ana Ester. Compósito para material de construção civil a partir de resíduos de tratamento de minério de ferro, de concreto e da produção da cal. 2021. 87 ff. Dissertação de Mestrado - Programa Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Em decorrência da crescente necessidade da indústria em minimizar ou então reaproveitar os resíduos gerados nos processos produtivos, o que influencia diretamente na redução de custos para o tratamento e a disposição e ainda auxilia na preservação do meio ambiente, o objetivo principal desta pesquisa foi realizar o aproveitamento dos resíduos da mineração de Fe rro (RMF), proveniente do desastre decorrente do colapso da barragem de Fudão em Mariana – MG, resíduos da produção de cal (RPC) e também do resíduo de concreto (RC), para gerar um novo compósito para a construção civil com características de concreto, e avaliar as mudanças das propriedades mecânicas e das estruturas morfológicas dos corpos de prova durante os períodos de cura de: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180 e 365 dias. Através dos métodos de DRX, FRX e MEV com EDS, foram determinadas as interações físico-químicas dos componentes das misturas. Com os resíduos caracterizados, foram desenvolvidos 16 compósitos variando-se o teor das matérias-primas, distribuídos entre 30% e 60% de RMF e RC e teores entre 10 e 25% de RPC, totalizando 960 corpos de prova os quais foram submetidos a ensaios de resistência à compressão uniaxial simples, absorção de água, retração linear, densidade, análise química, mineralógica, morfológica, ensaio de lixiviação e solubilização, analises de micro-massa a laser. Durante a cura, foi observado o incremento nos valores da resistência a compressão, que ocorre em função da neutralização e a dissolução das superfícies agora com baixa alcalinidade, ocasionando a síntese das novas formações amorfas e cristalinas. Dentre todas as composições desenvolvidas, destacou-se a de numero doze, a qual obteve resistência a compressão uniaxial de 2,52 MPa aos 28 dias e 7,07 MPa aos 365 dias de cura, a qual foi submetida à análises dos processos físicos químicos de formação de novas estruturas através do conjunto de métodos DRX, MEV EDS e mapeamento. As propriedades ambientais foram estudas através de ensaio de lixiviação e solubilização, analises de micro-massa a laser – LAMMA. Os valores dos testes experimentais de lixiviação e solubilidade dos metais pesados foram significativamente inferiores aos permitidos pelas normas brasileiras, demonstrando a ligação mecânica eficaz das partículas, o que também significa a ligação química eficaz dos átomos e íons em novas formações quimicamente estáveis. Os resultados desta dissertação atestam que estes resíduos reunidos em um compósito e utilizados em materiais de construção civil, contribuem para diminuir a extração de recursos naturais, além de propiciar uma destinação correta ao grande volume disposto, os quais oferecem sérios danos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Resíduo de minério de ferro. Lodo de Mariana. Resíduo de produção de cal. Resíduo de concreto. Resíduo de Construção e demolição. Compósitos.

ABSTRACT

POVALUK, Ana Ester. Composite for civil construction material, from iron ore tailing, concrete and construction residues and lime production waste. 2021. 87 f. Masters dissertation - Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná, (Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2021.

The industry has a growing need to minimize or otherwise reuse the waste generated in production processes. This not only directly influences on the reduction of costs of waste treatment and disposal but also helps to preserve the environment.The main objective of this research was to use iron ore tailings (IOT), from the collapsed Fundão dam in Mariana - MG, lime production waste (LPW) and also concrete residue (CR), to generate a new composite for civil construction with concrete characteristics, and evaluate changes in mechanical properties and morphological structures of specimens during curing periods of: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180 and 365 days. Through the methods of XRD XRF, SEM with EDS, the physicochemical interactions of the components of the mixtures were determined. With the characterized residues, 16 composites were developed, varying the content of the raw materials, distributed between 30% and 60% of IOT and CR and contents between 10 and 25% of LPW, totaling 960 specimens which were subjected to simple uniaxial compressive strength tests, water absorption, linear shrinkage, density, chemical, mineralogical, morphological analysis, leaching and solubilization tests, and laser micro-mass analysis. During curing, an increase in the values of compressive strength was observed, which occurs due to the neutralization and dissolution of surfaces now with low alkalinity, causing the synthesis of new amorphous and crystalline formations. Among all the compositions developed, there is the number twelve, which obtained uniaxial compressive strength of 2.52 MPa at 28 days and 7.07 MPa at 365 days of cure, which was subjected to analysis of chemical physical processes of formation of new structures through the set of methods XRD, SEM EDS and mapping. The environmental properties were studied through leaching and solubilization tests, laser micro-mass analysis – LAMMA. The values of the experimental tests for leaching and solubility of heavy metals were significantly lower than those allowed by Brazilian standards, demonstrating the effective mechanical bonding of particles, which also means the effective chemical bonding of atoms and ions in new chemically stable formations. The results of this dissertation attest that these residues when made into a composite and used in civil construction materials, contribute to the reduction of the extraction of natural resources, in addition to providing a correct destination for the large volume disposed, which offer serious hazard to the environment.

Keywords: iron ore tailings. Mariana slime. Lime production residue. Concrete waste. Construction and demolition waste. Composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo do beneficiamento de ferro 22
Figura 2 - Materias primas 38
Figura 3 – Homogeneização seca das matérias primas 43
Figura 4 - Molde cilindrico 20x20cm 44
Figura 5 - Prensa manual Bovenau 10 Tn 44
Figura 6 - Processo de cura dos corpos de prova - CP’s 45
Figura 7 - Curva granulométrica dos resíduos 50
Figura 8 - Difratogramas de Raixo – X das matérias primas dos materiais desenvolvidos: A – RMF, B – resíduo de concreto, C – resíduo da produção da cal 52
Figura 9 - Microestrutura morfológica das matérias primas: a, b e c - RMF; 54
Figura 10 - Mudança de composição mineralógica das amostras de composição 12 durante de hidratação e cura 61
Figura 11 - Mudança de micro estrutura morfológica das amostras de composição 12 pelo 63
Figura 12 - Composição de isótopos em diferentes pontos da amostra de composição 12 após de hidratação e cura durante 90 dias 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições variando o percentual dos resíduos 41
Tabela 2 - Composição química das matérias primas 51
Tabela 3 - Resistência axial das amostras durante a hidratação e cura. 55
Tabela 4 - Coeficiente de expansão das amostras de teste no processo de cura 57
Tabela 5 - Absorção de água (% de peso) depois de dias de hidratação e cura 58
Tabela 6 - Composição química de novas formações de composição 12 65
Tabela 7 - Lixiviação e solubilização de metais de lodo de Mariana e de composição 12 (pelo método AAS), ... 68

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
RC	Resíduo de Concreto
RPC	Resíduo da Produção de Cal
RMF	Resíduo de Minério de Ferro
DRX	Difração de Raios X
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ABPC	Associação Brasileira dos Produtores de Cal
CP	Corpo de prova
CPS	Contagens por Segundo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UFPR	Universidade Federal do Paraná
LAMIR	Laboratório de Análises Minerais e Rochas

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentagem
ºC	Graus Celsius
Abs	Absorção de água
cm	Centímetro
m^3	Metro cúbico
dm	Decímetro
g	Grama
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
h	Horas
kg	Quilograma
kg/ano	Quilograma por ano
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
km	Quilômetro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
n	Newtons
μm	Micrômetro
ton	Tonelada
ton/mês	Tonelada por mês
ton/ano	Tonelada por ano
nº.	Número
$	Unidade monetária
M_f	Módulo de finura
$RA_{\%}$	Percentual retido acumulado (série normal)
γ	Massa específica
$m_{rec+amostra}$	Massa do recipiente mais a massa da amostra
m_{rec}	Massa do recipient
V_{rec}	Volume do recipient

H	Relação entre a massa úmida e a massa seca ou teor de umidade
m_h	Massa úmida
m	Massa seca
I	Coeficiente de inchamento
f_c	Resistência à compressão
F	Força de compressão
C_{RA}	Coeficiente de resistência à água
R_{Sat}	Resistência dos corpos de prova saturados
R_{Sc}	Resistência dos corpos de prova secos
m_s	Amostra saturada
M_p	Porcentagem de material pulverulento
m_i	Massa inicial
M_{sf}	Massa seca final
Abs_{cp}	Absorção de água pelo corpo de prova
m_{sat}	Massa da amostra saturada em água após imersão
m_S	Massa da amostra seca
V	Volume em mm^3
Π	Constante matemática
R	Raio da amostras
H	Altura da amostras
D	Massa específica aparente
L_i	Leitura inicial
L_f	Leitura final

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1 JUSTIFICATIVA 15
1.2 OBJETIVOS 17
1.2.1 Objetivo Geral 17
1.2.2 Objetivos específicos 17
1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA 17
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 18
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
2.1 RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO (RMF) 20
2.2 RESÍDUO DE CONCRETO 25
2.3 RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA CAL 30
2.4 COMPÓSITOS 33
3. MATERIAIS E MÉTODOS 35
3.1 ESCOLHA DOS RESÍDUOS MUNICIPAIS E INDUSTRIAIS 37
3.2 COLETA DOS RESÍDUOS MUNICIPAIS E INDUSTRIAIS 37
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS - PRIMAS 38
3.3.1 Composição granulométrica 38
3.3.2 Micro análise Qímica pelo Método de Dispersão de Energia (EDS) 40
3.3.3 Difração de Raios-X (DRX) 38
3.3.4 Microscopia Eletronica de Varredura (MEV) 39
3.3.5 Fluorescência de Raios-X (FRX) 40
3.4 PREPARO DAS COMPOSIÇÕES 41
3.5 HOMOGENEIZAÇÃO SECA DOS RESÍDUOS 42
3.6 HIDRATAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES 43
3.7 MOLDAGEM DAS COMPOSIÇÕES 43
3.8 COMPACTAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES 44
3.9 CURA DAS COMPOSIÇÕES 45
3.10 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES 45
3.10.1 Resistência à Compressão Axial 46
3.10.2 Coeficiente de Expansão Linear 46
3.10.3 Absorção de Água por Imersão 47
3.10.4 Coeficiente de Resistência à Água 48
4. ANÁLISES DOS RESULTADOS 49
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS 49
4.1.1 Composição granulométrica das matérias primas 49
4.1.2 Composição química das matérias primas **50**
4.1.3 Composição mineralógica das matérias primas **52**

4.1.4 Microestrutura das matérias primas pelo método microscopia eletrônica varredura (MEV) **.....53**
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DESENVOLVIDOS **55**
4.2.1 Resistência axial dos materiais desenvolvidos **55**
4.2.2 Expansão durante a cura dos materiais desenvolvidos **56**
4.2.3 Absorção de água de materiais depois de 28 e 90 dias de cura.....**58**
4.3 PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DE FORMAÇÃO DAS ESTRUTURAS DOS MATERIAIS DESENVOLVIDOS **59**
4.3.1 Mudança da composição mineralógica das composições 12 60
4.3.2 Mudança do micro morfologia das amostras de composição 12 durante hidratação e cura 62
4.2.3 Composição micro química de novas formações composição 12.....64
4.2.4 Distribuição dos elementos químicos principais em novas formações da composição 12.....65
4.2.5 Composição isotópica em novas formações das amostras da composição 12 65
4.3 A SUSTENTABILIDADE NOS COMPÓSITOS DESENVOLVIDOS.....67
4.4 LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIDADE 67
5. CONCLUSÃO 70
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....71
6. REFERÊNCIAS.....73

1 INTRODUÇÃO

Os processos industriais de produção atendem às necessidades para o desenvolvimento humano e resultam no consumo de recursos naturais, sejam eles renováveis ou não.

A definição de produção, segundo FUSCO E SACOMANO (2007), é um processo através dos quais bens e serviços são gerados por meio de transformação de recursos. Sendo assim, para que haja produção é necessário que se tenha entradas: insumos, matéria-prima, mão de obra para que se possam obter saídas: produtos/serviços. Assim sendo, a produção é o ato de transformar tecnologias, insumos, mão de obra, informações e dinheiro em saídas.

Em busca pelo desenvolvimento humano, há uma crescente nescessidade que ela ocorra de maneira sustentável. Ainda em 1987 o Relatório Brundtland, apresentado na Assembleia Geral da ONU popularizou a expressão "desenvolvimento sustentável" e sua definição, considerada a mais próxima do consenso oficial o qual é definido como sendo “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” e foi reconhecido como o precursor da inauguração do conceito de desenvolvimento sustentável, CMMAD (1988).

Gallo (2007) sugere ainda que a sustentabilidade seja um relacionamento entre sistemas econômicos dinâmicos e sistemas ecológicos maiores e também dinâmicos, embora de mudança mais lenta, onde a vida humana possa continuar indefinidamente; os indivíduos possam prosperar; as culturas humanas possam desenvolver-se; mas os resultados das atividades humanas devam obedecer a limites para não destruir a diversidade, a complexidade e a função do sistema ecológico de apoio à vida.

De acordo com a corrente de pensamento de Enriquez (2008 *apud* Radetzky, 1992), Davis (1995 e 1998), Davis e Tilton (2002), Pegg (2006) e Stijn (2006), a mineração contribui para o desenvolvimento econômico dos espaços territoriais, pois geralmente estes espaços foram privilegiados com jazidas minerais e, em decorrência da exploração deste recurso, há grande possibilidade de geração de recursos financeiros para financiar o seu próprio desenvolvimento.

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

Diante das ideias relacionadas ao desenvolvimento humano e econômico, de maneira sustentável, abordamos um dos três resíduos analisados neste estudo, o resíduo de minério de ferro, por apresentar alta complexidade e grande magnitude no que diz repeito aos danos causados ao meio ambiente. Proveniente do colapso da Barragem de Fundão, o lodo de Mariana (assim nomeado, pois a barragem rompida encontra-se implantada no município de Mariana, no distrito de Bento Rodrigues, Minas Gerais), a qual foi construída especificamente para servir de depósito para o resíduo de minério de ferro e, que pertencente à empresa Samarco S/A e, tem sido amplamente noticiada pelos meios de comunicação nacionais e internacionais desde o ocorrido, em final do ano de 2015.

Segundo a NBR 13028 (ABNT, 2017), rejeito “é todo e qualquer material descartado durante o processo de benefciamento de minérios”, porém nesta pesquisa adotaremos o termo resíduo de minério de ferro”, pois passaremos a tratá-lo como passivo de reutilização, sendo assim aproveitavel economicamente, já que aplicaremos como matéria – prima para novas composições para a construção civil.

Ainda um problema que resulta em grande quantidade de resíduos, a indústria da construção civil é uma importante extratora e consumidora de recursos naturais não renováveis e, consequentemente uma das maiores indústrias geradoras de resíduos. O indivíduo brasileiro produz, em média, meia tonelada de resíduos de construção civil ao ano. Os números evidenciados pela Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - ABRECON (2019) indicam que 60% do lixo sólido das cidades vêm da construção civil e 70% desse total poderia ser reutilizado.

O resíduo de concreto (RC) apresenta, em sua maioria, alto potencial de reciclagem, sendo que estes podem e devem ser reaproveitados, reutilizados ou reciclados como forma de minimizar os nocivos impactos ambientais, comenta Christofóri (2017). Do mesmo modo, as indústrias que atuam também na mineração, como os de calcário geram resíduos provenientes da produção de cal (RPC), que é resultante da má calcinação da rocha calcaária e também será utilizado neste compósito como aglomerante. Estima-se que as maiores reservas estejam com os

maiores produtores mundiais. Os maiores produtores mundiais de cal são: a China com 220 milhões de toneladas (63%), Estados Unidos, com 19 milhões de toneladas (5,5%), Índia, com 16 milhões de toneladas (4,5%), Rússia, com 10,4 milhões de toneladas (3%), Brasil, com 8,5 milhões de toneladas (2,5%), Japão, com 8,2 milhões de toneladas (2,3%) e Alemanha, com 6,5 milhões de toneladas (1,8%), citam Schulz *et al.* (2014). Segundo Silva (2014), os resíduos da produção de cal (RPC) podem ser utilizados como material na construção civil.

Através da utilização dos resíduos anteriormente elencados, os quais representam uma oportunidade para que se encontrem alternativas, que possam dar uma destinação adequada e que sejam técnica e economicamente viáveis e estejam em acordo com a regulamentação, minimizando assim, o impacto ambiental, inclusive, apresentando um conhecimento aprofundado sobre a composição química e estrutural destes resíduos é possível encontrar novas formas alternativas e mais nobres para sua utilização.

Assim, se faz necessário realizar uma abordagem científica que permita realizar uma avaliação da microestrutura e identificação dos produtos formados pelos processos físico-químicos que ocorrem durante a hidratação do material.

1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo sido consolidada a relevância das questões ambientais na atividade produtiva e tendo em vista que o desastre da barragem de Fundão ocorrido no ano de 2015 resultou em um grande volume de lodo contendo resíduos de mineração, que ficaram dispersos no meio ambiente, e que foram encaminhados a uma área próxima do local da tragédia e lá permanecem disponíveis para possível reaproveitamento. Segundo Book Samarco (2016), combinado ao RC, já sendo justificado o problema gerado em se acumular resíduos e a dificuldade em descartar, assim como o RPC, que na sua produção também enfrenta a mesma problemática, se faz importante e necessário criar um novo material a base de materiais descartados, realizando assim o reuso do material caracterizado, dando a possibilidade de readequar a sua utilização, atenuando o impacto ambiental gerado pelos setores da industria ou reduzindo os custos, trazendo como resultado a

sustentabilidade no processo produtivo e, consequentemente o desenvolvimento tecnológico da industria da construção.

A indústria da construção civil provoca impactos ambientais negativos, pois, sumariamente substitui a vegetação do solo por edificações, assim como é responsável também pela extração de matéria-prima esgotável, que são os agregados utilizados na construção, no caso as areias, britas e os aglomerantes (cal e gesso), além do fato de que os insumos consumem energia para serem extraídos da natureza e transportados até o local de consumo (SANTOS 2009).

O exposto envolve o estabelecimento de procedimentos necessários para o manejo e destinação ambientalmente adequados dos resíduos do beneficiamento do minério de ferro, para o resíduo de construção, como também dos resíduos provenientes da produção da cal, não menos importantes, mas que ainda demandam de atenção. O presente trabalho também se justifica pelo impacto positivo ao meio ambiente, no sentido de trazer uma solução técnica para todos os resíduos analisados. Vale ressaltar que, estes materiais ora estudados, necessitam de uma análise de cunho científico, com o intuito de entender o seu comportamento a nível microscópico, em quais proporções melhor se desempenham, para propor sugestão de aplicabilidade na indústria da construção, retroalimentando a cadeia produtiva, minimizando custos com matéria-prima naturais, onde diversas pesquisas vêm surgindo visando abrir novos mercados para utilização desses materiais reciclados.

E ainda, considerando que o grupo de pesquisa da Universidade Federal do Paraná e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, reúne pesquisadores, que buscam através da pesquisa, abranger numerosos estudos na área de interesse, justificando assim a sua importância, nos quais os resíduos estão sendo aplicados em vários trabalhos, variando as matérias-primas, como por exemplo, utilizando cinzas de madeira, lodo de estação de tratamento de água e resíduos de produção de cal (ANDRADE et al., 2016). Estas pesquisas propuseram a utilização destes resíduos para a produção de compósitos na construção civil, sem o acréscimo de cimento Portland, onde as resistências dos compósitos se enquadraram na classificação para blocos cilíndricos de concreto e blocos cerâmicos para alvenaria. Já utilizando resíduo de concreto, lodo de anodização de alumínio e resíduos de produção de cal, Pedrozo (2016). Obteve valores para a resistência a compressão entre 3,81 e 8,75 MPa, aos 28 dias e, entre 4,53 e 18,09

MPa em 365 dias de cura, predominantemente de acordo com a NBR 7170 (ABNT, 1983), que classifica os tijolos cerâmicos de classe C em até 4,0 MPa e a NBR 6136 (ABNT, 2006) que estabelece resistências maiores que 6 MPa para blocos de concreto de classe D.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal da pesquisa é avaliar a utilização de novas composições materiais de construção civil a partir de resíduos de tratamento de minério de ferro, de concreto e da produção da cal.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Desenvolver novos materiais de construção civil, através da análise dos processos físico-químicos dos componentes presentes nos compósitos;
- Através das propriedades mecânicas, para fins não estruturais das novas composições, verificar a adequação deste material quanto às exigências das normas brasileiras vigentes, e;
- Empregar os resíduos oriundos do colapso da barragem de Fundão resíduo de minério de ferro, também citado como “Lodo de Mariana”, os resíduos de construção civil - concreto, e resíduos da produção da cal, em maior percentagem possível, para que sejam absorvidos novamente pela cadeia produtiva da construção civil, minimizando os problemas relacionados com o meio ambiente.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A presente pesquisa está baseada em uma análise prática e tem como finalidade a utilização de resíduos descartados pela indústria de mineração, pela indústria da construção civil e pela indústria de fabricação da cal para o desenvolvimento experimental de compósitos. O resíduo de minério de ferro, foi extraído do município de Mariana, MG, o resíduo de concreto, da região de Curitiba e o resíduo da produção da cal, da região metropolitana de Curitiba. São elencados os seguintes aspectos:

- Preparo das matérias – primas, como pesagem, secagem e peneiramento;
- Desenvolvimento da mistura das matérias-primas para a confecção dos compósitos, utilizando diferentes teores das matérias-primas selecionadas para esta pesquisa;
- Caracterização por meio das propriedades mecânicas, dos compósitos desenvolvidos;
- Caracterização quanto às propriedades mineralógicas de alguns compósitos desenvolvidos,
- Análise dos processos físico-químicos dos compósitos desenvolvidos;
- Determinação da influência de cada matéria-prima nos compósitos, e;
- Demonstração dos benefícios ambientais.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi realizada utilizando resíduos coletados de três origens distintas sendo que dos resíduos, RC e RPC, os quais têm sido amplamente estudados no Brasil e no mundo e, o mais excêntrico e de delicada abordagem, o resíduo de minério de ferro, integram o compósito sugerido.

Foram utilizados os métodos de peneiramento, secagem, pesagem, mistura hidratação, compactação, cura. E como desfecho, foram realizado testes para análise química, mineralógica, e morfológica pelos métodos de: Fluorescência de Raios-X (FRX), Difratometria de Raios X (DRX), Microscópia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), para definição das composições químicas e mineralógicas das matérias-primas e composições finais dos corpos de prova.

De caráter experimental, o estudo propõe à confecção de compósitos que atendam as características necessárias a aplicabilidade destes resíduos no reuso da construção civil, sem fins estruturais, atendendo também as questões de preservação ambiental.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação evolui ao longo de seções, incluindo esta primeira, na qual são apresentados os aspectos gerais do tema abordado, sendo eles: uma breve introdução, os objetivos, os procedimentos e as justificativas da pesquisa.

Para a segunda seção é realizada uma revisão bibliográfica abordando o processo de geração de cada resíduo, suas características químicas e físicas, bem como a produção, destinação e aproveitamento.

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

Já para a quarta seção são abordadas a análise dos resultados, as mudanças de composição mineralógica e as estruturas dos materiais durante os períodos de cura.

Ao final, encontram-se as conclusões, as sugestões para trabalhos futuros e referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a oportunidade de contribuir para a geração de soluções que possam vir a impactar em melhor uso dos recursos do meio ambiente, com consequentemente, economia de insumos proveniente de matéria-prima natural, o trabalho propõe verificar as condições de utilização do rejeito de minério de ferro, proveniente do desastre de Mariana (RMF), combinado também com o resíduo de produção e demolição de concreto (RC) e resíduos da produção da cal (RPC), para a formulação de um novo compósito para construção civil.

Para isto, alguns conceitos se fazem necessários para pontuar acerca dos componentes no processo de confecção dos referidos compósitos.

De acordo com a Lei 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil em 2010, fica estabelecida a diferença entre os termos resíduos e rejeito: “Resíduo: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para issosoluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível; Já os rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as ossibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”, (BRASIL, 2010).

Isto posto, seguem algumas considerações iniciais acerca dos resíduos escolhidos para esta pesquisa.

2.1 RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO (RMF) – LODO DE MARIANA

Sassine (2015) aponta a Samarco como uma empresa brasileira de mineração, produtora de minério de ferro de alta qualidade para a indústria siderúrgica mundial. Sendo a Samarco, responsável civilmente pelo desastre

ocorrido com o rompimento da barragem de Fundão, juntamente com suas responsáveis solidárias[1], a empresa Vale e a BHP Billiton, Joint – venture.

Mazolla (2018) aponta que o despejo de 34 milhões de metros cúbidos de lama, na bacia hidrográfica do Rio Doce, causou 19 mortes e destruiuas comunidades locais de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo, no final do ano de 2015, sendo este considerado o maior desastre socioambiental já ocorrido no Brasil, em volume e distância percorrida.

Ainda sobre as características da magnitude da tragédia, a onda de rejeitos atingiu 10 distritos de cinco municípios do estado de Minas Gerais, e que segundo Carmo (2017) compreendem os municípios e distritos de Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce, onde edificações como residências, prédios públicos, imóveis comerciais, igrejas centenárias e fazendas antigas foram destruídas e/ou danificadas pelo lodo advindo do rompimento da barragem de Fundão. A apenas 6 km da barragem de Fundão, Bento Rodrigues, foi o distrito mais danificado, com 84% dos edifícios afetados.

Somaram-se ao evento 218 edifícios os quais foram totalmente destruídos, do total de 806 os quais foram atingidos. Sofreram danos também 21,1 km de estradas rurais, 12 pontes e a pequena usina hidrelétrica de Bicas.

Os danos se estenderam ainda a áreas de patrimônio cultural, do qual vale citar um dos principais bens, a capela de São Bento, um edifício do século XVIII cercado por muros de pedra. Foram danificados dois sítios arqueológicos, cinco cavernas, um trecho de 2,2km da Estrada Real e áreas preservadas do complexo paisagístico na junção do Carmo e rios Piranga e o complexo urbano de Bento Rodrigues, seis locais de interesse histórico e cultural e mais de 2000 peças sagradas, consideradas patrimônio material.

Cavallet (2013) aponta que a sua composição base, o rejeito de minério de ferro constituiu-se, principalmente, pelos óxidos de silício, sendo esse elemento o mesmo da areia natural, pelo óxido de alumínio e o óxido de ferro.

Porém, nos depósitos de minérios há a concentração de metais traço, que são elementos não-degradáveis e tóxicos para os seres humanos, como Níquel (Ni),

[1] Acordo entre duas ou mais empresas independentes e dotadas de personalidade jurídica e que estabelecem alianças estratégicas por um objetivo comercial comum, por tempo determinado, segundo Wanderley (2016).

Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg), Vanádio (V), Zinco (Zn), Arsênio (As), Chumbo (Pb), Cobre (Cu) e Lítio (Li), (IBAMA, 2015).

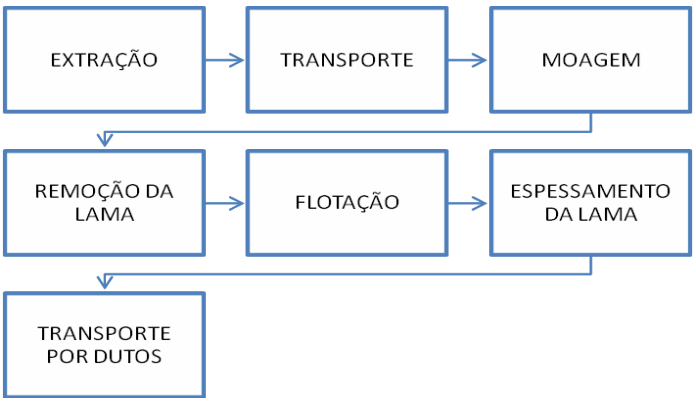
Segura et al. (2016) comentam que a amostra da lama, após o colapso da barragem, apresentou a concentração de Fe e Mg (ferro e manganês) 4 vezes maior que o limite máximo para a qualidade de corpos d'agua, de acordo com a legislação brasileira, alem de riscos potenciais de citotoxidade e danos ao DNA das amostras da lama e solo. Os testes de lixiviação mostraram que Ba, Pb, As, Sr, Fe, Mn e Al têm alto potencial de mobilidade da lama para a água.

São gerados diariamente no brasil, 379 mil toneladas de rejeitos de minério de ferro, distribuídas pelas 672 barragens de rejeito, de acordo com sistema nacional de informações sobre segurança das barragens – snibs (2018).

As barragens de rejeitos surgem como parte do processo de beneficiamento minério de ferro. faz-se necessário separar o material valioso presente dos minerais extraídos, dos demais minerais restantes, que não possuem valor de venda, e assim, o minério extraído atenda às especificações do mercado internacional. normalmente esta separação requer o uso de água e, embora o rejeito seja um material que não possui valor econômico, por razões ambientais deve ser devidamente armazenado (minas jr, 2005).

O processo de mineração do ferro passa por várias etapas, conforme apresentado na figura 1.

Figura 1 - Processo do beneficiamento de ferro



Fonte: Adaptado de Segura et al. (2016)

A referida barragem era constituída predominantemente pelo método à montante e uma parte pelo método de linha de centro, segundo relatório de Morgensternet et al. (2016).

Segundo estudos preliminares realizados pelo IBAMA (2015) os resíduos RMF foram classificados como não perigosos e não inertes para ferro e manganês, conforme NBR 10.004.

Na união europeia, mais de 1,2 bilhões de toneladas de resíduos de rejeito já foram armazenadas e reutilzadas, segundo wang et al. (2014). o que demonstra que através da reutilização dos resíduos, é possível mitigar problemas ambientais e alcançar a sustentabilidade.

Wanna et al. (2019) comenta que quase metade do volume total de minério de ferro extraído nas operações de mineração é destinado como rejeito e descartado em barragens de contenção, gerando impactos ambientais e risco para o entorno em caso do seu rompimento.

Contudo, a legislação ambiental vem cada vez mais apoiando as práticas sustentáveis nos processos produtivos que poderiam mitigar parte do impacto de barragens de rejeitos sem interferir na cadeia produtiva da mineração e, sendo grande influenciadora para que as empresas encontrem um uso potencial significativo de reutilização para rejeitos de minério de ferro, mitigando parte do impacto de barragens de rejeitos (EDRAKI et al. 2014).

Como uma alternativa para uma destinação adequada deste resíduo, vários estudos tem sido elaborados, como exemplo o de Fontes et al. (2016), onde estes observaram, no estudo realizado, que as argamassas produzidas com o rejeito consumiram maiores teores de água para a consistência e plasticidade adequadas, para que fosse mantida a mesma trabalhabilidade se comparada as argamassas convencionais, alcançando melhor desempenho mecânico aos 28 dias de idade.

Além do mais, as argamassas com o rejeito apresentaram aumento da densidade aparente e redução dos níveis de ar incorporado quando comparadas às convencionais.

De acordo com sua constituição químico-mineralógica, é sugerida que sejam utilizados em peças cerâmicas, em compósitos à base de cimento e como substituição parcial de matérias-primas convencionais e agregados naturais

(FONTES et al. 2016, YELLISHETTY et al. 2008, CHEN et al. 2013, ZHAO, FAN E SUN, 2014).

A valorização dos rejeitos está relacionada à recuperação de metais residuais e a utilização da matriz mineral. Uma pesquisa realizada por Shettima et al. (2016), utilizando resíduo da produção de minério de ferro em substituição parcial e total do agregado miúdo, obteve resultados indicando que houve uma melhora na resistência mecânica, mesmo que a trabalhabilidade fora prejudicada.

Para diminuir o custo para a produção de concreto de alto desempenho na China, e evidentemente absorver o resíduo causador de impactos ambientais, Zhao, Fan e Sun (2014) estipularam um teor de rejeitos de 40% para a substituição, nas amostras curadas no padrão e a idade de 90 dias, e obtiveram a resistência mecânica equivalente ao da mistura de controle.

Yao et al. (2019) mostram que rejeitos de minério de ferro ativado por CaO exibem atividade pozolânica após ativação mecânica devido à degradação estrutural com síntese de etringita semelhante a fibra e gel C–S–H amorfo.

Já Galvão et al. (2018) usou, com sucesso, até 50% de rejeitos de minério de ferro com quatro tipos de resíduos ligantes: resina de acetato de polivinila (na forma de cola branca comum), resina acrílica, cal hidratada para pintura e cimento Portland de alta resistência inicial para a produção de tinta. A tinta sustentável apresentou cor avermelhada; opacidade adequada; resultados satisfatórios em relação à durabilidade a um custo significativamente inferior. Para a avaliação das misturas, foram utilizados quatro parâmetros principais: custo, homogeneidade de cor, resistência à abrasão e durabilidade à exposição externa.

Nota-se que o uso de rejeito de minério de ferro em substituição de matérias- primas em concretos e produtos cerâmicos são tecnicamente favoráveis.

Vários estudos têm demonstrado a possibilidade do uso de rejeitos de minério de ferro na fabricação de tijolos, produção de concreto e proteção radiológica, bem como outras aplicações (MA et al. 2016).

Luo et al. (2016) estudaram o rejeito fornecido pela *Nanjing Iron and Steel Group*, do distrito de Yeshan, localizado em Jiangsu na China, o qual substituia a argila, utilizando como matéria-prima para produzir clínquer de cimento pelo processo convencional de sinterização. Foram investigadas as propriedades do cimento Portland produzido com clínquer sinterizado a 1420°C com diferentes

adições de RMF, variando de 0 a 20% em peso. Análise química e mineralógica mostrou que a adição de RMF com até 10% em peso, tem pouco efeito na formação das fases mineralógicas. Além disso, testes físico-mecânicos mostraram que o RMF com adição de 10% em peso não afetou negativamente a qualidade do clínquer produzido, ao contrário, poderia produzir clínquer de melhor qualidade do que o sem RMF.

2.2. RESÍDUO DE CONCRETO

A construção Civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento social e econômico, porém ainda comporta-se como grande geradora de impactos ambientais, seja pela modificação da paisagem, pelo consumo de recursos naturais ou pela geração de resíduos, YEMAL et al. (2011).

Para introduzir o assunto dos resíduos de concreto, se faz necessária a citação a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 307, de 5 de julho de 2002, a qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil sendo estes os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras e as quais são objeto deste estudo.Compreendendo também os materiais cerâmicos (tijolos, azulejos, blocos, telhas, placas de revestimento) argamassa e concreto,os do processo de fabricação e ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos e meio fio, entre outros, produzidos nos canteiros de obras, comumente chamados de entulhos, caliça ou metralha).

Ainda relacionado com a mesma resolução, a resolução nº 307 CONAMA, fixa os itens VII – Reciclagem e VIII - Beneficiamento, onde a reciclagem é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação e o beneficiamento é o ato de submeter um resíduo às operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto. Além disso, esta define que os resíduos de blocos de concreto, blocos cerâmicos, tijolos, argamassas, outros componentes cerâmicos e assemelhados tenham como solução de destinação inicial, a reciclagem, de modo que seja possível o seu aproveitamento como elemento agregado para uso em pavimentos e concreto sem função estrutural.

As atividades relacionadas à reciclagem de resíduo de concreto (RC) remontam a Antiguidade, porém, foi na era Moderna, que foram empregados na reconstrução da Europa, após a Segunda Guerra Mundial, e onde ainda é amplamente praticada, especialmente na Holanda, citam John e Agopyan (2000).

De acordo com CHIU e STROPKY (2014), a demolição de estruturas antigas gera grande quantidade de resíduos de concreto em áreas urbanas. Geralmente estes resíduos são enviados para aterros sanitários, que na sua maioria não estão preparados para receberem este tipo material.

Liang e Vernerey (2014) relataram que a tendência principal na otimização de materiais pós vida útil, faz com que se reduza a disposição de resíduos, evitando o uso de recursos naturais não renováveis usados na produção de materiais de construção, reduzindo assim seu impacto ambiental. Para o desenvolvimento sustentável, muitos pesquisadores estudaram a possibilidade de usar resíduos na produção de concreto, dentre eles Chen et al. (2011) os quais estudaram a possibilidade de fabricar tijolos a partir de rejeitos de hematita e resíduo de concreto para construção de casas provisórias para operários de uma obra de usina hidrelétrica na China.

Os resíduos de construção são um problema crescente em muitos países, em especial nos países em desenvolvimento, pois os mesmos em sua maioria não possuem uma legislação que direcione estes resíduos para uma provável reutilização, embora já se observe no mercado nacional a movimentação de empresas interessadas em explorar o negócio de reciclagem de RC, e não apenas operar o negócio de transporte destes resíduos, como é o caso da ABRECON (2019).

A geração de grandes volumes de resíduos de construção oriundos dos canteiros de obras, além dos materiais de demolição, é responsável por cerca de 20 a 30% do total dos resíduos gerados pelos países membros da União Europeia (MURAKAMI et al. 2002).

No modelo atual de produção, grande parte dos resíduos são gerados na construção de bens de consumo duráveis (edifícios, pontes e estradas). A reciclagem de resíduos no Brasil como materiais de construção pode ser considerada tímida, se comparada a países do primeiro mundo, com a possível exceção da intensa reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e de aço. Este

atraso pode ser atribuído aos repetidos problemas econômico, assim como, problemas sociais em situação de urgência, que ocupam a agenda de discussões políticas (ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2003).

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

Segundo a já citada ABRECON (2019), o resíduo de construção se torna um problema para o poder público municipal, responsável pelo serviço de coleta. No contexto econômico, o resíduo pode ser considerado dispendioso, já que, o Brasil joga fora oito bilhões de reais ao ano porque não recicla seus produtos.

São necessárias geralmente três etapas para a produção de agregados reciclados de concreto, iniciando pela triagem com remoção de quaisquer impurezas, a exemplo aço, madeira, gesso, alvenaria, vidro, plástico; em seguida por um processamento de moagem ou trituração e, por último, por um peneiramento para determinação granulometria do agregado.

Existem atualmente grupos de pesquisa em universidades brasileiras, muito ativos em estudos relacionados ao reaproveitamento resíduos de construção, estes visam analisar aspectos de redução de sua geração durante a atividade de construção e ainda fomentar tecnologias para a reciclagem e reaproveitamento, como exemplo, o estudo de Tosic et al. (2015), durante o processamento o concreto perde uma certa quantidade da pasta do cimento, embora uma parte permaneça ligada ao agregado.Esta pasta de cimento residual é a principal causa da menor qualidadedo agregado reciclado comparado com o agregado natural.

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

O *International Council for Research and Innovation in Building* (CIB), pontua a indústria da construção civil como o setor que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva. Estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção (MMA, 2014).

A Resolução nº 307 do Conama, ainda estabelece a obrigatoriedade de gestão diferenciada dos resíduos da construção, atribuindo obrigações ao município, à prefeitura e ao construtor. Então, a legislação brasileira encontra-se em um bom nível de critérios estabelecidos a fim de promover a correta classificação e destinação do resíduo da construção civil, porém ainda falta colocar em pratíca operações onde, o RC possa ser reciclado em larga escala e de maneira mais efetiva.

Segundo Cavalcanti (2003), o RC que sai dos canteiros de obras brasileiras é composto basicamente por 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação, como tijolos e blocos, e 6% de outros materiais como concreto, rocha, e materiais deletérios (metais, plástico, papel, solo). Já para Poon e Lam (2008), os agregados reciclados de concreto possuem, em média, uma densidade de10% menor que os agregados naturais. Ocorre maior absorção de água e a diminuição da qualidade e durabilidade no agregado reciclado, devido à argamassa que se mantém ligada ao resíduo e ainda durante o seu processo de obtenção, ocorrem fissuras nos grãos, prejudicando a qualidade se comparados com agregados naturais, segundo DE JUAN e GUTIÉRREZ (2012).

Este resíduo é um material poroso e a porosidade depende da relação a/c do concreto empregado (ETXEBERRIA et al., 2007). As propriedades físicas dependem da qualidade e quantidade de argamassa aderida no agregado natural.

Para estes mesmos autores, ETXEBERRIA *et al*. em 2011, o resíduo de concreto é composto de agregados naturais com argamassa aderida. As propriedades físicas tais como a densidade, o tempo de pega, a resistência e a exsudação, dependem das características já comentadas: qualidade e a quantidade de argamassa aderida no agregado natural, o que pode levar a uma necessidade maior de água de amassamento acarretando em um a/c maior e, consequentemente a resistência a compressão axial será menor se comparado com a mesma argamassa com agregado natural.

Tendo em vista a perda do abatimento devido a agua de amassamento ser insuficiente ou simplesmente sugada pelo agregado reciclado, em alguns casos faz-se necessário a utilização de aditivo para reestabelecer o abatimento desejado (BEHERA et al. 2014).

Outras características dos agregados, tais como: tamanho, máxima absorção de água, textura da superfície e forma de agregação estão diretamente associados à trabalhabilidade da composição; no caso de agregados reciclados do concreto (resíduos de concreto) é difícil satisfazer a trabalhabilidade necessária comparada ao uso de agregados naturais.

Ghataora et al. (2014), afirmam que para a produção de uma tonelada de agregado natural que chega ao consumidor final são emitidos cerca de 0,5 toneladas de dióxido de carbono. O dióxido de carbono é o principal contribuinte para o efeito estufa. Para Oliver; Maenhout; Peters (2012), a produção de agregados naturais representa cerca de 5% das emissões globais de CO_2.

Para que seja realizada a produção de agregados reciclados, ocorrem três etapas distintas: a remoção de impurezas através da triagem, que são os materiais deletérios e componentes de vedação, seguido do processamento de moagem-trituração e por último peneiramento. Este último, realizado para a determinação da composição granulométrica do agregado.

A sua competitividade em relação ao agregado natural está relacionada à condição de aplicação em canteiros de obra. Para Manzini et al. (2008), esse indicador se vincula à organização dos empreendimentos produtivos, num período de curto, médio e longo prazo, posicionando-os num conceito muito atual que é a sustentabilidade.

Com isto, a reciclagem do RC envolve a alteração ou transformação de suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos.

A utiliação de resíduo de concreto em substituição ao agregado natural pode proporcionar a redução de impactos ambientais, diminuir a emissão de CO_2 e evitar a utilização de energia não renovável.

Brand et al. (2015), estudaram a qualidade de agregados reciclados graúdos 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.

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

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

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

2.3 RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA CAL

A cal pode ser considerada o mais importante produto químico inorgânico à disposição do homem, pois participa diariamente de nossa vida, de nossas construções, dos produtos químicos e agrícolas. As atividades e a salubridade das indústrias e das cidades dependem dela em grande parte, segundo Azbe (1940).

A cal é um produto composto predominantemente por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio, resultantes da calcinação, à temperatura de 900 – 1200°C, de calcários, calcários magnesianos e dolomitos.

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

No Brasil, segundo Pereira et al. (2009), *a* maioria da cal produzida resulta da calcinação de calcários/dolomitos metamórficos, de idades geológicas diferentes;

geralmente muito antiga (pré-cambriana) e pureza variável. Em geral, na região sul/sudeste predomina as cales provenientes de dolomitos e calcários magnesianos e na região nordeste/norte/centro as resultantes de calcários.

Os sedimentos químicos são precipitados a partir de soluções, principalmente dos oceanos. A sua mineralogia reflete, portanto, a composição das soluções a partir das quais eles precipitaram. A rocha química mais abundante é o calcário e o dolomito, constituídos fundamentalmente de carbonato de cálcio e magnésio, denominados de calcita e dolomita. Os calcários podem ser constituídos em grande parte por fósseis - conchas formadas por precipitação bioquímica de carbonato de cálcio que os animais extraem das águas oceânicas.

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).

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

Garcia (2008) comenta que os resíduos da produção da cal são originados da rocha calcária mal queimada, que ocorre quando o processo de combustão é realizado de forma incompleta ou ineficiente. Esses resíduos são geralmente comercializados como subprodutos, constituído essencialmente da cal e elementos não calcários como: Al_2O_3 (alumina), SiO_2 (sílica), Fe_2O_3 (óxido de ferro), entre outros, em quantidade total superior a 12% segundo a NBR 6453 (ABNT, 2003).

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

Os resíduos da produção de cal podem ser utilizados como material na construção civil enfatizam os autores Waltrick (2010),; Andrade(2012),Ferreira (2012), Stella(2013) e Kanellopoulos e Nicolaides (2014).

Segundo Guimarães et al. (2002), a cal origina quatro tipos cales: a cal virgem comum, ou óxido de cálcio (CaO), a cal hidratada, ou hidróxido de cálcio

($Ca(OH_2)$), a cal virgem dolomítica, ou óxido de cálcio e magnésio (CaOMgO), a cal hidratada normal tipo N, ou hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio ($Ca(OH)_2Mg(OH)_2MgO$), por exemplo. Por sua versatilidade e uso, ela está entre os 10 produtos de origem mineral de maior consumo mundial, muito usado como aglomerante-ligante e reagente químico.

Entre os principais impactos ambientais relacionados à produção da cal estão às emissões de dióxido de carbono, de outros gases de alto consumo de energia, produção de resíduos, mudança na paisagem devido a mineração, ruído e poeira.

Segundo a ABPC, em 2008, o Brasil ocupou a 5ª posição entre os países qua mais produzem a cal no mundo. Os principals Estados brasileiros produtores, no ano de 2016, responsáveis por mais de 90% da produção nacional da cal, foram: Mato Grosso, com 21,2%, Paraná, 13,2%, Goiás, 12,8%, São Paulo, 11,5%, Minas Gerais, 10,8%, Rio Grande do Sul, 9,4%, Mato Grosso do Sul, 7,1% e Tocantins, 6,6%, segundo ANM (2019).

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

O aproveitamento da cal residual como aglomerante depende das suas características a serem determinadas em laboratório, tomando-se como referência os requisitos e critérios da especificação para a cal industrial. Sendo constituídos essencialmente de CaOH (hidróxido de cálcio), tendo em vista à exposição as chuvas e demais intempéries.

Resíduos como calcário e carbonatos à base de cal são utilizados pelas indústrias de cimento na clinquerização para a conservação de energia térmica e na otimização da produção (BHATTY; GAJDA, 2004).

Do, Mun e Keun (2017), através de estudos das características do resíduo da produção de cal, subproduto da produção de carbonato de sódio (Na_2CO_3) incorporado ao concreto asfáltico. Obtiveram, através dos resultados coletados, uma melhora nas características de deformação permanente, rigidez e resistência à fadiga do concreto asfáltico.

Andrade et al. (2016), observaram que o índice de absorção de água das amostras testadas atendeu às normas aplicadas, demonstrando que ao longo do tempo de cura houve diminuição da porosidade com possível hidratação da cal e as resistências dos compósitos se enquadram na classificação para blocos cilíndricos de concreto e blocos cerâmicos para alvenaria.

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

2.4 COMPÓSITOS

De acordo com Kim (2007), um compósito é confeccionado a partir de dois ou mais tipos de materiais diferentes que, através da sua combinação, obtém propriedades que não são encontradas no material original. Por meio de avanços nas ciências dos materiais e as aplicações de engenharias relacionadas, são bem estabelecidas tanto à caracterização dos materiais quanto as teorias relacionadas neste processo.

Neste princípio de ação combinada são criadas melhores combinações das propriedades através de criteriosa combinação de dois ou mais materiais distintos (CALLISTER,2011).

Callister (2011) comenta que poderá ser considerado um compósito qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa de ambas as fases que a constituem, resultando assim em uma combinação melhorada das suas propriedades, as quais podem ser de vários tipos, desde ligas metálicas, cerâmicas e polímeros.

A origem desta importante classe de materiais remonta a milhares de anos, tendo como exemplo notável as madeiras, os ossos e os tecidos musculares tendo como eficiência estrutural dos compósitos naturais (HULL; CLYNE, 1996).

Segundo Neto (2018) os materiais que compõe o compósito podem ser classificados como aglomerante (matriz) e reforço, fase dispersa. Outra classificação pode ser distribuída em três divisões principais: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e os estruturais. Caso o reforço seja em forma de

fibras, elas poderão ser dispostas paralelas entre si, ou entrelaçados, formando um tecido e orientando o reforço em multidireções.

Já para os compósitos sintéticos, existem várias opções de matriz, que poderão ser classificados de acordo com o tipo dos arranjos dos reforços existentes. Na construção civil, o compósito mais conhecido e constumeiramente utilizado é o concreto, onde o reforço é realizado com partículas grandes e é através da alteração da matriz e das fases dispersas que poderá ser modificado (SOUZA, 2018).

Através do conhecimento dos variados tipos de compósitos, é possível projetar materiais que possuam combinações de propriedades melhoradas do que as encontradas nas ligas metálicas, nos materiais cerâmicos e nos materiais poliméricos, compreendendo a dependência dos seus comportamentos em relação às seguintes variáveis: características à geometria e a distribuição, as quantidades relativas e também as propriedades das fases constituintes.

O primeiro compósito que se tem notícia a nível mundial foi a invenção patenteada por Cockbain et al. (1977), esta consistiu em desenvolver um método para a fabricação de compósitos de ceramico/metal cerâmica, onde foi produzida uma região porosa em um material cerâmico através da sinterização de um material granular sobre este material cerâmico. Nas cerâmicas, a ligação pode ocorrer mecânica ou e quimicamente e no metal ele pode infiltrar na região porosa, onde ocorreu a ligação mecanicamente à cerâmica.

O termo compósito pode estar associado à tecnologia de ponta, quando tendo em mente que podem ser empregados em componentes utilizados em satélites, aeronaves e hilicópteros, implantes dentários e ortopédicos biocompatíveis, veículos de fórmula-1, plataformas marítimas de petróleo, tubulações, pontes, edifício, reparos em viadutos, telescópios e geradores eólicos, instrumentos musicais e estruturas inteligentes (os quais são inspirados na natureza buscando reproduzir as características adaptativas dos sistemas naturais), comenta Neto (2018).

Outra característica dos compósitos, apontada por Neto (2018), está relacionada à sua versatilidade quanto ao espectro das propriedades físicas, químicas e mecânicas, as quais podem ser obtidas através da combinação de várias opções de reforços e diferentes tipos de matrizes.

Na construção civil, a exemplo de aploicabilidade de compósito vale citar o empregado os compósitos ceramicos, constituidos de resíduos dregs e grits em conjunto com o cimento, no entanto observaram uma absorção de água acima do tolerado em Norma (GEMELLI, CAMARGO e BRESCANSIN, 2009; LOUZADA, BIZINOTO e ROMONICH, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será abordado o detalhamento metodológico da pesquisa aplicado para o desenvolvimento do estudo. Tendo sido escolhido o tema, que trata do desenvolvimento de um novo compósito para a construção civil, relacionando a mistura de resíduos (industriais e municipais), o detalhamento se deu desde a coleta e preparação dos resíduos, seguido de preparação dos corpos de prova, o detalhamento dos ensaios de caracterização das matérias-primas e dos corpos de provas e suas referidas análises.

Esta pesquisa foi caracterizada como uma pesquisa prática, utilizando procedimentos experimentais e técnicas de observação direta dos resultados. Ela se destinou a verificar e analisar a utilização de materiais descartados pela indústria da cal, pela indústria da construção civil e pela lama residual resultante do colapso da barragem de Fundão, que foi gerado durante o processo de mineração do ferro.

De caráter explicativo analítico, pelo método hipotético dedutivo e por meio de procedimentos experimentais e, de acordo com observação direta dos resultados, o trabalho está baseado na análise de maneira quantitativa por meio da tabulação dos resultados.

Os compósitos desenvolvidos seguiram as premissas da norma NBR 5739 (2007). Para a determinação da absorção de água, massa específica dos corpos de prova foi utilizada a norma NBR 9778 (ABNT, 2009).

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

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

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram realizados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), com uma máquina universal de ensaios da marca EMiC, modelo DL 10000, capacidade máxima de 100 KN, com rótula, que comprimiu os corpos de prova a 2 mm/min até atingir o limite de rompimento de 30%, gerando os resultados finais dos ensaios. Por meio do software Tesc foram observados: a força máxima, em Newton (N), a tensão em Megapascal (MPa), com o qual se obteve os valores de resistência à compressão das amostras. Já as análises de resistência à água, seguiram as premissas da GOST 9479-84 (1985), no qual se admite perda da resistência à compressão uniaxial de até 35 % dos corpos de prova saturados em relação a média das resistências dos corpos de prova secos.

A análise da composição química dos resíduos fez se com o uso do método de Fluorecência de Raios-X (FRX), a qual foi realizada através do Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X da marca PANalytical, modelo Axios Max, adjunto ao software SuperQ 5l, para interpretação de análise semiquantitativa de varredura química dos materiais, operando com fonte de Raios-X o tubo de Rh de 3 kW, para efetuar a leitura da composição química por dispersão de comprimento de onda sequencial. Esta se realizou no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas – LAMIR do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

A análise de Difração de Raios-X (DRX) foi executada por meio de Difratômetro de Raios X da marca PANalytical, modelo EMPYREAN, adjunto ao software X´Pert High Score Plus para interpretação das fases cristalinas das amostras, resultando na sequência de picos obtidos na contagem dos eventos. Os materiais analisados foram o resíduo de minério de ferro (RMF), o resíduo de concreto (RC) e o resíduo da produção da cal (RPC). Esta se realizou no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas – LAMIR do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

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

3.1 ESCOLHA DOS RESÍDUOS MUNICIPAIS E INDUSTRIAIS

Para o desenvolvimento dos compósitos, foram empregados três resíduos distintos: o resíduo de minério de ferro, coletado *in loco* em Mariana – MG, resíduos da produção da cal, coletados em indústria da região Metropolitana de Curitiba e o resíduo de construção e demolição, da região de Ponta Grossa – PR, baseado no princípio que os aglomerantes reagem em meio alcalino, e escolhendo resíduos com pH em torno de 13 proporcionou-se ambiente favorável para que o resíduo da produção a cal (RPC) reagisse e, consequentemente aumentasse suas características como material ligante.

O resíduo de minério de ferro (RMF) foi escolhido pelo fato de possuir função pozolânica (pois o mesmo reage com o hidróxido de cálcio na presença de água, dos quais são formados compostos com propriedades cimentícias) e cuja pasta proporcionará a união de todos os resíduos que favorecerá a obtenção de compósitos coesos, aumentando assim, a resistência mecânica.

Como todo aglomerante é um material ativo e ligante, cuja sua principal função é formar uma pasta que promova a união entre os grãos existentes eles ainda podem ser utilizados na obtenção das argamassas, concretos e compósitos, na forma de pasta e inclusive em confecção de natas.

3.2 COLETA DOS RESÍDUOS MUNICIPAIS E INDUSTRIAIS

Com o intuito de desenvolver e testar, em nível de laboratório, os novos compósitos oriundos dos resíduos industriais, nesta etapa serão descritos os procedimentos adotados na presente dissertação que se iniciam desde a coleta das amostras, sua caracterização, composição das amostras, preparação dos corpos de prova, os ensaios, e as análises efetuadas.

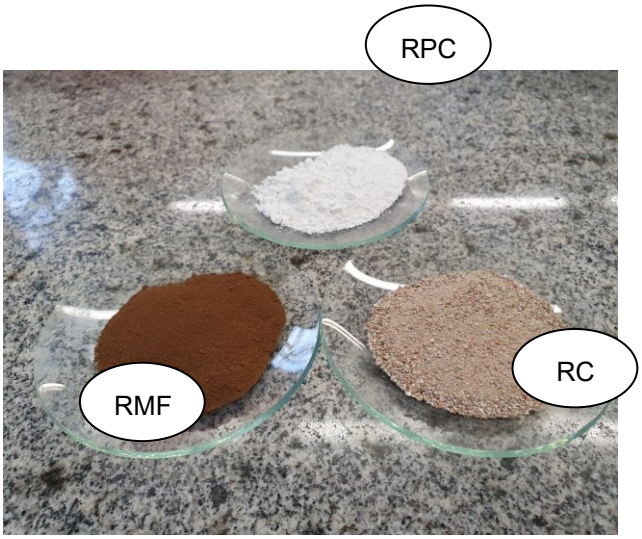
A coleta do RMF foi executada pela empresa (SAMARCO), responsável pelo funcionamento da barragem de Fundão. Ocorrida esta etapa, o material foi acondicionado em bombonas com tampa e transportados de Minas Gerais para o laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba. Por último coletado o resíduo de minério de ferro, aproximadamente, 40 kg de amostra com pontencial hidrogênico medido de 10,21, portanto alcalino.

No laboratório, o RMF foi peneirado e secado em estufa a 100ºC por 24 horas e acondicionado em recipiente plástico com tampa até a sua utilização na mistura das amostras.

A coleta do RC foi realizada em Ponta Grossa e encaminhada para a Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Este resíduo também passou por peneiramento em malha 1,18 mm, após isso, este resíduo foi devidamente armazenado até sua utilização na mistura.

A coleta de resíduo da produção da cal foi realizada na região metropolitana de Curitiba, de uma empresa produtora de cal e ensacada em embalagem plástica para evitar umidade ambiente até sua utilização.

Figura 2 - Materias primas



Fonte: Autoria própria (2021)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS- PRIMAS

3.3.1 Composição granulométrica

O ensaio de análise granulométrica do agregado foi normatizado pela NBR NM 248 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003).

3.3.2 Difração de Raios-X (DRX)

Com frequência é necessário expressar a composição, ou concentração, de uma liga em termos de seus constituintes. A forma mais comum é a percentagem em massa e a percentagem atômica (CALLISTER & WILLIAN, 2002). A intensidade de Raios-X difratados fornece informações importantes sobre a estrutura cristalina do material analisado, geralmente obtidos sob a forma de difratograma. A contagem de fótons de Raios-X é medida em função do ângulo de difração 2ɵ.

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

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

Os ensaios são realizados através de uma amostra colocada diretamente no porta-amostra, denominado spinner, que nada mais é que o suporte do próprio equipamento, a massa utilizada no ensaio é de aproximadamente 1,50 g do material a ser analisado, utilizando radiação λ Cu-Kα onde Cu K∝ λ=1,54184A, tensão = 40 kV, corrente = 30 mA, varredura 2θ= 3,5 a 70º, tamanho do passo: 0,016 e tempo do passo 10s, para que dessa forma seja possível a realização da leitura da amostra pelo equipamento. Este ensaio foi realizado tanto para os resíduos, como para as misturas seca e para os corpos de prova com as idades entre 3, 180 e 365 dias.

3.3.3 Microscopia Eletronica de Varredura (MEV)

O Método de ensaio no qual se analisa a morfologia de uma amostra e a sua composição elementar, é denominado de MEV/EDS, respectivamente. Para as análises morfológicas e de composição atômica das amostras confeccionadas, mediante a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), foram utilizados os equipamentos ZEISS e OXFORD Instruments, modelos EVO MA15 e X-MAX, e obtidas as variáveis por meio dos softwares Smart SEM e INCA – Point & ID, respectivamente.

A preparação da amostra para este ensaio consistiu em fixar aproximadamente 1,5 g da amostra em um suporte metálico circular, denominado stub, tendo esta amostra submetida a um recobrimento com uma fina camada de um condutor, no caso ouro (Au), denominado de metalização das amostras, para que fossem produzidas imagens de alta resolução da amostras.

A técnica da metalização das amostras é utilizada para melhorar o nível de emissão de elétrons, facilitando a construção da imagem.

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

Foi utilizado o método MEV para pesquisar as estruturas e as alterações mistura seca e nos compósitos desenvolvidos.

3.3.4 Micro análise Qímica pelo Método de Dispersão de Energia (EDS)

A microanálise quimica foi realizada por meio de uso do Espectrômetro Dispersivo de Energia (EDS), equipamentos este que é acoplado ao MEV.

Através do EDS, é possivel obter infomração sobre a quantidade de elementos químicos, sendo estes determinados nas amostras de forma pontual ou em uma área pré determinada pelo MEV, seja ela na matéria – prima ou então no compósito desenvolvido.

3.3.5 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Foi utilizado o método de Fluorescência de Raios-X (FRX) para analisar a composição química exclusiva dos resíduos. A análise de FRX possui características diferenciadas, tais como: a determinação de multi elementos simultâneos; a flexibilidade para análise qualitativa e quantitativa; operação com amostras sólidas e líquidas e a não apresentação de caráter destrutivo (NAGATA; BUENO; PERALTA-ZAMORA, 2001).

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

3.4 PREPARO DAS COMPOSIÇÕES

Trabalhando com a variação dos teores dos resíduos do resíduo de minério de ferro (30% a 60%), do resíduo de construção (15% a 60%) e os resíduos da produção da cal (10% a 25%), foram moldadas as 16 composições, conforme mostra a tabela 1 e, cada qual apresentando o seu respectivo teor de umidade.

Tabela 1 - Composições variando o percentual dos resíduos

(continua)

Comp.	Lodo Mariana	RC	RPC	Umidade %
C1	30	60	10	16%
C2	40	50		17%
C3	50	40		17,25%
C4	60	30		17,25%
C5	30	55	15	21%

Tabela 2 - Composições variando o percentual dos resíduos **(conclusão)**

C6	40	45		21%
C7	50	35		19%
C8	60	25		17%
C9	30	50	20	20%
C10	40	40		21%
C11	50	30		19%
C12	60	20		19%
C13	30	45	25	21%
C14	40	35		21%
C15	50	25		20%
C16	60	15		18%

Fonte: Autoria própria (2019)

Para cada composição foram confeccionados 60 corpos de prova de 20 x 20 mm para a determinação da resistencia à compressão uniaxial, sendo efetuado o rompimento nasidades de 3, 7,14,28,60,90, 180 e 365 dias.

Cada composição detalhada na Tabela 1 foi compactada com pressão de 10 MPa, em prensa hidráulica, sendo que cada amostra recebeu por 30 segundos esta pressão para sua compactação. A confecção dos corpos de provas baseou-se nos preceitos estipulados pela norma NBR 5738 (ABNT, 2003).

3.5 HONOGENEIZAÇÃO SECA DOS RESÍDUOS

As proporções para a mistura dos resíduos, conforme exposto na tabela 1, foram pesadas em balança eletrônica, marca Marte, modelo AD2000, com a precisão de 0,01 g.

Realizada a pesagem de cada componente de cada composição, estes foram homogeneizados em almofariz de porcelana com o auxílio de pistilo, igualmente cerâmico, com capacete de neoprene, tomado o cuidado de macerar com vigor cada resíduo e, para que a cal se misturasse adequadamente a mistura, evitando pequenos grumos à mistura, em conformidade a norma NBR 5738 (ABNT, 2003). Efetuada a inspeção visual da mistura seca, iniciou-se o processo de hidratação.

Figura 3 – Homogeneização seca das matérias primas

Fonte: Autoria própria (2021)

3.6 HIDRATAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

Esta etapa recebe destaque pela importância no processo da fabricação dos compósitos e serve como parâmetro, pois poderá influenciar diretamente na resistência mecânica e demais propriedades da amostra, como já é esperado em soluções alcalinas.

Foi utilizada água potável nas misturas, com auxílio de proveta graduada a fim de mensurar a quantidade de água utilizada em cada composição, para que fosse determinado o teor de hidratação de cada composição.

Para cada composição misturada e hidratada, utilizou-se recobrimento do almofariz com pano umedecido para evitar perda de umidade durante o processo de moldagem.

3.7 MOLDAGEM DAS COMPOSIÇÕES

Para a moldagem das misturas de cada composição, as porções da mistura foram devidamente pesadas em balança com precisão de 0,01g, e introduzida no molde cilíndrico metálico, Para que se obtivessem corpos de prova para o experimento, foram utilizados moldes cilíndricos de aço medindo 20 mm de diâmetro por 20 mm altura (Figura 4), sendo cuidadosamente inseridas com auxílio de um

fuinil plástico. Tomou-se cuidado para que nenhuma porção da amostra se perdesse durante o processo introdutório no molde metálico, para isto utilizou-se do auxílio de uma espátula metálica.

Foi identificado, por meio de teste visual, o melhor teor de umidade e que, através da consistência da amostra, se tornasse possível a ligação entre os resíduos para a confecção dos corpos de prova.

Para efeito de validação da umidade ótima, verificou-se visualmente a presença de brilho oriundo da água na superfície da composição recém-moldada. Em não havendo este realce através do brilho, era constatada a falta de água na mistura.

O peso da mistura hidratada para a compactação da composição foi de 12 gramas. Foi observado que no período das moldagens, a umidade relativa do ar esteve variando entre 72% e 74% e a temperatura entre 21ºC e 31ºC.

Figura 4 - Molde cilindrico 20x20cm

Fonte: Autoria própria (2021)

3.8 COMPACTAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

Tendo sido moldados os corpos de prova, estes foram submetidos à compactação através da utilização de prensa manual, de marca Bovenau, modelo P10ST (Figura 5), sendo aplicado uma carga de 10 MPa num intervalo de 30 segundos.

Figura 5 - Prensa manual Bovenau 10 Tn

Fonte: Autoria própria (2021)

3.9 CURA DAS COMPOSIÇÕES

A cura dos corpos de prova de cada composição foi realizada em temperatura ambiente, e após 24 horas acondicionadas em embalagens plásticas com tampa, contendo pequenos orifícios para permitir a respiração das amostras e até que alcançassem as datas dos respectivos ensaios, conforme NBR 5738 (ABNT, 2003), conforme Figura 6.

Figura 6 - Processo de cura dos corpos de prova - CP's

Fonte: Autoria própria (2020)

3.10 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

Para a caracterização das composições desenvolvidas, foram determinadas as propriedades mecânicas e físico-químicas das composições.

3.10.1 Resistência à Compressão Axial

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

A resistência à compressão uniaxial (fc) segue as diretrizes da norma NBR 5739 (ABNT, 2007), cujos valores foram calculados conforme a Equação 01.

$$FC = \frac{4 * F}{\pi * D^2}$$

Eq. 01

Onde:

fc: Resistência à compressão, em Megapascal (MPa);

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

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

Para cada composição foram moldados 45 corpos de prova para a determinação da resistência à compressão uniaxial, sendo rompido 5 cps para cada idade: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365 dias e ainda realizou-se a resistência à agua nas idades de 28 e 90 dias sendo rompido 5 cps em cada idade. Desta forma foram rompidos 50 cps para cada uma das 16 composições totalizando 800 corpos de prova.

3.10.2 Coeficiente de Expansão Linear

O coeficiente de expansão linear (α) foi utilizado para verificar a expansão linear das amostras durante as seguintes idades: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365 e 730 dias, onde foi medido o diâmetro inicial (li) dos corpos de prova, com o auxílio de um paquímetro digital, e, medido novamente após cada idade de cura (lf), calculou-se o

coeficiente de expansão linear, conforme a Equação 02 da NBR 12815 (ABNT, 2012):

$$\frac{l_f - l_i}{l_i} * 10$$

Eq. 02

Onde:

li: diâmetro inicial dos corpos de prova (mm);

lf: diâmetro após cada idade de cura (mm).

3.10.3 Absorção de Água por Imersão

Para a obtenção da absorção de água por imersão (Abs) das 16 composições, utilizou-se 5 cps para as idades de cura de 28 e 90 dias, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009), onde o peso do CP seco (Ms) é comparado com o peso do corpo de prova saturado (Msat), após imersão em água por 24 horas. A absorção de água por imersão é determinada conforme Equação 03:

$$Abs = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 10$$

Eq 03

Onde:

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

Msat: massa do corpo de prova após saturada em água por 24 horas, em gramas (g);

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

3.10.4 Coeficiente de Resistência à Água

Os valores do coeficiente de resistência à água (CRA) são calculados após a imersão dos corpos de prova em água por um período de 24 horas utilizando 5 cps para idade de cura aos 28 e 90 dias, e para aprovação do material o resultado da equação deve ser maior ou igual a 0,65, ou seja, para estar em conformidade tolera-se a perda de até 35 % da resistência do material saturado em comparação com o seco (GOST 9479-84, 1985). O coeficiente é calculado conforme a Equação 04.

$$CRA = \frac{R_{sat}}{R_{sc}}$$

Eq. 04

Onde:

CRA: Coeficiente de resistência à água;

RSat: Resistência dos corpos de prova saturados, em megapascal (MPa);

RSc: Resistência dos corpos de prova secos, em megapascal (Mpa).

4 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos desde a caracterização das matérias-primas (os resíduos industriais e municipais) até as características dos compósitos produzidos e a possível destinação à construção civil. Os resultados da investigação englobam as seguintes seções:

1. Caracterização das matérias-primas, quanto as suas composições granulométricas, minerais e a morfologia das suas partículas;

2. Propriedades mecânicas e físicas dos compósitos desenvolvidos;

3. Processos físico-químicos de formação das estruturas, explicando as razões da formação destas propriedades.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

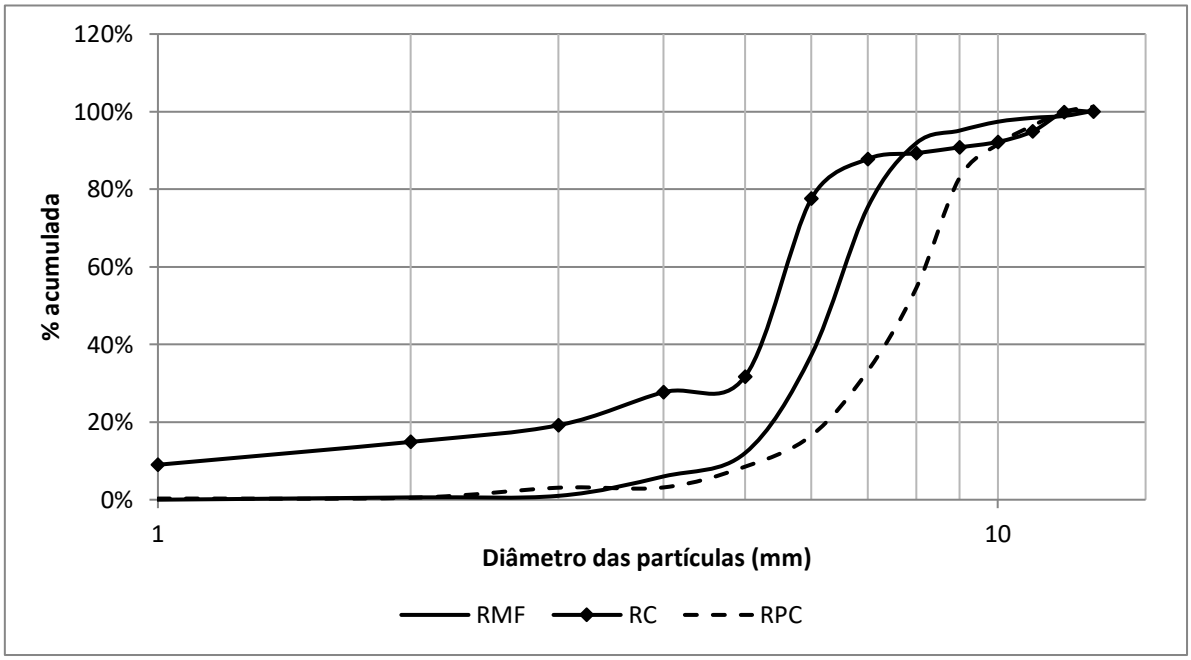
Todas as matérias-primas foram caracterizadas do ponto de vista da composição granulométrica, composição química, mineralógica e morfológica de suas partículas.

4.1.1. Composição granulométrica das matérias-primas

A comparação da composição granulométrica das matérias-primas (Figura 5) demonstra que as partículas mais grossas (até 9,50 mm) ficam no RC em grande quantidade. O total das quantidades das partículas de RC com tamanhos 2,00 – 9,50mm ou mais, atinge 87,8%. A amostra de RMF contém partículas do mesmo intervalo 2,00 – 9,50mm em uma quantidade 75,30% de peso. RMF contém um teor um pouco maior de partículas menores do que 2,00 mm - 18,0% do que RC - 12,1%.

A maioria das partículas de RPC (66,29%) apresenta tamanhos das partículas entre 0,010 e 0,028 mm e só 16,54% de peso das partículas têm tamanhos maiores do que 2 mm.

Figura 7 - Curva granulométrica dos resíduos



Fonte: Autoria própria (2021)

Por meio da Figura 5, verifica-se que o RMF apresentou distribuição uniforme de granulometria e mais fina e isto tambem se aplica ao RPC. Já o RC apresentou uma granulometria mais grossa e não apresentou uma distribuição tão contínua se comparado aos dois resíduos anteriormente citados.

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

4.1.2 Composição química das matérias primas

A composição química das matérias-primas (Tabela 2), estudada pelo método do FRX, também é significativamente diferente. A amostra de RMF é composta

principalmente por SiO_2 (41,9%) e Fe_2O_3 (48,1%) com um pequeno teor de 6,3% de Al_2O_3 e uma perda ao fogo relativamente pequena (3,08%).

Os Resíduos de concreto (RC) apresentam 49,1% de SiO_2 e CaO com teor de 22,5% devido à grande quantidade dos principais minerais de ligação dos silicatos de cálcio do cimento Portland (alita 3CaO SiO_2, belita $2CaO{\cdot}SiO_2$) e aluminoferrita de cálcio ($4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$). Este apresentou uma perda ao fogo (P.F.) alta de 10,60%, devido à dissociação durante a calcinação, a uma temperatura de 1000°C, dos carbonatos e hidratos formados durante a hidratação e carbonização do concreto.

Tabela 3 - Composição química das matérias primas

Elementos	RMF % de peso	RC % de peso	RPC % de peso
CaO	0,2	22,5	51,6
MgO	0	3,1	29,0
SiO_2	41,9	49,1	1,5
Fe_2O_3	48,1	1,9	0,2
Al_2O_3	6,3	6,4	0,1
K_2O	0,2	1,7	<0,1
SO_3	<0,1	0,9	<0,1
MnO	<0,1	<0,1	<0,1
Na_2O	0	1,5	0
TiO_2	0	0,7	0
P_2O_5	0	0,5	0
P.F.	3,08	10,60	17,49

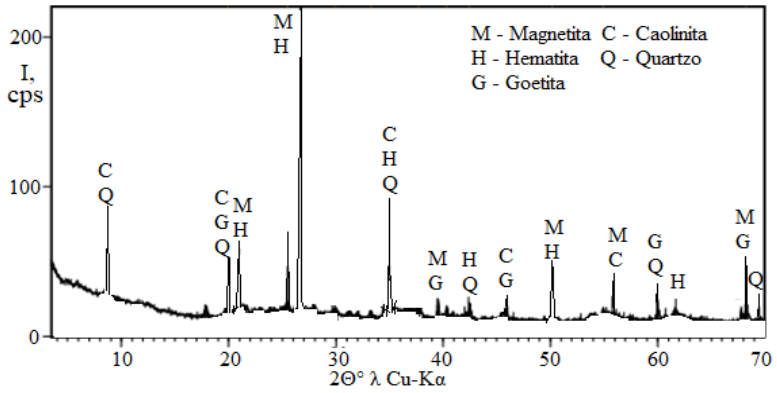
Fonte: Autoria própria (2021)

Os principais óxidos de RPC são CaO (51,6%) e MgO (29,0%), o que indica a produção de cal a partir de rochas dolomíticas $Ca{\cdot}Mg\ (CO_3)_2$. Com uma baixa quantidade de SiO_2 (1,5%), Fe_2O_3 (0,2%) e Al_2O_3(0,1%) como poluentes. A soma de P.F. e esses poluentes é de 19,29%, o que ultrapassa significativamente o limite permitido de 12% da norma técnica brasileira NBR 6453 (ABNT, 2003), revelando, assim, que este seja classificado como resíduo da produção de cal (RPC), não podendo ser vendida como cal ligante industrial.

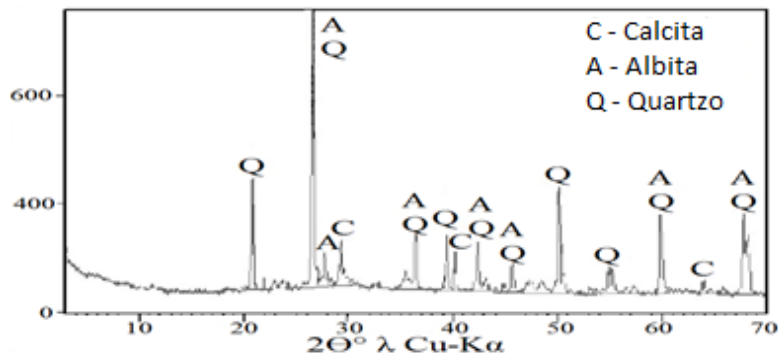
4.1.3 Composição mineralógica das matérias-primas

O estudo da composição mineralógica das matérias-primas se deu pelo método de DRX. A Figura 8 – a demonstra que o RMF consiste principalmente de três minerais ferruginosos - magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3) e goetita (FeO(OH)) com inclusões de caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})\cdot(OH)_8$) e quartzo ($SiO_2$). Porém o RMF apresenta a menor quantidade de fases cristalinas entre as três matérias-primas 200 cps (contagens por segundo). A intensidade do maior do pico cristalino de magnetita e ferrita ocorreu no ângulo 2θ = 26,5° mal ultrapassando o valor de 200 cps (contagens por segundo). A linha alta de fundo de raios-X indica a presença de um número bastante alto de materiais amorfos.

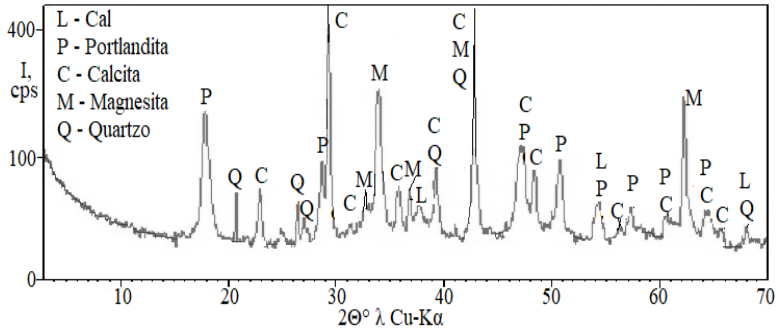
Figura 8 - Difratogramas de Raixo – X das matérias primas dos materiais desenvolvidos: A – RMF, B – resíduo de concreto, C – resíduo da produção da cal



a – RMF



b – RC



c – RPC

Fonte: Autoria própria (2021)

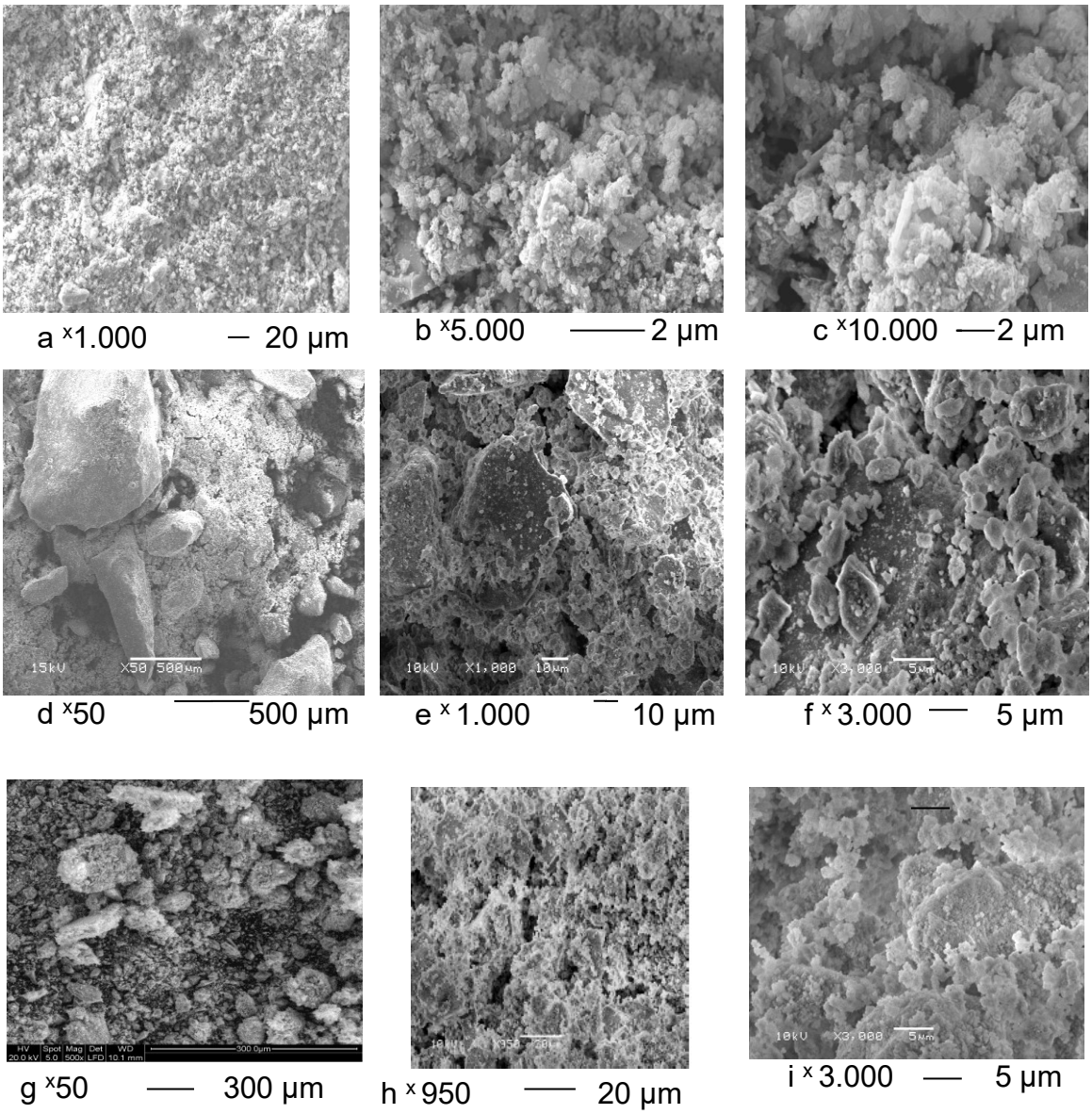
O resíduo de concreto (RC) (Figura 8-c) é composto pela calcita ($CaCO_3$), albita ($Na(AlSi_3O_8)$) e quartzo (SiO_2). Esta matéria-prima possui o maior pico de fase cristalina de albita e quartzo no ângulo 2θ = 26,8° com intensidade de até quase 800 cps, principalmente devido ao conteúdo de quartzo, cuja altura também mascara o maior conteúdo de materiais amorfos. A quantidade de calcita nesta amostra RC é muito baixa.

A calcita é o maior componente de resíduo de produção de cal (Figura 8-c) com o pico principal independente sem coincidência com picos de outros minerais.

4.1.4 Microestrutura das matérias primas pelo método microscopia eletrônica varredura (MEV)

A morfologia das matérias-primas estudadas é apresentada na Figura 9 por meio do método de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e é apresentada em diferentes magnificações, o que pode permitir a visualização de cada matéria prima com um maior nível de detalhamento.

Figura 9 - Microestrutura morfológica das matérias primas: a, b e c - RMF; d, e e f – resíduo de concreto; g, h e i – resíduo de produção de cal.



Fonte: Autoria própria (2021)

Nas imagens da Figura 9 - a, b e c é claramente visível que todas as partículas de RMF apresentam tamanhos de 1 até 20 µm de diferentes configurações, mas na maioria arredondada, sem ligações físicas e químicas entre elas. Estas características são mais visíveis, principalmente, com o aumento dos números de ampliações de 5.000 e 10.000 vezes. Pode-se observar, também, a pequena quantidade com formas de partículas redondas, ovais, angulares (Figura 9 – c), laminares, agulhas, encurvadas, entre outras. As partículas apresentam poros de diferentes tamanhos e configurações.

A estrutura de resíduos de concreto ao nível micro (Fig. 9 – d, e, f) é um conjunto de partículas de tamanhos muito diferentes: de 1 a 1.000 μm de mais diferentes configurações. Em ampliações de 1.000 e 3.000 vezes, as partículas grandes mostram numerosas microformações pontuais típicas de ligantes hidráulicos.

Similar às novas formações, que cobrem completamente toda a superfície da amostra de resíduos de cal (Fig. 9 – g, h, i).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DESENVOLVIDOS

4.2.1 Resistência axial dos materiais desenvolvidos

A análise dos resultados experimentais (Tabela 3) mostra que a resistência à compressão dos corpos de prova é diretamente proporcional ao teor de RPC, como componente aglutinante, e do resíduo de concreto RC, aparentemente devido à atividade hidráulica remanescente da quantidade completamente não hidratada de minerais de cimento Portland. Possivelmente, a presença desses dois componentes quimicamente e hidraulicamente ativos obscurece a manifestação da atividade pozolânica de RMF ativados por CaO, observada por Yao et al (2019). A resistência das amostras de todas as composições aumenta constantemente com um aumento do período de hidratação de 0,42 MPa no 3º dia para 10,22 MPa no 365º dia.

Tabela 4 - Resistência axial das amostras durante a hidratação e cura

(Continua)

	Composições, % de peso			Resistência axial (MPa) após de dias de cura							
	RMF	RC	RPC	3	7	14	28	60	90	180	365
1	30	60	10	0,93	1,15	1,73	1,94	2,27	2,91	3,14	4,26
2	40	50		0,72	1,07	1,57	1,80	1,92	2,22	3,90	4,70
3	50	40		0,56	0,82	1,14	1,34	2,17	2,06	4,01	4,38
4	60	30		0,42	0,84	1,26	1,31	1,83	2,19	3,53	4,16
5	30	55	15	1,13	1,53	2,09	2,41	3,08	4,48	5,27	6,28
6	40	45		1,05	1,40	1,73	2,23	3,20	4,16	4,79	5,29
7	50	35		1,03	1,53	1,84	1,96	2,55	3,02	4,50	5,20
8	60	25		0,88	1,02	1,32	1,73	2,43	2,12	3,93	4,68

Tabela 5 - Resistência axial das amostras durante a hidratação e cura

(conclusão)

9	30	50	20	1,68	2,49	3,05	3,94	5,72	6,55	7,67	9,90
10	40	40		1,53	1,85	2,51	2,92	3,46	5,55	7,93	9,22
11	50	30		0,86	1,24	2,18	2,83	3,11	4,65	6,07	8,90
12	60	20		0,75	1,63	2,20	2,52	2,90	4,20	5,40	7,07
13	30	45	25	2,34	2,30	2,57	3,02	5,07	6,38	8,40	10,22
14	40	35		1,15	1,76	2,09	2,59	4,99	6,53	8,16	9,87
15	50	25		1,26	1,63	1,86	2,31	3,68	5,59	7,66	9,35
16	60	15		0,89	1,11	2,26	2,13	3,58	5,13	6,94	7,59

Fonte: Autoria própria (2021)

A resistência mínima em todas as idades de hidratação é possuída por corpos de prova da composição 4, com um teor mínimo de 10% de RPC e um teor mínimo de 30% de RC com uma resistência de 4,16 MPa em 365 dias. As composições 1, 2 e 3, com 10% RPC, têm resistências ligeiramente maiores e valores de resistência muito semelhantes da composição 8, com 15% RPC e 25% RC. Amostras da composição 13, com teor máximo de 25% de RPC e 45% de RC, têm resistência máxima para 180 e 365 dias de hidratação (8,40 e 10,22 MPa, respectivamente). Nas idades iniciais, antes do período de 90 dias, a resistência maior foi observada apenas para amostras de composição 9.

4.2.2 Expansão durante a cura dos materiais desenvolvidos

A expansão linear de todos os materiais desenvolvidos (Tabela 4) aumentou com o incremento do tempo de hidratação, isso ocorreu devido à síntese de novas formações sol-gel nas superfícies de partículas sólidas, como resultado de sua corrosão alcalina de soluções do RPC. O preenchimento do espaço entre as partículas sólidas com sol leva à expansão e um aumento nas dimensões lineares das amostras durante os primeiros 28 dias de hidratação do material. Porém, após 28 dias de aumento da concentração e densidade de matéria corroída, o sol passa para um gel, o que leva ao processo oposto de contração das amostras, a partir do 90º dia de quase todas as composições. A Tabela 4 mostra claramente o processo de expansão das amostras para 28 dias inclusive e retração seguinte em todos os períodos, incluindo 365 dias.

Mymrin (1987) estudou em detalhes um processo semelhante de transição da expansão para a contração em escórias siderúrgicas ferrosas e interação química deles com vários solos naturais. O processo da expansão - retração - expansão - retração foi repetido várias vezes durante 5 a 7 anos de hidratação e endurecimento, quando as amostras foram armazenadas em condições ao ar úmido. Ao mesmo tempo, a resistência continuou a crescer continuamente.

Tabela 6 - Coeficiente de expansão das amostras de teste no processo de cura

N°	Composições, % de peso			Coeficiente de expansão (%) após de dias de cura							
	RMF	RC	RPC	3	7	14	28	60	90	180	365
1	30	60	10	1,78	1,89	1,97	2,00	1,99	1,83	1,71	1,65
2	40	50		1,70	1,77	1,84	1,92	1,92	1,83	1,72	1,63
3	50	40		1,64	1,69	1,82	1,85	1,83	1,79	1,70	1,61
4	60	30		1,56	1,68	1,78	1,82	1,82	1,77	1,69	1,58
5	30	55	15	1,90	2,12	2,36	2,38	2,30	2,16	2,05	1,92
6	40	45		1,82	1,97	2,14	2,21	2,15	2,08	1,99	1,93
7	50	35		1,73	1,82	1,98	2,12	2,09	1,97	1,85	1,88
8	60	25		1,78	1,84	1,91	2,00	1,94	1,80	1,71	1,65
9	30	50	20	1,98	2,17	2,38	2,44	2,32	2,35	2,14	2,03
10	40	40		1,88	1, 93	2,41	2,44	2,30	2,24	2,13	2,08
11	50	30		2,02	2,15	2,19	2,22	2,16	2,12	2,01	1,92
12	60	20		1,84	2,09	2,24	2,24	2,08	2,00	1,89	1,82
13	30	45	25	2,12	2,23	2,44	2,51	2,45	2,36	2,30	2,22
14	40	35		2,14	2, 19	2,41	2,44	2,36	2,30	2,17	2,11
15	50	25		2,13	2,21	2,18	2,26	2,21	2,14	2,03	1,90
16	60	15		2,00	2,27	2,31	2,35	2,31	2,23	2,10	2,00

Fonte: Autoria própria (2021)

A composição 13 apresentou os maiores valores de expansão em todos os dias de cura, seguida pelos compósitos 14, 9 e 10. Esta variação dos resultados pode ser justificada pelo alto teor (até 70% no compósito 9) de RPC e RC, com influência prioritária do RPC.

Por outro lado, o menor valor de expansão pertence à composição 4, seguida pela composição 3 e 1, que também apresentam os menores valores de resistência no 365º dia (Tabela 4). Esses resultados confirmam a idéia da relação entre a variação do tamanho e a resistência das amostras durante os processos

físicos e químicos de hidratação de materiais. O RMF nesses compostos desempenha o papel de um enchimento passivo (filler).

4.2.3 Absorção de água de materiais depois de 28 e 90 dias de cura

O valor da absorção de água de materiais como o concreto sem cimento Portland depende de muitos fatores. Todas as misturas investigadas neste trabalho diferem apenas na porcentagem de componentes, dois dos quais (RPC e RC) possuem propriedades ligantes restantes. Portanto, o principal fator na diferença entre seus valores de absorção de água é a quantidade de elementos hidraulicamente ativos que se hidratam durante esses 28 e 90 dias e com suas novas formações hidratadas fecharam a porosidade previamente aberta das amostras. A Tabela 5 apresenta os valores de absorção de água para as composições.

Tabela 7 - Absorção de água (% de peso) depois de dias de hidratação e cura

N°	Composições, % de peso			Absorção de água (% de peso) depois de dias de cura	
	RMF	RC	RPC	28 dias	90 dias
1	30	60	10	6,98	6,04
2	40	50		6,63	5,88
3	50	40		6,42	5,63
4	60	30		6,07	5,56
5	30	55	15	8,90	7,82
6	40	45		8,69	7,58
7	50	35		8,21	7,12
8	60	25		7,85	7,03
9	30	50	20	9,90	9,06
10	40	40		9,24	8,82
11	50	30		8,93	8,55
12	60	20		8,48	8,04
13	30	45	25	11,62	9,64
14	40	35		11,27	9,23
15	50	25		10,87	8,76
16	60	15		10,44	8,29

Fonte: Autoria própria (2021)

Os valores de absorção de água de todas as composições (Tabela 5) diminuem entre 28 e 90 dias de hidratação. Composições com alto teor de RPC apresentam altos valores de absorção de água devido à hidratação incompleta da cal durante a preparação e endurecimento das amostras. Por exemplo, a absorçao das composições 1 – 4, com 10% RPC, no dia 28° variam entre 6,98 e 6,07%, enquanto as formulações 13 – 16, com 25% RPC, variam entre 11,62 e 10,44%, Essa diferença diminuiu acentuadamente no 90º dia de hidratação: 6,04 e 5,56%, contra 9,64 e 8,29%, para composições com 10% de RCP e 25% de RPC, respectivamente.

Os valores de absorção de água para as composições com o mesmo teor de RPC aumentam com o aumento do teor de RC nas mesmas. Os valores máximos de absorção de água é apresentado pela composição 13 (11,62 e 9,64%) e mínimo pela composição 4 (6,07 e 5,56%) aos 28º e 90º dias, respectivamente.

4.3 PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DE FORMAÇÃO DAS ESTRUTURAS DOS MATERIAIS DESENVOLVIDOS

Para estudar os processos físico-químicos de formação das estruturas dos materiais desenvolvidos, a composição 12 foi escolhida devido ao maior teor (60% em peso) do resíduo de minério de ferro além de 20% de resíduo de concreto e 20% de teor de componente ligante - resíduo da produção de cal. Além disso, as amostras da composição 12 apresentam valores bastante elevados de resistência axial, entre outras propriedades, que correspondem às demandas da NBR 7170 (ABNT, 1983) e, portanto, podem ser recomendadas para aplicação à nível industrial.

O conjunto de métodos para estudar os processos de formação da composição estrutura 12 durante 365 dias de hidratação e cura consistiu em DRX, MEV, EDS e mapeamento. As propriedades ambientais foram estudadas através de espectroscopia de absorção atômica - AAS, lixiviação e solubilização de metais pesados na idade de 90 dias de cura.

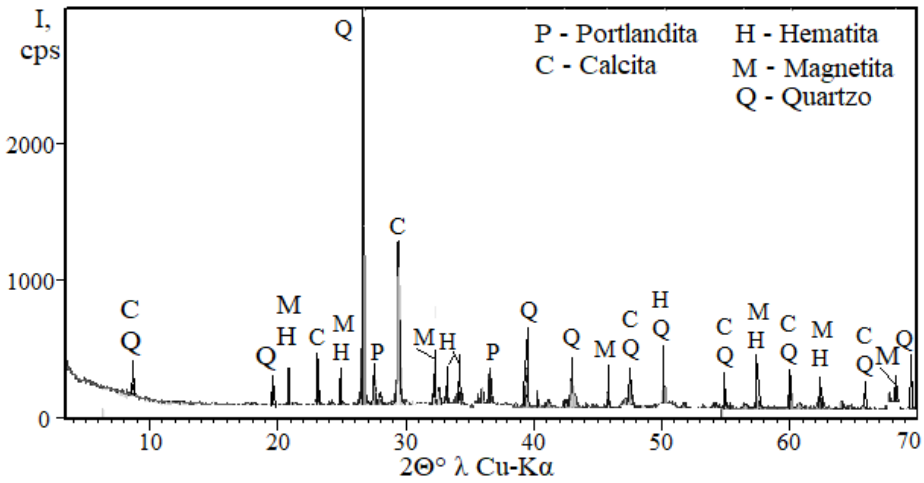
4.3.1 Mudança da composição mineralógica das composições 12

A composição mineralógica da mistura inicial seca da composição 12 está representada pelos seguintes minerais: portlandita ($Ca(OH)_2$), calcita ($CaCO_3$), hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e quartzo (SiO_2) (Figura 10a). Intensidade máxima, maior do que 2.000 cps (cálculos por segundo) dos picos cristalinos, tem quartzo no ângulo 2θ= 26,5°. As intensidades dos picos de outros minerais ficam no nível de 500 cps ou menor, exceto do pico de calcita no ângulo 2θ = 29,5°. É visível, também, um alto fundo de raios-X, o que significa alto teor dos materiais amorfos na composição 12.

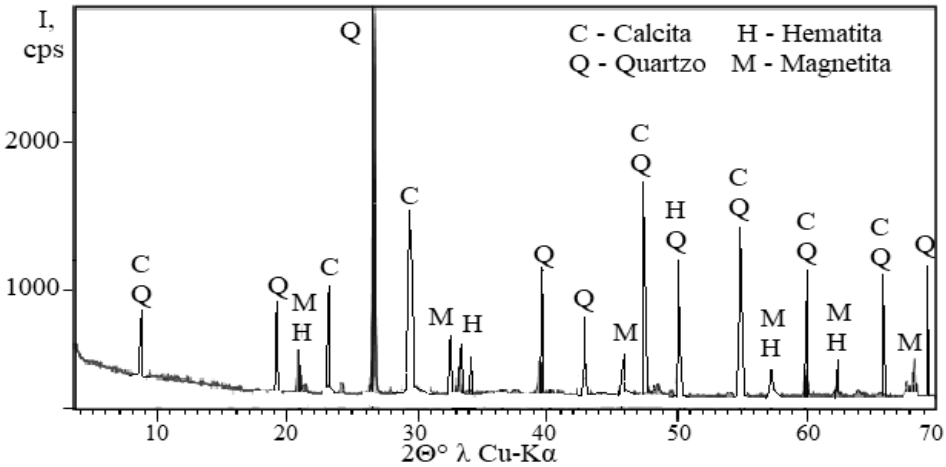
Após a hidratação e cura ao ar das amostras da composição 12, no difratograma (Figura 10b) desaparecem os picos de portlandita por razão da hidratação adicional e da absorção de CO_2 do ar, com transformação do $Ca(OH)_2$ em calcita $CaCO_3$. Esta reação leva a um aumento muito forte na intensidade de todos os picos das estruturas cristalinas da calcita, algumas das quais quase atingem o nível de 2.000 cps (corpos por segundo).

Na Figura 10a, praticamente todas as partículas de quartzo estão nas camadas superficiais, assim como foram mecanicamente destruídos durante muitas épocas geológicas, no regime dinâmico da crosta terrestre, mudanças de temperatura e correntes de água e ventos. Mas a maioria das partículas possuem núcleos mono-cristalinos não destruídos. Exatamente estes núcleos refletem os raios-X, e como as camadas destruídas espalham intensidades do tubo dos raios-X e eclodem os raios refletidos da Figura 12a.

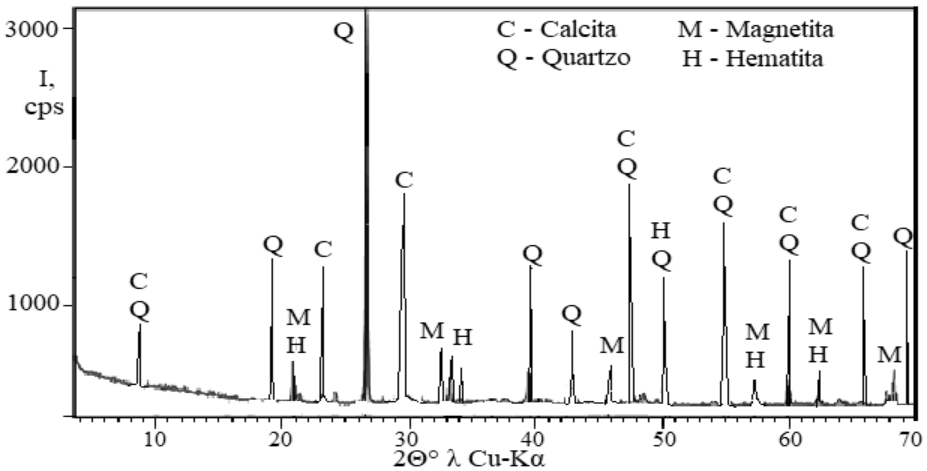
Figura 10 - Mudança de composição mineralógica das amostras de composição 12 durante de hidratação e cura



a - mistura inicial seca



b - amostra após 180 dias de cura



c – amostra após 365 dias de cura

Fonte: Autoria própria (2021)

Na Figura 10b como as camadas superficiais de quartzo foram quimicamente dissolvidas durante 180 dias em ambiente alcalino de resíduo de

produção cal hidratado, e, os produtos desta dissolução foram removidos em espaço dos poros como uma parte do processo de transição de sol-gel. Devido a isso, a intensidade dos picos do quartzo aumentaram em comparação com a Fig, 10a, criando a ilusão errada de novas partículas cristalinas (Mymrin, 1986). As intensidades de picos de calcita também crescem em todos os ângulos, particularmente, com o pico no ângulo 2θ = 29,5° aumentando sua intensidade de I = ± 1,200 até ± 1500 cps.

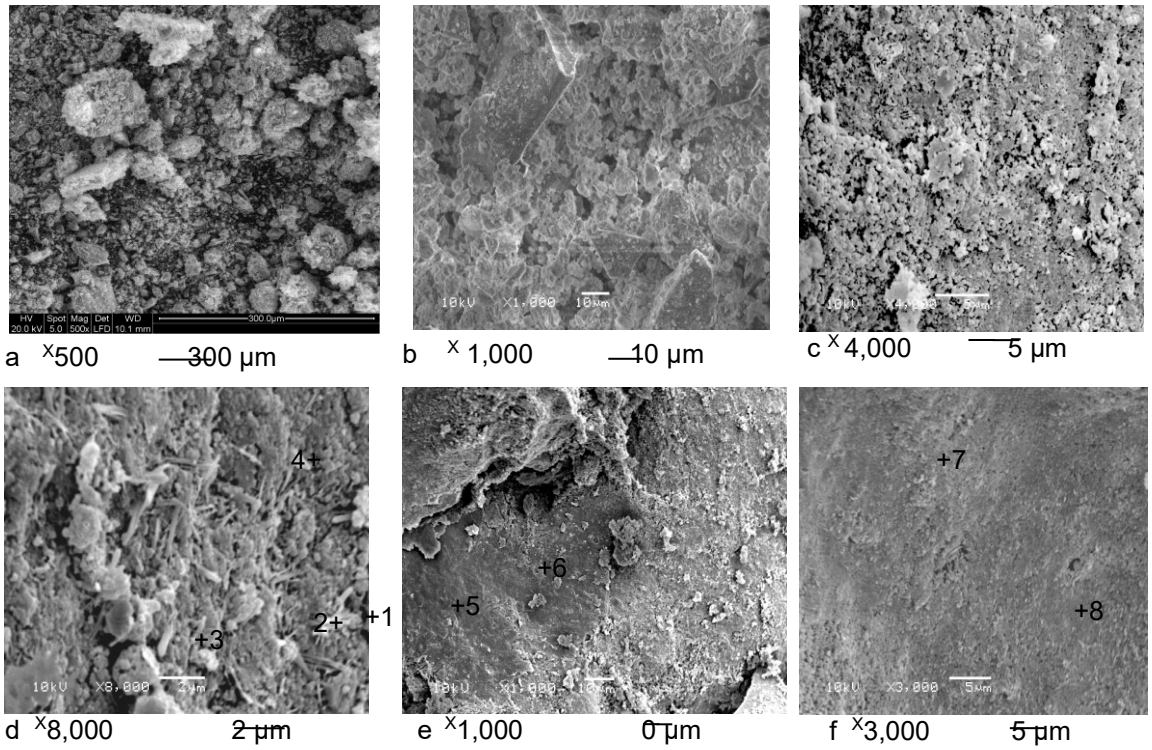
O processo de fortalecimento de todos os materiais continua até 365 dias com velocidade lenta. Na Figura 10c é bem visível o aumento de intensidades de picos cristalinos de quartzo e calcita. O maior pico deles é de quartzo no angulo 2θ = 26,5° aumento sua intensidade de I = ± 2,800 cps até o nível de ± 3,000 cps. O pico de calcita com ângulo 2θ = 29,5° cresce neste período de forma mais lenta, do que durante primeiros 180 dias (de ±1500 cps até ±1,700 cps).

Fica realçado, também, todos os três difratogramas da Figura 10, que apresentam alto teor de materiais amorfos. Eles foram parcialmente herdados dos componentes amorfos iniciais (Figura 10a), mas uma parte significativa deles foi formada durante a dissociação alcalina de todas as partículas da mistura inicial, incluindo partículas de quartzo.

4.3.2 Mudança do micro morfologia das amostras de composição 12 durante hidratação e cura

O processo de mudança da estrutura morfológica das amostras de composição 12, durante de hidratação e cura, foi estudada por meio do método de microscopia eletrônica de varredura – MEV (Figura11). A amostra seca compactada (Figura 11a) é representada por partículas de várias configurações, desde formatos redondos, ovais, angulares, agulhares, lamelares até formas encurvados, entre outras. Os tamanhos deles variam entre 1 e 200 μm. As partículas não estão ligadas entre si, e os poros entre eles também têm tamanhos e formatos diferentes.

Figura 11 - Mudança de micro estrutura morfológica das amostras de composição 12 pelo método MEV: a – mistura seca inicial; b e c – após de 180 dias de cura; d, e, f - após de 365 dias de cura e pontos de composição micro química pelo método EDS



Fonte: Autoria própria (2021)

Depois de 180 dias de hidratação a estrutura morfológica das amostras (Figura 11b e c) muda muito: grãos dispersos desaparecem e em vez deles aparecem um grande número de pequenas superfícies de partículas unidas, também ligadas entre si. As superfícies e bordas dessas áreas estão cobertas por novas formações gotejantes, semelhantes a nuvens, as quais não foram encontradas na mistura seca original (Figura 11a). O número de poros foi drasticamente reduzido, e suas formas também se tornaram lisas, arredondadas em todos os lados. Os tamanhos dos poros também diminuam drasticamente e, variam entre 2 e 10 µm. Essa transição de partículas dispersas e não conectadas para sua unificação (Figura11a) em estruturas monolíticas (Figura 11b) explica o aumento na resistência dos materiais no processo de formação dessas ligações.

Porém, a estrutura das amostras em todos os pontos é significativamente diferente, isso se deve a interação química entre as partículas com composição química diferente, o que, possivelmente, impossibilitou de se obter uma alta homogeneidade de mistura dos componentes iniciais ao nível micro. Em alguns pontos em maior ampliação, estruturas como a Figura 11c são encontradas. Eles

também mostram claramente o processo de reunião e combinação de partículas em áreas mais monolíticas, o que também leva a um aumento na resistência das amostras. Esses pontos se distinguem pelo aparecimento de uma rede de micro poros com tamanhos entre 0,1 – 1,0 μm, muito parecido a uma estrutura rendada nas novas formações.

Em alguns pontos, estruturas semelhantes a agulhas muito pequenas são visíveis. Muito mais deles são vistos em amostras após 365 dias de hidratação (Figura 11 d), em alguns pontos eles crescem juntos e formam drusas de cristais, o que também pode aumentar a resistência das amostras O número de drusas é relativamente pequeno, sendo a estrutura morfológica das Figuras 11e e f caracterizada por planos na sua maioria, sem qualquer semelhança com a existência de drusas nos pontos iniciais e com um número muito pequeno de poros.

A transição sol-gel foi observada neste experimento aos 365 dias, mas pode durar por muitos anos, especialmente em condições de suficiente umidade (MYMRIN, 1987), o que causa endurecimento em longo prazo e alterações em outras propriedades físico-químicas dos materiais.

4.2.3 Composição micro química de novas formações composição 12

Os resultados da composição química obtidos na Figura 11 - d, e, f através de método de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), são apresentados na Tabela 6. Eles demonstram que os pontos 1 – 4, obtidos de formas agulhadas (Figura 11d), têm altos valores de Ca (entre 30,01 e 30,88%) e c (entre 24,11e 25,44%). Essa coincidência de formas agulhas, seus intercrescimentos frequentes em forma de drusas e uma composição constante, predominantemente Ca - C, nos permite atribuí-los à calcita ($CaCO_3$). A validade desta suposição é confirmada pelos resultados da análise DRX (Figura 10b e c) e da Tabela 3. Além disso, altos teores dos outros elementos, especialmente de Fe, Si e pequenos teores de Mg e Al são inevitáveis por razão dos altos teores deles nas matérias-primas.

Os pontos 5 – 8 das novas formações têm predominância de Fe (entre 53,75 e 55,05%) devido à predominância de Fe (48%) no RMF. Altos teores de carbono C (12,64 - 15,67%) nos pontos 5 – 8 confirmam a possibilidade da existência de

carbonatos amorfos, como uma parte de fundo amorfo das difratogramas de Figura 10 – b,c.

Tabela 8 - Composição química de novas formações de composição 12 em pontos da Figura 9-d, e e f (pelo método de EDS)

(Continua)

Pontos	C	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu	Total
1	25,24	6,45	0,70	21,02	30,88	15,34	0,37	100,00
2	25,44	5,99	0,64	12,05	30,01	25,56	0,31	100,00

Tabela 9 - Composição química de novas formações de composição 12 em pontos da Figura 9-d, e e f (pelo método de EDS)

(conclusão)

3	25,33	8,09	0,58	10,91	30,16	24,59	0,32	100,00
4	24,11	3,18	0,26	20,74	30,17	22,54	-	100,00
5	12,64	12,16	-	0,78	20,63	53,80	-	100,00
6	14,18	12,72	0,26	0,73	18,00	53,75	0,36	100,00
7	15,65	4,66	11,44	1,24	11,67	54,89	0,45	100,00
8	15,67	4,62	11,65	1,19	11,82	55,05	-	100,00

Fonte: Autoria própria (2021)

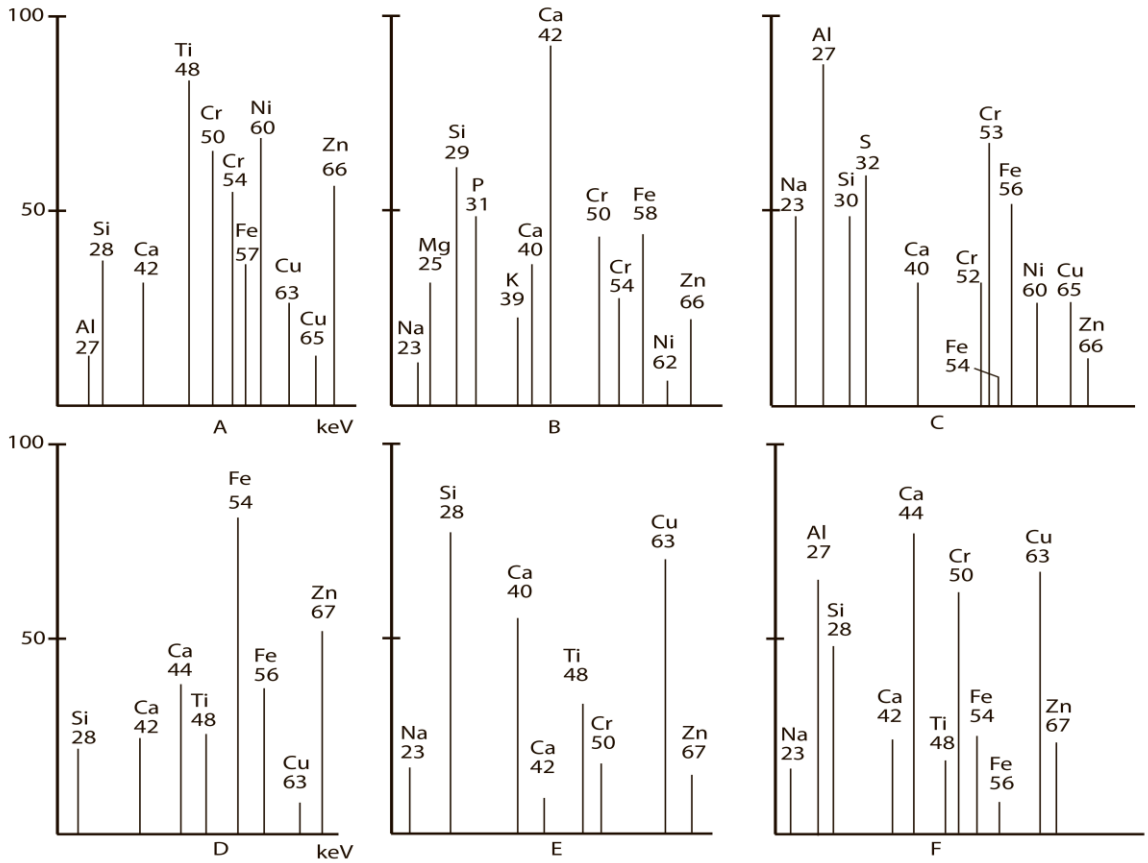
Comparando as informações obtidas da Figura 11, pode confirmar a heterogeneidade de distribuição de cada um dos elementos químicos. O elemento químico predominante desta composição foi o ferro, sendo concentrado em forma de coágulos disformes. As partículas de magnésio e cálcio são distribuídas de maneira mais uniforme do que todas as outras partículas.

4.2.4 Composição isotópica das amostras da composição 12

A necessidade de aplicar a análise da composição isotópica, como um dos métodos de pesquisa mais sensíveis, decorreu do fato da detecção, pelo método EDS (Tabela 7), de um alto teor de cobre (Cu) sendo este considerado um metal pesado e ambientalmente perigoso. Os resultados desta análise de composição isotópica (Figura 12), por meio do método de análise de micro-massa a laser (LAMMA), demonstra a presença não só cobre, mas isótopos de diferentes pesos

atômicos de Cr, Ni, Zn, em diferentes pontos de amostra da composição 12 e em diferentes teores (intensidades dos picos).

Figura 12 - Composição de isótopos em diferentes pontos da amostra de composição 12 após de hidratação e cura durante 90 dias



Fonte: Autoria própria (2021)

De uma maneira resumida, todos os fatos acima obtidos experimentalmente, permitem argumentar que o processo de formação da estrutura dos materiais desenvolvidos consiste em dois efeitos mutuamente complementares:

Efeito 1: O efeito da dissociação alcalina da superfície de partículas sólidas dos componentes com a síntese de novas formações sol-gel amorfas (também conhecidas como "soluções sólidas"), gradualmente transformando-se em um estado semelhante a uma rocha, como uma grande quantidade de materiais naturais conhecidos (sílica, opala, obsidiana, perlita, taquilita, pedra-pomes, âmbar).

Efeito 2: O efeito da síntese de carbonatos, especialmente calcita e possivelmente a dolomita, ambas cristalinas e amorfas é claramente visível. Ambos os tipos das novas formações (amorfa e cristalina), como na natureza, são misturas

de vários graus de homogeneidade tanto dos componentes inociais dissolvidos quanto dos produtos de sua interação no espaço poroso.

4.3 A SUSTENTABILIDADE NOS COMPÓSITOS DESENVOLVIDOS

Devido ao alto teor de metais, especialmente de metais pesados, no resíduo de minério de ferro (RMF - lodo de Mariana) e, consequentemente, em todas as composições desenvolvidas, incluindo a composição 12, com 60% de RMF torna se extremamente necessário o estudo das propriedades ambientais dos materiais por métodos de lixiviação e solubilização em meio ambiente alcalino em concordância com NBR 10.004 (ABNT, 2004).

O estudo de lixiviação da (Tabela 8) pelo método AAS mostrou que o conteúdo de metais, incluindo metais pesados (Zn, Ni, Ba, Cd, Pb, Sn, Hg, Se, Cr, etc,) ultrapassou os limites da norma brasileira de toxicidade, NBR 10004 (ABNT, 2004). OS elementos que mais excederam os limites impostos pela NBR 10004 foram o Cd, o Pb e Cr totais, com 0,5, 1,0, e 5,00 mg/L, fixados como quantidade limite e que na materia prima do RMF (lodo de Mariana) apresentou 1,14, 3,43 e 8,46 mg/L, respectivamente.

4.4 LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO

O ensaio de lixiviação de metais pesados foi realizado segundo as premissas da NBR 10005 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004). Através da análise de lixiviação no compósito 12, confirmamos a presença de metais pesados no RMF, como já era o esperado e destacamos ainda a presença de bário e ferro com 55,28 e 28,31 mg/L, respectivamente, os quais foram transformados na composição 12.

Mesmo o bário, que estava abaixo do limite preconizado na NBR, de 70,0 mg/L, houve redução significativa de 55,28 para 12,03 mg/L.

O ensaio de solubilização foi realizado segundo as premissas da NBR 10006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT, 2004).

Originalmente empregados para avaliar e classificar os resíduos sólidos, os ensaios de lixiviação e solubilização são ferramentas muito úteis na avaliação da

periculosidade de resíduos sólidos e de suas formas residuais finais quando dispostos em aterros (OLIVEIRA, 2002).

De acordo com SILVA (2018), os ensaios de lixiviação e solubilização determinam se houve a estabilização por solidificação, pois, caso estabilizados, haverá a presença de mecanismos que inibem a dispersão dos contaminantes, modificação da solubilidade pelo controle do pH, formação de combinações químicas insolúveis e o encapsulamento dos contaminantes.

Logo, para assegurar que houve a imobilização de determinados contaminantes nos compósitos é interessante que se realize os ensaios de lixiviação e de solubilização (MYMRIN et al. 2017; VICTORIA, 2013; KIZINIEVIC et al. 2018). A Tabela 7 apresenta os valores de lixiviação de solubilidade para o resíduo de minério de ferro (lodo de Mariana) e para a composição 12.

Tabela 10 - Lixiviação e solubilização de metais de resíduo de minerio de ferro composição 12 (pelo **método AAS)**

Elementos	Lixiviação, mg/L			Solubilização, mg/L		
	RMF(lodo de Mariana)	Comp.12	NBR 10004	RMF(lodo de Mariana)	Comp, 12	NBR 10004
As	2,63	0,47	1,0	3,56	< 0,001	0,01
Ba	55,28	12,03	70,0	4,47	0,052	0,7
Cd	1,14	0,05	0,5	1,71	<0,005	0,005
Pb	3,43	0,32	1,0	3,66	<0,01	0,01
Cr total	8,46	1,78	5,0	8,67	0,02	0,05
Hg	2,47	0,04	0,1	3,81	< 0,001	0,001
Se	2,75	0,23	1,0	3,35	< 0,001	0,01
Al	4,76	2,56	*	36,44	0,05	0,2
Cu	6,29	0,19	*	7,08	1,47	2,0
Fe	28,31	1,69	*	30,75	0,09	0,3
Mn	5,11	0,85	*	7,43	0,06	0,1
Zn	4,48	0,03	*	14,13	1,72	5,0

Nota: *- não determinado pela NBR 10004

Fonte: Autoria própria (2021)

A composição 12 foi selecionada para este estudo por razão de máximo (60%) teor de lodo de Mariana. Primeiramente, deve-se comparar o RMF como matéria-prima com a composição 12 após de hidratação e cura durante 90 dias (Tabela 8).

Após a hidratação e interação química com outros componentes da composição 12, o RMF apresentou forte ligação química de metais pesados em condição insolúvel em ambiente ácido pelo método AAS.

A composição 12 atende às exigências da NBR 10004 (ABNT, 2004) após hidratação e cura; por exemplo, os valores da lixiviação de Ba são 4,6 vezes menores do que de RMF como matéria-prima e 5,8 vezes menor do que o exigido pela respectiva NBR. A lixiviação de Cd tem diminuição semelhante de valores em 22,8 e 10 vezes. Outros metais também têm diminuição semelhante dos valores de lixiviação. Os valores de solubilização de As de RMF antes de utilização como matéria prima principal tem valores maiores (8,67 mg/L) do que exige as regulamentações da NBR (0,05 mg/L), cerca de173,4 vezes, mas depois de ligação química na composição 12 o valor de solubilização diminuiu até 0,02 mg/L.

A ligação mecânica eficaz das partículas de matéria-prima também significa a ligação química eficaz dos átomos e íons em novas formações quimicamente estáveis. Esses processos criam materiais estáveis, que correspondem aos rígidos padrões de saúde.

5 CONCLUSÃO

Como principais conclusões têm-se:

I. Os resultados desta pesquisa confirmam a possibilidade de utilização de resíduo principal do processo de mineração de ferro (RMF) em compósitos com resíduo de concreto (RC) e resíduo da produção da cal (RPC) para produção de bases de estradas, substituindo duas camadas tradicionais de areia e pedras naturais, para blocos de concreto, tijolos maciços não queimados, entre outros materiais de construção civil.

II. As propriedades mecânicas e físicas de materiais desenvolvidos correspondem às demandas de normas técnicas do Brasil. Particularmente os valores de resistência uniaxial no 3° dia de hidratação e cura aumenta até nível de 2,34 MPa, no 28° dia – até 3,94 MPa, no 180° dia - 8,40 MPa e no 365° dia - 10,22 MPa. Os valores de coeficiente de variação diametral durante os primeiros 3 dias variam entre 1,56 e 2,13, aumentam até 28 diasde 1,82 - 2,51% e depois diminuem até 365°dias atè 1,58 - 2,22%, Os valores da massa específica aparente das amostras das composições no 3° dia variam entre 3,30 - 3,50 g/cm³ e aumentam até 3,39 - 3,62 g/cm³ no 365° dia. A Absorção de água no 28° dia fica entre 7,17 e 9,32% e diminui até valores de 6,26 - 8,64%. Todas estas características correspondem às demandas técnicas das NBR atuais.

III. As pesquisas dos processos físicos – químicos, permitem estabelecer o implementação dos seguintes processos: dissolução química das superfícies de partículas sólidas dos componentes iniciais em uma solução alcalina de resíduo da produção da cal hidratado, a interação química dessas soluções dos componentes iniciais com a formação de soluções de síntese sol de várias composições químicas,

a densificação dessas soluções de síntese de sol com sua transição para um gel;

a síntese dos cristais de calcita em espaço dos porose a transição do gel durante um ano de hidratação em estado semelhante à pedra.

Esses processos explicam a mudança em todas as propriedades mecânicas e físicas dos materiais desenvolvidos ao longo do ano e podem ocorrer nos materiais por muito mais tempo e, com uma intensidade gradualmente decrescente.

IV. Foi constatado que o RMF contém quantidades significativas de metais, inclusive os metais pesados perigosos (Zn, Ni, Ba, Cd, Pb, Sn, Hg, Se, Cr) acima dos limites estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), os quais foram ligados quimicamente, diminuindo os percentuais de concentração para todos os elementos na composição 12. O estudo das propriedades ecológicas dos materiais desenvolvidos por métodos padronizados de solubilidade e lixiviação em meio ácido têm demonstrado seu sucesso na ligação por gel com novas formações até o nível que satisfaça a NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Por isso, o maior beneficiado com a aplicação dos resultados obtidos nessa pesquisa é o meio ambiente, considerando a real possibilidade de utilização de resíduos do processo de mineração como matéria-prima, aplicando-os a uma destinação final adequada, prevenindo uma possível contaminação do meio ambiente e diminuindo a extração de recursos naturais.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após as conclusões obtidas com a realização do presente trabalho são sugeridos alguns temas para trabalhos futuros:

Ampliação dos resultados da pesquisa, em escala industrial, através do desenvolvimento de tecnologia adequada para tal;

Através das composições estudadas e desenvolvidas, avaliar as propriedades mecânicas dos produtos finais (artefatos para a construção civil, como paver, bloco não estrutural, placas, guias de calçamento, bocas de lobo);

Estudo da viabiidade econômica para a fabricação dos novos materiais a partir da composição 12;

Para que seja observada a inertização dos possíveis contaminantes presente nas composições estudadas, alterar a produção de materiais com

características de concreto, para a confecção de cerâmica, realizando a queima dos corpos de prova em fornos;

Estudar as demais composições desenvolvidas, além da composição 12, para que se possa obter alternativas viáveis a serem aplicadas, de acordo com as distancias geográficas, influenciando positivamente na redução do custo relacionado ao frete das matérias primas e;

Depois de implantadas as alternativas sugeridas, avaliar os resultados.

REFERÊNCIAS

ABPC, **Associação Brasileira dos Produtores de Cal**. Disponibilizado em: <http://www.abpc.org.br/frame.htm> Acessado em setembro de 2020

ANDRADE, C,; MYNRINE, V.; SILVA, D.A.; MAYER, S.L.S; SIMETTI, R.; MARCHIORI. F. **Compósito para a construção civil a partir de resíduos industriais** Revista Matéria, v.21, n.2, p. 321 – 329. 2016.

ANM - Agência Nacional de Mineração, Sumário Mineral / Coordenação Geral Marina Marques Dalla Costa, Karina Andrade Medeiros e Thiers Muniz Lima, Brasília: ANM, 2019, 201 p,: Il.; 29 cm, Disponível em: www.anm.gov.br

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, Rio de Janeiro, 2015.

_____, **NBR 5739** - Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**,** Rio de Janeiro, 2007.

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

_____, **NBR 7170** - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria, Rio de Janeiro, 1983.

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

_____**, NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

_____, **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

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

_____, **NBR 12815**: Concreto endurecido — Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear — Método de ensaio.

_____,**NBR 13028:** Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos, 2017.

_____,**NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos para a Construção Civil – ABRECON,Disponivel em: < https://abrecon.org.br/>

AZBE, V. Z. Fundamental Mechanics of Calcination and Hydration of Lime and Methods of Control, 1940.

BAZUCO, R. S. **Utilização de Agregados Reciclados de Concreto para Produção de Novos Concretos**, Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999, 112p.

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

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

BHATTY, J. I.; GAJDA. J. Alternative materials, **World Cement**. v 35, n 12, p 41-48, Dec, 2004.

BRASIL, Guilherme Mungo**, Desenvolvimento: includente, sustentável e sustentado**, Revista Eletrônica Direito e Política, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciência Jurídica da UNIVALI, Itajaí, v,13, n,2, 2º quadrimestre de 2018, Disponível em: www.univali.br/direitoepolitica - ISSN 1980-7791 P, https://www.pucsp.br/catedraignacysachs/contato.html. Acesso em 09 Julho 2020.

BRASIL. Lei Federal n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n°9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm > Acesso em: em 16 de Julho de 2018.

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

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

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

BOOK SAMARCO, **Um Ano do Rompimento de Fundão,** Acesso em jun, 2018, Disponível em: https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2017/01/Book-Samarco_final_baixa,pdf

BOZA, M.M.C.; CALGARO, C.; LUCCA, M. F., **Sustentabilidade, desenvolvimento sustentável e ecodesenvolvimento: Um projeto para uma justiça política-social?**, In: Âmbito Jurídico, Rio Grande, XIV, n, 87, abr 2011. Disponível em: < http://www.ambitojuridico.com.br/site/index.php?artigo_id=9166&n_link=revista_artigos_leitura>. A. Acesso em: Acesso em jun 2019.

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.

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

CALLISTER, W. D.; **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**, 2ª edição, Editora LTC, 2006.

CARMO, F. F et al. Falhas na barragem de rejeitos do Fundão: a tragédia ambiental do maior desastre tecnológico da mineração brasileira no contexto global, Revista Perspectivas em Ecologia e Conservação, Volume 15, Edição 3. Páginas 145-151, setembro de 2017.

CASTRO, P. G. D. de Jesus, **Reciclagem de Resíduos com agregado para concreto**, 2006, 57f, Projeto Final (Graduação em Engenharia Civil) UEG, Anápolis – GO, 2006.

CAVALLET, L. E.; CARVALHO, S. G. de e FORTES NETO, P. **Metais pesados nos resíduos e na área de descarga de água dos resíduos sólidos urbanos** . Rev. Ambient. Água [online]. 2013, vol.8, n.3, pp.229-238. ISSN 1980-993X. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1155.

CHEN, Yongliang et al. **Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings**. Construction and Building Materials, v. 38, p. 1083-1088, 2013.

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

CHRISTOFORI, J. B.; OLIVEIRA, P. P.; SILVA, L, O, E,; Revista UniVap,

Sustentabilidade na destinação de resíduos da Construção Civil, 01 March 2017, Vol.22.

CLYNE, W,, HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**. 3rd edition, Cambridge University Press, 2019.

COCKBAIN, A. G., et al, **Compósite materials.Depositante:** Alan Gray Cockbain et al.EUA n.688.556. Depósito: 21 mai,1976,Concessão; 25 out, 1977. Disponível em: https://patentimages,storage,googleapis,com/f7/0a/70/8f8904d6bd7a6f/US4055451,pdout, Acesso em out 2020.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 1988.

CONGRESSO NACIONAL - Lei Federal n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n°9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 agosto de 2010. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: outubro de 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA, Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002, **Dispõe diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**, Publicada no DOU no 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, páginas 95-96, Disponível em http://www.mma.gov.br/estruturas/, acesso em 2018.

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

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

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

EDRAKI M.; BAUMGARTL T.; MANLAPIG E.; BRADSHAW D.; FRANKS D. M.; MORAN C. J.; **Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches**, J. Cleaner Prod. 84 (2014) 411–420, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014,04,079.

ENRIQUEZ, M. A. Mineração: maldição ou dádiva: os dilemas do desenvolvimento sustentável a partir de uma base mineira. Signus, 2008.

ETXEBERRIA M.; VÁZQUEZ E.; MARÍ A.; BARRA M. Influence of amount of ecycled coarse aggregates and production process on propefrties of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete Research, v.37, p. 735-742, 2007.

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.

FILHO, Joaquim Nery de Sant'ana, Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados, Orientador: Sidney Nicodemos da Silva, Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2013. 130 fl. Disponível em: http://www.posmat.cefetmg,br/wp-content/uploads/sites/120/2017/08/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Joaquim_Nery_Filho,pdf. Acesso em: Julho de 2018.

FONTES, WANNA C. et al. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams, Construction and Building Materials, v. 112, p, 988-995, 2016.

FONTES, WANNA C. et al. Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to "brown porcelain". Construction and Buildig Materials, v. 206, p. 111-121, 2019.

FUSCO, J. P. A., SARCOMANO, J.B. **Operações e gestão estratégica da produção.** São Paulo, Editora Arte e Ciência. 2007.

GALLO, Z.; TEIXEIRA, D. **Princípios de Gestão de Recursos Hídricos: descentralização e participação comunitária**. In: FERRANTE, V. L.; LORENZO, H. C.; RIBEIRO, M. L. (Org.) Alternativas de Sustentabilidade e Desenvolvimento Regional. Rio de Janeiro: E-papers, 2007.

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

GALVÃO J, L, B,, et al, 2018. **Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints.** J. Clean Prod., 412-422. doi,org/10,1016/j,jclepro,2018,07,313

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

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

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**, 2ª, Ed, – São Paulo: Pini, 2002.

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

GULARTE, L. C. P. et al. Estudo de viabilidade econômica da implantação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil no município de Pato Branco (PR), utilizando a metodologia multi-índice ampliada. Revista Eng, Sanit, Ambient, vol. 22 no.5 Rio de Janeiro, Set./Out. 2017.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis: Laudo Técnico Preliminar - Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Novembro de 2015. Disponível em <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_Ibama,pdf> Acesso em agosto, 2020.

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

KIZINIEVIC, O; KIZINIEVIC, V.; BORIS, R.; GIRSKAS, G.; MALAISKIENE, J. Eco-efficient recycling of drinking water treatment sludge and glass waste: development of ceramic bricks. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. v.20, p.1228-1238, 2018.

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.

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

LOPES, L.M.N.; **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais,** Revista Sinapse Multipla, Minas Gerais, v,5, n, 1, p, 183-200 jul,2016.

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

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

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

MANZINI, E. Design para a inivação social e sustentabilidade: Comunidades criativas, organizações colaborativase novas redes projetuais, E-papers, vol I, 103 p, Rio de Janeiro, 2008.

MAZZOLA B. G., **Da gestão dos stakeholders à licença social para operar: do caso do desastre de Marian**a, Orientador: Moacyr de Miranda Oliveira Jr, Tese (doutorado) – Faculdade de Economia Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, 2018, 242 p,Disponível em: <https://www,teses,usp,br/teses/disponiveis/12/12139/tde-13072018 152431/publico/CorrigidaBruno,pdf>, acesso em junho de 2020.

MILANEZ, B., LOSEKANN, C., **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes,impactos e ações sobre a destruição**, Rio de Janeiro, Folio Digital – Letra e Imagem, 2016, Disponível em: https://books,google,com,br/books?hl=pt-BR&lr=&id=rFrJDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT5&dq=tipo+e+teor+de+dos+metais+pesados+da+barragem+de+Fund%C3%A3o++lodo+de+Mariana+MG&ots=vOlsDJ_PwL&sig=hDw5S4EEnMcPbnwpkHIsS0mT4XQ#v=onepage&q&f=false> Acesso em: 17 mar, 2018

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. BRASIL., http://www.mma.gov.br. 2007, Disponível em: https://www,mma,gov,br/informma/item/12421-noticia-acom-2014-11-585,html

MORGENSTERN, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., & Watts, B. D. (2016) **Fundão Tailings Dam Review Panel.** Retrieved December 13, 2016, from http://fundaoinvestigation,com/wpcontent/uploads/general/PR/en/FinalReport,pdf

MURAKAMI, S.; IZUMI, H.; YASHIRO, T.; ANDO, S.; HASEGAWA, T**. Sustainable building and policy design Tokyo**, Institute of International Harmonization for Building and Housing, 16 p, 2002.

MYMRIN V., **Theoretical bases of clay soils strengthening by dumped ground cooled ferrous slags for road base construction**, D.Sc. thesis, Moscow State University, Moscow (MGU), 1987.
MYMRIN, V. A. CORRÊA S, M**, Novos materiais de construção de resíduos de produção e demolição de concreto e resíduos de produção de cal,** Materiais de Construção e Construção, v, 21, Março de 2007, Páginas 578-582

MYMRIN, V.; ALEKSEEV, K. P.; FORTINI, O. M.; CATAI, R. E.; NAGALLI, A.; RISSARDI, J. L.; MOLINETTI, A.; PEDROSO, D. E.; IZZO, R. L. S. **Water cleaning sludge as principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics**. Journal of Cleaner Production, v.145, p.367-373. 2017.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**, 1ª edição digital, São Paulo, Editora Edgard Bluche, 2018, 416 p.

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

NAGATA, N.; BUENO, M. I. M. S.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Métodos Matemáticos para Correção de Interferências Espectrais e Efeitos Interelementos na Análise Quantitativa por Fluorescência de Raios-X.Química Nova, v. 24, n. 4, p. 531-539, 2001.

OLIVIER J.; MAENHOUT J. G.; PETERS J. **Trends in global CO_2 emissions,** PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012.

PEDROZO. D. E. ***Composição à base de resíduo de concreto, lodo de anodização de alumínio e resíduos de produção de cal,*** *Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós – graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2016, 197 f.*

PEREIRA, L. S. e FERREIRA, G. E. A **indúsria da Cal no Brasil**. XVII Jornada de Iniciação Científica – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM, julho de 2009.

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

RAMACHANDRAN, V. S. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, Techniques, and Applications**. Edited by V. S. Ramachandran and James J. Beaudoin. Norwich, New York, U.S.A, 2001 . 963 p.

ISBN 0-8155-1437-9. disponível em: < http://sci-lib.org/books_1/R/ramachandran.pdf> . Acesso em: 26/05/2019.

SAMARCO. **Entenda o rompimento,** Disponível em: <https://www.samarco.com/rompimento-de-fundao>. Acesso em: março de 2018.

SANTOS, A. L.; Diagnóstico ambiental da gestão e destinação dos resíduos da construção e demolição (RDC) Analise das Construtoras Associadas ao Siduscon/RN e empresas coletoras no município de Parnamirim – RN / - Natal, RN, 2009,

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.

SASSINE, V. **Laudo aponta que rio Doce estará sujeito a condições imprevisíveis**, Jornal O Globo, 2015, Disponível em: http://oglobo,globo,com/brasil/laudo-aponta-que-rio-doce-estara-sujeito-danos-imprevisiveis-18378346, Acesso em: 29 de dez, 2015,

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

SEGURA, F. R. et al., **Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst** (Bento Rodrigues, Brazil). Environmental Pollution, v. 218, p, 813-825, 2016.

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

SILVA, M. B. de L. Novos materiais à base de resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos de produção de cal (RPC) para uso na Construção Civil. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

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

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

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

STELLA, J. C. Elaboração e caracterização de compósito para a construção civil a base de material dragado de portop marítimo, entulho e cal residual, 2013, 98 f, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 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, 2011. Proceedings. Building and Housing Research Center, 2001.

TOSIC N.; MARINKOVIC S.; DASIC T.; STANIC M. **Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use.** Journal of Cleaner Production, v. 87, p. 766-776, 2015.

VICTORIA, A. N. Characterisation and performance evaluation of water works sludge as bricks material. **International Journal of Engineering and Applied Sciences**. v.3, n.3, p.69-79, 2013.

WANDERLEY, L. J.; MANSUR, M. S. ; B. MILANEZ; R. G. PINTO. Desastre da Samarco/Vale/BHP no Vale do Rio Doce: aspectos econômicos , políticos e sócio ambientais. Cienc. Cult. vol.68 no.3 São Paulo Julho de 2016.

WALTRICK, CARLOS E. Elaboração e caracterização de compósitos para a construção civil a base de resíduos de argamassa, entulho e cal residual. Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010. 92 p.

WANG C., HARBOTTLE D., LIU Q., XU Z. Current state of fine mineral tailings treatment: Acritical review on theory and practice, Minerals Engineering 58: 113–131. 2014.

WANNA C. F., AZEVEDO C. F., BRIGOLINI G. J, SCHMIDT W., **Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates**Journal of Cleaner Production Volume 257, 1 June 2019, 120530.

YAO G, et al. **Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement** J. Powder Technology, 360, 863-871, https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.002

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, Resources, Conservation and Recycling, v, 52, n, 11, p, 1283-1289, 2008. Yellishetty isto? et al. (2008)

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NÄÄS, I. A. **Sustentabilidade na construção civil.** INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 3, 2011, São Paulo. Anais... São Paulo, 2011. p. 1-10.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. **Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete**. Construction and Building Materials, v. 50, p, 540-548, 2014.