

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído**

**Alex Sovat Cancio**

**LEVANTAMENTO E ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DE  
RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE FERRO NA  
INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL**

**Belo Horizonte,  
2017**

**ALEX SOVAT CANCIO**

**LEVANTAMENTO E ESTUDO DA REUTILIZAÇÃO DE  
RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE FERRO NA  
INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

**Orientador: White José dos Santos**

**Belo Horizonte,  
2017**

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por me guiar sempre.

Dedico ao meu super-herói, Virgílio Jorge Cancio da Silva, que tenho o orgulho de chamar de pai. À minha querida mãe, Nice Sovat Cancio, aos meus irmãos Max e Márcio, pelo eterno apoio e por serem constantes incentivadores nesta caminhada, principalmente ao retornar aos estudos aos 37 anos de idade.

À minha linda e amada filha Ísis T. Cancio, minha motivação diária de vida.

À minha amiga, companheira de todas as horas, noiva e futura esposa Juliana R. C. Coelho, que sempre me incentivou e ajudou nas horas e momentos duros e difíceis da vida, me transmitindo o que há de mais importante como amor, carinho, atenção e presença constante.

Aos meus familiares Adethylde (Vó Tidinha), Kilder (Dindinho), Rejane (Dindinha), Valéria (Lela) e Vinícius (Zú) pelo carinho e ajuda, sempre que solicitados.

À minha sogra Elane, pelo carinho de mãe e pelas correções ortográficas dos trabalhos. Ao meu sogro Josélio, pelo exemplo de ética, justiça e gerenciamento.

Ao amigo Carlo Grimald, pelo exemplo de determinação, humanidade e por me apresentar com leveza o mundo acadêmico.

Aos poucos e bons amigos que tenho Roberto Luiz L. Cardoso, Rogério E. Santana, Marcelo Pacifico C. Araújo, Rodrigo R. C. Coelho e Marcos Saraiva, por me incentivarem ao longo do curso, me ajudarem a ser uma pessoa cada dia melhor e me tranquilizarem, sabendo que posso contar com eles a qualquer hora.

## **AGRADECIMENTOS**

O agradecimento neste trabalho é uma forma de tentar expressar em palavras, mesmo que de uma forma simples, o reconhecimento ou a gratidão que tenho às pessoas que me ajudaram.

Agradeço, primeiramente, ao professor e eterno orientador, Dr. White José dos Santos pelo acolhimento, paciência, dedicação, ensinamentos e colaboração para enriquecimento deste trabalho e, conseqüentemente meu conhecimento técnico.

Aos mestres, como se diz ao pé da letra, dotados de saber e competência, Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior, Dr. João Batista Santos de Assis e Mestre Clémenceau Chiabi Saliba Júnior pela grande contribuição em minha formação profissional.

Agradeço ao Professor Ayrton Viana à pesquisadora Nara Linhares pela troca de informações sobre minério e também pelo fornecimento de amostras para os ensaios realizados.

Às alunas de iniciação científica, Bruna Almada e Fernanda Galvão, pela forte ajuda nos ensaios e pesquisas realizadas, tendo sempre o foco no aprendizado contínuo para o crescimento técnico. Isso é motivo de orgulho em poder ver que existem pessoas boas de coração e de serviço neste caos que estamos vivendo em nosso querido país.

Agradeço também aos técnicos responsáveis pelos laboratórios de Concreto e Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, sendo, respectivamente Ricardo e Alberto.

Aos colegas de sala, que contribuíram na troca de conhecimentos e experiências ao longo de todo o curso.

*“A educação é a arma mais poderosa que  
você pode usar para mudar o mundo.”  
(Nelson Mandela)*

## RESUMO

O processo de extração de minério de ferro e o condicionamento de resíduo em barragens de contenção na forma de lama, constituídos de mistura de solo e água, geram uma degradação, poluição visual, degradação da terra, poluição do ar na época de seca e poluição da água em períodos chuvosos, impactando muito o meio ambiente. Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar o reaproveitamento de resíduo de mineradora de minério de ferro para utilização na construção civil brasileira, através de substituição do aglomerante hidráulico. Levantou-se pesquisas nacionais e internacionais sobre o aproveitamento de resíduos de minério de ferro, reintroduzindo-o no ciclo de produção. Verificou-se na bibliografia que o resíduo de mineração está sendo analisado como substituição ou adição a agregado miúdo em concreto e/ou em compostos cimentícios, em produtos cerâmicos, pavimento intertravado, compósitos à base de cimento, como infraestrutura rodoviária, dentre outros. Realizou-se, também, um estudo prático com três amostras diferentes de resíduo de minério de ferro (RMF), a qual foram ensaiadas para determinação das características físicas, químicas e mineralógicas (granulometria laser, massa específica, fluorescência de raio-x e difração de raio-x), e confeccionou-se pasta de cimento, sendo realizada a caracterização física e mecânica (consistência normal, índice de consistência e resistência a compressão). Verificou-se, na bibliografia, que o resíduo de mineração está sendo analisado como adição e/ou substituição de aglomerante hidráulico ou agregado miúdo em concreto, produtos cerâmicos, pavimento intertravado, compósitos à base de cimento, como infraestrutura rodoviária, dentre outros. Percebeu-se nos resíduos de minério de ferro (RMF) analisados, variação quanto à mineralogia e composição química, sobretudo em relação à mudança do local de extração. A densidade se apresentou levemente superior ao cimento. A consistência da pasta confeccionada com a substituição de 50% do cimento pelo RMF aumentou bastante, chegando aproximadamente a 40% comparada com a de referência, utilizando fator a/s de 31%. A resistência à compressão se manteve constante após substituir, mostrando assim que não houve uma variação significativa e nem comprometimento das propriedades mecânicas. É recomendável a utilização do RMF para redução do consumo de recursos naturais não renováveis para a indústria da construção civil, causando menos destruição da paisagem, menor impacto ambiental gerado por barragens de concentração de resíduo, além de economizar áreas de barragens, custos com o monitoramento, licenciamento de novas áreas para depósito do mesmo.

**Palavras-chave:** Resíduo de minério de ferro (RMF); Pastas com substituição do cimento; Aproveitamento de resíduos de mineração de ferro.

## ABSTRACT

The process of iron ore extraction and the conditioning of mud tailings, consisting of a mixture of soil and water, in containment dams impact the environment by generating visual pollution, land degradation, air pollution during the dry season and water pollution during the rainy season. Therefore, this work aims to study the reuse of iron ore tailings (IOT) in the Brazilian civil construction, by replacing the hydraulic binder by the IOT. National and international researches were gathered about the reintroduction of IOT's in the production cycle. According to the bibliography, the IOT is being analyzed as a substitution or addition to fine aggregate in concrete and/or in cement compounds, in ceramic products, in interlocking pavement, and also in road infrastructure, among others uses. A practical study was carried out with three different samples of IOT, whose physical, chemical and mineralogical characteristics were analyzed (laser particle size analysis, specific mass, X-ray fluorescence and X-ray diffraction). Cement pastes were also made with IOT and they were analyzed according to its physical and mechanical properties (standard consistency of cement, flow test and compressive strength). It was possible to notice that the IOT's samples analyzed showed variation in the mineralogical and chemical composition, especially due to the change of the extraction site. The density was slightly higher than the cement. The cement paste made with the replacement of 50% IOT had a considerably increased consistency, reaching approximately 40% of the consistency of the reference using the 0,31 water/solids factor. The compressive strength remained constant, thus showing that there was no significant variation and no loss of the mechanical properties. The IOT use is recommended to reduce the consumption of nonrenewable natural resources for the construction industry, causing less destruction of the landscape, less environmental impact generated by tailing dams, reducing areas for its conditioning and also reducing costs with the monitoring and the licensing for this purpose.

**Keywords:** Iron ore tailings (IOT); Pastes with cement replacement; Use of iron mining waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Moinho de barras.....	40
Figura 02 - Realização do ensaio de densidade com a utilização de balão volumétrico e os frascos de vidro .....	41
Figura 03 - Granulômetro a Laser Sympatec Helos Vectra – Equipamento aberto.....	42
Figura 04 - Aparelho de Vicat.....	46
Figura 05 - Teste de Flow Table.....	47
Figura 06 - Fluxograma para identificação CP.....	47
Figura 07 - Identificação CP.....	47
Figura 08 - Equipamento de Compressão.....	48
Figura 09 - Difração de Raio-X das Amostras RMF.....	51



## LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Compostos Químicos do Clínquer.....	18
Tabela 02 – Classificação Comercial do cimento Portland no Brasil.....	19
Tabela 03 – Equivalência de Cimento Americano e Brasileiro.....	19
Tabela 04 – Influência do Tipo de Cimento nas Propriedades das Pastas, Argamassas e Concretos.....	20
Tabela 05 - Classificação da Forma da Partícula do Agregado.....	22
Tabela 06 - Identificação e Classificação de Resíduos.....	24
Tabela 07 - Quadro Comparativo estudos com Argamassa.....	31
Tabela 08 - Quadro Comparativo estudos com Cerâmica.....	32
Tabela 09- Quadro Comparativo estudos com Material para Pavimentação.....	33
Tabela 10- Quadro Comparativo Estudos com Concretos e Compostos com Cimento.....	34
Tabela 11 - Ensaio experimentais.....	36
Tabela 12 – Nomenclatura Amostra.....	37
Tabela 13- Padrões Ministério da Saúde.....	38
Tabela 14 - Qualidade da Água .....	38
Tabela 15 - Moldagem e Identificação dos Corpos de Provas.....	47
Tabela 16 – Limites de impureza na Água de Amassamento.....	49
Tabela 17 – Difração Raio-X das Amostras de RMF.....	50
Tabela 18 – Análise Mineralógica.....	52
Tabela 19 – Resultados de Caracterização Física.....	55
Tabela 20 – Espalhamento Médio de Consistência .....	56

## LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 01- Densidade.....	54
Gráfico 02- Granulometria. ....	55
Gráfico 03- Espalhamento Médio de Flow table.....	57
Gráfico 04- Compressão .....	58

## LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS E UNIDADES

a/s – fator água / material seco

Al - Alumínio

$Al_2O_3$  – Alumina ou Óxido de Alumínio

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta Resistência Inicial

ASTM – American Society for Testing and Materials

Ca - Cálcio

CaO – cal Virgem ou Óxido de Cálcio

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

Cm - Centímetro

Copasa – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CP – Cimento Portland ou Corpo de Prova (conforme contexto)

CP V ARI – Cimento Portland com alta resistência inicial

BH – Belo Horizonte

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DEMC – Departamento de Engenharia de Materiais

DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais

DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas

DRX – Difração de Raio X

Fe – Ferro

FeO – Monóxido de ferro

FeO(OH) – Goetita

FeO(OH)  $nH_2O$  - Limonita

$Fe_2O_3$  – Óxido de Ferro ou Óxido Férrico ou Hematita

$Fe_3O_4$  - Magnetita

g – Grama (unidade de medida massa)

hm<sup>2</sup> - Hectare (unidade de medida de área)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

RMF – *Iron Ore Tailing* ou Resíduo de Minério de Ferro

Kg - Quilograma (unidade de medida massa)

Km – Quilômetro (unidade de medida de comprimento)  
Km<sup>2</sup> - Quilômetro ao Quadrado (unidade de medida de área)  
K<sub>2</sub>O – Óxido de Potássio  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
MG – Minas Gerais  
MgO – Periclásio ou Óxido de Magnésio  
m – Metro (unidade de medida de comprimento)  
mm - Milímetro (unidade de medida de comprimento)  
MME- Ministério de Minas e Energia  
MPA – Mega Pascal (unidade de medida de pressão e tensão – Sistema internacional)  
N – Newton (unidade de medida de força)  
Na<sub>2</sub>O – Óxido de Sódio  
NBR – Norma Brasileira Registrada  
NM – Norma Mercosul  
P – Fósforo  
PIB – Produto Interno Bruto  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - Pentóxido de Difósforo  
PR – Pasta de Referência  
RMF – Resíduo de Minério de Ferro  
Si - Silício  
SiO<sub>2</sub> – Sílica, Óxido de Silício ou Quartzo  
t - Tonelada (unidade de medida de massa)  
TiO<sub>2</sub> – Dióxido de Titânio  
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICAVA .....	14
1.2 OBJETIVOS .....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 AGLOMERANTES .....	17
2.2 ADIÇÕES .....	20
2.3 AGREGADOS .....	21
2.4 RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE FERRO .....	22
2.5 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE FERRO .....	23
2.6 REUTILIZAÇÃO DE RMF NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	24
2.6.1 Reutilização em argamassa.....	25
2.6.2 Reutilização em materiais cerâmicos.....	26
2.6.3 Material Rodoviário.....	27
2.6.4 Substituição ou adição em concreto e ou compostos à base de cimento	28
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
3.1 MATERIAIS.....	36
3.1.1 Cimento .....	36
3.1.2 Resíduo de Minério de Ferro .....	37
3.1.3 Água.....	37
3.2 MÉTODOS.....	38
3.2.1 Coleta .....	38
3.2.2 Moinho de Barras .....	39
3.2.3 Caracterização do RMF .....	40
3.2.3.1 Densidade .....	40
3.2.3.2 Granulometria à laser .....	41
3.2.4 Fluorescência de raios-X .....	42
3.2.5 Difração de raios-X.....	43
3.2.6 Fabricação da pasta de cimento Portland.....	43
3.2.7 Consistência Normal.....	44
3.2.8 Índice de consistência .....	45
3.2.9 Moldagem e cura.....	46
3.2.10 Resistência à compressão axial .....	48
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1 ANÁLISE DA ÁGUA.....	49
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	50
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO RMF E CPV .....	53
4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA PASTA .....	56
4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	57
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>62</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais e justificava

O Brasil é detentor de uma extensão territorial de 8.515.759,09 km<sup>2</sup>, com uma infinita riqueza de recursos naturais renováveis e não renováveis (IBGE, 2016). O processo de extração e mineração desses recursos começou desde a descoberta do Brasil colônia, pois na época o foco principal era a extração de madeira, pedras e metais preciosos, mas especificamente o ouro. Hoje esta indústria tem um desempenho importante na geração de riqueza do país, contribuindo fortemente para o seu Produto Interno Bruto (PIB).

Na publicação do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015), baseada no Relatório Anual de Lavra (RAL), em 2014 o Brasil possuía uma reserva de 11,9% de minério de ferro existente no mundo, sendo a mesma estimada mundialmente em 10.000.000 toneladas de ferro. Com isso o Brasil se evidencia no cenário global, tanto em reserva quanto em produção mineral.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2017), os dois primeiros bens minerais que bateram recorde na extração foram os agregados para construção civil com 673.000.000 de milhões de toneladas, seguida do minério de ferro com 400.000.000 milhões de toneladas. O minério de ferro é o principal minério destinado à exportação, junto à Rússia, Estados Unidos, Canadá, China e Austrália. A indústria extrativa representa 4,3% de todo Produto Interno Bruto (PIB) e 16,9% do PIB Industrial brasileiro (IBGE *apud* IBRAM, 2017).

Em todo processo produtivo, seja industrial ou extração, são gerados resíduos. O resíduo é uma consequência inevitável do beneficiamento do minério de ferro, do qual já foi retirado o produto economicamente relevante. O processo de extração de minério de ferro e o condicionamento de resíduo em barragens de contenção na forma de lama, constituídos de mistura de solo e água, geram um impacto negativo no meio ambiente. Esses impactos são detectados através de uma degradação, poluição visual, degradação da terra, poluição do ar na época de seca e poluição da água em períodos chuvosos, impactando muito no meio ambiente.

Os resíduos da mineração são gerados longe das áreas urbanas, e, por isso, a maioria das pessoas não os vê e, portanto, não se preocupa com eles, ao menos quando há um rompimento de uma barragem. O condicionamento inadequado de resíduo em barragens pode gerar acidentes de grande proporção, como o ocorrido no estado de Minas Gerais com a barragem da mineradora Rio Verde em 2001, onde rompeu uma barragem em Macacos, distrito de Nova Lima e cinco operários morreram no acidente, que atingiu 43 hectares e assoreou 6,4 km do leito do córrego Taquaras (O Tempo, 2014). Outro acidente ocorreu em 5 de novembro de 2015, causando o derramamento de uma enorme quantidade de lama, que inundou e destruiu várias casas no distrito de Bento Rodrigues, em Mariana (G1, 2015). Esse foi considerado o maior impacto ambiental da história brasileira e o maior do mundo envolvendo barragens de resíduos.

Buscando solucionar este desafio, pesquisadores vêm estudando formas de aproveitar este resíduo na construção civil com finalidades distintas, como na confecção de argamassas (CARRASCO *et al.*, 2016; FONTES *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2016) em materiais cerâmicos (SOUZA, 2008; BARBOSA, 2017; SILVA, 2014) e infraestrutura rodoviária (SILVA, 2010; BASTOS *et al.*, 2016; SANT'ANA FILHO, 2017).

Este trabalho é composto por um estudo teórico de revisão bibliográfica e uma parte experimental para caracterização física e química dos RMF, bem como avaliar as características mecânicas deste resíduo em substituição ao cimento. Sua metodologia será baseada em análise de publicações científicas, dissertações e testes práticos. No trabalho prático têm-se, por objetivo, verificar a viabilidade física e mecânica da mistura desse resíduo de três mineradoras diferentes ao cimento, procurando assim agregar valor aos resíduos de mineração de minério de ferro com geração de produtos mais ecoeficientes para construção civil.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral consiste no levantamento dos estudos de reaproveitamento de resíduo de mineração de ferro na construção civil e caracterização de resíduos de três mineradoras de ferro diferentes em Minas Gerais com foco a substituição do cimento Portland.

Para alcançar o objetivo geral, têm-se os objetivos específicos:

- Realizar levantamento de pesquisa técnico-científica acerca da reutilização de RMF na construção civil;
- Caracterizar física e quimicamente três amostras de RMF com viés de avaliar sua possível heterogeneidade;
- Caracterizar física e mecanicamente pasta de cimento realizada com três amostras de RMF em substituição ao aglomerante hidráulico.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aglomerantes

Os aglomerantes são materiais que tem a função de aglutinar outras partículas. Geralmente os aglomerantes são materiais pulverulentos que se hidratam em presença de água, formando assim uma pasta com capacidade de envolver e aglutinar os agregados graúdos ou miúdos, formando assim, ao endurecer, corpos sólidos e coesos (RIBEIRO, PINTO, STARLING, 2011, p33).

De acordo com Hagemann (2011), os aglomerantes podem ser classificados segundo seu mecanismo de endurecimento:

1. Aglomerantes inertes: não reagem e seu endurecimento se dá pela secagem da matéria. Tem-se como exemplo a argila.
2. Aglomerantes ativos: seu endurecimento acontece por reação química, tem-se como exemplo a cal e o cimento. São subdivididos em dois grupos:
  - Aéreos: endurecem por reação química na presença do CO<sub>2</sub> (gás carbônico) do ar e conservam sua propriedade. Tem-se como exemplo o gesso e a cal.
  - Hidráulicos: Endurecem pela ação exclusiva da água de amassamento e conservam sua propriedade na presença de ar e água. Tem-se como exemplo o cimento Portland.

Os aglomerantes utilizados na construção civil podem ser hidráulicos ou aéreos. Sua dosagem varia de acordo com a utilização.

Cimento é um aglomerante pulverulento que se hidrata na presença de água, mais usado na construção civil, conhecido mundialmente como Cimento Portland. O Cimento Portland tem esse nome por apresentar cor, propriedade de durabilidade e solidez semelhantes às rochas existentes na ilha britânica de Portland (RIBEIRO, PINTO, STARLING, 2011, p.33).

O cimento é fabricado pela moagem do clínquer, para a fabricação do clínquer. A matéria prima deve conter em sua composição química os principais óxidos CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que raramente são encontrados em uma única rocha, por isso são misturados dois ou mais tipos de rocha, o Calcário (75% a 80%) e a argila (20 a 25%) são os mais comuns utilizados no cimento (ISAIA, 2011 p.189).

Após a queima, sai do forno em forma de pelotas escuras, é resfriado, moído e recebe a adição de gesso ( $\text{CaSO}_4$  - sulfato de cálcio) para impedir que a hidratação entre o cimento e a água aconteça instantaneamente durante sua utilização (RIBEIRO, PINTO, STARLING, 2011, p.34).

Tabela 01 - Compostos químicos do clínquer

<b>Compostos</b>	<b>Formula Química</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Propriedades específicas decorrentes dos compostos do clínquer</b>
Silicato tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 50 - 65%	$\text{C}_3\text{S}$	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
Silicato dicálcio	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 15 - 25%	$\text{C}_2\text{S}$	Endurecimento lento Baixo calor de hidratação Baixa resistência inicial
Aluminato tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 6 - 10%	$\text{C}_3\text{A}$	Pega muito rápida controlada com adição de gesso Suscetível ao ataque de sulfatos Alto calor de hidratação, alta retração Baixa resistência final
Ferro aluminato tetracálcio	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 3 - 8%	$\text{C}_4\text{AF}$	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência
Cal livre	$\text{CaO}$ 0,5 - 1,5%	C	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência

Fonte: Ribeiro, Pinto, Starling, 2011.

O cimento, em sua forma comercial, é dividido em cinco tipos principais no mercado brasileiro e normatizados pela ABNT, onde são chamados:

- Cimento Portland comum CP I.
- Cimento Portland composto CP II (com adição de escoria de alto forno, pozolana e fíler).
- Cimento Portland de alto forno CP III (com adição de escoria de alto-forno, apresentando baixo calor de hidratação).
- Cimento Portland pozolânico CP IV (com adição pozolana, apresenta baixo calor de hidratação).
- Cimento Portland de alta resistência inicial CP V (com maiores produções de silicato tricálcio -  $\text{C}_3\text{S}$ , que lhe confere alta resistência inicial e alto calor de hidratação).

Tabela 02 - Classificação comercial do cimento Portland no Brasil

Tipos de Cimento Portland	Sigla	Composição (% de Massa)				Norma
		Clínquer	Escoria	Pozolana	Materiais carbonáticos	
CP comum	CPI	100	0	0	0	5732
CP com adição	CPI - S	95 - 99		1 - 5		
CP com escória	CPII - E	56 - 94	6 - 34	-	0 - 10	11578
CP com pozolana	CPII - Z	76 - 94	-	6 - 14	0 - 10	
CP com fíler	CPII - F	90 - 94	-	-	6 - 10	
CP de alto-forno	CPIII	25 - 65	35 - 70	-	0 - 5	5735
CP pozolânico	CPIV	50 - 85	-	15 - 50	0 - 5	5736
CP de alta resistência inicial	CPV ARI	95 - 100	0	0	0 - 5	5733

Fonte: Modificada de Ribeiro, Pinto, Starling, 2011.

A especificação de cimento, segundo a EM-197-1, é bem parecida com as especificações da ABNT, já a equivalência com a norma americana é demonstrada na Tabela 03, sendo as equivalências estabelecidas por propriedade e não composição (ISAIA, 2011 P.212).

Tabela 03 – Equivalência de cimentos americanos e brasileiros

Cimento Americano		Cimento Brasileiro Equivalente	
Norma	Tipo	Norma	Tipo
ASTM C150	I	ABNT NBR 5732	CPI ou CPI-S
ASTM C150	II	ABNT NBR 11578	Pipo CPII-F
ASTM C150	III	ABNT NBR 5733	CPV - ARI
ASTM C150	IV	ABNT NBR 131116	BC - Cimento de baixo calor de hidratação
ASTM C150	V	ABNT NBR 5737	RS - Cimento resistente aos sulfatos
ASTM C595	IS	ABNT NBR 5735	Tipo CPIII
ASTM C595	IP	ABNT NBR 5736	Tipo CPIV

OBS: Os tipos brasileiros CPII-E e CPII-Z correspondem aos tipos ASTM C-595, IS e IP, com menores teores de escória e pozolana, respectivamente.

Fonte: Isaia, 2011.

Segundo Isaia (2011), as principais características que o tipo de cimento que influenciam nas propriedades de pastas, argamassas e concretos podem ser verificados na Tabela 04.

Tabela 04 – Influência do tipo de cimento nas propriedades das pastas, argamassa e concretos

Influência	Tipo Cimento					
	Comum e Composto	Alto-Forno	Pozolânico	Alta Resistencia Inicial	Resistencia a Sulfatos	Branco Estrutural
Resistência a compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito menor nos primeiros dias	Padrão	Padrão
Calor Gerado na reação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão

Fonte: Isaia, 2011.

## 2.2 Adições

As adições ao cimento, durante a sua produção, é uma das alternativas de sucesso que tem como finalidade somar ou mesmo substituir a matéria prima e atribuir algumas características peculiares, que podem reduzir certas influências ou aumentar o efeito de outras, quando desejado ou necessário. Além de contribuir para diminuir as emissões específicas de gases de efeito estufa, além de reciclarem rejeitos industriais e também a redução do consumo de energia durante o processo de fabricação (ISAIA, 2011 p.202).

Segundo Fonseca (2010), as adições minerais são classificadas conforme sua ação físico-química em três grupos distintos: Pozolânico, cimentante e fíler.

Material pozolânico, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015) e a ASTM C 618 (2008a), podem ser naturais (argila calcinada ou termicamente ativa) ou artificiais (cinzas volantes, cinza de casca de arroz, sílica ativa, etc.) e é definido como material silicoso ou sílico-aluminoso, que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas quando finamente divididos, à temperatura ambiente e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos com propriedades aglomerantes (ligantes) e cimentantes.

De acordo com a especificação brasileira para cimento Portland pozolânico, os materiais pozolânicos consistem de 15% a 50% de massa do aglomerante e sua fabricação varia de região para região, dependendo da disponibilidade do segmento para a aquisição desta matéria prima (ISAIAS, 2011, P.204)

Material cimentante é aquele que produz material cimentante insuficientes para matérias estruturais, como o C-S-H, sem a necessidade de hidróxido de cálcio presente no cimento Portland. Tem uma auto-hidratação lenta quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, pode ser acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita, exemplo escoria de alto forno (FONSECA, 2010).

O filer é um material sem atividade química, com a finalidade física de empacotamento granulométrico, melhorando a compacidade e trabalhabilidade, fazendo o papel de ponte entre os produtos de hidratação. Exemplo: calcário, pó de quartzo, pó de pedra (FONSECA, 2010).

## **2.3 Agregados**

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015), agregados para Construção Civil são materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia civil, tais como a pedra britada, o cascalho e as areias naturais ou obtidas por moagem de rocha, além das argilas e dos substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias de aciaria, produtos industriais, entre outros.

Os agregados são em sua maioria materiais inertes (não devem provocar reações indesejáveis) ou com atividade química praticamente nula. Cobrem uma extensa gama de tamanhos de partículas (BAUER, 2011, p.63).

Os agregados constituem 70% do volume total dos produtos em que se utilizam. Eles desempenham um importante papel para redução da retração das pastas formadas por cimento e água. E ainda influenciam fortemente na resistência mecânica das argamassas e concretos, influenciando também o custo total (RIBEIRO, PINTO, STARLING, 2011, p.33).

A classificação do agregado é baseada segundo sua origem (naturais e artificiais), as dimensões das partículas (miúdo ou graúdo) e seu peso específico aparente (leve, médio e pesado) (BAUER, 2011, p.63).

Segundo a NBR 7211(ABNT, 2009), agregado miúdo é o material passante pela peneira com abertura de malha de 4,75mm, ficando retido na peneira com abertura de malha 150mm. Já o agregado graúdo é aquele que passa pela peneira com abertura de malha 75mm e ficam retidos na peneira de malha 4,75mm.

As formas e texturas das partículas de agregado influenciam nas propriedades das argamassas e concretos no estado fresco do que no endurecido. A forma (arredondada, irregular, lamelar, anguloso, alongado, discoide) é avaliada visualmente e a textura é verificada conforme norma ABNT 7809 (2008) (Costa, 2016).

Tabela 05 - Classificação da Forma de partículas de agregados

<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>EXEMPLOS</b>
Arredondado	Completamente erodido pela água ou or atrito	Seixo de rio ou de praia, areia de rio ou deserto
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente desgastado por atrito, com cantos arredondados	Outros seixos Opalas
Lamelar	Espessura pequena em relação as outras dimensões	Rochas laminadas
Anguloso	Possui arestas bem diferentes, formadas pelas interação de faces relativamente planas	Pedras britadas em geral
Alongado	Geralmente angulosos, em que o comprimento é bem maior que as demais dimensões	
Discoide	Comprimento muito maior do que a largura e a largura muito maior que a espessura	

Fonte: BS 812, 1975; NEVILLE, 1997; COSTA, 2016.

## **2.4 Resíduo de mineração de ferro**

Segundo o Ministério de Minas e Energia- MME (2010), a mineração do ferro representa a mais importante atividade mineral do país. A atividade desenvolve as comunidades do entorno das minas e favorece o desenvolvimento do comércio ao longo das vias de escoamento do minério, como ocorreu no “Quadrilátero Ferrífero”, em Minas Gerais, constituindo o Vale do Aço.

Segundo a mineradora Vale (2016), o minério de ferro é encontrado na natureza na forma de rochas, misturado a outros elementos. Ele é então retirado cheio de impurezas e por isso precisa passar por procedimentos de limpeza e purificação para depois ser comercializado nas indústrias.

Segundo o Ministério de Minas e Energia- MME (2010), a mineração de ferro trata-se da extração a céu aberto das rochas, transporte das mesmas por caminhões para beneficiamento a seco ou úmido, com britagem, moagem, peneiramento, filtragem e classificação e homogeneização, e em alguns casos concentração. Os efluentes são normalmente depositados em pilhas ou barragens.

Nestas barragens encontra-se em grande quantidade os resíduos da mineração de ferro que possuem pouco ou nenhum valor econômico, pois possui baixo teor de ferro, o que exigiria processos muito sofisticados para viabilizar a sua exploração.

## **2.5 Classificação de resíduo de mineração de ferro**

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), a classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados. Esta norma identifica e classifica os resíduos sólidos, quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e saúde pública.

A lei 12.305 (2010) institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que classifica os resíduos quanto à origem e periculosidade (Tabela 06).

Tabela 06 - Identificação e Classificação de Resíduos

Classificação	Categorias	
Origem	Resíduos domiciliares, limpeza urbana, sólidos urbanos, Estabelecimento Comerciais, serviços públicos de saneamento básico, agrícolas, saúde, construção civil, Agrossilvopastoris, serviço de transportes,	
Nível de toxicidade	Classe I - Perigos	
	Classe II - Não Perigosos	II A – Não Inertes
		II B - Inertes
	Não inertes, inertes, radioativos, perigosos	
Composição química	Orgânicos, inorgânicos, metálicos, não metálicos	
Degradabilidade	Biodegradáveis, não biodegradáveis	
Destinação final	Recicláveis, não recicláveis, compostáveis, reutilizados como matéria prima	

Fonte: NBR 10.004 e Lei 12.305

Segundo a mineradora Vale (2016), o material presente em suas barragens é inerte, ou seja, não contém componentes tóxicos. Ele é composto, em sua maior parte, por sílica (areia) e não apresenta nenhum elemento químico danoso à saúde. Sant'ana Filho *et al.* (2017) reforça, em sua pesquisa de viabilidade técnica para fabricação de pavimento intertravado, a classificação do RMF como Classe II B (não perigoso e inerte). Zuccheratte *et al.* (2017), em sua pesquisa também caracteriza o RMF com inerte e não perigoso.

## 2.6 Reutilização de RMF na construção civil

O resíduo de minério de ferro vem sendo alvo de estudos para aproveitamento com finalidades distintas. Destacam-se os estudos de Carrasco *et al.* (2016), Fontes *et al.* (2016) e Ferreira *et al.* (2016) acerca da caracterização de argamassas com resíduo de minério de ferro; assim como os estudos de Souza (2008), Barbosa (2017) e Silva (2014) sobre o aproveitamento em materiais cerâmicos para construção civil; e de Silva (2010), Bastos *et al.* (2016) e Sant'ana Filho *et al.* (2017) sobre infraestrutura e pavimento rodoviária; e ainda as pesquisas de Bezzera (2017), Franco *et al.* (2014), Zuccheratte *et al.* (2017) e Costa *et al.* (2016) sobre a aplicação de RMF em concreto.

Desta forma, será apresentado a seguir uma revisão bibliográfica das pesquisas sobre RMF, cujos autores foram citados acima, contendo os ensaios utilizados, seus resultados e respectivas conclusões.



### 2.6.1 Reutilização em argamassa

As argamassas servem para unir ou revestir pedras, tijolos ou blocos. Segundo Santos *et al.* (2017), para se ter uma boa argamassa é necessária uma dosagem em que se estabeleça proporções dos materiais constituintes, levando-se em conta características dos materiais, propriedades e conhecimentos técnicos.

Carrasco *et al.* (2016), publicou seu estudo de caracterização de argamassa com resíduo de minério de ferro e determinação de módulo de elasticidade estático e dinâmico. Este trabalho utiliza o resíduo de minério de ferro da mineradora Samarco, próximo à Belo Horizonte/MG, e adota como materiais e métodos à sua pesquisa o cimento CPV-ARI e RMF como material fino e granular. Observam um aumento considerável da coesão no estado fresco sem aumentar a fluidez. No estado endurecido, tem-se melhoras no desempenho mecânico (tração e compressão) com a inserção de material fino. Ele atribui isso ao maior enchimento de vazios existente e uma possível reação pozolânica entre hidróxidos de cálcio no cimento e a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) do agregado fino. Carrasco *et al.* (2016), conclui que é possível obter argamassas de alto desempenho para serem usadas como material estrutural, mas devem ser feitos mais estudos para verificar sua durabilidade e aderência.

Fontes *et al.* (2016), em seu estudo com argamassa e revestimento produzidos com substituição da cal por RMF na proporção de 10%, 20%, 50% e 100%. Realizou-se ensaios de moagem, análise química (FRX e DRX), granulometria, densidade, ensaios de resistência a compressão e tração na flexão. Concluiu-se que o uso de RMF, em proporção inferior a 20% em substituição de cal, são mais viáveis para esta aplicação, que argamassas produzidas com RMF consumiram mais água para manutenção da consistência e plasticidade adequada. Apresentaram ainda um desempenho mecânico maior aos 28 dias. Fontes *et al.* (2016), sugere que as propriedades dessas argamassas são mais apropriadas para colocação de tijolos.

Ferreira *et al.* (2016), em sua publicação de estudos de aproveitamento de resíduos de minério de ferro, realizou quatro traços diferentes, contendo resíduo como agregado. Determinou a massa unitária do resíduo, tempo de pega, viscosidade e densidade da pasta (estado fresco e endurecido) e resistência à compressão. Concluiu que a argamassa produzida com maior quantidade de resíduo

(1:2,5) e menor fator água/cimento (0,95), foi a que apresentou menor tempo de pega e maior resistência à compressão.

## **2.6.2 Reutilização em materiais cerâmicos**

Souza, Vieira e Monteiro (2008), avaliaram o efeito da incorporação do resíduo de minério de ferro na microestrutura de uma cerâmica argilosa. Em sua metodologia foram realizadas amostras com porcentagens de RMF até 30% em peso, usadas na confecção de corpos-de-prova por prensagem e utilizando queima nas temperaturas de 700, 900 e 1100°C. Avaliaram MEV, DRX e porosimetria com foco na microestrutura dos corpos de provas cerâmicos. Concluíram que a adição de RMF à massa de argila muda à estrutura da cerâmica e que a porcentagem ideal para a adição não afetar a qualidade do produto final é 10% em peso.

Barbosa (2017), em sua monografia, avalia a utilização de RMF como matéria prima na produção de cerâmica. Para seus ensaios preparou corpos de provas com substituição de 10% da matéria prima de solo por RMF, prensado com 21MPa e queimados com 1000C° por 180mim. Avaliou a retração linear de secagem, retração linear de queima, perda de massa por secagem, perda de massa por queima, massa específica de queima, absorção de água e resistência à compressão simples. Conclui que os valores 27% e 42,3MPa de absorção de água e resistência à compressão respectivamente, mostra que a utilização de 10% de RMF como matéria prima está dentro dos parâmetros para confecção de alguns produtos cerâmicos.

No estudo de recuperação e reciclagem de resíduos de minério de ferro para produção de cerâmica Silva *et al.* (2014) avaliou o ponto tecnológico para utilização deste elemento como aditivo na indústria cerâmica. Utilizou três tipos de resíduo de minério de ferro: o de retalhos de flutuação (FT), retalhos de separação magnética fina (FM) e retalhos de separação magnética grosseira (CM). Sua metodologia consistiu em caracterizar o RFM por tamanho, realizar ensaio de densidade real, realizar a composição química e mineralógica e adicionar a argila de 0% a 55 de resíduo. A conclusão indica que a adição a partir da concentração de minério de até 5% de RMF para a produção de cerâmica vermelha é altamente viável tecnicamente,

pois aumenta a resistência a flexão, diminui a densidade, aumenta a porosidade diminui a absorção de água.

### **2.6.3 Material Rodoviário**

Silva (2010) analisou laboratorialmente aspectos físicos e de comportamento mecânico de agregados convencionais e alternativos para uso em revestimento asfáltico. Realizou-se a caracterização mecânica das misturas asfálticas e ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), fadiga por compressão diametral à tensão controlada e deformação permanente por compressão axial. Concluiu que o desempenho mecânico foi satisfatório, caracterizando a viabilidade do uso do RMF em camadas de rolamento.

Bastos *et al.* (2016), analisou em sua publicação usar retalhos de minério de ferro das barragens como material rodoviário. Para isso foi caracterizar o RMF quimicamente, minerologicamente e fisicamente. Estabilizá-los com cimento, lima ou escória de aço com aglutinante. Realizou três tipos de misturas primárias e cada uma conteve 4 misturas secundárias, contendo 1, 2, 5 e 10% de aglutinante em relação à cauda seca. Testes amostras com FRX, DRX e análise ambiental. Com as misturas realizou curvas de compactação, avaliou a expansão, a resistência à compressão, a absorção de água e a durabilidade. Concluiu, com os resultados obtidos, que o uso de RMF de barragens como material de infraestrutura rodoviária é tecnicamente viável, quando adequadamente estabilizado.

Sant'ana Filho *et al.* (2017) avalia a viabilidade técnica e ambiental de pavimento intertravado com resíduos de minério de ferro. Para isso usou o resíduo de minério de ferro (RMFs) como agregado fino na produção de blocos de concreto interligados, substituir o agregado natural em proporções de 10, 20 e 80%. Analisou a granulometria, difração de raio-x, fluorescência de raio-x, gravidade específica, análise ambiental, resistência à compressão e resistência à abrasão. Após todos os ensaios foram comparados os testes dos pavimentos intertravados produzidos com RMF, com os convencionais e aos limites padrão. Conclui que misturas com a substituição do agregado natural por RMF em até 20%, a compressão superou o

mínimo da norma, menor absorção de água e porosidade e desgastes menos superficiais. Apresentando assim características físicas e mecânicas semelhantes ou mesmo superior aos pavimentos convencionais.

#### **2.6.4 Substituição ou adição em concreto e ou compostos à base de cimento**

Costa (2016) estudou concreto com resíduo de sinter feed<sup>1</sup> de modo a avaliar o desempenho e caracterização microestrutural. Para isso realizou estudos comparativos em uma argamassa e concreto produzido com resíduo de minério de ferro gerado do processo de sinter feed, em relação aos produzidos com agregados naturais. Analisou-se a granulometria, área superficial, porosimetria, análise mineralógica, análise microestrutural com MEV, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e abrasão úmida e seca. Além disso, foram realizadas as características físicas, comparando o emprego do resíduo na substituição parcial ou total da areia natural. Esses ensaios alimentaram dados para comparar o emprego do resíduo na substituição parcial ou total da areia natural. Concluiu que é viável a utilização de resíduo de minério de ferro gerado do processo de sinter feed para produção de concretos convencionais, em circunstância e finalidade específicas, pois no resíduo há a incidência da variável mineral conhecida como goethita.

Franco *et al.* (2014) analisou a aplicação de resíduo de mineração como agregado para a produção de concreto. Em seu estudo foi caracterizado o resíduo quanto a identificação das propriedades físicas e posteriormente foram realizados três traços experimentais C20, C30, C40 e avaliados a resistência à compressão e à tração na flexão. Os ensaios foram granulometria, massa específica, teor de umidade e caracterização ambiental. Nos moldes que foram ensaiados houve adição de 0,5, 5, 10 e 50% de RMF e substituição a areia com os mesmos percentuais. Concluiu que os resultados apontaram para a viabilidade em se usar RMF em concreto para uso em construção civil. A adição na análise realizada foi mais viável

---

<sup>1</sup> Sinter Feed é um resíduo de minério de ferro retirado depois do processo de jigagem, o qual define-se como um processo de separação gravimétrico.

que a substituição do agregado miúdo natural por resíduo. À medida que se aumentava o cimento nos traços, a proporção de RMF também foi aumentada, C20 adição de 5%, C30 e C40 adição de 10%, mostrando uma viabilidade de utilização como filler, como redutor de poros e melhorando o desempenho mecânico.

Bezerra (2017) caracterizou resíduo de minério de ferro e avaliou a sua influência no comportamento físico-químico e mecânico na pasta de cimento. Para isso foram produzidas duas pastas com fatores de correlação água/sólidos e teores de substituição de cimento por lama de RMF. Produziu as pastas com dosagem de 0,45 e 0,65 de correlação água/material seco com teores de substituição de cimento de 5%, 10% e 15%. Realizou ensaios de granulometria, massa específica, teor de umidade/sólidos, composição química e mineral, termoanálise, reologia e avaliado o comportamento físico e mecânico. Concluiu que com os resultados obtidos com o aumento de RMF acelerou as reações hidráulicas das pastas e reduziu a trabalhabilidade das misturas. Com pouca idade o comportamento mecânico não foi alterado pela substituição até 10% de RMF, mas para misturas com 28 e 90 dias houve uma pequena redução. Os ensaios de segregação, massa específica e índice de vazios foram poucos afetados pelos teores de RMF.

Zuccheratte *et al.* (2017), em sua publicação, estudou o cascalho sintético para produção de concreto com o resíduo arenoso da exploração de BIFs e o Polietileno tereftalato (PET) reciclado. Precisaram obter uma mistura uniforme, a qual realizou as etapas: mistura de massas iguais de flocos de PET e resíduo arenoso em um panela de fusão; aquecimento em um forno no ar até 260°C para derreter os flocos de PET; moagem do corpo fundido refrigerado no ar para obter tamanhos de partículas abaixo de 0,1 mm; mistura do material moído com resíduo arenoso aquecido à mistura até 260°C para derreter as partículas de PET; esmagando e peneirando o resfriamento, misturou material no ar para obter o cascalho sintético. Para o traço foi fixado a proporção de massa de resíduo em massa de cimento de 3,12 e realizados os ensaios de granulometria, massa unitária, densidade, absorção de água, microscopia óptica, espectroscopia infravermelha, espectroscopia de fluorescência de raios-X e resistência à compressão. Concluíram que o cascalho era composto por 75% de resíduos arenosos e 25% de PET, com uma massa unitária de 0,88 kg/dm<sup>3</sup>. Foi obtido um concreto com o cascalho sintético

com resistência à pressão de 9-12 MPa (após 7-91 dias), uma densidade seca de 1,9 g/cm<sup>3</sup>, razão vazia de 27% e absorção de água de 14 a 15%. Mostrou uma interação entre o PET e o fundente (solução aquosa de policarboxilato) que deve ser monitorado a longo prazo.

Levando em consideração as pesquisas apresentadas acima e com o intuito de comparar os métodos e os resultados obtidos por cada autor, foram construídos quadros comparativos, agrupados segundo sua área de estudo.

Tabela 07 – Quadro Comparativo estudos com Argamassa

Ensaio	Argamassa			
	Carrasco <i>et al.</i> (2016)		Fontes <i>et al.</i> (2016)	Ferreira <i>et al.</i> (2016)
Autores	Carrasco <i>et al.</i> (2016)		Fontes <i>et al.</i> (2016)	Ferreira <i>et al.</i> (2016)
Tema	Caracterização de Argamassa com RMF		Argamassa de Revestimento Produzido com RMF	Estudos de Aproveitamento de Rejeito Minério de Ferro
Metodologia	Utilizado duas frações de RMF, como agregados finos e granulares, Caracterização Química e Granulometria.		Captação de RMF, Caracterização Química e Mineralógica, Classificação do RMF, Produção de Argamassa e Ensaio	Captação de Rejeito em forma de polpa, seca, homogeneizada, quarteada e confeccionada argamassa
Composição do Traço	Cimento; fino; granular; água - 06 traços 1; 0; 4; 1,06 / 1; 1; 4; 1,30 / 1; 0;5; 1,48 / 1; 1;5 ;1,29 / 1; 0; 6; 1,38 / 1; 1; 6; 1,52		Foram realizados 3 traços diferentes e cada traço repetiu-se 3 vezes. Argamassa 1:3 (Ligante: agregado). Houve substituição do agregado natural por RMF, substituição da cal por RMF na proporção 10%, 20%, 50%, 100%	Cimento; Rejeito - A/C 01; 02 - 0,95 / 01; 02 - 1,00 01; 2,5 - 0,95 / 01; 2,5 - 1,00
Aglomerante	CP V Ari		CP III 40 - RS	-
Região do RMF	Samarco - Belo Horizonte /MG		Barragem de Lama em Minas Gerais	Morro do Pilar - Minas Gerais
Composição Química	Granular	Fino		
Fe	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido férrico	21,99	34,26	45,92	-
SiO <sub>2</sub> - Dióxido de silício	67,97	45,72	24,19	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido de alumínio	0,15	2,06	4,82	-
MnO - Óxido de manganês	0,01	3,03	-	-
CaO - Óxido de cálcio	-	-	-	-
P	-	-	0,096	-
Mn	-	-	0,025	-
Cura	28 dias		7 e 28 dias	28 dias
Ensaio	Granulometria		Granulometria	Massa unitária
	Módulo de Elasticidade Elástico		Moagem	Índice de consistência
	Modulo de Elasticidade Dinâmico		FRX - Análise química	Tempo de Pega
	Resistencia a Compressão Axial		DRX - Composição mineralis	Viscosidade
	Resistencia a Compressão Diametral		Análise Ambiental	Densidade
	Densidade		Tração na Flexão	Resistência à compressão
	Granular-3,14 (g/cm <sup>3</sup> )	Fino-3,47 (g/cm <sup>3</sup> )	Compressão	Teste de Lixiviação (verificar a contaminação por elementos tóxicos)
	-	-	-	Dissolução
-	-	-	Classificação	
Conclusão	Diminuir o diâmetro do RMF, diminui os poros melhora as embalagens das partículas e uma maior durabilidade do compósito		O RMF em proporção não superior de 20% em substituição é mais viável para esta aplicação. As amostras produzidas com RMF consumiram mais água para consistência e plasticidade, e apresentou melhor desempenho mecânico, maior densidade aparente no estado endurecido por causada do RMF	A Argamassa confeccionada com maior quantidade de rejeito (traço 1:2,5) e menor relação A/C (0,95), apresentou menor tempo de pega e maior resistência à compressão

Fonte: Carrasco *et al.* (2016); Fontes *et al.* (2016); Ferreira *et al.* (2016)

Tabela 08 – Quadro Comparativo estudos com Cerâmica

Ensaio	Cerâmica		
Autores	Souza; Vieira; Monteiro (2008)	Barbosa (2017)	Silva <i>et al.</i> (2014)
Tema	Microestrutura de cerâmica com rejeito de minério de ferro	Aproveitamento de RMF para a produção de cerâmica vermelha	Estudo da reciclagem de RMF para produção de cerâmica
Metodologia	Preparar formulações, com percentuais de rejeito de até 30% em peso, usadas na confecção de corpos-de-prova por prensagem uniaxial para queima nas temperaturas de 700, 900 e 1100°C e posteriormente avaliar microestrutura	Os corpos de provas foram preparados com substituição de 10% da matéria prima de solo por RMF, prensado com 21MPa e queimados com 1000C° por 180mim	Foi coletado três tipos de RMF (retalhos Flutuação, separação magnética fina e separação magnética grosseira), realizado uma caracterização do tamanho das partículas de RMF, medido a densidade real, a composição química e mineralógica. A adição de RMF a argila foi de 0% e 5% de massa e teve 10 amostras de teste. Foi utilizado uma prensa hidráulica com 20MPa de pressão e levado ao forno com 950C°
Composição do Traço	-	-	-
Aglomerante	-	-	-
Região do RMF	-	-	-
Composição Química	-	-	FT
Fe	-	7,4	10,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido férrico	83,55	-	15,01
SiO <sub>2</sub> - Dióxido de silício	4,78	89,41	84,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido de alumínio	3,81	-	0,45
MnO - Óxido de manganês	-	-	-
CaO - Óxido de cálcio	0,2	-	0,07
P	-	-	0,024
Mn	-	-	0,02
Cura	-	-	-
Ensaio	Microscopia eletrônica de varredura	Retração linear de secagem	Granulometria
	Difração de raios-X	Retração linear de queima	Densidade real
	Porosimetria de mercúrio	Perda de massa por secagem	Composição Química e Mineralógica
	-	Perda de massa por queima	Resistência à flexão
	-	Massa específica de queima	-
	-	Absorção de água e resistência à compressão simples	-
	-	-	-
	-	-	-
Conclusão	A incorporação do RMF nas fases cristalinas de queima da cerâmica argilosa alterou com a incrementação da hematita, o qual contribui para conferir à cerâmica uma coloração mais avermelhada. O rejeito de minério de ferro incorporado em até 10% em peso atua como um material de preenchimento reduzindo a porosidade da cerâmica	Conclui que os valores 27% e 42,3MPa de absorção de água e resistência à compressão respectivamente, mostra que a utilização de 10% de RMF como matéria prima está dentro dos parâmetros para confecção de alguns produtos cerâmicos	Concluiu que a adição de rejeito até 5% para produção de cerâmicas vermelhas é tecnicamente viável

Fonte: Souza; Vieira; Monteiro (2008); Barbosa (2017); Silva *et al.* (2014)



Tabela 09 – Quadro Comparativo estudos com Material para Pavimentação

Ensaio	Material para Pavimentação		
	Silva (2010)	Bastos <i>et al</i> (2016)	Sant'ana Filho (2017)
Autores			
Tema	Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro	Usando retalhos de minério de ferro das barragens como material rodoviário	Viabilidade Técnica e Ambiental de Pavimento Intertravado Com Rejeitos de Minério de Ferro
Metodologia	As misturas betuminosas do tipo CBUQ seguiram a metodologia Marshall, sendo adotada a mesma granulometria, Faixa C do DNIT, utilizando de brita graduada e escória de aciaria, em diferentes proporções, como agregados graúdos e miúdos e o rejeito de minério de ferro como filer. Foi realizado ensaio de para caracterização mecânica	Caracterizar o RMF quimicamente, mineralogicamente, ambiental e física. Estabilizá-los com cimento, lima ou escória de aço com aglutinante.	Avaliar a viabilidade técnica e ambiental do uso de rejeitos de minério de ferro (RMFs) como agregado fino na produção de blocos de concreto interligados, substituir o agregado natural em proporções de 10, 20 e 80%. Comparar os testes dos pavimentos intertravado produzidos com RMF, com os convencionais e aos limites padrão.
Composição do Traço	CBUQ dosado segundo a metodologia Marshall, sendo adotada granulometria da faixa C do DNIT.	Foram realizados três tipos de misturas primárias e cada uma conteve 4 misturas secundárias contendo 1, 2, 5 e 10% de aglutinante em relação à cauda seca	Houve adição de RMF na proporção de 10, 20 e 80% em relação à massa de agregado natural
Aglutinante	CBUQ	CP III 40 - RS	CP V - ARI
Região do RMF	Mina do Gongu Soco - Barão de Cocais/MG	Região do Quadrilátero Ferrífero - MG	Fábrica de Processamento do estado de MG
Composição Química	-	-	-
Fe	Hematita - FeO <sub>3</sub>	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido férrico	Caolinita - AL <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	68,05	35,5
SiO <sub>2</sub> - Dióxido de silício	Quartzo - SiO <sub>2</sub>	20,4	63,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido de alumínio	Actinolita - Ca <sub>2</sub> (MgFe) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	11,2	1,2
MnO - Óxido de manganês	Talco - Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	-	-
CaO - Óxido de cálcio	-	-	-
Ensaio	Resistência à tração estática por compressão diametral (RT)	Granulometria	Granulometria
	Módulo de resiliência (MR)	FRX	DRX
	Compressão axial	DRX	Gravidade Específica,
	Granulometria - Faixa C do DNIT	Análise ambiental	FRX
	Abrasão Los Angeles Durabilidade	Curvas de Compactação	Análise ambientais
	Densidade e Absorção	Avaliação de expansão	Resistência à Compressão
	DRX	Resistência à compressão	Resistência à Abrasão
	-	Absorção de água	-
-	Durabilidade	-	
Conclusão	Após análises dos ensaios conclui de que o desempenho mecânico foi satisfatório, caracterizando a viabilidade do uso do RMF em camadas de rolamento	Com os resultados obtidos, concluiu-se que o uso de RMF de barragens como material de infraestrutura rodoviária é tecnicamente viável, quando adequadamente estabilizado.	Os resultados mostraram que misturas com a substituição do agregado natural por até 20% de RMF, a força de compressão superou o mínimo da norma, mais baixo absorção de água e porosidade e desgastes menos superficial. Apresentando assim características físicas e mecânicas semelhantes ou mesmo superior aos pavimentos convencionais

Fonte: Silva (2010); Bastos *et al.* (2016); Sant'ana Filho (2017)

Tabela 10 – Quadro Comparativo Estudos com Concretos

Ensaio	Substituição de Agregado em Concreto			
Autores	Bezerra, Goulart (2017)	Franco <i>et al.</i> (2014)	Zuccheratte, Freire, Lameiras (2017)	Costa (2016)
Tema	Caracterização do rejeito de minério de ferro (RMF) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pasta de cimento	Aplicação de Rejeito de Mineração como Agregado para a Produção de Concreto	Cascalho sintético para concreto obtido a partir de cauda de minério de ferro arenoso e polireciclado	Concreto com rejeito de sinter feed, estudo comparativo de desempenho e caracterização microestrutural
Metodologia	Foram produzidas duas pastas com fatores de correlação água/sólidos e teores de substituição de cimento por lama de RMF	Foi caracterizado o rejeito quanto as características químico-ambiental, identificação das propriedades físicas, posteriormente foram realizados três traços experimentais C20, C30, C40 e avaliados a resistência à compressão e tração na flexão	Para obter uma mistura uniforme, foram realizadas etapas: mistura de massas iguais de flocos de PET e resíduo arenoso em um panela de fusão; aquecimento em um forno no ar até 260 ° C para derreter os flocos de PET; moagem corpo fundido refrigerado no ar para obter tamanhos de partículas abaixo de 0,1 mm; mistura do material moído com resíduo arenoso aquecimento à mistura até 260 ° C para derreter as partículas de PET; esmagando e peneirando o resfriamento misturou material no ar para obter o cascalho sintético	Estudos comparativos em uma argamassa e concreto produzidos com rejeito de minério de ferro gerado do processo de sinter feed, em relação aos produzidos com agregados naturais. Para isso foi avaliado microestrutura e realizado ensaio físico comparando ao emprego do rejeito na substituição parcial ou total da areia natura.
Composição do Traço	As pastas foram dosadas de 0,45 e 0,65 de correlação água/material seco com teores de substituição de cimento de 5, 10 e 15%	Adição de 0,5, 5, 10 e 50% de RMF e substituição a areia com os mesmos percentuais.	Proporção fixa de massa de resíduo em massa de cimento de 3,12	Arg. - Areia; Cimento CII; Água 1º traço: 9,36g=5,18L; 1,91g=1,48L; 0,6 / 2º traço variou só a água de fc 0,6 pata 1,55L Arg. - Rejeito; Cimento CII; Água 1º traço: 9,60g=5,81L; 1,91g=1,48L; 0,6 / 2º traço variou só a água de fc 0,6 pata 1,55L Conc. - Cimento; Areia; Brita 0; Brita 1; 1;2,1;1,05; 1,85 - a/c=0,63 e aditivo=0,8% do cimento Conc. - Cimento; Areia; Brita 0; Brita 1; Rejeito 1; 1,05; 0,95; 1,50; 1,50 - a/c=0,63 e aditivo 0,8% CPIV usou fator a/c 0,52
Aglutinante		CP V - ARI	CPV ARI	CPII E 32 e CP IV-40 RS
Região do RMF	Barragem de Conceição/MG	-	Samarco Mineração SA.	
Composição Química	-	-	-	
Fe	-	-	-	55,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido férrico	50,6	-	-	-

SiO <sub>2</sub> - Dióxido de silício	31,5	-	-	13,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Óxido de alumínio	7,92	-	-	1,89
MnO - Óxido de manganês	0,51	-	-	-
CaO - Óxido de cálcio	0,09	-	-	-
P	-	-	-	0,083
Mn	-	-	-	0,25
Cura	-	3, 7 e 28 dias	-	-
Ensaio	Granulometria	Granulometria	Granulometria	Granulometria
	Massa Específica	Massa Específica	Massa unitária	área superficial
	Teor de umidade/sólidos	Teor de umidade	Densidade	Porosimetria
	Composição Química e Mineral	Caracterização Ambiental	Absorção de água	Análise mineralógica
	Micrografia		Microscopia óptica	Análise microestrutural com MEV
	Termoanálise		Espectroscopia infravermelha	Resistência à compressão
	Reologia		Espectroscopia de fluorescência de raios-X	Resistência tração por compressão diametral
	Comportamento Físico e Mecânico		Resistência à compressão	Módulo elasticidade
	-	-	-	Abrasão seca e úmida
Conclusão	<p>Conclui, com os resultados obtidos, que com o aumento de RMF acelerou as reações hidráulicas das pastas e reduziu a trabalhabilidade das misturas. Com pouca idade o comportamento mecânico não foi alterado pela substituição até 10% de RMF, mas para misturas com 28 e 90 dias houve uma pequena redução. Os ensaios de segregação, massa específica e índice de vazios foram poucos afetados pelos teores de RMF</p>	<p>Os resultados apontaram para a viabilidade em se usar RMF em concreto para uso em construção civil. A adição na análise realizada foi mais viável que a substituição do agregado miúdo natural por resíduo. À medida que se aumentava o cimento nos traços a proporção de RMF tb foi aumentado, C20 adição de 5%, C30 e C40 adição de 10%. Mostrando uma viabilidade de utilização como filer, como redutor de poros e melhorando o desempenho mecânico.</p>	<p>O cascalho sintético foi usado no lugar do cascalho natural e o resíduo arenoso foi utilizado em lugar de areia natural. O cascalho era composto por 75% de resíduos arenosos e 25% de PET, com uma massa unitária de 0,88 kg / dm<sup>3</sup>. Foi obtido um concreto com o cascalho sintético com resistência à pressão de 9-12 MPa (após 7-91 dias), uma densidade seca de 1,9 g / cm<sup>3</sup>, razão vazia de 27% e absorção de água de 14 a 15%. A análise I mostrou que há uma interação entre o PET e o fundente (solução aquosa de poliacrilato) que deve ser monitorado a longo prazo.</p>	<p>Concluiu que é viável a utilização de rejeito de minério de ferro gerado do processo de sinter feed para produção de concretos convencionais, em circunstância e finalidades específicas, pois no rejeito há a incidência da variável mineral conhecida como goethita.</p>

Fonte: Bezerra, Goulart (2017); Franco *et al.* (2014); Zuccheratte, Freire, Lameiras (2017); Costa (2016)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo reúne o programa experimental correspondente às atividades práticas de caracterização de resíduo de minério de ferro e estudo de pastas de cimento Portland com substituição pelo RMF, conforme descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Ensaio experimentais

<b>Material</b>	<b>Propriedades</b>	<b>Discriminação</b>	<b>Norma</b>
Resíduo	Caracterização Física	Distribuição Granulométrica Massa específica	NBR NM 248/2001; NBR NM 53/2009;
	Caracterização Química e Mineralógicas	Fluorescência de Raios-X (XRF) Difração de Raios-X (XRF)	- -
Pasta de Cimento	Física	Consistência Normal Moldagem e Cura	NBR NM 43/2002; NBR 5738/2015
	Mecânicas	Resistência à compressão axial	NBR 13279/2015

Fonte: Autor, 2017

#### 3.1 Materiais

Os materiais empregados nesta pesquisa foram cimento, água e resíduo de minério de ferro. Tais matérias serão descritos a seguir:

##### 3.1.1 Cimento

Para o experimento foi adotado a utilizado o Cimento Portland, CP-V ARI da Holcim (fabricado em Pedro Leopoldo/MG). A adoção do CP-V ARI se deu por ser um aglomerante hidráulico mais puro, na sua composição conter conforme NBR 5733 (ABNT, 1991) no mínimo 95% em massa de clínquer com sulfato de cálcio e máximo de 5% de material carbonático.

O aglomerante utilizado, CP-V ARI, dispõe da característica conhecida de possuir uma maior superfície específica, por permanecer no moinho por um tempo mais prolongado, queima mais completa, alto teor de  $C_3S$  (silicato tricálcio) e conforme NBR 5733(1991) menor teor de adição minerais em sua composição. Isso ocasiona uma maior resistência em baixas idades.

### 3.1.2 Resíduo de Minério de Ferro

Os RMF's analisados neste trabalho têm origem em cidades pertencentes ao Quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, como apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Nomenclaturas amostras

Região	Amostra	Nomenclatura
Sarzedo	Sinter Feed	Amostra 1
	Barragem Lama	Amostra 2
Itabira	Barragem Lama - Pontal	Amostra 3

Fonte: Autor, 2018

### 3.1.3 Água

A água utilizada foi proveniente de rede pública de abastecimento local, fornecida pela concessionária COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais). Segundo a mesma, a água, possui um rigoroso controle de qualidade, realizando análises antes, durante e depois do processo de tratamento da água, sempre respeitando as determinações do Ministério da Saúde. A companhia de saneamento em questão utiliza as etapas de oxidação (metais e materiais orgânicos), coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação para o tratamento da água. Os aspectos considerados (Tabela 13) para análise da qualidade da água antes do fornecimento são:

1. Físico: Cor e turbidez. Possíveis alterações na sua cor ou presença de resíduos;
2. Químico: Presença de materiais orgânicos e inorgânicos (pesticidas, ferro, e etc);
3. Bacteriológico: Existência de coliformes totais e escherichia coli, dentre outros;
4. Hidrológico: Verifica a presença de micro-organismos e organismos (vegetais e animais).

Tabela 13 – Padrões Ministério da Saúde

Dados referentes ao período: 01/2016 a 12/2016 - Portaria 2914/ Ministério da Saúde							
Nº de amostras							
Parâmetro	Unidade	Mínimo	Realizadas	Fora padrões	Dentro padrões	Valor médio	Limite
Cloro	mg/L Cl	7428	7921	20	7901	1,19	0,2 a 2
Coliformes Totais	NMP/100 mL	7428	7890	124	7766	98,43	Obs.
Cor	UH	1716	2334	10	2324	0,74	15
Escherichia coli	NMP/100 mL	7428	7890	5	7885	-	Obs.
Fluoreto	mg/L F	0	1095	199	896	0,74	0,6 a 0,85
pH	-	0	2333	1	2332	7,98	6 a 9,5
Turbidez	uT	7428	7890	75	7815	0,48	5

Fonte: Copasa, 2017

Relatório de análise da água, no período de dezembro de 2017, quando utilizada no laboratório de concreto da UFMG é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Qualidade da Água

Dados referentes ao período de (período de 12/2017 a 12/2017)							
Parâmetro	Unidade	Nº de amostras				Valor médio	Limites
		Mínimo	Analisadas	Fora Padrão	Que atende		
Cloro	mg/L Cl	582	652	0	652	1,00	0,2 a 2
Coliformes Totais	NMP/100mL	582	650	19	631	0,97	Obs.
Cor	UH	136	190	3	187	2,19	15
Escherichia coli	NMP/100mL	582	650	0	650	-	Obs.
Fluoreto	mg/L F	0	0	0	0	-	0,6 a 0,85
Turbidez	uT	582	652	10	642	0,52	5
pH	-	0	14	0	14	7,58	6 a 9,5

Fonte: Copasa, 2017

## 3.2 Métodos

Este trabalho avaliou a influência do RMF como substituição ao Cimento Portland, para isso seguiu a metodologia apresentada a seguir:

### 3.2.1 Coleta

Foram obtidos 5 kg de amostras de cada região, sendo elas advindas de pesquisas em andamentos no Laboratório de Concreto do Departamento de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais.

### **3.2.2 Moinho de Barras**

Trata-se de um moinho que se utiliza de hastes para moer os materiais. A moagem é responsável pela redução do tamanho das partículas, com a finalidade de atingir granulometrias compatíveis com a granulometria desejada, assim como para atender a granulometria necessária para a realização de determinados ensaios, como o de fluorescência de raio-X (BRISOLA, 2012). Concluída esta etapa, o material fica então liberado para a próxima etapa do processo.

O moinho de barras é utilizado para triturar minérios, carvão / coque, e outros materiais em aplicações úmidas e secas. O moinho de barras pode ser utilizado para moer os materiais para baixa granulometria e peneiramento seco.

No caso deste estudo, a granulometria almejada para realizar a substituição do RMF ao Cimento Portland, é a do cimento (Peneira #200 – abertura de 0,074mm segundo a norma ABNT 11579/2012), pois assim a reação de hidratação não sofre grandes interferências, reduz-se a exsudação e mantém-se a trabalhabilidade da pasta de cimento.

O moinho utilizado neste procedimento foi o do Laboratório de Minas da UFMG, fabricado pela PAVITEST – Contenco Indústria e Comércio LTDA. Antes da utilização foi feita uma limpeza interna do moinho e de suas barras com água limpa e secado, utilizando soprador de ar comprimido para se evitar a contaminação.

O moinho continha 42 barras em aço, com peso médio aproximado de 1,4kg por barra, com a moagem via seca. Foi realizada a moagem de 5 kg de amostra por um período de 15 minutos. Foi feito um teste na peneira série normal da ABNT/ASTM ou Tyler Mesh nº 200 com abertura 0,074mm, com uma pequena quantidade, em média 30 gramas, para verificar a eficiência da moagem e posteriormente armazenado em recipiente hermético de vidro. Foi realizado este procedimento para todas as amostras (Figura 01).

Figura 01 – Moinho de barras



Fonte: Autor, 2017

### 3.2.3 Caracterização do RMF

#### 3.2.3.1 Densidade

A densidade pode ser definida como sendo a razão entre a massa e o volume correspondente. Cabe ressaltar que na massa específica os vazios estão incluídos. O símbolo para a densidade é  $\rho$  (a letra grega ró) e a unidade SI para a densidade é quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ).

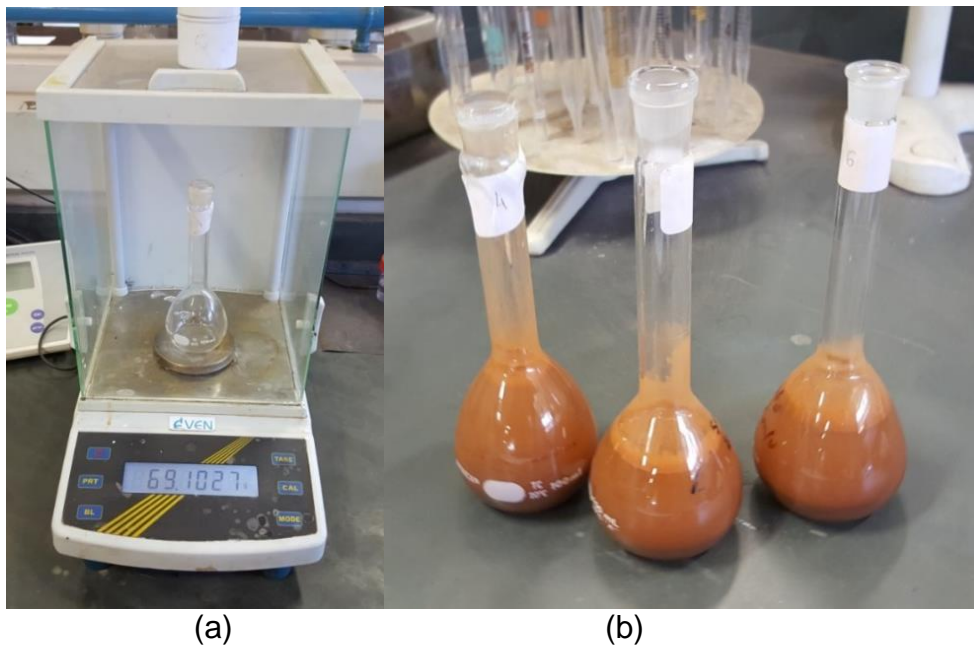
Para determinação da densidade (Figura 02 - a e b) foi feito primeiro a pesagem do frasco vazio ( $P_p$ ). Introduziu-se no frasco os fragmentos do mineral e realizou-se a segunda pesagem ( $P_{p+m}$ ). Encheu-se o frasco com água da COPASA, colocou-se os frascos em Banho Maria com fervura por 25 minutos, com o objetivo de se expulsar as bolhas de ar. Depois de resfriado, encheu-se o frasco com água até a marca de 100ml, antes da terceira pesagem ( $P_{p+m+a}$ ). Fez-se a última pesagem do frasco com água ( $P_{p+a}$ ), depois de esvaziá-lo e tornar a enchê-lo



somente com água. Após estes procedimentos, pode-se determinar sua densidade pela Equação 01.

$$d = \frac{P_{p+m} - P_p}{(P_{p+a} - P_p) - (P_{p+m+a} - P_{p+m})} \quad (01)$$

Figuras 02 – Densidade com a utilização de balão volumétrico e os frascos de vidro.



Fonte: Autor, 2017

### 3.2.3.2 Granulometria à laser

A difração à laser é uma técnica utilizada para determinação do tamanho das partículas de materiais que vão desde centenas de nanômetros a vários milímetros de tamanho. Esta mede as distribuições de tamanho das partículas por medição da variação angular na intensidade da luz, difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra.

Este método de ensaio proporciona medições rápidas, facilidade em repetição, alta produtividade e resultados instantâneos. O equipamento utilizado deste procedimento foi o Granulômetro a Laser Sympatec Helos Vectra, existente no Laboratório de Raios-X do Departamento de Minas da UFMG (Figura 03).

Figura 03 – Granulômetro a Laser Sympatec Helos Vectra – Equipamento aberto.



Fonte: Autor, 2017

### 3.2.4 Fluorescência de raios-X

A Fluorescência de raios-X é um ensaio por dispersão de energia. É uma técnica analítica não destrutiva capaz de identificar elementos químicos através de radiações características quando submetidos à excitação adequada. A emissão de espectro com linhas características pode ser induzida com impacto de partículas aceleradas, tais como elétrons, prótons, partículas alfa, íons e radiação de tubos de raios-X. (PUC-RIO, Certificação digital nº 0813396/CA, p.44)

Neste método, o material a ser analisado é atingido com um feixe de Raios X, que interage com os átomos da amostra, provocando a ionização das camadas mais internas dos átomos. Os átomos, na amostra, geram raios X característicos que são emitidos do material. Tais raios são conhecidos como raios X "fluorescentes" e possuem um comprimento de onda e uma energia específicos que são característicos de cada elemento.

O equipamento utilizado para análise semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX): espectrômetro PHILIPS PW-2400; pastilhas prensadas, existentes no Laboratório de Raios-X do Departamento de Minas da UFMG.

O método utilizado para referência analítica foi o CLA70C para determinação de oxido de ferro (II) – FeO (silicato) volumétrico; o PHY01E: LOI (Loss on ignition) –

Perda ao fogo por calcinação da amostra a 405°C e/ou 1000°; e XRF79C: Fusão com tetraborato de lítio e quantificação por XRF, existente na empresa SGS GEOSOL Laboratórios LTDA com certificado de análise GQ1703333.

### **3.2.5 Difração de raios-X**

A difratometria de raios-X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências de materiais, engenharias metalúrgica, química e de minas, além de geociências, dentre outros. A difração é para obter o espectro com informações da caracterização do resíduo. A identificação das fases é feita por comparação dos espaçamentos dos picos das amostras com banco de dados conhecido para materiais cristalinos. (BLEICHER; SASAKI, 2000).

A caracterização é importante para verificar a presença dos elementos/minerais, podendo prever possíveis contaminações ou reações indesejáveis com o aglomerante hidráulico cimentíssimo usado.

O equipamento utilizado deste procedimento foi o Difratômetro de raio-x (DRX) para amostra em pó PHILIPS (PANALYTICAL), sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW 1830/40, goniômetro PW 3020/00, existente no Laboratório de Raios-X do Departamento de Minas da UFMG.

### **3.2.6 Fabricação da pasta de cimento Portland**

Foram confeccionados 80 corpos-de-prova com substituição de RMF, na granulometria fina passante da peneira 200 (<75 µm), ao cimento Portland na proporção 1:1 para a execução das pastas de cimento.

Avaliou-se as propriedades físicas e mecânicas entre pasta, no estágio fresco e endurecido com e sem a substituição do aglomerante hidráulico. Realizaram-se os ensaios de consistência normal e compressão.

### **3.2.7 Consistência Normal**

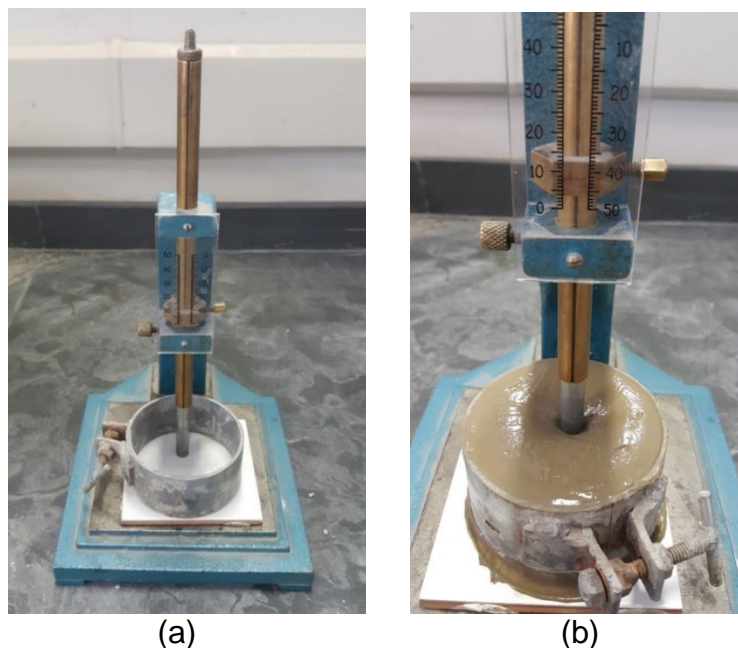
O objetivo desse ensaio é determinar o percentual de água para obter a consistência normal da pasta de cimento. Na fabricação da pasta a ser estudada foram utilizados dois tipos de traço. Para determinação da quantidade de água a ser utilizada no traço de referência e demais com resíduo (pasta de cimento) foi feita mistura apenas de água e cimento Portland CP-V em proporção, que conduz a uma consistência denominada normal de referência.

Essa consistência normal foi verificada com ajuda do aparelho de Vicat, utilizando a sonda de Tetmajer (Figura 06 – a e b), um corpo cilíndrico, metálico e liso de 10 mm de diâmetro. A sonda é posta a penetrar verticalmente na pasta por ação do peso total de 300g, a mesma deve estacionar a 6 mm do fundo num determinado tempo.

Para a preparação da amostra de referência a ser utilizada no ensaio de Vicat foi seguido o procedimento da NBR NM 43:2002, utilizados também os equipamentos: balança com resolução de 1g, misturador (argamassadeira) com cuba e misturador de inox, espátula, régua metálica e molde.

No primeiro ensaio de consistência da pasta de referência foi adicionado 152,6g de água, seguindo os passos relatados anteriormente e realizado a leitura no aparelho de 9mm. No segundo e último teste para a pasta de consistência foi realizado com um pouco mais de água, sendo 155,3g e obtendo uma leitura de 6mm. Diante desse resultado foi determinada a quantidade de 155,3g de água para a pasta de referência a ser mantido para o primeiro traço com todas as amostras. Esta quantidade determina um fator água x produto seco, determinado adiante por A/S, de 31% para todas as amostras do primeiro lote dos ensaios.

Figuras 04– Aparelho de Vicat.



Fonte: Autor, 2017

Utilizando a mesma quantidade de água da amostra de referência, realizou-se a substituição de igual quantidade de aglomerante hidráulico cimentício por amostra de resíduo, ficando 250g de cimento CP-V e 250g da amostra moída de minério. O teste de Vicat, com a sonda de Tetmajer, deu uma consistência baixíssima, pois a pasta ficou muito fluida e o embolo de Tetmajer atingiu o fundo em um segundo. No segundo ensaio de consistência da pasta com substituição de igual teor de aglomerante por resíduo, e assim determinou-se um novo fator de água x produto seco (A/S) de 23%, também a ser estudado.

### 3.2.8 Índice de consistência

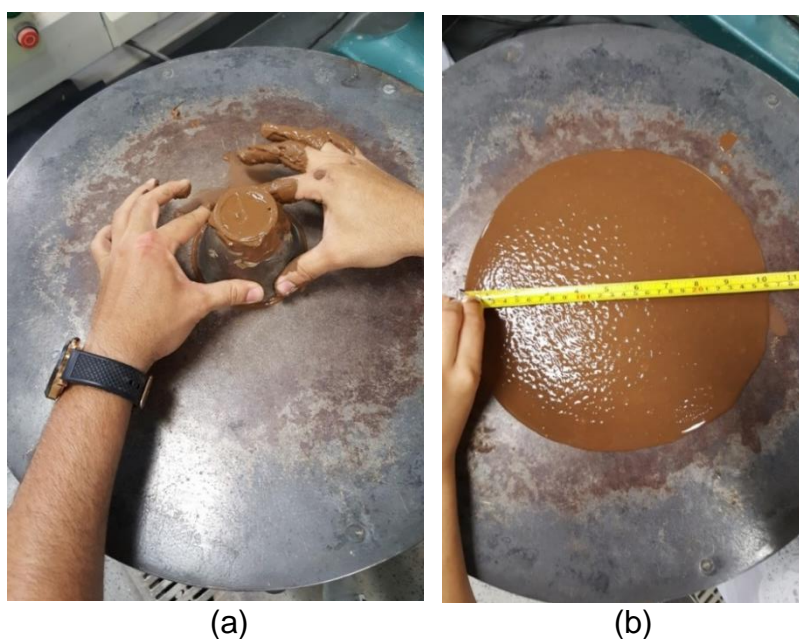
A consistência é a propriedade pela qual a pasta de cimento no estado fresco tende a resistir à deformação. A quantidade de água é o fator principal que influencia nesta deformação. Outros fatores como granulometria dos agregados, morfologia, qualidade do aglomerante também influenciam nesta deformação. A pasta de cimento com índice de consistência normal nada mais é do que a mistura padronizada do cimento e água que apresenta propriedade reológica constante.

Para que a execução dos ensaios seja uniforme para todos os cimentos, de maneira que os resultados sejam comparáveis, é necessário que as pastas de

cimento apresentem as mesmas características. Como se trata de pastas, igualar as viscosidades, que é uma de suas principais propriedades, ter-se-á todos os ensaios nas mesmas condições.

A viscosidade pode ser avaliada pela mesa de espalhamento (*Flow Table*), conforme método descrito na NBR 7215:1996. No teste de *Flow Table* o tronco de cone utilizado foi reduzido, com uma correlação de 45,73% menor, para se evitar um consumo elevado de material (Figura 05 – a e b).

Figuras 05 – Teste de Flow Table



Fonte: Autor, 2017

### 3.2.9 Moldagem e cura

Os moldes foram em PVC de 25mm e cortados com 51mm de altura para atender a NBR 5738 (ABNT, 2016), onde informa que os corpos de prova cilíndricos devem ter altura igual ao dobro do diâmetro. A dimensão final do corpo de prova será 2,5x5cm (cimento e resíduo).

A moldagem foi realizada em duas camadas com adensamento manual, utilizando uma haste de 4,2mm, sendo realizados 5 golpes por camada. Também foi realizado uma vibração externa, através da base vibratória do peneirador por 15 segundos com 10 corpos de prova por vez.



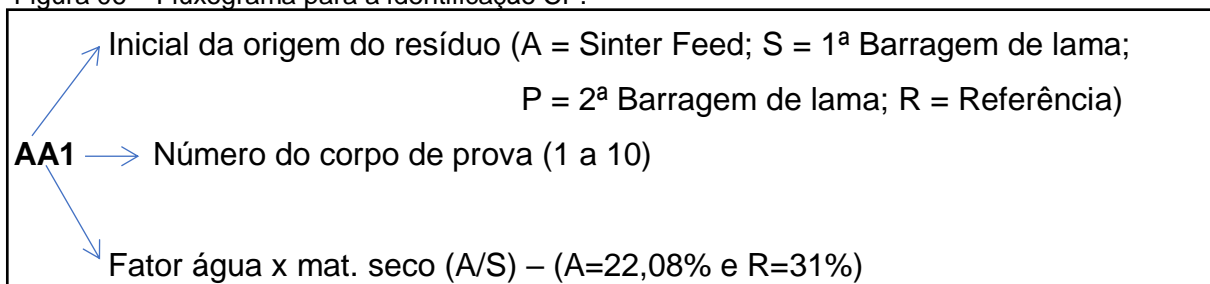
A desmoldagem foi realizada após 48 horas e os corpos de prova curados em tanque de cura estanque, submersos em água potável não corrente, protegidos de contaminação e raios solares dentro da câmara úmida do laboratório de concreto do Departamento de Matérias de Construção Civil (DEMC) da UFMG, por 21 dias. Foram moldados 80 corpos de prova. Esta quantidade de amostra foi moldada com a configuração de dez unidades com cada fator de A/S para cada amostra de minério (50% cimento + 50% resíduo + água), mais dez unidades de amostra de referência (cimento e água). As amostras foram identificadas seguindo o referencial do fluxograma da Figura 06 e exemplificado conforme Figura 07.

Tabela 15 – Tab. Moldagem e Identificação dos Corpos de Provas

Região	Amostra	Nomenclatura	Fator A/C	Cimento (g)	Resíduo (g)	Água (g)
Referência		RR	31,00	1300	-	403,00
		RA	22,08	1300	-	287,00
Sarzedo	Amostra 01	AR	31,00	350	350	217,00
		AA	22,08	350	350	154,60
	Amostra 02	SR	31,00	350	350	217,00
		S.A	22,08	350	350	154,60
Itabira	Amostra 03	PR	31,00	350	350	217,00
		PA	22,08	350	350	154,60

Fonte: Autor, 2017

Figura 06 – Fluxograma para a identificação CP.



Fonte: Autor, 2017

Figura 07 – Identificação CP.



Fonte: Autor, 2017

### 3.2.10 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência de compressão axial é realizado através da aplicação de uma carga uniaxial compressiva uniforme na seção circular do corpo de prova. Tem por objetivo comprimi-lo até ruptura, para avaliar a resistência do material a compressão. A resistência compressiva foi obtida usando a expressão  $f_c = F/A$ , sendo “F” a força aplicada no teste e “A” a área da seção transversal da amostra de teste.

O ensaio foi realizado no laboratório de materiais da UFMG, utilizando um equipamento eletromecânico do fabricante Instron modelo 5582 (Figura 08). Este equipamento é utilizado para obter resistência dos materiais em ensaios de tração, compressão, flexão, etc; ou seja, todas as classes dos ensaios mecânicos destrutivos. A velocidade de carga utilizada para o ensaio foi de 0,5mm/min.

A quantidade ensaiada foi de quatro corpos de prova por cada fator A/S de cada amostra, totalizando 24 corpos de provas rompidos.

Figura 08 – Equipamento de Compressão



Fonte: Autor, 2018



## 4. RESULTADOS

Após a realização dos procedimentos experimentais citados anteriormente, busca-se nesta etapa apresentar e discutir os resultados obtidos.

### 4.1 Análise da água

Segundo Neville (2013), a qualidade da água é importante, porque podem inferir na pega do cimento, afetar negativamente na resistência, além de outras patologias. A composição química adequada para a água a ser utilizada no amassamento ou cura de pastas, argamassa ou concretos deve conter o pH (grau de acidez) entre 6,0 e 8,0, sem sabor salinizado ou salobro. Águas naturais levemente ácidas são inofensivas, mas água que contenha ácido húmico ou outros ácidos orgânicos pode afetar negativamente o endurecimento.

Segundo a norma britânica BS 3148:1980 recomenda-se um limite máximo de 500mg por litro de íons cloretos, enquanto para a BS EM 1008-2002 e a norma americana ASTM C 1602-06 os teores variam conforme utilização do concreto.

A NBR 6118 (2014) informa que o elevado teor de íon cloro (cloreto) exerce um mecanismo preponderante de deterioração relativo às armaduras em concreto armado e em água e em solos que contenham ou estejam contaminados por sulfatos e dão origem a reações expansivas e deletérias em pasta de cimento hidratada.

A NBR 15900 (2009) destina suas 08 partes à análise química da água de amassamento, orientando como deve ser analisada a concentração dos componentes. Os limites de cloretos, sulfatos e álcalis na água de várias normas são comparados na Tabela 16. Conforme análise dos resultados, a água da COPASA/MG é potável e sua utilização é segura e adequada para água de amassamento e cura.

Tabela 16 – Limites de impureza na água de amassamento

Impureza		BS 3148:1980	BS EM 1008:2002	ASTM C 1602/C 1602M-06	ABNT NBR 15900
Íon Cloreto	Concreto protendido	500	500	500	500
	Concreto armado		1000	1000	1000
	Concreto simples		4500	-	4500
Sulfato		1000 (SO <sub>3</sub> )	2000(SO <sub>3</sub> )	3000(SO <sub>4</sub> )	2000(SO <sub>4</sub> )
Álcalis		1000	1500	600	1500

OBS: 1) Unidade em mg por litro (ppm) 2) NBR 15900 parte 6 refere-se a cloretos; a parte 7 sulfato e a parte 9 álcalis

Fonte: Adaptada Neville, 2013 e Isaia, 2011

## 4.2 Caracterização química e mineralógica

O ensaio realizado no Laboratório de Raios-X do Departamento de Minas da UFMG obteve os principais padrões das fases minerais dos resíduos de minério de ferro para as seguintes amostras, conforme mostrado na Tabela 17 e Figura 09.

Tabela 17 – Difração de Raios-X das amostras de RMF

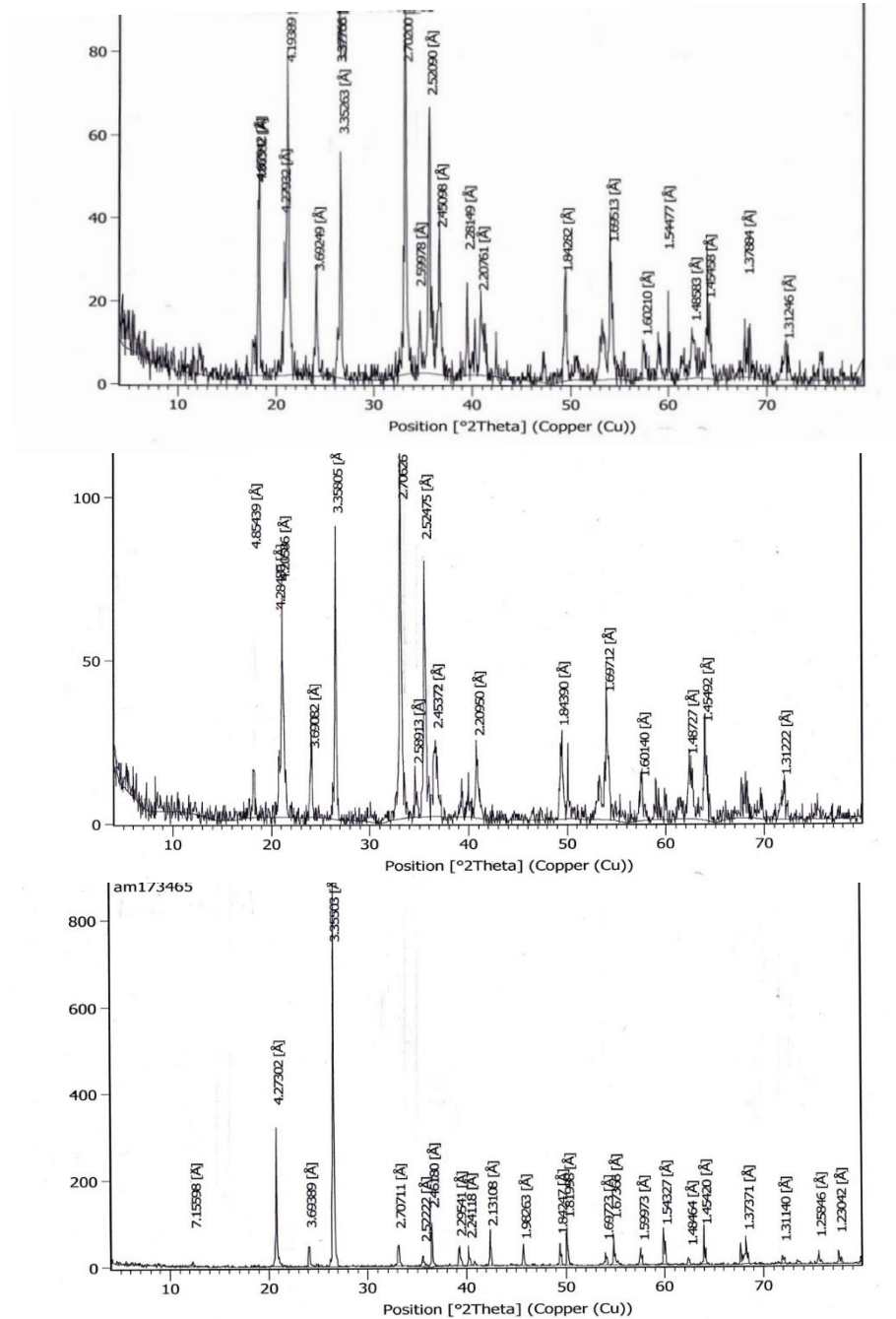
Difração Raio X				
Quantidade	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	
Alto	Fe, O	Fe, O	Si, O	
Médio	Si	Si	Fe	
Baixo	Al	Al, P	-	
Traço	Mg, Na, Mn, Cr, Ti, Ca, Cl, S	Mn, Ti, Cl, S, Mg, Na	Mg, Na, Mn, Ti, Ca, K, Cl, S, P, Al	
Composição Mineral				
Mineral	Dureza*	Presença por região		
Hematita - $Fe_2O_3$	5,5 - 6	X	X	X
Quartzo - $SiO_2$	7	X	X	X
Gibbsita - $Al(OH)_3$	2,5 - 3	X	X	-
Goetita - $FeO(OH)$	5 - 5,5	X	X	-
Magnetita - $Fe_3O_4$	5,5 - 6	-	X	-
Caulinita - $Al_2Si_2(OH)_4$	2 - 2,5	-	-	X

Fonte: Autor, 2017 e \* Enciclopédia multimídia de minerais

De acordo com os padrões XRD, a Tabela 16 apresenta os principais elementos constituintes da amostra 01 do processo de Sinter Feed, podendo-se detectar a presença em maior quantidade de Ferro (Fe) e Oxigênio (O), uma média quantidade de Sílica (Si), uma baixa quantidade de Alumínio (Al) e traços da presença de Magnésio (Mg), Sódio (Na), Manganês (Mn), Cromo (Cr), Tálcio (Ti), Cálcio (Ca), Cloro (Cl) e Enxofre (S). A amostra 02 da mesma região da amostra 01, mas coletada da barragem de lama, constatou-se a presença em maior quantidade de Ferro (Fe) e Oxigênio (O), uma média quantidade de Sílica (Si), uma baixa quantidade de Alumínio (Al) e Fósforo (P) e traços da presença de Manganês (Mn), Tálcio (Ti), Cloro (Cl), Enxofre (S), Magnésio (Mg) e Sódio (Na). A amostra 03 de outra região, dentro do mesmo estado, foi coletada de barragem de lama detectou-se a presença em maior quantidade de Sílica (Si) e Oxigênio (O), uma média quantidade de Ferro (Fe), e traços da presença de Magnésio (Mg), Sódio (Na), Manganês (Mn), Tálcio (Ti), Cálcio (Ca), Potássio (K), Cloro (Cl), Enxofre (S), Fósforo (P) e Alumínio (Al).

Analisando a Tabela 17, percebe-se a presença predominante dos minerais nas amostras são de Quartzo -  $\text{SiO}_2$ , Hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Goethita -  $\text{FeO}(\text{OH})$  e Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

Figura 09 – Difração de Raios-X das amostras de RMF



Fonte: Autor, 2017

No intuito de se realizar uma análise quantitativa das amostras, para uma caracterização química, foi extraído os resultados, da pesquisa de Costa (2016) dos compostos analisados na amostra 01, realizados no laboratório da Itaminas em junho de 2015 e realizado Fluorescência por Raio-x (FRX), nas amostras 02, 03 e cimento CPV-ARI no laboratório da na empresa SGS GEOSOL Laboratórios LTDA com certificado de análise GQ1703333, os resultados obtidos foram compilados e descritos na Tabela 18.

Tabela 18 – Análise Mineralógica

<b>Análise</b>	<b>FeO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MnO</b>	<b>LOI</b>
Amostra - 01	-	13,28	1,89	55,65	-	-	-	0,09	-	-	0,25	-
Amostra - 02	0,49	25,60	3,13	59,10	3,85	0,23	0,14	0,16	<0,1	0,38	0,23	6,12
Amostra - 03	<0,14	30,10	5,71	56,90	0,03	<0,1	0,22	0,29	<0,1	0,08	0,44	7,20
Cimento CPV-ARI	0,16	20,00	4,62	2,76	60,10	1,69	0,23	0,23	0,22	0,95	0,16	5,24

Fonte: Autor, 2017

Analisando os resultados de DRX e FRX para caracterização química, percebe-se que existe uma coerência entre as amostras com relação aos elementos Sílica, Alumínio e Fósforo e uma pequena divergência quanto à avaliação do elemento Ferro, pois na análise semiquantitativa a amostra 03 apresenta uma quantidade média, enquanto as demais amostras uma alta quantidade, enquanto a análise quantitativa os teores de ferro entre as amostras são bem equiparadas com variação máxima de 5,83%.

Foi observado que a amostra 03 teve 13 compostos e as amostras 01 e 02 tiveram 10 e 12 compostos respectivamente, sendo detectado também a presença em comum, em grande quantidade, de Ferro e Sílica e traços dos elementos Magnésio (Mg), Sódio (Na), Manganês (Mn), Tálcio (Ti), Cálcio (Ca), Cloro (Cl) e Enxofre (S).

O Cloro, cujos traços foram encontrados em todas as amostras na Difração, não foi perceptível no ensaio de Fluorescência de Raio X. Tendo em vista que cada ensaio tem um limite de detecção.

As amostras 01 e 03 apresentaram traços de Magnésio e Cálcio, que podem influenciar a pega do cimento e ocasionar alteração do seu volume. Era esperado que a amostra 01 obtivesse resultado diferente da amostra 02, por ter sido extraída

de etapas diferentes do processo de beneficiamento do minério, o que não aconteceu. A amostra 03 por ser de região diferente, não apresentou índices discrepantes, quando comparados com a amostra 02 do mesmo tipo de processo.

A diferença detectada nos resultados de DRX e FRX, entre as amostras, podem ter uma correlação com a homogeneização inadequada antes dos ensaios, tendo em vista que a quantidade de amostra utilizada é reduzida, fazendo com que os compostos e elementos químicos fiquem menos ou mais concentrados naquela quantidade de amostra coletada.

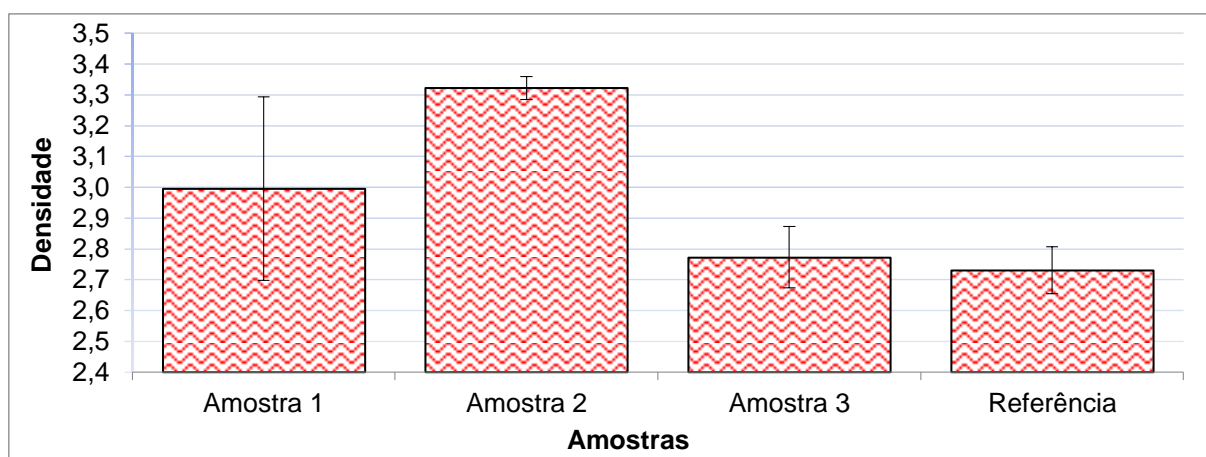
Essa análise mineralógica auxilia na percepção de possíveis reações quando misturados ao cimento para a formação de pasta, argamassa ou concreto. As reações podem ter caráter benéfico ou deletério, devido à presença e concentrações de certos compostos.

Segundo Isaia (2011) desagregações podem ser causadas por expansões devido a reação da cal livre, magnésio e sulfato de cálcio. O magnésio reage, de forma similar, a cal livre, somente na forma cristalina, presente no clínquer, onde hidrata-se de forma muito lenta, ocupando um volume maior que o óxido de cálcio livre original. Já o sulfato de cálcio causa expansão pela formação de sulfoaluminato de cálcio (etringita) com o sulfato de cálcio excedente não utilizado pelo  $C_3A$  durante a pega. Outros compostos interessantes de se avaliar são os óxidos de sódio e potássio ( $Na_2O$  e  $K_2O$ ), conhecidos como álcalis, que podem reagir com agregado (sílica reativa) na fabricação de concreto causando desintegração, conhecido como reação álcali-agregado.

### **4.3 Caracterização física do RMF e CPV**

A caracterização física se deu do RMF e o cimento CP V-ARI, usado como referência, se deu pela densidade demonstrado no Gráfico 01 e granulometria laser representado no Gráfico 02 e Tabela 19.

Gráfico 01 – Densidade

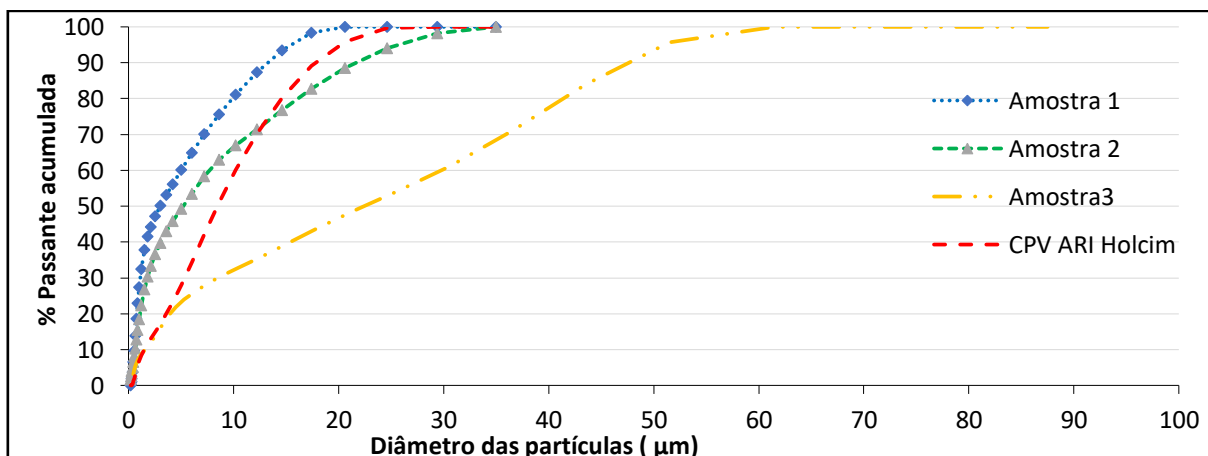


Fonte: Autor, 2017

Analisando o gráfico de densidade, pode-se perceber que o RMF tem tendência de aumento da densidade, quando comparado com o CPV, utilizado como referência. O desvio padrão apresentado entre as amostras 01, 02 e referência demonstram que as médias estão estatisticamente próximas. A amostra 02 apresenta um menor desvio padrão e uma maior densidade, quando comparado com as amostras 01, 03 e referência. Apresenta um aumento considerável de densidade, com aproximadamente 22%, quando comparado com a de referência. Esta elevada densidade pode estar relacionada com a maior concentração de ferro e a presença do mineral Magnetita -  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , assim como a densidade da amostra 01 ser maior que a amostra 03 pode estar relacionada com a presença dos minerais Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e Goetita -  $\text{FeO}(\text{OH})$ , que são minerais mais pesados.

O ensaio de densidade foi feito com análise em água, por isso desconfia-se que o material de referência tenha reagido durante a realização do procedimento, pois o valor achado foi de 2,73 inferior ao 3,15  $\text{g}/\text{cm}^3$ , comumente encontrada nos testes e bibliografia.

Gráfico 02 – Granulometria



Fonte: Autor, 2017

Tabela 19 – Resultada de caracterização física

Amostra	D <sub>10</sub> (µm)	Variação (%)	D <sub>50</sub> (µm)	Variação (%)	D <sub>90</sub> (µm)	Variação (%)
CP V	1,480	-	8,440	-	17,820	-
01	0,530	-64,189	2,980	-64,692	13,240	-25,701
02	0,610	-58,784	5,180	-38,626	21,610	21,268
03	1,530	3,378	22,430	165,758	47,620	167,228

Fonte: Autor, 2017

De forma geral, percebe-se no resultado apresentado no Gráfico 01, uma variação de densidade, que as amostras de RMF são mais pesadas que a do cimento utilizado como referência. As amostras quando comparadas com o cimento apresentaram: Amostra 01 apresentou um aumento de 22,6%, amostra 02 apresentou uma elevação de 18,3% e amostra 03 apresentou 1,55% maior.

Foi realizado granulometria à laser nas amostras de RMF, onde os resultados dos diâmetros médios passantes na #50µm para amostra de referência CPV ARI foi de 8,44 µm, de 2,98µm para a mostra 01, de 5,18µm para a amostra da 02 e de 22,43µm para amostra 03. Percebe-se que a amostra do 03 teve a maior diâmetro de material na #50µm

Extraindo os dados do Gráfico 02 de granulometria, verifica-se que a amostra 01 e 02 apresentam uma finura maior que a do cimento CPV de referência e a amostra 03 apresenta a granulometria mais grossa.

A granulometria mais grossa da amostra 03 tem correlação com a composição mineral constituinte, pois o tempo de moagem foi o mesmo para todas

as amostras e observou-se que a sílica é o material que possui maior dureza e está em maior concentração.

A amostra 01 apresenta uma granulometria mais fina devido a presença mais elevada de Goetita - FeO(OH), elemento com uma dureza menos elevada, inclusive friável a mão.

Observa-se na Tabela 19 a variação de tamanhos das partículas pelos dados de  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$ . Em  $D_{10}$  e  $D_{50}$ , apenas a variação da amostra 03 foi maior que a de referência, mostrando que as partículas das amostras estão maiores que a do cimento. Em  $D_{90}$ , já percebe-se que apenas a amostra 01 se encontra com as partículas menores que o cimento CPV utilizado como referência. A variação entre a amostra 01 e 02 não estão altas e quase todas as faixas granulométricas ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$ ) estão menores que a de referência, nos remetendo à ideia de que este material pode trabalhar com uma boa propensão a filler, melhorando o preenchimento dos vazios deixados pelo cimento.

#### 4.4 Caracterização física pasta

A caracterização física da pasta de cimento foi realizada através do ensaio de índice de consistência processado no laboratório de concreto da UFMG, o qual obteve as medidas médias do espalhamento da base do tronco de cone de argamassa, após o abatimento, descrita na Tabela 20 e Gráfico 03. A finalidade de realizar caracterização física das pastas de cimento com dois fatores a/s foi avaliar o consumo mínimo de cimento e trabalhabilidade.

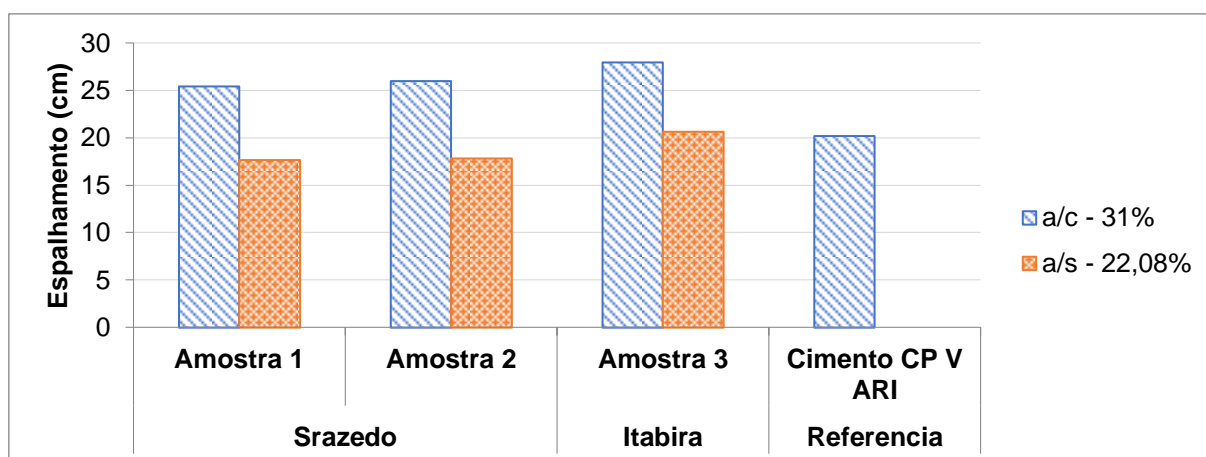
Tabela 20 – Espalhamento médio de consistência em centímetro

Fator Água	Sarzedo		Itabira	Referência
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	CP V ARI
R = 31%	25,43	26,00	27,97	20,23
A=22,08%	17,67	17,83	20,63	-
% de Redução	30.54	31.41	26.22	-

Fonte: Autor, 2017



Gráfico 03 – Espalhamentos médios de *Flow Table*.



Fonte: Autor, 2017

Analisando as amostras com o fator a/s de 31% constata-se um ganho de consistência de mínimo de 26,84% na amostra 01 e um ganho máximo de 39,40% na amostra 03.

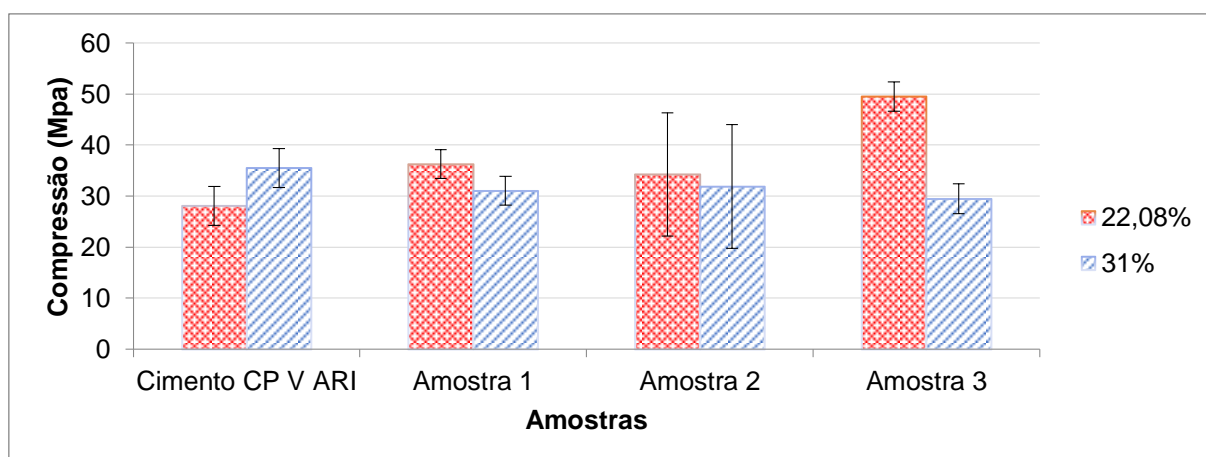
Comparando os fatores de a/s de 31%, com 22,08% entre as mesmas amostras, constata-se que houve uma redução de 30,54% no resultado de espalhamento na amostra 01, para amostra 02 uma redução de 31,41% de espalhamento e para amostra 03 uma redução de 26,22%.

Correlacionando os resultados da fluidez com os da análise granulométrica, para as amostras 01 e 02 era esperado que houvesse um aumento da demanda de água, visto que possuem granulometria mais fina que a do cimento, mas isso não aconteceu. Isto pode estar associado à porosidade diferenciado do RMF, que pode influenciar a demanda de água.

#### 4.5 Resistência à compressão

A resistência axial de compressão foi determinada experimentalmente com a aplicação da carga até a ruptura dos corpos de prova confeccionados com fatores a/s de 31% e 22,08%. Com os resultados obtidos foi confeccionado o Gráfico 04.

Gráfico 04 – Compressão



Fonte: Autor, 2017

Analisando o resultado do Gráfico 04, observa-se que não houve uma variação significativa e nem comprometimento das propriedades mecânicas, visto que ao se substituir 50% do cimento pelo RMF a resistência à compressão se manteve constante. Todas as amostras melhoraram a compressão com a redução do fator a/s para 22%, conforme esperado. A pasta de referência não obteve melhora de resistência com a redução do fator a/s. Seu material ficou muito seco, ocasionando uma dificuldade de adensamento e maior dificuldade de expulsar os vazios internos e como consequência uma maior porosidade e redução da compressão axial.

A pasta moldada com amostra 03, com fator a/s de 22,08%, teve um ganho de resistência aproximado de 39% quando comparada com a de referência. Isso se deve à alta concentração de sílica na composição mineral da amostra da pasta.

Segundo a curva de Abrams, com o aumento da adição de água, espera-se uma redução na resistência à compressão. Entretanto, foi possível observar um aumento da mesma, indicando que houve uma possível reação. Na amostra 3, há indícios de que adição teve um efeito fíler, provocado por um melhor empacotamento de partículas, enquanto que nas amostras 1 e 2 pode ter ocorrido algum efeito de atividade pozolânica devido a granulometria fina e composição acentuada de sílica destas amostras.

Os resultados deste ensaio foram significativamente afetados pela dificuldade da garantia da planicidade das faces de aplicação das cargas e o equipamento

utilizado que possuía uma estrutura rígida para carregamento, gerando concentrações de tensões e um desvio padrão muito superior ao aceitável (10% da média).

## 5. CONCLUSÃO

As reflexões e considerações realizadas durante este trabalho conduziram para a conclusão dos objetivos deste trabalho. Pela revisão bibliográfica encontrou-se estudos de resíduo de mineração, com análises em adição e/ou substituição de aglomerante hidráulico ou agregado miúdo em concreto, produtos cerâmicos, pavimento intertravado, compósitos à base de cimento, como infraestrutura rodoviária, dentre outros.

No ensaio prático deste trabalho concluímos que a água fornecida pela COPASA/MG apresenta um PH neutro e baixo teor de íons de cloreto e sulfato. Por não propiciarem reações expansivas e deletérias em pasta de cimento é, portanto, caracterizada como potável e segura para utilização como água de amassamento e cura.

Na caracterização física do RMF, observou-se que sua densidade é levemente maior que a do aglomerante hidráulico. Pode-se observar, também, que a moagem do RMF depende da dureza dos materiais constituintes, uma vez que o equipamento utilizado e o tempo foram padronizados. Desta forma, observou-se que nas amostras com maior teor de quartzo houve alteração na composição granulométrica.

A mineralogia das amostras revelou heterogeneidade no teor de alguns minerais, sendo a presença predominante de Quartzo -  $\text{SiO}_2$ , Hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Goethita -  $\text{FeO}(\text{OH})$  e Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Na estrutura química presente nas amostras foi verificado que todas apresentam um alto nível de ferro, demonstrando que o processo de extração de ferro da mineradora não está adequado e pode ser melhorado.

Nos ensaios com a pasta, no estado fresco, com substituição de 50% de aglomerante por RMF, a fluidez obtida foi de até 40%, sem a variação do fator a/s. Na caracterização mecânica, não foi observado perda expressiva da propriedade mecânica da pasta confeccionada com RMF com fator a/s de 31%. Desta forma, foi possível observar um ganho de resistência ao se reduzir o fator a/s, o que indica um possível efeito filer ou pozalânico.

Diante dos resultados e verificações experimentais do trabalho, fica comprovada a heterogeneidade do resíduo de minério de ferro, assim como uma densidade levemente elevada comparada com o aglomerante CPV ARI, uma boa compatibilidade com produtos cimentícios comprovada pela proximidade dos resultados de compressão, viabilizando a utilização do RMF como adição/substituição do aglomerante.

Conclui-se que a utilização do resíduo oriundo do processo extrativo do minério ferro é viável e de suma importância, pois reduz o consumo de recursos naturais não renováveis para a construção civil e de outros insumos, como o consumo de energia, além da diminuição de emissão de poluentes, da destruição da paisagem, geração de impacto ambiental originado pelas barragens de concentração de resíduo, redução dos custos com o monitoramento e licenciamento de novas áreas para depósito dos resíduos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACEM - Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações Técnicas - Definição e Classificação**. Disponível em: <http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 28 jan. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 618**: Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete; PA, USA. 2008

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1602/C 1602M-06**: Specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete; PA, USA. 2006

ANVISA – Agencia Nacional de Vigilância Sanitária. **Tabela Equivalência Abertura Malha** Disponível em: [www.anvisa.gov.br/hotsite/farmacopeiabrasileira/arquivos/cp38\\_2010\\_anexos/tabela\\_equivalencia\\_abertura\\_malha\\_tamis.pdf](http://www.anvisa.gov.br/hotsite/farmacopeiabrasileira/arquivos/cp38_2010_anexos/tabela_equivalencia_abertura_malha_tamis.pdf). Acesso em: 05 nov. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMAS MERCOSUL. **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. ABNT. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMAS MERCOSUL. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa aparente e absorção de água. ABNT. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMAS MERCOSUL. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. ABNT. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118** Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. ABNT. Rio de Janeiro, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial, 1991

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregado para concreto – especificação, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência a compressão, 1996

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozol<sup>^</sup>çnicos - Especificação. Rio de Janeiro 1992

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900**: **Água para amassamento de concreto**. Rio de Janeiro, 2009.

BASTOS, Lucas *et al.* Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. **Journal of materials in civil engineering**, v. 28, p. 988-995, out. 2016.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção (Vol. 1)**. 5ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BLEICHER, Lucas; SASAKI, José Marcos. Introdução à difração de raios-X em cristais. **UFC – Universidade Federal Ceará**. Disponível em: <http://www.raiosx.ufc.br/site/wp-content/uploads/downloads/2013/01/apostila.pdf>  
Acesso em: 22 jan. 2018.

BRASIL. Presidência da República, **Lei 12.334/2010**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm). Acesso em: 02 out. 2017.

BRISOLA, Daisiana Frozi. **Otimização no preparo de amostra para análise em espectrofotometro de fluorescência de raio X**. Disponível em: <http://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Quarteamento.pdf> Acesso em: 21 fev. 2018.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Mixing water for concrete. Specification for sampling testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as maxing water for concrete. **BS EN 1008:2002**.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Methods of test for water for marking concrete (including notes on the suitability of the water). **BS 3148:1980 (W/D)**.

CARRASCO, E.V.M, *et al.* Study Characterization of Mortars With Iron Ore Tailing Destructive and Nondestructive Test. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 31-38, nov. 2016.

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais – **Qualidade de água**. Disponível em: <http://www2.copasa.com.br/servicos/qualidadeagua/pesqtel.asp?letra=B&cidade=1543>. Acesso em: 20 jan. 2018.

COSTA, Ayrton Vianna. **Concreto com rejeito de sinter feed: Estudo comparativo de desempenho e caracterização microestrutural**. 280 f. Tese Doutorado - UFMG Escola de Engenharia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

COSTA, S.M. **Estudo de Reologia e da Microestrutura de pasta de Cimento Portland com Adição de Nanosílica Estabilizada**. 177 f. Tese - UFMG Escola de Engenharia de Minas Gerais , Belo Horizonte, 2017.

Dicionário Infopédia da Língua Portuguesa. Disponível em: [www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa-aa/agregado](http://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa-aa/agregado). Acesso em 10 nov. 2017.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **RAL – Relatório Anual de Lavra**. Disponível em: <https://ralweb.dnpm.gov.br/SCA/Site/Login.aspx?ReturnUrl=%2fRAL%2fSite%2fDeclaracoes%2fAbrirRal.aspx>. Acesso em: 02 set. 2017.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente – **Inventário estadual de barragens do estado de Minas Gerais**. Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/fean/inventario de barragem 2011.pdf](http://www.feam.br/images/stories/fean/inventario%20de%20barragem%202011.pdf). Acesso em: 28 jan. 2018.

FERREIRA, K.C. *et al.* **Estudos De Aproveitamento de Rejeitos de um Minério de Ferro Itabirítico da Região de Morro do Pilar**. *Holos*, ano 32, v.2 p. 22-83, fev. 2016.

FONSECA, Gustavo Celso. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Dissertação de Mestrado – Universidade federal de Minas Gerais. Belo Horizonte / MG, 2010.

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

G1 – *Globo* /Jornal Globo de Notícias. Disponível em: <http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/barragem-de-rejeitos-se-rompe-em-distrito-de-mariana.html> . Acesso em: 20 set. 2017.



Hagemann, S. E. **Apostila de Materiais de Construção Básicos**, Universidade Aberta do Brasil do Instituto Federal Sul-rio-grandense, n.145, Rio Grande do Sul, 2011.

HUANG, Xiaoyan; RANADE, Ravi; F.ASCE, Victor C. Li. Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore tailings Powder as Replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, nº 7, p.923-931, jul. 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística . **Síntese Brasil - Os países do mundo**. 2016. Disponível em: <https://pais.es.ibge.gov.br/#/pt/pais/brasil/info/sintese>. Acesso em: 20 ago. 2017.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Portal de Mineração**. 2017, disponível em: [http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB\\_REL\\_IBRAM\\_2017.pdf](http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB_REL_IBRAM_2017.pdf). Acesso em: 20 set. 2017.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciencia e Tecnologia** 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1V.

ISAIA, G. C. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciencia e Engenharia de Materiais** 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2007. 1V

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.;GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Enciclopédia Multimídia de Minerais**. [on-line].ISBN: 85-89082-11-3 Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html> Acesso em: 21 jan. 2018

MME – Ministério de Minas e energia. **Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodenal(201 – 2030) de Geologia, Mineração e Transporte mineral** Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P09\\_RT18\\_Perfil\\_da\\_Minerao\\_de\\_Ferro.pdf/e9ef3b57-cdbd-4166-b39d-f0f26f28e3ca](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P09_RT18_Perfil_da_Minerao_de_Ferro.pdf/e9ef3b57-cdbd-4166-b39d-f0f26f28e3ca) Acesso em: 21 fev. 2018

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do concreto**; tradução Ruy Alberto Cremonini. 2ª ed. Porto Alegre, Brookman, 2013

OTempo. **O Tempo**. 2014., disponível em: <http://www.otempo.com.br/cidades/limpeza-dos-rios-n%C3%A3o-foi-feita-1.914568>. Acesso em: 12 set 2017.

PUC – Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. **Fundamentos teóricos da técnica de análise espectrométrica por fluorescência de raio-X**. Certificado digital nº 0813396/CA, disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18799/18799\\_6.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18799/18799_6.PDF) Acesso em: 10 jan 2018.

RIBEIRO, C. C., PINTO, J. D., STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 3ª ed. Belo Horizonte, 2011.

SANT'ANA FILHO, Joaquim *et al.* Technical and Environmental Feasibility of Interlockin Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 1-7, jan. 2017.

SANTOS, White José. **Argamassa de alto desempenho**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora / MG, 2011.

SILVA, F. L. *et al.* Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramicl. **Construction and Building Materials**, v. 40, part B p. 16085-16089, dez. 2014.

SILVA, R. G. O. **Estudo Laboratorial de desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de mineração de ferro**. 132 f. Dissertação de Metrado – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto/MG, 2010.

Vale. **Entenda o que são as barragens de rejeito**. 2016. Disponível em: <http://www.vale.com/samarco/PT/Paginas/entenda-barragens-rejeito.aspx>. Acesso em: 05 out. 2017.