



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil

Curso de Graduação em Engenharia Civil

---



**Gabriela Andrade Ferreira**

# **VIABILIDADE TÉCNICA DA AREIA FERROSA COMO AGREGADO EM CONCRETOS**

Ouro Preto

2021

# Viabilidade Técnica da Areia Ferrosa como Agregado em Concretos

Gabriela Andrade Ferreira

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 26 de março de 2021 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.  
Banca examinadora:

Fernanda Pereira da Fonseca Elói

Vanessa Pereira Santana

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Guilherme Jorge Brigolini Silva – UFOP

Co-orientador: M.Sc.Laís Cristina Barbosa Costa – UFOP

Ouro Preto

2021



SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F383v Ferreira, Gabriela Andrade .

Viabilidade técnica da areia ferrosa como agregado em concretos.  
[manuscrito] / Gabriela Andrade Ferreira. - 2021.  
59 f.

Orientadores: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva Silva, Ma. Laís  
Cristina Barbosa Costa Costa.

Coorientador:

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola  
de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Concreto. 2. Minas e mineração - Rejeitos. 3. Reaproveitamento -  
Agregado miúdo. I. Costa, Laís Cristina Barbosa Costa. II. Silva, Guilherme  
Jorge Brigolini Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716

Viabilidade Técnica da Areia Ferrosa como Agregado em  
Concretos

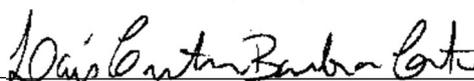
Gabriela Andrade Ferreira

Monografia de conclusão de curso para  
obtenção do grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto  
defendida e aprovada em 26 de março de  
2021 como parte dos requisitos para a  
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.  
Banca examinadora:



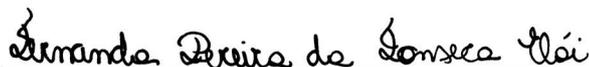
---

Orientador: Prof. D.Sc. Guilherme Jorge Brigolini Silva – UFOP



---

Orientador: M.Sc. Laís Cristina Barbosa Costa – UFOP



---

Membro: M.Sc. Fernanda Pereira da Fonseca Elói - UFOP



---

Membro: M.Sc. Vanessa Pereira Santana - UFOP

*Dedico este trabalho aos meus pais, mestres e amigos que torceram por mim durante toda a minha trajetória dentro da UFOP.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos do Grupo Ative, professor Dr. Guilherme Brigolini pela orientação, por me permitir fazer parte da equipe e sempre incentivar minhas ideias, Ms. Fernanda Elói pela coorientação e ajuda nos projetos de iniciação, Letícia Figueiredo e Karine Santos pela ajuda nos ensaios.

Assim como todos do Grupo Reciclos, Ms. Laís Barbosa pela coorientação nessa monografia, ajuda nos ensaios e interpretação de resultados, professor Dr. Ricardo pela oportunidade de fazer parte da sua equipe e me possibilitar o uso das instalações do Laboratório de Materiais de Construção, Júnio sempre disposto a ajudar, disponibilizando seu tempo e esforço e demais membros da equipe por toda ajuda e parceria.

Aproveito para demonstrar minha gratidão também à Fundação Gorceix pela oportunidade das bolsas de iniciação científica. A todos os professores e mestres que me permitiram chegar até aqui.

Por último e de forma muito especial, agradeço minha família pelo incentivo, aos amigos da Engenharia Civil pelo companheirismo e a Deus que me deu forças nos momentos de dificuldade.

## RESUMO

A exploração de recursos naturais pelo homem vem causando danos significativos ao meio ambiente devido a própria atividade e a geração de resíduos subsequentes. Um exemplo que se destaca é a indústria da mineração, visto que além do impacto ambiental inerente na atividade mineradora, há demanda por áreas extensas para deposição de rejeitos. Com isso, cresce a busca por novas alternativas que permitam reutilizar os resíduos dessas atividades industriais e minimizar os impactos ambientais. Nesse trabalho é estudado um rejeito do tratamento químico de bauxita para obtenção de alumina. O beneficiamento para obtenção da alumina é conhecido como Processo Bayer e gera um rejeito de fração grosseira, que foi nomeado neste trabalho como areia ferrosa devido a sua composição com cerca de 30% de ferro e sua distribuição granulométrica. Para analisar as suas características e o seu provável comportamento quando compondo uma matriz cimentícia, foram feitos estudos de caracterização física e química da areia ferrosa (AF), sendo comparado a uma areia natural (AN). Assim, nessa pesquisa foram produzidos quatro traços de concretos, sendo dois com areia natural e dois com areia ferrosa, tendo consumos de cimento fixados em 425kg/m<sup>3</sup> e 533kg/m<sup>3</sup>. Esses concretos foram avaliados quanto as suas propriedades físicas e mecânicas. Também foram realizados ensaios de durabilidade em argamassas produzidas com areia ferrosa e areia natural. Pode-se atestar comportamentos semelhantes ou superiores da areia ferrosa em relação a natural, como produção de concretos com resistência a compressão até 26% maior que o concreto convencional. Com relação a durabilidade, a areia ferrosa apresentou expansibilidade maior do que os limites recomendados por norma, indicando uma possível reatividade. Dessa forma, demonstra-se com esse trabalho a possibilidade de reaproveitamento de mais um material de construção na construção civil, com ressalvas de alguns resultados a serem mais estudados.

Palavras-chaves: concreto, agregado miúdo, resíduo de mineração, reaproveitamento.

## ABSTRACT

The exploitation of natural resources by man has been causing significant damage to the environment due to the activity itself and the generation of subsequent waste. An example that stands out is the mining industry, since in addition to the environmental impact inherent in mining activity, there is a demand for extensive areas for tailings deposition. As a result, the search for new alternatives for reusing the waste from these industrial activities and minimizing environmental impacts is growing. In this work, a waste from the chemical treatment of bauxite to obtain alumina is studied. The processing to obtain alumina is known as the Bayer Process and generates a coarse fraction tailings, which was named in this work as ferrous sand due to its composition with about 30% iron and its granulometric distribution. To analyze its characteristics and its probable behavior when composing a cementitious matrix, studies of physical and chemical characterization of ferrous sand (AF) were made, being compared to a natural sand (AN). Thus, in this research, four concrete strokes were produced, two with natural sand and two with ferrous sand, with cement consumption fixed at 425kg / m<sup>3</sup> and 533kg / m<sup>3</sup>. These concretes were evaluated for their physical and mechanical properties. Durability tests were also carried out on mortars produced with ferrous sand and natural sand. It is possible to attest to similar or superior behaviors of ferrous sand in relation to natural sand, such as the production of concrete with compressive strength up to 26% higher than conventional concrete. With regard to durability, ferrous sand showed greater expandability than the limits recommended by the norm, indicating a possible reactivity. Thus, this work demonstrates the possibility of reusing yet another construction material in civil construction, with reservations for some results to be further studied.

Keywords: concrete, fine aggregate, mining waste, reuse.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de fabricação do cimento Portland .....	7
Figura 2 - Extração de areia no leito do rio Paraíba do Sul - São Paulo .....	10
Figura 3 - Extração de areia em planície costeira - Campo Largo, PR .....	10
Figura 4 - Graduação do solo - Fonte: Análise granulométrica do Solo - Filipe Marinho, 2020, Guia da Engenharia.....	12
Figura 5 - Fluxograma das etapas do processo Bayer - Adaptado de IAI.....	14
Figura 6 - Barragem de Marzagão - Ouro Preto, MG.....	15
Figura 7 - Barril de AF em seu estado natural .....	17
Figura 8 - Beneficiamento de areia ferrosa no separador magnético tipo tronco de cone .....	18
Figura 9 - AF em frações separadas pelo ensaio de granulometria.....	19
Figura 10 - Ensaio de massa específica pelo método do Frasco de Chapman ..	20
Figura 11 - Ensaio de massa unitária da AF .....	20
Figura 12 - Absorção de água da AF .....	21
Figura 13 - CAF-425 moldado e adensado antes de ir para câmara úmida .....	23
Figura 14 - Ensaio do concreto no estado fresco.....	24
Figura 15 - Corpos de provas submetidos à compressão.....	25
Figura 16 - Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico de CAF-533 .....	26
Figura 17 - Distribuição granulométrica .....	28
Figura 18 - Gráfico slump x aditivo .....	30
Figura 19 - Massa específica no estado endurecido.....	32
Figura 20 - Gráfico de absorção de água e índice de vazios.....	32
Figura 21 - Velocidade de pulso ultrassônico .....	33
Figura 22 - Resistência à compressão simples .....	34
Figura 23 - Tabela de classificação do grau de reatividade da NBR 15577-1 ....	36

Figura 24 - Corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de expansibilidade na autoclave .....37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimento Portland. Adaptado de (IBRACON, 2009) .....	5
Tabela 2 - Dosagem dos traços .....	22
Tabela 3 - Composição química da AF e AN .....	29
Tabela 4 - Massa específica do concreto no estado fresco .....	31
Tabela 7 - Reatividade álcali-agregado .....	35
Tabela 8 - Resultados de teste de expansibilidade na autoclave .....	38

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para  
Construção

ANM - Agência Nacional de Mineração

AN - Areia natural

AF - Areia ferrosa

FRX - Fluorescência de raio X

IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto

LMC<sup>2</sup> - Laboratório de Materiais de Construção Civil

RAA - Reação álcali-agregado

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

VPU - Velocidade de pulso ultrassônico

## SUMÁRIO

Agradecimentos .....	VI
Resumo .....	I
Abstract.....	II
Lista de Figuras .....	I
Lista de Tabelas.....	III
Lista de Siglas.....	IV
Sumário .....	V
1 Introdução .....	1
1.1 Objetivo .....	2
1.1.1 Objetivos Específicos.....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Concreto de Cimento Portland.....	4
2.2 Agregados para concretos.....	9
2.2.1 Extração de agregado miúdo natural e impactos ambientais.....	9
2.2.2 Influência das características do agregado miúdo nas propriedades do concreto .....	11
2.3 Mineração de bauxita .....	13
2.3.1 Processo Bayer.....	13
3 Materiais e Métodos.....	16
3.1 Caracterização dos agregados miúdos .....	18
3.1.1 Caracterização física.....	18
3.1.2 Caracterização química .....	21

3.2	Dosagem do concreto.....	22
3.3	Caracterização do concreto no estado fresco .....	23
3.4	Caracterização do concreto no estado endurecido.....	24
3.4.1	Massa específica, absorção de água e índice de vazios .....	24
3.4.2	Resistência a compressão .....	25
3.4.3	Velocidade de pulso ultrassônico.....	26
3.4.4	Durabilidade .....	26
4	Resultados .....	27
4.1	Caracterização física e química dos agregados miúdos.....	27
4.2	Caracterização do concreto no estado fresco .....	30
4.3	Caracterização do concreto no estado endurecido.....	31
4.3.1	Massa específica, absorção e índice de vazios .....	31
4.3.2	Velocidade de pulso ultrassônico.....	33
4.3.3	Resistência mecânica a compressão.....	34
4.3.4	Durabilidade .....	35
5	Conclusão .....	39
	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>39</b>
	Referências.....	40

# 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais consumido pelo homem, depois da água. Segundo o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) (2009) estima-se que no Brasil 30 milhões de metros cúbicos de concreto são produzidos anualmente nas centrais. Em seu estado fresco molda-se a qualquer forma geométrica desejada tendo performance mecânica satisfatória no estado endurecido com relativo baixo custo, sendo esses os principais motivos da sua vasta utilização (Mehta & Monteiro, 2014).

Segundo os estudos de Luz (2012) a utilização do concreto causa impactos ao meio ambiente principalmente devido a obtenção de seus componentes: cimento e agregados. A produção do cimento Portland demanda extração de matéria-prima, tem significativo gasto energético e, devido ao processo de queima, é um dos maiores emissores de gases poluentes, sendo responsável por 7% da emissão mundial de gás carbônico na atmosfera, no Brasil esse fator é reduzido e próximo de 2,7% (CEBDS, 2019).

Com relação aos agregados, o seu processo de extração tem significativo consumo de água e modifica a paisagem e a biota existente (Silva, 2012). A Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção afirma que em 2014 houve uma demanda de aproximadamente 740 milhões de toneladas de brita e areia no Brasil (ANEPAC, 2019). Agregados graúdos, normalmente vindos de pedreiras, geram decapeamento do solo, emissão de particulados, poluição de solo e água, perda de biodiversidade e retirada de recursos naturais exauríveis (ANEPAC, 2019). Agregados miúdos, provenientes de lavra em leito de rios ou de lavras em encostas, geram os mesmos impactos que os agregados graúdos, além da possibilidade de exposição do aquífero, mudanças na geometria do leito do rio, no fluxo e turbidez da água (ANEPAC, 2019).

Em contrapartida tem-se a extensa geração de resíduos pela indústria metalúrgica. Destaca-se o refinamento do mineral bauxita pelo processo Bayer para produção de alumina. Em 2017 quase 50 milhões de toneladas de alumínio foram produzidas no Brasil pelos dados da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2018). Esse processo leva a formação de diversos resíduos, dentre eles uma fração grosseira, como uma areia, advinda do processo de '*desilication*', em português

dessilicação ou dessilicagem (retirada de sílica). Os rejeitos do processo Bayer são dispostos em barragem e contém hidróxido de sódio (NaOH) em sua composição, que é inserido na etapa de digestão do mineral (IAI, 1972). Esses rejeitos dispostos em barragem geram riscos ao meio ambiente e a população local. Desastres atuais como as barragens de deposição de resíduos de minério de ferro que se romperam em Mariana no ano de 2015 e Brumadinho no ano de 2019 mostram o impacto que sua má gestão pode ocasionar, buscas por novas soluções tem movimentado a sociedade científica (Laschefski, 2020).

Com isso, ressalta-se a importância de reincorporar os resíduos na cadeia produtiva e minimizar esses impactos que tem danos irreparáveis. Considerando a grande demanda por recursos naturais da construção civil, uma boa alternativa é o reaproveitamento dos resíduos gerados no refinamento do mineral bauxita para fabricação da alumina como materiais de construção civil. Resíduos da produção da alumina já vem sendo aplicados por alguns pesquisadores na produção de novos tipos de cimento alcalino ativado (Ke, et al., 2015); (Barros, 2017); (Fagundes, 2019).

Assim, visando contribuir com o avanço tecnológico da reutilização de rejeitos das indústrias químicas de mineração, será produzido um concreto com substituição total de areia natural por uma areia reciclada obtida a partir da fração grosseira dos resíduos da fabricação de alumínio denominada areia ferrosa. O comportamento do concreto produzido com esse rejeito será analisado quanto suas propriedades físicas e mecânicas, a fim de investigar a viabilidade técnica da reutilização desse resíduo.

## **1.1 Objetivo**

Investigar o desempenho de concretos produzidos com areia reciclada do processo Bayer, areia ferrosa, comparando a concretos produzidos com areia natural.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- Caracterizar física e quimicamente a areia ferrosa e a areia natural;
- Determinar as propriedades mecânicas e físicas dos concretos produzidos com areia ferrosa em comparação ao convencional;

- Avaliar o potencial reativo da areia ferrosa através das técnicas de reatividade álcali-agregado e expansão acelerada em autoclave;

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Concreto de Cimento Portland**

Constituído por uma mistura de cimento Portland, água e agregados (miúdos e graúdos) em quantidades pré-determinadas, o concreto tem componentes relativamente baratos e facilmente encontrados em qualquer lugar do mundo (Mehta & Monteiro, 2014) (IBRACON, 2009).

A vasta aplicação do concreto é justificada pelo seu baixo custo e a sua resistência a água, que diferente da madeira e do aço, pode ser utilizado para controle, transporte e armazenamento hidráulico sem demandar demasiados tratamentos. Além disso, existe a facilidade de utilização admitindo diferentes formas e aplicações, sendo ainda resistente a presença de fogo (Mehta & Monteiro, 2014).

Assim, o concreto é definido pela ASTM (American Society for Testing and Materials) como um compósito que consiste em um meio de ligação formado por um material aglomerante, neste caso cimento hidráulico, e água ao qual está incorporada partículas ou fragmentos de agregados (ASTM, 2000).

Os agregados são materiais granulares usualmente compostos por minerais representando cerca de 70-80% do volume total do concreto (Lamond, 2006). Os agregados miúdos são aqueles que dispõem de uma granulometria menor que 4,75mm e quando maiores que isso são chamados de agregados graúdos (ASTM, 2000).

O cimento é um material fino e seco, que apresenta propriedades aglomerantes quando ocorre a sua hidratação. Ele é chamado de hidráulico quando os produtos de hidratação se tornam estáveis na presença de água. O cimento Portland é um tipo de cimento hidráulico essencialmente constituído de silicatos e aluminatos reativos. Este é produzido a partir da mistura do clínquer com sulfato de cálcio, podendo conter adições minerais como filler, calcário, pozolanas e outros materiais cimentantes suplementares (Mehta & Monteiro, 2014).

A variação da composição do cimento faz com que esse tenha diferentes aplicações. A Tabela 1 a seguir mostra os tipos de cimento atualmente existentes no Brasil. Destaca-se que a NBR 16697 (ABNT, 2018) permite que todos os cimentos

Portland produzidos no Brasil, com exceção do CP I, contenham até 10% de filler calcáreo.

Tabela 1 - Tipos de cimento Portland. Adaptado de (IBRACON, 2009)

	<b>Sigla</b>	<b>Características</b>
<b>Cimento Portland Comum</b>	CP I	Cimento Portland sem qualquer adição, exceto gesso, usado em construções gerais.
<b>Cimento Portland Composto</b>	CP II	Tem adição de escória, pozolana ou filler, podendo também ser utilizado em construções gerais.
<b>Cimento Portland de Alto Forno</b>	CP III	Contém escória de alto forno em proporções entre 35% a 70% de sua massa. Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, sendo comumente usado em construção de barragem.
<b>Cimento Portland Pozolânico</b>	CP IV	Contém pozolana que varia de 15% a 30% em massa. Recomendado para obras que exigem resistência a ação de água corrente devido as suas características de alta resistência e baixa permeabilidade.
<b>Cimento Portland de Alta Resistência Inicial</b>	CP V - ARI	Como atinge alta resistência em idades menores é recomendado para peças de concreto pré-moldado. Essa característica é alcançada pela utilização de uma dosagem própria de calcário e argila na produção de clíquer e uma moagem mais fina do cimento.

A fabricação do cimento Portland se dá em indústrias químicas de transformação. Primeiro as matérias primas (calcário e argila) são extraídas das jazidas. O calcário é triturado em um britador e passado em uma peneira de 30mm, onde material retido volta para o processo de britagem. Em seguida eles seguem para estocagem e a partir de então existem dois métodos de produção: por via seca e por via úmida (Andriolo, 1984).

Por via seca o material estocado vai para silos, onde são cominuídos por moinhos de bola para reduzir em torno de 80% sua faixa granulométrica. As partículas mais finas dispersas no moinho são captadas por um separador e levadas para homogeneização feita por agitação pneumática. As mais grossas seguem para mais um ciclo de moagem para serem homogeneizadas em seguida (Neville, 1982).

O processo por via úmida, que é mais antigo e tem um gasto energético maior, é feito incluindo água no processo de moagem da matéria prima e ilustrado na Figura 1. A pasta obtida é encaminhada para silos, em seguida para tanques de homogeneização, que permanecem em agitação para evitar a segregação, e depois para estocagem. A fração grosseira volta para o circuito (Andriolo, 1984).

Após a moagem e controle da composição química do pó ou da pasta, o material é levado para calcinação em um forno rotativo que chega até 1500°C. Nessa etapa são formados os torrões de clínquer que são resfriados rapidamente através de jatos d'água ao sair do forno para elevar a sua reatividade. Por último, o clínquer é levado novamente ao moinho de bola, onde são incrementadas as adições que darão as características desejadas ao cimento, para ser, por último, estocado e ensacado (Andriolo, 1984).

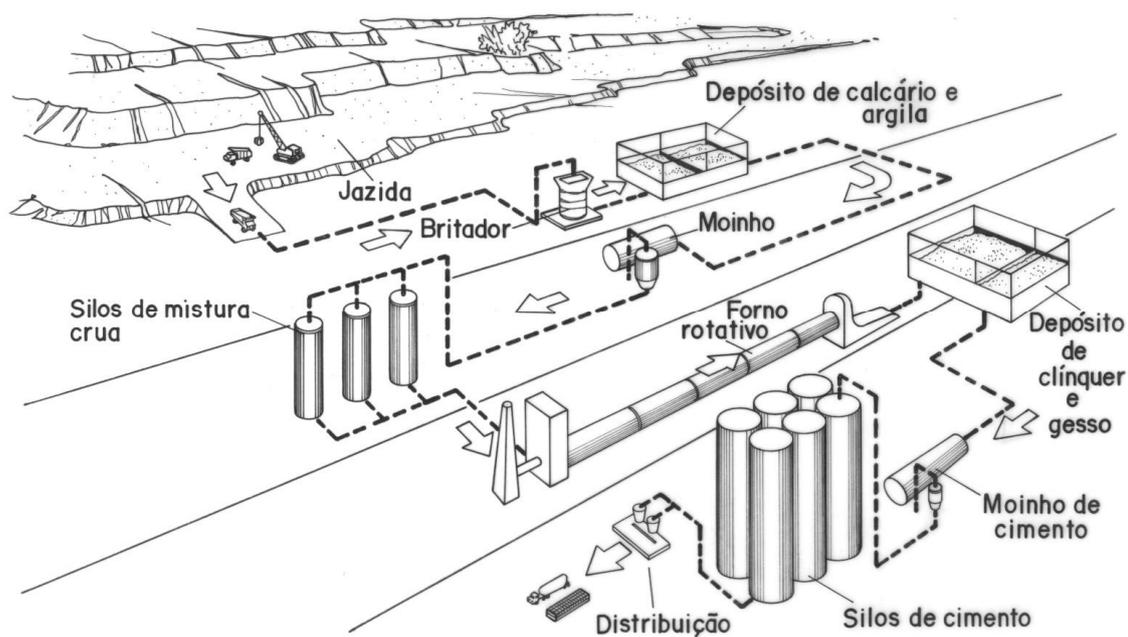


Figura 1 - Processo de fabricação do cimento Portland

FONTE: Resdil, 2019.

Quimicamente o cimento Portland é composto por silicatos e aluminatos. Com relação aos silicatos majoritariamente estão presentes o silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e o beta silicato dicálcico ( $\beta-C_2S$ ) podendo conter um baixo teor de íons de magnésio, alumínio, ferro, potássio, sódio e enxofre. As formas impuras dos silicatos são a alita ( $C_3S$ ) e a belita ( $C_2S$ ) (Mehta & Monteiro, 2014). Quanto aos aluminatos, o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) é o principal aluminato do clínquer, mas tem-se também a presença de ferroaluminatos de cálcio que pertencem a série de soluções sólidas das ferritas ( $C_2A-C_2F(F_{ss})$ ). Como os silicatos, esses compostos podem conter magnésio, sódio, potássio e sílica (Mehta & Monteiro, 2014).

Vista toda essa estrutura encontrada no cimento Portland, para que esta gere uma matriz enrijecida e resistente, faz-se então adição de água, a partir desse momento dá-se início ao processo de hidratação (Mehta & Monteiro, 2014). O processo de hidratação do cimento resume-se em reações simultâneas dos compostos anidros com a água. A hidratação dos aluminatos é mais acelerada e responsável pelo enrijecimento da pasta de cimento enquanto que a dos silicatos são responsáveis pelo endurecimento que caracteriza a resistência da matriz (Neville, 1982)

A hidratação dos silicatos forma um silicato hidratado de cálcio (C-S-H). De um modo geral o C<sub>3</sub>S é encarregado pela resistência da matriz cimentícia nas quatro primeiras semanas, ao passo que o C<sub>2</sub>S se hidrata de forma mais lenta e promove o aumento da resistência de forma mais significativa após as quatro semanas (Neville, 1982). A hidratação dos silicatos gera um gel rígido pouco cristalino. Espera-se que cimentos que tem mais C<sub>3</sub>S alcancem resistências maiores que aqueles com maior proporção de C<sub>2</sub>S, visto que o primeiro composto ao hidratar gera um teor menor de C-S-H e maior de hidróxido de cálcio (Mehta & Monteiro, 2014).

A reação do C<sub>3</sub>A e água é rápida e gera alto calor de hidratação, que é reduzido pela adição de gipsita, a fim de tornar o cimento um material utilizável. A pega é determinada pela relação aluminato/sulfato na fase aquosa. O correto proporcionamento da gipsita é necessário para evitar pega instantânea ou demasiadamente demorada, uma pega, normalmente, varia de 2 a 4 horas (Petrucci, 1983).

Além da composição química e mineralógica do cimento outro fator que interfere no desempenho de matrizes cimentícias é a finura do cimento Portland, grãos maiores de 75 µm podem nunca ser hidratados completamente, enquanto aqueles menores que 45 µm tem a hidratação muito rápida (Mehta & Monteiro, 2014).

Após a cura do concreto, um aspecto muito relevante para aplicabilidade e classificação é a sua resistência mecânica, sendo um dos fatores determinantes para definição do seu traço. O desempenho mecânico do concreto é medido em termos de resistência à compressão, normalmente fazendo uso de corpos de prova curados a temperatura e umidade padrão com idades de 28 dias. O concreto pode ser classificado quanto a sua classe de resistência como: baixas (menor que 20MPa); média (entre 20 e 40MPa); e alta (acima de 40MPa). Fatores como a relação a/c (água/cimento), condições de adensamento e cura influenciam diretamente na porosidade da matriz e conseqüentemente na sua propriedade mecânica. Quanto maior o fato a/c menor a resistência a compressão e maior a porosidade (Mehta & Monteiro, 2014). Outra propriedade mecânica é o módulo de elasticidade que caracteriza o concreto pela sua deformação na aplicação de carga e conseqüente reversibilidade ao sofrer o descarregamento, os valores usuais variam de 14 a 40GPa (Petrucci, 1983).

Pelo fato do concreto ser utilizado em construções civis é esperado dele uma boa durabilidade. Agentes agressivos decorrentes de ações físicas, como dissolução; ações químicas, como formação de substâncias expansivas; ou ainda ações mecânicas, como a erosão podem comprometer o desempenho do concreto (Petrucci, 1983). Uma patologia relevante relacionada a durabilidade do concreto é a reatividade álcali-agregado (RAA), que é responsável por expansão e fissuração do concreto quando ocorrem reações químicas entre álcalis, íons hidroxila na pasta de cimento Portland e certas sílicas reativas (Mehta & Monteiro, 2014). Essas reações químicas ocorrem em agregados que tem a presença de minerais do grupo sílica como opala, calcedônia, ou do grupo dos silicatos como vermiculita, illita, esmectita e do grupo dos carbonatos como dolomita (Luz & Almeida, 2012).

## **2.2 Agregados para concretos**

Os agregados são materiais minerais obtidos naturalmente (como areia e cascalho) ou artificiais, advindos de processos de britagem de rochas consolidadas. No Brasil, o vasto território terrestre influencia no tipo e características dos agregados disponíveis e utilizados. Os agregados graúdos produzidos através de granito e gnaisse são os mais utilizados no país, entretanto tem-se empregado basaltos na região sul e sudeste; calcários e dolomitos nos estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia; e lateritas em Minas Gerais e na região amazônica (Luz, 2012)

O controle de qualidade nos agregados utilizados na construção civil se mostra cada vez mais importante para evitar danos futuros as edificações. A realização de ensaios tecnológicos em laboratórios próprios é essencial para sua caracterização. Características mineralógicas, petrográficas, químicas e físicas são importantes para detectar problemas tais como o rompimento de sua estrutura (Luz, 2012).

### **2.2.1 Extração de agregado miúdo natural e impactos ambientais**

A extração mineral de areia natural depende do tipo de depósito ao qual ela se encontra. No Brasil 70% da extração ocorre em cavas de lavras inundadas; os outros 30% em cavas secas, planícies costeiras, fundos de vales entre outros, como ilustram as Figura 2 e Figura 3 (Silva, 2012).



Figura 2 - Extração de areia no leito do rio Paraíba do Sul - São Paulo

FONTE: Estudos avançados, vol 24, 2010



Figura 3 - Extração de areia em planície costeira - Campo Largo, PR

Fonte: Revista Escola de Minas, vol 56, 2003

É fato que a extração de agregados miúdos contribui com o fornecimento de insumos importantes na cadeia produtiva e principalmente na construção civil. Porém, a forma como essas atividades ocorrem, resultam em um alto impacto ambiental podendo ser consideradas insustentáveis a longo prazo, principalmente considerando que os recursos não são renováveis (Silva, 2012).

Ao abrir uma lavra para extração de areia, inúmeros são os impactos causados. Inicialmente há a retirada da cobertura vegetal da margem dos rios causando degradação da paisagem e intensificando o processo de assoreamento dos leitos. Em seguida é realizado um decapeamento do solo para retirada da sua camada superficial, alterando o ecossistema local devido a mudança da vegetação. A abertura de cava pode expor o aquífero e facilitar a contaminação das águas por meio de ação humana. Além disso as lavras de areia natural são normalmente feitas próximas aos centros urbanos, a fim de reduzir o valor do frete do produto, o que ainda pode afetar o meio ambiente ao qual vive essa população como geração de poeira, vibrações, ruídos e até mesmo prejudicando a qualidade da água, que pode vir a ser utilizada para captação e consumo humano ao longo de seu curso (Alexander & Mindess, 2005).

### **2.2.2 Influência das características do agregado miúdo nas propriedades do concreto**

As características dos agregados interferem no desempenho dos concretos tanto em seu estado fresco quanto em seu estado endurecido. Os procedimentos para as caracterizações dos agregados miúdos são normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Caracterizações químicas e físicas são importantes para definir os componentes desses materiais, já que pode apresentar certos minerais e substâncias reativas (Luz & Almeida, 2012). A massa específica e a massa unitária são parâmetros importantes na dosagem do concreto, já que consideram o espaço que o mesmo ocupará na matriz cimentícia e expressam indiretamente a porosidade do agregado (Mehta & Monteiro, 2014). O formato e a textura do grão interferem na aderência dos mesmos na mistura, conseqüentemente influenciam na resistência final do concreto. Por exemplo, grãos com superfícies ásperas se aderem melhor a pasta de cimento, aumentando a resistência do concreto e diminuindo sua porosidade (Neville, 1982).

Segundo a normativa C-125 (ASTM, 2000) os grãos que se encontram na faixa de 0,75 $\mu$ m a 4,75mm recebem a denominação de agregados miúdos, enquanto que a NBR 7211 (ABNT, 2009) classifica como agregado miúdos aqueles retidos entre 150 $\mu$ m e 4,75mm. Um agregado com curva granulométrica contínua e bem graduado é responsável por um melhor entrosamento entre as partículas visto que o material mais fino preenche os espaços deixados pelas partículas maiores tornando a matriz mais densa. Quando o agregado é mau graduado, sendo composto predominantemente por uma fração de partículas há um baixo entrosamento e são encontrados diversos vazios na matriz (Pinto, 2006). A Figura 4 ilustra os tipos de graduação, os solos bem graduados apresentam uma ampla gama de tamanhos de grãos, um solo de graduação uniforme apresenta grãos de tamanhos semelhantes, enquanto solo de graduação aberta apresenta grãos de dimensão extremas, muito grandes ou muito pequenos. Um valor diretamente relacionado ao entrosamento do agregado é o seu índice de vazios.



Figura 4 - Graduação do solo - Fonte: Análise granulométrica do Solo - Filipe Marinho, 2020, Guia da Engenharia.

Além disso, a granulometria do agregado tem significativa influência na trabalhabilidade, consumo de água e cimento em matrizes cimentícias. Dessa forma, agregados miúdos de fração grosseira geram concretos mais ásperos e menos trabalháveis, enquanto agregados miúdos mais finos são responsáveis por originar concretos mais plásticos existindo, no entanto, a preocupação com exsudação. O aumento de trabalhabilidade ocasionado pela utilização de frações finas resulta no aumento do consumo de água e, conseqüentemente, do consumo de cimento (Mehta & Monteiro, 2014). Quanto melhor distribuído granulometricamente o agregado, menor o consumo do cimento hidráulico, pois o entrosamento gera mais plasticidade a matriz reduzindo assim a quantidade de cimento (Luz & Almeida, 2012).

A absorção de água pelo agregado também influencia nas propriedades do concreto. Agregados com alta absorção de água podem absorver parte da água de amassamento para chegar ao estado saturado aumentando a demanda de água do sistema para alcançar a trabalhabilidade esperada e reduzindo a água disponível na matriz para completa hidratação do cimento (Neville, 1982).

## 2.3 Mineração de bauxita

A bauxita é o minério de onde se extrai o óxido de alumínio, também conhecido como alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) matéria primária do alumínio. Para uma jazida de bauxita ser aproveitável deve ter aproximadamente 30% de alumina, e ainda é preciso de 5 a 7 toneladas de bauxita para gerar 2 toneladas de alumina que se tornam 1 tonelada de alumínio. (ABAL, 2017). O alumínio não é encontrado em seu estado elementar na natureza, pela sua afinidade com o oxigênio tem tendência em oxidar e, portanto, é normalmente encontrado como óxido de alumínio ou íons  $\text{Al}^{3+}$  (Constantino, et al., 2002).

A bauxita normalmente é formada em regiões subtropicais ou tropicais por ação de intemperismo em aluminossilicatos. Os minerais que basicamente compõe a bauxita são a gibbsita ( $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ ) e as formações polimórficas boehmita ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ ) e diaspório ( $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ ). Quando encontrado óxidos de ferro como goetita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) e aluminossilicatos nesse minério são considerados impurezas. O processo de beneficiamento da bauxita varia com o teor de óxido de alumínio existente no material retirado da jazida, o mais utilizado mundialmente é o Processo Bayer (Constantino, et al., 2002) (ABAL, 2017).

### 2.3.1 Processo Bayer

O processo Bayer é um processo hidrometalúrgico, que retira a alumina da bauxita através da calcinação do minério, desenvolvido por Karl Joseph Bayer em 1888 (Tinoco, 2017). O princípio básico para o funcionamento desse processo é que os minerais gibbsita, boehmita e diaspório se dissolvem sob certas condições de pressão e temperatura em solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), também conhecido por soda cáustica (Constantino, et al., 2002). Para a obtenção final de alumina o minério é moído é lavado a fim de obter granulometria e pureza satisfatória, isso gera um resíduo lamacento denominado de lama vermelha. Para cada tonelada de alumina extraída é gerado em torno de 1 tonelada desse rejeito de lama vermelha (Villar, 2002).

A partir do fluxograma da Figura 5 vê-se todas as etapas do processo Bayer, onde a primeira etapa consiste na moagem da bauxita. Em seguida o minério inicia o

processo de digestão, onde ocorre a lixiviação dos minerais gibbsita, boehmita e diaspório por meio de uma solução de soda cáustica, por toda essa etapa a temperatura e pressão da solução são controladas. Desta etapa é formada então uma solução supersaturada de aluminato de sódio ( $\text{NaAl}_2$ ) (Tinoco, 2017). Depois essa solução segue para a etapa de clarificação, que separa por sedimentação os sólidos insolúveis, gerando os rejeitos finos do processo. Esses sólidos insolúveis que precipitam são a alumina. Por último, é realizado o estágio de calcinação, onde a alumina é lavada e submetida a altas temperaturas que chegam a  $1100^\circ\text{C}$  para eliminar toda a água gerando um cristal de alumina pura, no aspecto de um pó branco (Tinoco, 2017).

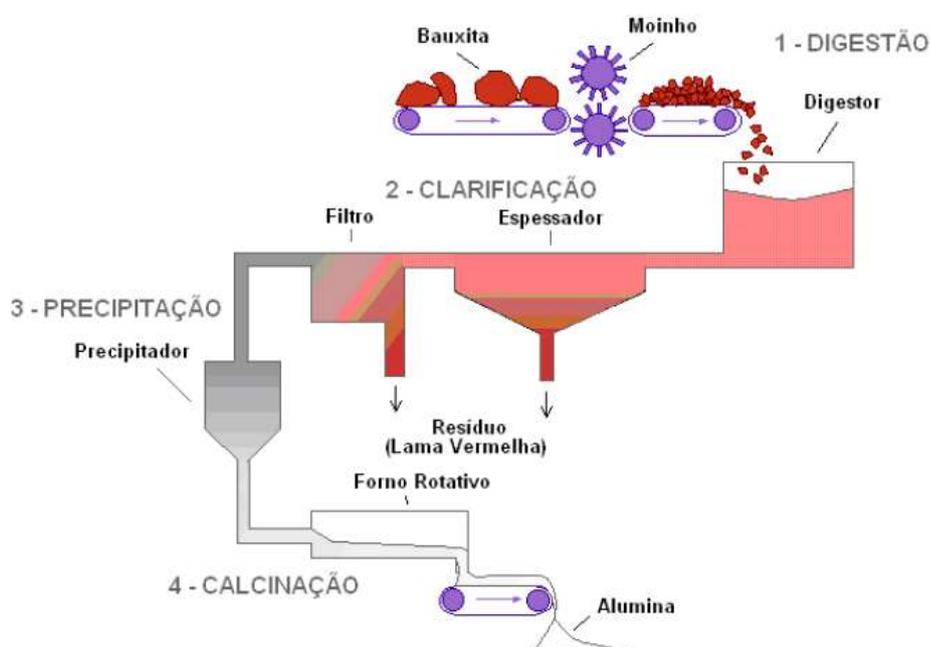


Figura 5 - Fluxograma das etapas do processo Bayer - Adaptado de IAI

A lama vermelha é um rejeito fino composto basicamente de óxidos de ferro, titânio, quartzo, aluminossilicatos de sódio, minerais de ganga e hidróxido de sódio. (Tinoco, 2017). O *International Aluminium Institute* (IAI) retrata que algumas jazidas de bauxita possuem um alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e necessitam de uma fase extra no processo para retirar o excesso desse óxido no minério, evitando a formação de incrustações que prejudicam a qualidade do produto final, esse processo, denominado dessilicagem, ocorre entre a moagem e a digestão do minério (IAI, 1972). Dessa forma, é gerado um rejeito de fração mais grosseira do processo Bayer, denominada

nesse trabalho por areia ferrosa. Esse resíduo ainda é bastante inexplorado pelos trabalhos científicos, visto que a autora não encontrou citações para o mesmo dentre as pesquisas realizadas.

Ao que diz respeito a destinação dos resíduos gerados no Processo Bayer, inicialmente a lama vermelha é lavada a fim de retirar a soda cáustica para ser reutilizada na digestão. No entanto o nível de pH do rejeito continua alto (aproximadamente 13) devido a algum NaOH remanescente. Após essa lavagem a lama vermelha é acondicionada geralmente em barragens. Em algumas situações a mesma é depositada no seu estado fluido formando lagoas de deposição logo após a lavagem do rejeito (IAI, 1972). A deposição em estado pastoso faz com que a lama passe antes da deposição por um filtro tipo prensa, que retira a água em excesso utilizada em todo o processo (Tinoco, 2017) (IAI, 1972). O rejeito de fração grosseira, quando ocorre, é disposto também em barragens.

A Figura 6, obtida através do programa de computador *Google Earth* mostram um exemplo de uma barragem de lama vermelha disposta em seu estado líquido. As regiões em tom laranja escuro (região número 2) mostram o rejeito em si, as regiões esbranquiçadas (região número 1) representam a cristalização de hidróxido de sódio ainda presente na lama.

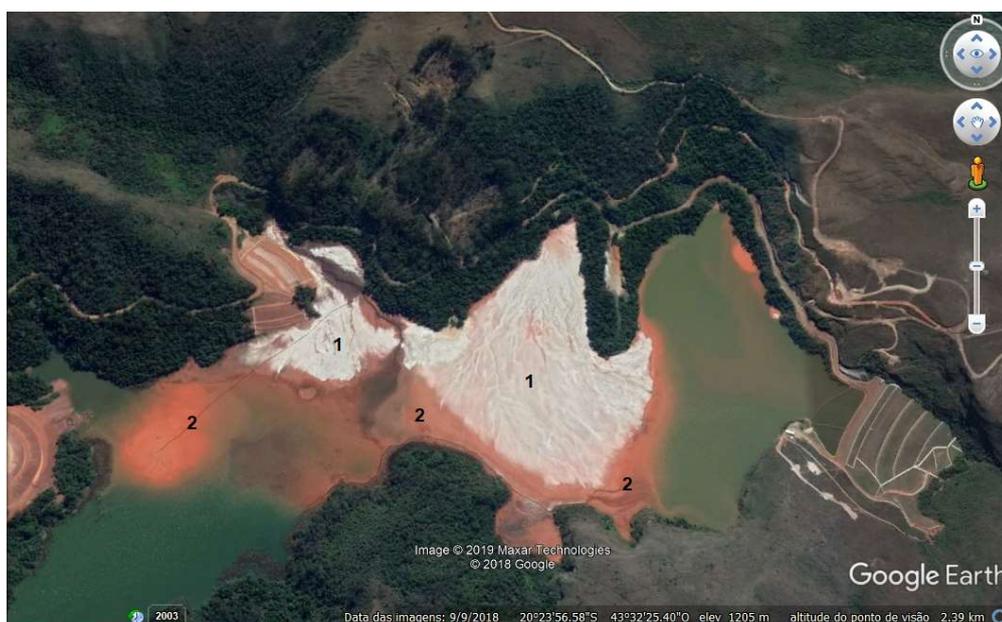


Figura 6 - Barragem de Marzagão - Ouro Preto, MG

FONTE: Google Earth, 2003

Com relação ao reaproveitamento dos resíduos do Processo Bayer, Ke et al (2015), Fagundes (2019), Barros (2017), Santana (Santana, 2020) e estudaram a produção de geopolímeros a partir da ativação alcalina do rejeito fino de processo Bayer, obtendo resultados que indicam sua viabilidade, Figueiredo (2020) inclusive reutiliza o rejeito de fração fina (lama vermelha) e fração grosseira (areia ferrosa).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

A fim de verificar a viabilidade técnica da utilização da areia ferrosa (AF) como agregado miúdo para construção, foram confeccionados concretos utilizando o cimento CPV-ARI. Com a finalidade de comparação, foram fabricados concretos com areia natural (AN). O cimento Portland CPV - ARI foi escolhido pela demanda de resultados relevantes de resistência com idades menores, 7 e 14 dias de idade, e também pelo seu baixo teor de adições minimizando a probabilidade de quaisquer reações com o agregado. O cimento adquirido recebido no (Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC<sup>2</sup>) foi armazenado dentro de um saco plástico em ambiente coberto e fechado, para evitar contato com umidade do meio exterior a sua embalagem.

O agregado graúdo escolhido para produção dos concretos foi a brita 0 de gnaiss, vinda de uma jazida localizada em Contagem, município de Minas Gerais, e acondicionada a céu aberto, que tinha variação granulométrica entre 6,5mm e 12,5mm. Para escolha da classificação da brita foi considerada a dimensão dos corpos de prova a serem utilizados. A NBR 5738 (ABNT, 2016) especifica que a dimensão básica do corpo de prova deve ser no mínimo três vezes maior que a dimensão nominal do agregado. Moldes de tamanhos menores demandam menores quantidades de material e permitem a elaboração de um maior número de espécimes, aumentando a relevância estatística do projeto. Dessa forma os corpos de prova foram fabricados em moldes cilíndricos de 5cm de diâmetro por 10cm de altura, atendendo a normativa e viabilizando o trabalho.

A AF foi obtida com uma indústria química do beneficiamento de alumina localizada na cidade de Ouro Preto, região central de Minas Gerais. As amostras foram retiradas diretamente da barragem de disposição da AF, observando os critérios

de quarteamento e representatividade, sendo fornecida em barris hermeticamente fechados com aproximadamente 50kg de material. O material foi armazenado em um depósito a céu aberto no LMC<sup>2</sup> da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).



Figura 7 - Barril de AF em seu estado natural

A areia ferrosa passou por um processo de beneficiamento, com um separador magnético do tipo cone, a fim de possibilitar a fabricação de concreto. Para isso, a AF era despejada dentro do equipamento, a fração magnética se prendia ao cone magnético e a fração não magnética caía sobre uma bandeja, como ilustra a Figura 8. Repetiu-se esse procedimento três vezes para cada amostra de AF, onde cerca de 70% da sua fração magnética foi retirada e descartada. Apenas a fração passante nesse equipamento foi utilizada para moldagem dos concretos. A repetição de 3 vezes foi escolhida com base nos trabalhos realizados pelo Grupo de Pesquisas Reciclos e descrito em Protocolo Reciclos #1 (Santos, 2015).



Figura 8 - Beneficiamento de areia ferrosa no separador magnético tipo tronco de cone

A areia natural de rio (AN) é proveniente de uma jazida situada em Fonseca, distrito do município de Alvinópolis, em Minas Gerais. Assim como a brita ao ser recebida no LMC<sup>2</sup> foi acondicionada em ambiente a céu aberto.

Além disso, foi utilizado aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1180, que tem a capacidade de reduzir a quantidade de água e apresenta compatibilidade com o cimento adotado nesse programa experimental.

### **3.1 Caracterização dos agregados miúdos**

#### **3.1.1 Caracterização física**

Para realização de toda caracterização, as amostras de areia natural e ferrosa foram secas em estufa a uma temperatura de 100°C até constância de massa. Foram feitas análises de granulometria seguindo os protocolos da NBR NM 248 (ABNT,

2003), usando todas as peneiras da série normal e intermediária para agregados miúdos (#4,75mm até #75 $\mu$ m).

Seguindo as normativas da NBR 7211 (ABNT, 2009), as curvas granulométricas formadas a partir do ensaio serão também analisadas quanto a zona ótima e a zona utilizável. A zona ótima tem módulo de finura variando entre 2,20 a 2,90; a zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20; e a zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50. A Figura 9 mostra as frações de AF separadas gravimetricamente após a realização do ensaio de granulometria.



Figura 9 - AF em frações separadas pelo ensaio de granulometria

A massa específica foi determinada usando o método do frasco de Chapman segundo a NBR 9776 (ABNT, 1988). Para AF essa massa específica foi determinada em dois momentos, antes e depois do processo de separação magnética. O objetivo de realizar esse ensaio em dois momentos distintos é monitorar a influência da retirada do material magnético ferroso nesse parâmetro, já que o ferro é um metal de alta densidade. A Figura 10 mostra o ensaio sendo executado.



(a) AF sem fração magnética



(b) AN

Figura 10 - Ensaio de massa específica pelo método do Frasco de Chapman

Para a massa unitária foram seguidos os protocolos da NBR NM 45 (ABNT, 2006), adaptando-se o recipiente utilizado no ensaio, como pode ser observado na Figura 11. O ensaio foi executado 3 vezes, e então obteve-se a média dos resultados para um resultado final.



Figura 11 - Ensaio de massa unitária da AF

A determinação da absorção de água dos agregados foi realizada conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2001), como mostrado na Figura 12.



Figura 12 - Absorção de água da AF

### 3.1.2 Caracterização química

Para realização da caracterização química as amostras de AN e AF foram preparadas, sendo cominuídas em um moinho de almofariz mecânico da marca FRITSCH até as amostras serem completamente passante na peneira com abertura de  $75\mu\text{m}$ . A análise química foi realizada por meio de um equipamento de fluorescência de Raios X (FRX) da PANalytical modelo Epsilon<sub>3x</sub>, do LMC<sup>2</sup>. A caracterização química por fluorescência de raios-x foi realizada para três amostras diferentes de AF, uma no seu estado natural, uma da fração não magnética e uma da fração magnética. A AN foi analisada em seu estado natural.

### 3.2 Dosagem do concreto

Os concretos foram dosados baseados no método de dosagem IPT/ EPUSP adotando um teor de argamassa de 56% e uma trabalhabilidade de  $60\pm 10$ mm de slump medido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Dois traços distintos foram estudados, determinados de acordo com um consumo de cimento:  $425 \text{ kg/m}^3$  e  $533 \text{ kg/m}^3$ , com fatores água/cimento de 0,48 e 0,37, respectivamente. Foi utilizado o mesmo traço para fabricação dos concretos com areia natural e ferrosa.

Dessa forma, foi utilizado o Software Especialista para Dosagem de Misturas Cimentícias, desenvolvido por André Felipe, juntamente ao Grupo de Pesquisas Reciclos para cálculo do traço. O aditivo foi incorporado durante o ajuste prático com relação a massa de cimento objetivando alcançar a trabalhabilidade fixada, respeitando os limites estabelecidos pelo fabricante. O traço utilizado para confecção dos concretos com areia natural e ferrosa são apresentados na Tabela 2. Com intuito de facilitar a identificação dos corpos de prova, foi dada uma nomenclatura para cada traço de concreto seguindo o modelo: CAX-Z, onde X representa a areia utilizada (N=areia natural e F=areia ferrosa) e Z o consumo de cimento (425 e 533).

Tabela 2 - Dosagem dos traços

Traço	Consumo de Cimento	Cimento	Areia	Brita	Fator a/c	Aditivo (%)
CAN-425	$425 \text{ kg/m}^3$	1	1,80	2,20	0,48	0,250%
CAF-425	$425 \text{ kg/m}^3$	1	1,80	2,20	0,48	0,325%
CAN-533	$533 \text{ kg/m}^3$	1	1,24	1,76	0,37	0,200%
CAF-533	$533 \text{ kg/m}^3$	1	1,24	1,76	0,37	1,004%

Os procedimentos de moldagem e cura foram conduzidos segundo NBR 5738 (ABNT, 2016). Foi escolhido moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, devido a quantidade restrita de material disponível.

O adensamento dos corpos-de-prova foi feito em uma mesa de fluxo, com 15 golpes (velocidade 1 golpe/segundo) para cada uma das duas camadas de concreto no corpo de prova. A Figura 13 mostra os corpos de prova moldados e adensados. Logo após a moldagem, os corpos de prova foram acondicionados em câmara úmida EQUILAM SALT SPRAY EQSSP, com umidade e temperatura controladas (24°C, 95%). Após 24h, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos submersos em tanque com uma solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  até a idade da realização dos ensaios.



Figura 13 - CAF-425 moldado e adensado antes de ir para câmara úmida

### **3.3 Caracterização do concreto no estado fresco**

As matrizes produzidas com AN e AF foram analisadas segundo os ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - Slump test - seguindo as normativas da NBR NM 67 (ABNT, 1998) e o ensaio de massa específica no estado fresco pela NBR 9833 (ABNT, 2009) como se vê na Figura 14.



(a) Slump test do CAF-533



(b) Massa específica do CAF-533

Figura 14 - Ensaio do concreto no estado fresco

### 3.4 Caracterização do concreto no estado endurecido

Os corpos de prova foram ensaiados de acordo com suas características físicas (massa específica, absorção de água e índice de vazios), mecânicas (resistência a compressão e velocidade de pulso ultrassônico) e durabilidade (ensaio de reação álcali-agregado e expansibilidade) nas idades determinadas.

#### 3.4.1 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

Seguindo a NBR 9778 (ABNT, 2009) e utilizando o banho térmico da SOLOTEST foram caracterizadas três unidades de corpos de prova com idade de 28 dias. Em apenas um ensaio é possível obter essas características através das seguintes Equação 1, Equação 2 e Equação 3.

Equação 1 - Massa específica do concreto no estado endurecido

$$\text{Massa específica (concreto endurecido)} = \frac{ms}{msat - mi}$$

Equação 2 - Absorção de água do concreto

$$\text{Absorção} = \frac{msat - ms}{ms} \times 100\%$$

Equação 3 - Índice de vazios do concreto

$$\text{Índice de vazios} = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100\%$$

### 3.4.2 Resistência a compressão

Pelas normativas da NBR 5739 (ABNT, 2018) e utilizando a prensa servo-controlada EMIC DL20000/PC200, célula de carga 200KN e velocidade de 0,45MPa/s foram rompidas 3 unidades de corpos de prova à compressão com idades de 7, 14 e 28 dias. A Figura 15 mostra dois corpos de prova sendo submetidos ao ensaio de compressão, sendo um produzido com AN e outro com AF, ambos com consumo de cimento 425 kg/m<sup>3</sup>.



(a) CAN-425



(b) CAF-425

Figura 15 - Corpos de provas submetidos à compressão

### 3.4.3 Velocidade de pulso ultrassônico

Seguindo as normas da ASTM C-597 (ASTM, 2009) e utilizando o equipamento de ultrassom PROCEQ TICO foram avaliados 3 corpos de prova com idade de 28 dias para cada traço de concreto produzido, como mostra a Figura 16. É importante ressaltar que o ensaio foi realizado em amostras secas a temperatura ambiente por 72h, a ASTM C-597 (ASTM, 2009) determina que concretos saturados apresentam VPU 5% maiores que concretos secos.



Figura 16 - Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico de CAF-533

### 3.4.4 Durabilidade

Para os ensaios de durabilidade dos agregados foram produzidos corpos de prova prismáticos de 25x25x285mm de argamassa de AN e AF, seguindo os procedimentos e traços das NBR 15.577 (ABNT, 2018). Foi utilizado 3 corpos de prova para cada tipo de areia por teste.

A reatividade dos agregados AN e AF segundo a reação álcali-agregado foi caracterizada de acordo com a NBR 15.577-4 (ABNT, 2018). Para isso foi utilizado o

banho térmico da SOLOTEST, uma solução de NaOH e argamassas produzidas com AN e AF.

Além disso, com a finalidade de verificar a existência de qualquer componente químico reativo na areia ferrosa foi realizado o ensaio de expansibilidade em autoclave. Adaptando os protocolos da ASTM C-151 (ASTM, 2018) para argamassas, os corpos de prova foram produzidos com AN e AF e testados utilizando a autoclave MATEST E070X. Entende-se que o ambiente criado pela autoclave com alta umidade relativa e pressão estimulará a reatividade dos agregados. A autoclave chegou aos parâmetros máximos de 220C° e 300psi, o equivalente a aproximadamente 20,4atm.

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Caracterização física e química dos agregados miúdos**

A Figura 17 apresenta a curva granulométrica da areia ferrosa (AF) e natural (AN). Ambos agregados miúdos foram classificados como de granulometria média estando na sua maioria dentro da zona utilizável. Destaca-se que a areia ferrosa possui uma curva contínua e mais bem graduada quando comparada a NA que carece de partículas mais grosseiras ( $\geq 2,4\text{mm}$ ). O diâmetro máximo característico da AF foi de 2,4mm enquanto o da AN foi 1,2mm, porém os módulos de finura de ambas foram próximos sendo 0,960 para AF e 0,955 para AN. Dessa forma sabe-se que ambas as areias são aptas para produção de concreto conforme normativas da NBR 7211 (ABNT, 2009).

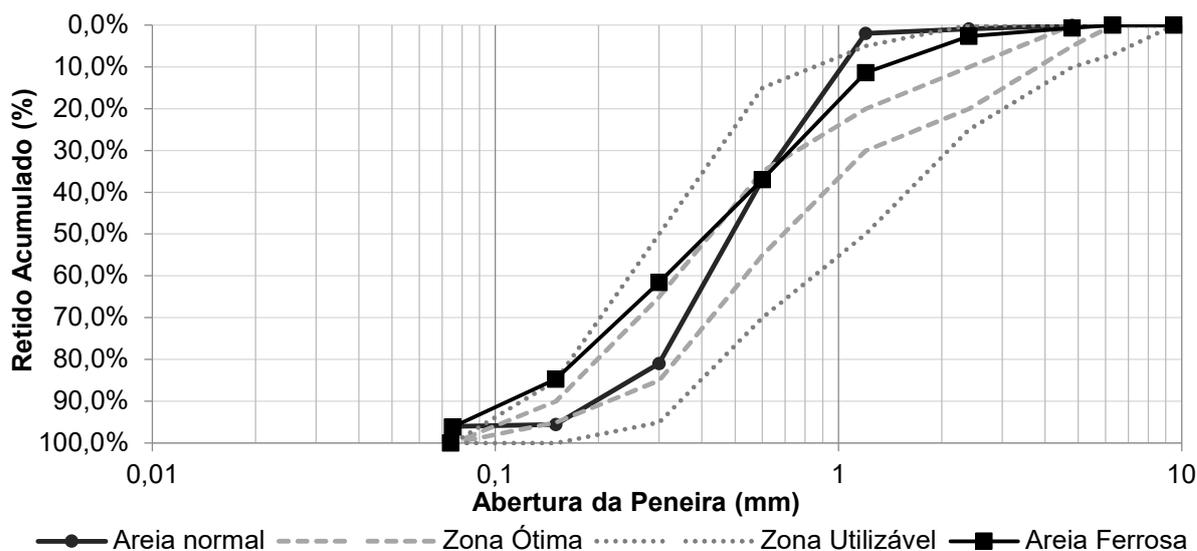


Figura 17 - Distribuição granulométrica

No ensaio de massa específica a amostra de AF pré-tratamento magnético apresentou um valor de  $3,00\text{g/cm}^3$  enquanto que a amostra sem a fração magnética apresentou um valor de  $2,75\text{g/cm}^3$ . Esse resultado mostra a eficiência do processo de separação magnética, já que o ferro é um material de alta densidade. O valor da areia ferrosa pós beneficiamento fica mais próximo da areia natural que apresentou uma massa específica de  $2,66\text{g/m}^3$ . Mehta e Monteiro (2014) estabelecem como referência para agregados miúdos uma massa específica variando entre  $2,60\text{g/cm}^3$  e  $2,70\text{g/cm}^3$ , mostrando que o valor encontrado nesse trabalho é próximo das referências.

Com relação a massa unitária dos agregados miúdos encontrou-se o valor de  $1,47\text{g/cm}^3$  para AN e  $1,50\text{g/cm}^3$  para AF. O resultado encontrado se aproxima da massa unitária média estabelecida pela literatura entre  $1,30\text{g/cm}^3$  e  $1,70\text{g/cm}^3$  (Mehta & Monteiro, 2014).

O ensaio de absorção de água obteve como resultado um valor de 0,5% para AN e 2,15% para AF, que demonstra que a areia ferrosa tem maior capacidade de absorver água. Essa absorção de água pode afetar a trabalhabilidade do concreto, pois ela retira água de amassamento da matriz (Isaia, 2011).

A Tabela 3 mostra o quantitativo de componentes químicos encontrados nas amostras de areia testadas. Nota-se que o tratamento magnético da AF foi efetivo, já que cerca de 14% da quantidade de ferro no material foi retirada. Altos teores de ferro podem gerar expansão da matriz, por isso a redução desse componente é importante para durabilidade desse concreto. Além disso, cerca de 70% do concreto é composto de agregados, a utilização de materiais com alta massa específica podem aumentar a massa específica do concreto aumentando o peso das estruturas e os custos envolvidos.

Tabela 3 - Composição química da AF e AN

	<b>AN</b>	<b>AF Natural</b>	<b>AF Fração não-magnética</b>	<b>AF Fração magnética</b>
$Al_2O_3$	5,80%	10,06%	9,17%	5,91%
$Fe_2O_3$	1,36%	44,32%	30,62%	78,96%
$SiO_2$	90,75%	39,01%	52,88%	7,51%
$TiO_2$	0,22%	3,64%	4,28%	4,42%
$Na_2O$	0,33%	1,31%	1,37%	0%
$SO_3$	0%	0,11%	0,18%	0%
$CaO$	0,19%	0,28%	0,30%	0,21%
$P_2O_5$	0,38%	0,42%	0,43%	0,40%
$ZrO_2$	0%	0,11%	0,14%	0%
$V_2O_5$	0%	0,16%	0%	0,41%
$Cr_2O_3$	0%	0,11%	0%	0,27%

## 4.2 Caracterização do concreto no estado fresco

Foi observado que as matrizes de AF e AN apresentaram diferença de cor e coesão. As matrizes de AF eram de cor marrom enquanto as de AN eram cinza, conforme o esperado. Além disso os concretos de AF apresentavam mais dificuldade de mistura na betoneira que os concreto de AN. Ainda assim os concretos não apresentaram segregação, exsudação ou ausência de argamassa em suas matrizes. A Figura 18 mostra a trabalhabilidade (slump) alcançada de acordo com a porcentagem de aditivo utilizado.

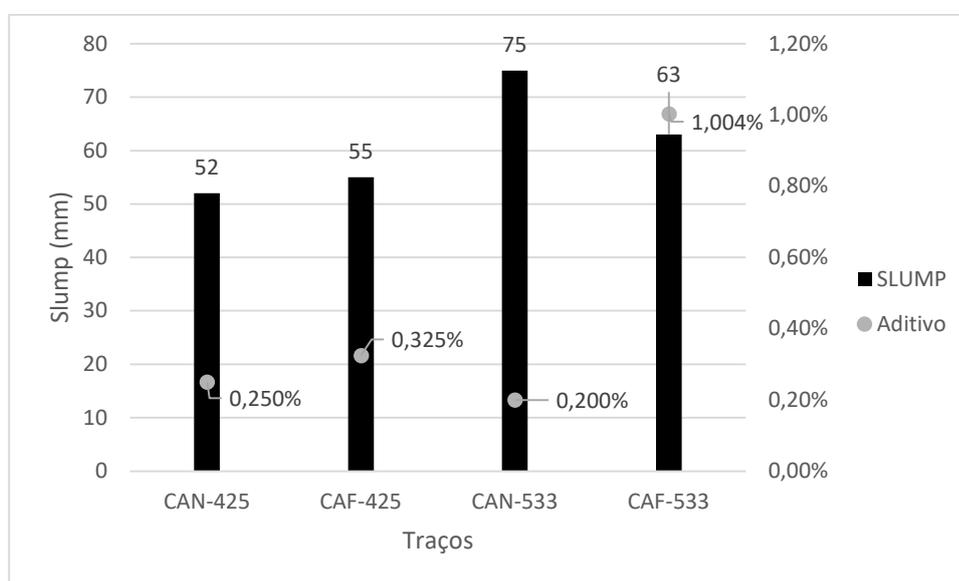


Figura 18 - Gráfico slump x aditivo

Nota-se que para uma mesma classe de concreto, aqueles fabricados com AF tiveram maior demanda por aditivo, chegando a ser 5 vezes maior para o CAF-533. Essa maior demanda por aditivo, também ocorreu no CAF-425 em menor proporção, com consumo 0,75% maior. A absorção da água do AF é 4 vezes maior que a da AN, em concretos com menor fator água/cimento essa diferença gera maior perda de trabalhabilidade devido a absorção da água de amassamento pelo agregado (Isaia, 2011). Além disso, o AF tem maior presença de finos que afetam também a trabalhabilidade.

Já no ensaio de massa específica apresentado na Tabela 4, nota-se que todos os concretos apresentaram valores similares. Apesar de não haver muita diferença entre as classes, os concretos mais resistentes (CAN-533 e CAF-533) apresentam massa específica maior em relação aos de menor resistência (CAN-425 e CAF-425), esse resultado é coerente visto que o cimento Portland é o material utilizado com maior massa específica (aproximadamente 3 g/cm<sup>3</sup>). A diferença entre os valores é menor que 2%, essa pequena diferença pode estar relacionada a pequenas variações no índice de vazios dessas misturas.

Tabela 4 - Massa específica do concreto no estado fresco

<b>Traço</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
CAN-425	1961,20
CAF-425	1928,11
CAN-533	1988,21
CAF-533	1982,50

### **4.3 Caracterização do concreto no estado endurecido**

#### **4.3.1 Massa específica, absorção e índice de vazios**

No ensaio de massa específica no estado endurecido obteve-se valores próximos entre todos os traços de concreto, como observa-se no gráfico da Figura 19. Esse é um comportamento esperado já que a massa específica dos agregados é próxima, sendo a massa específica da AF 3,27% maior que a AN. Os concretos produzidos são classificados com densidade normal, o que permite a sua aplicação em lajes, vigas e colunas pela NBR 8953 (ABNT, 2015).

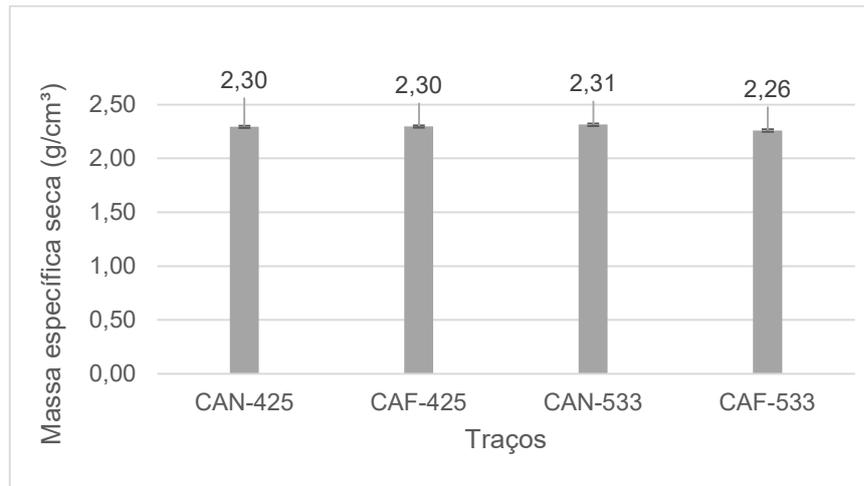


Figura 19 - Massa específica no estado endurecido

O índice de vazios e a absorção de água por imersão dos concretos fabricados são apresentados na Figura 20. Observa-se que a matriz mais porosa é a CAF-533, sendo esta maior que a referência CAN-533 em 53% para o índice de vazios e 50% para absorção de água. Esse comportamento não era esperado, visto que ambos os concretos possuíam o mesmo teor de água, porém isso pode ter ocorrido devido a falha no processo de moldagem e consequente formação de brocas nos corpos de prova.

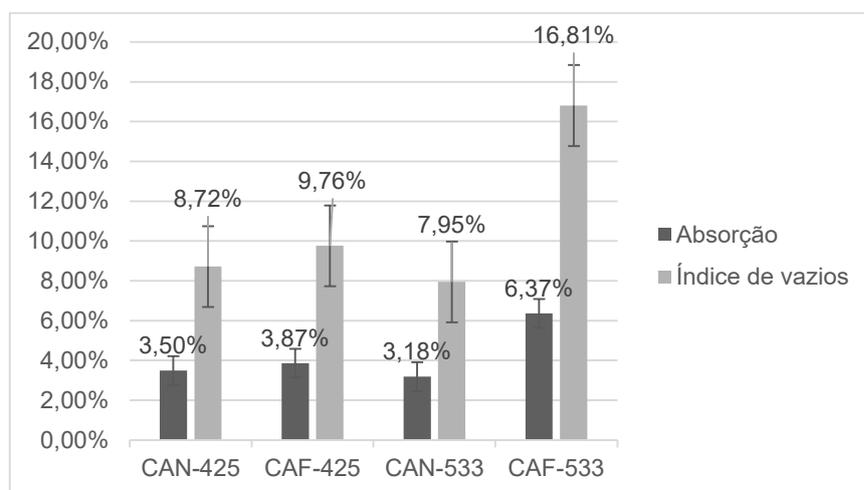


Figura 20 - Gráfico de absorção de água e índice de vazios

### 4.3.2 Velocidade de pulso ultrassônico

A Figura 21 apresenta a velocidade de pulso ultrassônico das matrizes produzidas. Assim como no ensaio de índice de vazios e absorção de água, pode se inferir sobre a porosidade da matriz de forma indireta, segundo (Popovics, et al., 1990) quanto menor a velocidade de pulso ultrassônico (VPU), mais porosa é uma matriz. Assim afirma-se mais uma vez que o traço CAF-533 apresenta uma matriz mais porosa entre todos, pois a sua velocidade de propagação de onda foi menor. Por outro lado, a CAN-533 foi a menos porosa e apresentou uma velocidade superior às outras matrizes, esse resultado concorda com o índice de vazios e absorção de água desses concretos.

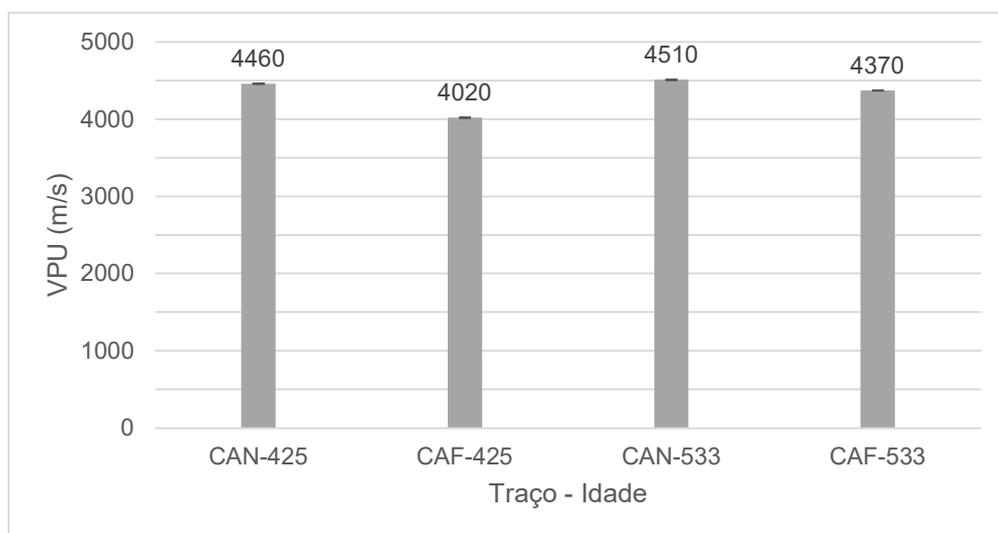


Figura 21 - Velocidade de pulso ultrassônico

Este ensaio pode fornecer também um indicador de qualidade do concreto, visto que é diretamente afetado pela porosidade do mesmo. Concretos com velocidade de onda acima de 4500 m/s são considerados excelentes, aqueles com velocidade entre 3600 e 4500m/s são considerados bons e 3000 e 3600m/s tem qualidade questionável (François, et al., 2016). Portanto vê-se na Figura 21 que todas as matrizes são classificadas como de bom desempenho, mesmo o CAF-533 que apresentou alto índice de vazios.

### 4.3.3 Resistência mecânica a compressão

A Figura 22 apresenta os resultados de resistência à compressão. Nesse ensaio é observado que os concretos produzidos com AF apresentam resultados satisfatórios quando comparada aqueles com AN, com resistências similares ou superiores.

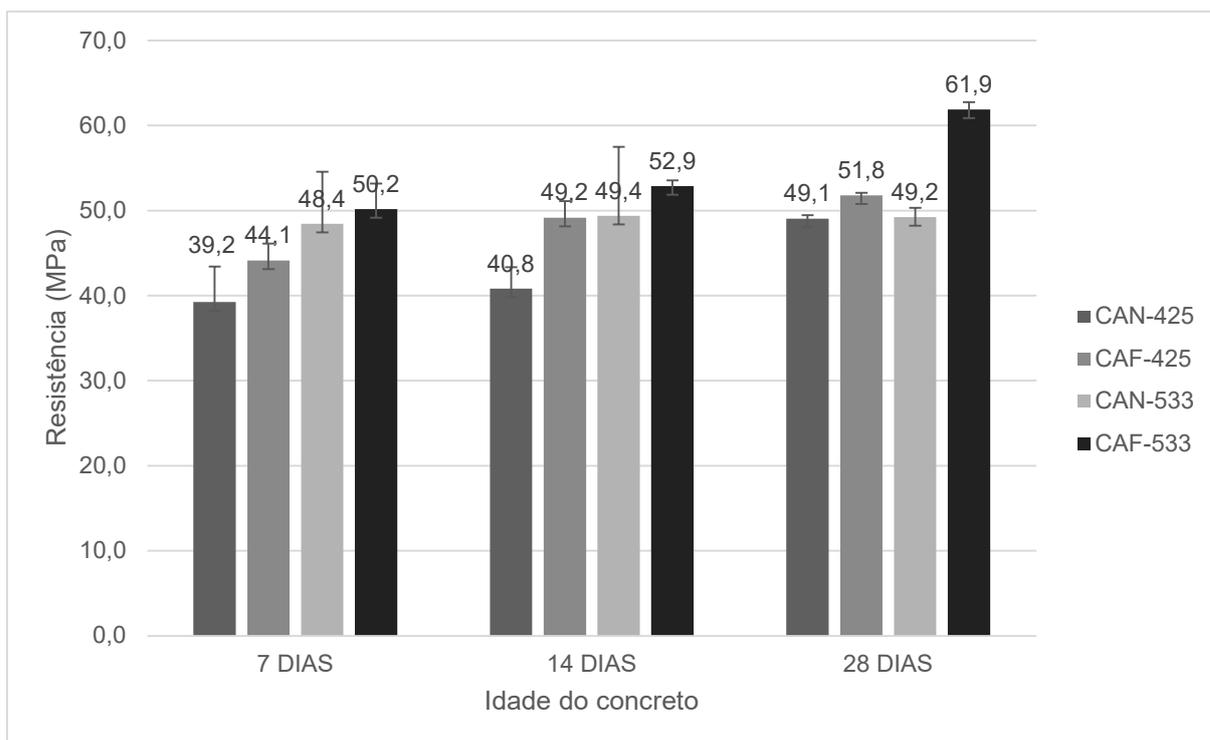


Figura 22 - Resistência à compressão simples

Os concretos produzidos com AF tem resistências superiores aos produzidos com AN. Destaca-se o CAF-533 que obteve a maior resistência à compressão comparado aos demais, chegando a ser 26% maior que o mesmo traço produzido com AN na idade de 28 dias. O traço CAF-425 é aproximadamente 5% maior que o seu correspondente CAN-425. No quesito idade e resistência as matrizes se comportaram conforme o esperado, ou seja, quanto maior a idade de uma matriz, maior também é a sua resistência mecânica. Apesar dos concretos com AF e AN, em geral, possuírem características físicas semelhantes foi observado um melhor comportamento mecânico por parte dos concretos com AF. Infere-se que isso pode estar relacionado

a sua composição química, com maior teor de ferro ou a morfologia das suas partículas, que precisam ser melhor avaliadas em trabalhos futuros.

Marina Dutra (Dutra, 2015) encontrou para seus traços de referência uma média de consumo de 434,3kg/m<sup>3</sup> em concretos de classe 20, com teor água/cimento 0,57; 553kg/m<sup>3</sup> em concretos classe 30, com teor água/cimento de 0,46; e 690,10kg/m<sup>3</sup> em concretos classe 40, com teor água/cimento de 0,38. Com seus traços ela alcançou a resistência pretendida pela classe do concreto com variações máximas de ±5 MPa. Dessa forma, percebe-se que os concretos CAN-425 e CAN-533 tiveram resistência superior ao do trabalho citado, sendo as faixas de consumo de cimento muito próximas. Entretanto, os resultados para velocidade de pulso ultrassônico para todas as matrizes demonstraram concretos de excelente qualidade, o que concorda com as altas resistências encontradas.

Apesar da matriz CAF-533 ter se mostrado mais porosa no ensaio de índices de vazios e absorção de água, na resistência essa se mostra divergente, já que resistências maiores apresentam menores porosidades (Neville, 1982). Como o ensaio de índice de vazios e absorção de água mede os poros abertos do corpo de prova, esse resultado pode ter sido afetado pelas brocas presentes nos corpos de prova, ocorridas devido a falhas na moldagem.

#### 4.3.4 Durabilidade

A Tabela 5 seguinte apresenta os resultados obtidos pelo teste de Reatividade Álcali-agregado. Observa-se uma expansibilidade superior nas amostras produzidas com areia ferrosa.

Tabela 5 - Reatividade álcali-agregado

	EXPANSIBILIDADE MÉDIA DAS AMOSTRAS	
AGREGADO	IDADE: 16 DIAS	IDADE:30 DIAS
AN	0,27 %	0,40 %
AF	3,23 %	3,57 %

A Figura 23 obtida na NBR 15.577-1 (ABNT, 2018), avalia os resultados obtidos apresentando a classificação dos agregados quanto a sua reatividade. Comparando a Figura 23 com a Tabela 5 pode-se deduzir que a AF é uma areia de potencialmente reativa de Grau R3 enquanto a AN é uma areia potencialmente reativa de Grau R1. Podemos observar também que a amostra de AF é cerca de 3% mais reativa que a amostra de AN.

**Tabela 2 – Classificação do grau de reatividade do agregado**

<b>Classificação da reatividade potencial do agregado <sup>c</sup></b>	<b>Expansão das barras de argamassa aos 30 dias <sup>a</sup></b> %	<b>Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias <sup>b</sup></b> %
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19 %	Menor que 0,04 %
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19 e 0,40 %	Entre 0,04 e 0,12 %
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41 e 0,60 %	Entre 0,13 e 0,24 %
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60 %	Maior que 0,24 %

<sup>a</sup> Valores com base na experiência brasileira.  
<sup>b</sup> Valores extraídos da ASTM C 1778 -16.  
<sup>c</sup> Até o momento de edição desta Norma, não se dispunha de dados estatísticos suficientes para classificar o grau de reatividade do agregado segundo o método acelerado de prismas de concreto previsto na ABNT NBR 15577-7.

Figura 23 - Tabela de classificação do grau de reatividade da NBR 15577-1

No teste de expansibilidade dos corpos de prova através da autoclave, em uma análise qualitativa, pode-se dizer que as matrizes resistiram bem às condições extremas de temperatura e pressão, já que as mesmas não apresentaram nenhum tipo de fissuramento ou deformação visíveis, como pode se ver na Figura 24.



Figura 24 - Corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de expansibilidade na autoclave

A Tabela 6 mostra os valores obtidos fazendo uma análise quantitativa desse ensaio, com medidas obtidas por meio de um relógio comparador de comprimentos, antes (L0) e após (L1) as barras serem submetidas ao ensaio. Nela pode-se observar que as matrizes com AN tiveram uma retração de cerca de 3,4% enquanto as matrizes AF expandiram quase 26%, ou seja, um valor cerca 8 vezes maior que a sua correspondente. O que prova, juntamente com o teste de reatividade álcali-agregado, que existem possíveis compostos reativos na AF, que podem prejudicar a durabilidade das matrizes. Esse resultado indica a necessidade de maiores estudos desse material para avaliar se é algum composto do ferro ou do NaOH remanescente que afeta a matriz e mapear possíveis soluções para inertizar esse material.

Tabela 6 - Resultados de teste de expansibilidade na autoclave

	<b>L0</b>	<b>L1</b>	<b>Expansibilidade</b>	<b>Média</b>
<b>AN 1</b>	-2,575	-2,696	-4,70%	<b>-3,35%</b>
<b>AN 2</b>	-5,388	-5,508	-2,23%	
<b>AN 3</b>	-4,504	-4,645	-3,13%	
<b>AF 1</b>	1,079	0,861	20,20%	<b>25,77%</b>
<b>AF 2</b>	0,796	0,559	29,77%	
<b>AF 3</b>	0,798	0,58	27,32%	

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, as características da areia ferrosa e as propriedades no estado fresco e endurecido dos concretos produzidos com a mesma foram avaliadas a fim de indicar a possibilidade da sua utilização na construção civil. Os resultados de caracterização física da AF e a AN classificam os agregados como areias de tipo médio e se encontram dentro da zona utilizável, estando, neste quesito, aptas para produção de concreto. A areia ferrosa tem massa específica similar a areia natural quando submetida ao tratamento no separador magnético tipo cone. A caracterização química indicou que o tratamento magnético da AF foi efetivo já que diminuiu cerca de 14% da quantidade de ferro no material.

Quanto às propriedades no estado fresco, observou-se uma diferença de textura e cor entre os concretos de AF e AN. No estado endurecido, pela velocidade de pulso ultrassônico, todos os traços ensaiados foram considerados concretos de boa qualidade. Observa-se também que a maior resistência alcançada se trata de uma matriz fabricada com a AF, chegando a aproximadamente 60MPa. Os resultados de reatividade álcali-agregado mostraram que a AF é uma areia de potencialmente reativa de Grau R3 e os resultados de expansibilidade que as matrizes com AN tiveram uma retração de cerca de 3,4% enquanto as matrizes AF expandiram quase 26%.

Diante desses resultados, faz-se então necessário novos estudos para afirmar que a areia ferrosa pode ser reutilizada em concretos. Pois mesmo que a sua considerável reatividade possa prejudicar a estrutura do concreto ao longo do tempo, pode-se estudar alguma forma de remediar essa característica, já que os resultados de competência mecânica afirmam positivamente que a areia ferrosa possa ser aplicada em concretos.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

- Estudar traços com menores resistências, reduzindo o consumo de cimento;
- Fazer uma microscopia do agregado reciclado (areia ferrosa);
- Avaliar alguma remediação para a alta reatividade da areia ferrosa.

## REFERÊNCIAS

ABAL, 2017. *Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade*, São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio.

ABNT, 1988. *NBR 9776: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do método do frasco de Chapman*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnica.

ABNT, 1997. *NBR 11578: Cimento Portland Composto*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 1998. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2001. *NBR NM 30: Agregado miúdo: Determinação da absorção de água*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2003. *NBR NM 248 Agregados: Determinação da composição granulométrica*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2006. *NBR 6467: Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de Ensaio*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2006. *NBR NM 45: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2009. *NBR 7211: Agregados para concreto*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2009. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2009. *NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2013. *NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2015. *NBR 8.953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2016. *NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2018. *NBR 15577: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2018. *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro: s.n.

Alexander, M. & Mindess, S., 2005. *Aggregates in Concrete*. 1st ed. New York: CRC Press.

Andriolo, F. R., 1984. *Construções de Concreto*. 1ª ed. São Paulo: PINI.

ANEPAC, 2019. *Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção*. [Online] Available at: <http://www.anepac.org.br/> [Acesso em 20 Novembro 2015].

ANM, 2018. *Anuário Mineral Brasileiro*, Brasília: Agência Nacional de Mineração.

ASTM, 2000. *C-125: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*, West Conshohocken: American Society of Testing and Materials.

ASTM, 2009. *C-597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

ASTM, 2018. *C-151: Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement*, West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

Barros, T. R. d., 2017. *Proposta para produção de aglomerantes para construção civil a partir de resíduos gerados na indústria de alumina*, 2017: Universidade Federal de Ouro Preto - Monografia.

Bertolino, L. C., Palermo, N. & Bertolino, A. V. F. A., 2012. Geologia. Em: A. B. d. Luz & S. L. M. d. Almeida, eds. *Manual dos agregados para construção civil*. Rio de Janeiro: CETEM, pp. 69-78.

BSI, 1986. *BS 1881 - Part 203 - Testing Concrete: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concret*, Londres: British Standards Institution.

CEBDS, 2019. *Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável*. [Online]  
Available at: <https://cebds.org/>  
[Acesso em 15 Novembro 2019].

Constantino, V. R. L., Araki, K., Silva, D. d. O. & Oliveira, W. d., 2002. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: consideração sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. *Química Nova*, 25(3), pp. 490-498.

Costa, L. C. B., 2019. *Dissertação de Mestrado: Desempenho de concretos de escória frente a ataque de cloretos*, Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP.

Dutra, M. B., 2015. *Produção de concreto com areia de granulometria ótima obtida do resíduo da mineração de quartzo*, Ouro Preto: Dissertação de Mestrado - UFOP.

Fagundes, J. T., 2019. *Obtenção e Caracterização de Geopolímero a partir da Lama Vermelha Sem Beneficiamento e Resíduo da Laminação de Vidros Planos*, Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto - Dissertação de Mestrado.

François, S.-P., Philibert, A., Giroux, B. & Rivard, P., 2016. Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, Volume 125, pp. 1022-1027.

IAI, 1972. *International Aluminium Institute*. [Online]  
Available at: <http://www.world-aluminium.org/>  
[Acesso em 10 Novembro 2019].

IBRACON, 2009. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais utilizado pelo homem. *Concreto & Construções*, pp. 14-19.

Isaia, G. C., 2011. *Concreto: ciência e tecnologia*, Rio de Janeiro: IBRACON.

Ke, X. et al., 2015. One-Part Geopolymers Based on Thermally Treated Red Mud/NaOH Blends. *The American Ceramic Society*, 98(1), pp. 5-11.

Lamond, J. F. & P. J. H., 2006. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. Bridgeport: ASTM International.

Laschefski, K. A., 2020. Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): Desastres como meio de acumulação por despossessão. *Revista da Geografia e Ecologia Política*, 2(1), pp. 98-143.

Luz, A. B. d., 2012. Introdução. Em: A. B. Luz & S. L. M. d. Almeida, eds. *Manual de agregados para construção civil*. 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM, pp. 3-6.

Luz, A. B. d. & Almeida, S. L. M. d., 2012. Normas Técnicas e Caracterização Tecnológica dos Agregados. Em: A. B. d. Luz & S. L. M. d. Almeida, eds. *Manual de Agregados para construção civil*. 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM, pp. 83-99.

Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M., 2014. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: IBRACON.

Neville, A. M., 1982. *Propriedades do Concreto - Tradução por Salvador E. Giamusso*. 1ª ed. São Paulo: Pini.

Petruci, E. G. R., 1976. *Materiais de Construção*. 2ª ed. Porto Alegre: Globo.

Petruci, E. G. R., 1983. *Concreto de Cimento Portland*. 10ª ed. Rio de Janeiro: Globo.

Pinto, C. d. S., 2006. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª ed. São Paulo: Oficina Textos.

Popovics, S., Rose, J. & Popovics, J., 1990. The Behavior of Ultrasonic Pulses in Concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 20, pp. 259-270.

Santana, V. P., 2020. *Estudo da ativação alcalina da lama vermelha e do resíduo de vidro pelos métodos one-part e two-part*, Ouro Preto: Dissertação de mestrado - UFOP.

Santos, D. H. d., 2015. *Determinação do teor metálico através do cone metálico*, Ouro Preto: Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos Reciclos.

Santos, L. F. d., 2020. *AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE ALUMINA PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL*, Ouro Preto: Monografia - UFOP.

Silva, J. P. M. d., 2012. Agregados E Sustentabilidade. Em: A. B. d. Luz & S. L. M. d. Almeida, eds. *Manual de Agregados para Construção Civil*. Rio de Janeiro: CETEM, pp. 237-255.

Tinoco, C. P., 2017. *Dissertação de mestrado - Caracterização geomecânica de um rejeito de mineração de bauxita*. São Paulo: Universidade de São Paulo - USP.

Villar, L. F. d. S., 2002. *Dissertação de Mestrado - Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita*. Rio de Janeiro: Pontifícia Univerdade Católica do Rio de Janeiro - PUC - RJ.