

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DANIEL DE SOUZA PRADO

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR RESÍDUO DE MINÉRIO DE
FERRO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADO**

BELO HORIZONTE

2022

DANIEL DE SOUZA PRADO

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR RESÍDUO DE MINÉRIO DE
FERRO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2022

DANIEL DE SOUZA PRADO

AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 13/07/2022

BANCA-EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva (orientador)

Profa. Dra. Luciana Boaventura Palhares

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

RESUMO

A atividade mineradora é uma das principais fontes de renda do Estado de Minas Gerais, e como consequência a geração de resíduos proveniente desta atividade se mostra um fator de enorme relevância ambiental e econômica, uma vez que os grandes volumes produzidos requerem grandes áreas para sua disposição, gerenciamento e monitoramento desses locais, alterando as características do ecossistema local, além de estabelecer um risco no que se diz respeito ao tipo de barragem usado no Brasil. Diante deste cenário, a reutilização desse tipo de resíduo pode ser uma alternativa viável, desde que sejam avaliadas as suas características química, mineralógica e granulométrica. Portanto, este estudo busca avaliar a substituição da areia de gnaiss, nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%, por resíduos de minério de ferro na produção de blocos de concreto intertravados. Primeiramente, foi realizada a caracterização das matérias primas (resíduo, areia de gnaiss e pó de pedra) por meio de análise granulométrica, análises de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). Posteriormente, foi avaliada as propriedades físicas e mecânica dos corpos de prova, utilizando os ensaios de absorção de água, porosidade aparente, massa específica e resistência à compressão uniaxial. Os resultados mostraram a possibilidade de reutilização do resíduo em substituição à areia de gnaiss na proporção de até 50%, para produção de blocos de concreto intertravados com resistência mecânica de 38,75 MPa.

Palavras-chave: Resíduo de mineração de ferro; Blocos de concreto intertravados; Pavimentação.

ABSTRACT

The mining activity is one of the main sources of income in the State of Minas Gerais, and therefore the generation of waste from this activity is a factor of enormous environmental and economic relevance, since large volumes produced require large areas for their disposal, management and monitoring of these places, changing the characteristics of the local ecosystem, in addition to establishing a risk with regard to the type of dam used in Brazil. Given this scenario, the reuse of this type of waste can be a viable alternative, provided that its chemical, mineralogical, and granulometric characteristics are evaluated. Thus, this study seeks to evaluate the replacement of gneiss sand, in the proportions of 25%, 50%, 75% and 100%, by iron ore waste in the production of interlocking concrete blocks. Firstly, the characterization of the raw materials (waste, gneiss sand and stone powder) was performed by means of granulometric analysis, X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD) analyses. Subsequently, the physical and mechanical properties of the specimens were evaluated, using the water absorption, apparent porosity, specific mass, and uniaxial compressive strength tests. The results showed the possibility of reusing the waste to replace the gneiss sand in the proportion of up to 50%, for the production of interlocking concrete blocks with mechanical strength of 38.75 MPa.

Keywords: Iron mining waste; Interlocking concrete blocks; Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trator atuando no nivelamento da pilha de estéril da mina de Timbopeba da Vale.....	15
Figura 2 – Resíduo em pasta, disposto por caminhões	16
Figura 3 – Disposição de resíduos granulares através de tubulações	17
Figura 4 – Exemplos de peças de concreto do Tipo I.....	22
Figura 5 – Exemplos de peças de concreto do Tipo II.....	23
Figura 6 – Exemplos de peças de concreto do Tipo III	23
Figura 7 – Exemplos de peças de concreto do Tipo IV	24
Figura 8 – Fluxograma dos materiais e métodos utilizados no trabalho.....	33
Figura 9 – Curva granulométrica do resíduo de minério de ferro.....	40
Figura 10 – Distribuição granulométrica da areia de gnaiss e zonas de utilização.....	41
Figura 11 – Distribuição granulométrica do pó de pedra e zonas e utilização	42
Figura 12 – Difratoograma de DRX para a amostra de resíduo de minério de ferro	44
Figura 13 – Difratoograma de DRX para a amostra de areia de gnaiss	45
Figura 14 – Difratoograma de DRX para a amostra de pó de pedra.....	46
Figura 15 – Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova	47
Figura 16 – Resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.....	26
Tabela 2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	28
Tabela 3 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.....	29
Tabela 4 – Traço referência	36
Tabela 5 – Traço 1 – Substituição em 25% da areia por resíduo de minério de ferro.....	36
Tabela 6 – Traço 2 – Substituição em 50% da areia por resíduo de minério de ferro	36
Tabela 7 – Traço 3 – Substituição em 75% da areia por resíduo de minério de ferro	36
Tabela 8 – Traço 4 - Substituição em 100% da areia por resíduo de minério de ferro.....	37
Tabela 9 – Análise química qualitativa para amostras de resíduo de minério de ferro, areia e pó de pedra.....	42
Tabela 10 – Massa específica da amostra seca	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivos Gerais.....	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Resíduos de mineração	13
3.1.1 Estéreis.....	14
3.1.2 Resíduos.....	15
3.1.3 Aspectos socioambientais	17
3.1.4 Caracterização dos resíduos de minério de ferro	18
3.2 Reutilização de resíduos em materiais da construção civil.....	19
3.2.1. Concretos e Argamassas	19
3.2.2 Blocos para pavimentação	20
3.3 Pavimento Intertravado.....	21
3.4 Blocos de concreto para pavimentação.....	21
3.4.1 Tipos de blocos para pavimentação	22
3.4.2 Composição dos blocos para pavimentação	24
3.4.2.1 Cimento Portland	25
3.4.2.2 Agregados	27
3.4.2.3 Agregados miúdos	27
3.4.2.4 Agregados graúdos.....	28
3.4.2.5 Agua de amassamento.....	29
3.4.2.6 Aditivos.....	30
3.5 Produção dos blocos	31
3.5.1 Dosagem	31
3.5.2 Mistura.....	31
3.5.3 Adensamento ou Compactação.....	32
3.5.4 Cura.....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Materiais	33
4.1.1 Matérias-primas	33
4.1.2 Equipamentos.....	34

4.2 Métodos.....	34
4.2.1 Caracterização das amostras de resíduo, areia de gnaiss e pó de pedra	34
4.2.2 Confeção dos corpos de prova	35
4.2.3 Dosagem dos traços	35
4.2.4 Caracterização dos corpos de prova.....	37
4.2.4.1 Absorção de água.....	37
4.2.4.2 Porosidade aparente (porosidade aparente)	38
4.2.4.3 Massa específica da amostra seca	38
4.2.4.4 Resistência à compressão uniaxial.....	39
5. RESULTADO E DISCUSSÕES	40
5.1 Caracterização das Matérias-Primas.....	40
5.1.1 Análise granulométrica	40
5.1.2 Análise química qualitativa por fluorescência de raios X (FRX)	42
5.1.3 Difração de raios X (DRX)	43
5.2 Caracterização Física e Mecânica dos Corpos de Prova.....	47
5.2.1 Absorção de água e porosidade aparente	47
5.2.2 Massa específica de bloco de concreto intertravado seco.....	48
5.2.3 Resistência à compressão uniaxial	49
6. CONCLUSÃO	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

A quantidade cada vez maior de resíduos gerados na fase de exploração, extração e processamento de minério de ferro constitui um grande problema ambiental às mineradoras, devido as grandes áreas requeridas para disposição dos mesmos, bem como a constante necessidade de gerenciamento desses locais (ANM, 2020).

Além dos danos ambientais causados pela disposição dos resíduos advindo do processamento, recentemente as barragens a montante, o modelo de barragem mais comum utilizado no Brasil, vem se mostrando um método arriscado depois das tragédias nas cidades de Mariana e Brumadinho, onde os danos ambientais e humanos foram imensos, visto que esta é a forma mais barata de se alojar resíduos, porém é também a menos segura (BRASÍLIA, 2019).

Diante deste cenário, a reutilização de resíduos gerados na mineração torna-se um fator de extrema importância, uma vez que essa prática visa um direcionamento destes resíduos, deixando de depositá-los em barragens, e também permitindo a diminuição dos impactos gerados na extração e beneficiamento de agregados, pois estes podem ser substituídos parcial ou totalmente dependendo da aplicação do material produzido, que são amplamente consumidos na indústria da construção civil, trazendo sustentabilidade aos processos de produção. Paralelo a este fato, a indústria da construção civil é, mundialmente, um setor em constante movimento, sendo este um dos setores de maior geração de resíduos e consumo de insumos naturais, mas também com grande capacidade de absorver resíduos provenientes de outros processos e setores industriais (ARISTIMUNHO et al. 2012).

A constante e crescente ampliação de ruas com pavimentação em municípios requer qualidade dos seus componentes. Visto os elevados investimentos públicos necessários para a manutenção das ruas, urge alcançar um melhor desempenho e, conseqüentemente, maior durabilidade desses pavimentos. A pavimentação por meio de blocos intertravados de concreto se mostra uma técnica atrativa, pois além de possuir um relativo baixo custo, é uma alternativa ao asfalto tradicional. Desse modo os blocos intertravados podem ser vistos com um grande mercado consumidor em diversos setores da construção civil.

A combinação dos fatores acima abordados promove um estudo com grande potencial, aliando as características físico/químicas e econômicas dos materiais à questão ambiental envolvida em processos industriais e de extração de matéria prima.

Partindo desse ponto, onde há um mercado sempre em movimento e a necessidade de buscar formas sustentáveis de produção, fica evidente a importância de estudos sobre a

utilização de resíduo de mineração em materiais de construção civil, em especial os blocos intertravados de concreto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da substituição da areia por resíduos de minério de ferro, proveniente do rompimento da barragem do Fundão (Mariana – MG), na produção de blocos de concreto intertravados.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a análise granulométrica por meio de peneiramento e análise a laser, e a caracterização química e mineralógica dos materiais utilizados (resíduo de minério de ferro, areia e pó de pedra) por meio de Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X na confecção dos blocos de concreto intertravados.
- Analisar a influência substituição da areia por resíduo de minério de ferro, em diferentes concentrações (25%, 50%, 75% e 100%) na mistura para confecção dos blocos de concreto intertravados, por meio dos testes físicos e mecânicos: absorção de água, porosidade aparente, massa específica e resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos de Mineração

A geração e disposição de resíduos são fatores críticos na mineração, setor que corresponde a um dos principais geradores mundiais de descartes, com importantes implicações econômicas, ambientais e sociais. Os resíduos gerados na atividade de mineração representam tanto um custo ao empreendedor, pois seu manejo adequado implica em despesas, quanto um passivo ambiental, pois os volumes movimentados precisam ser dispostos de forma correta e monitorados para evitar acidentes ou contaminação (ANM, 2020).

Na atividade de mineração, existem dois tipos principais de resíduos sólidos: os estéreis e os resíduos de processamento. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração (ou lavra) no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas. Os resíduos de processamento, aqui tratados como resíduos são resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas às substâncias minerais. Estes processos têm a finalidade de padronizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final. Existem ainda outros resíduos, constituídos por um conjunto bastante diverso de materiais, tais como efluentes do tratamento de esgoto gerado nas plantas de mineração, carcaças de baterias e pneus utilizados pela frota de veículos, provenientes da operação das plantas de extração e de beneficiamento das substâncias minerais (IPEA, 2012).

Com base nos dados declarados no Relatório Anual de Lavra (RAL), no período de 2010 a 2019, estimou-se que, no Brasil, um total de 3,4 bilhões de toneladas de resíduos e 8,2 bilhões de toneladas de estéreis foram gerados em empreendimentos produtores de ferro, ouro, cobre, fosfato, estanho, alumínio, níquel, carvão, manganês, zinco, cromo e vanádio. Do total de resíduos gerados, 61,2% concentra-se na região Sudeste, principalmente no estado de Minas Gerais (60,3%), e 40,9% estão relacionados à produção de minério de ferro. Em relação ao estéril, verifica-se maior participação do ferro (47,9%) no total gerado no período, com distribuição espacial menos concentrada em relação aos resíduos, embora com a região Sudeste ainda em primeiro lugar, respondendo por 44,3% do total, sendo 43,4% em Minas Gerais (ANM, 2020).

Em geral, estéril e resíduos são depositados em pilhas e barragens, e requerem manejo adequado bem como monitoramento constante para garantir a estabilidade e segurança de tais estruturas. Outra forma de disposição menos comum é em cavas exauridas de minas a céu

aberto, alternativa que apresenta menor risco ambiental comparada à disposição em barragens. Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos e estéreis é um tema que ganhou relevância nos últimos anos, em especial com a consolidação dos conceitos de licença social para operar (LSO) e de economia circular, correspondendo a uma tendência do setor mineral mundial. A necessidade de dar destinação sustentável aos resíduos da mineração ganhou mais relevância após os desastres das barragens de resíduo em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), e o aproveitamento econômico desses materiais surge como alternativa à deposição em estruturas como pilhas e barragens (ANM, 2020).

Como as barragens demandam monitoramento constante, de alto custo para as mineradoras, e pelo fato da grande maioria delas se encontrar muito próxima dos limites de suas capacidades, somados às questões de risco ambiental agravado pelos desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), grandes empresas do setor começaram a investir em estudos sobre reaproveitamentos de resíduos como matéria-prima para outros materiais. Em novembro de 2020 a Vale inaugurou a primeira planta de produtos para a construção civil que utiliza como matéria-prima principal o resíduo da atividade de mineração. Localizada na Mina do Pico, em Itabirito, Minas Gerais, a Fábrica de Blocos do Pico promoverá a economia circular na operação de beneficiamento do minério de ferro. A expectativa é que a cada ano, cerca de 30 mil toneladas de resíduos deixem de ser dispostas em barragens e/ou pilhas para produzir 3,8 milhões de produtos pré-moldados de aplicação na indústria da construção civil. A produção será de artigos como pisos intertravados, blocos de concreto estruturais, blocos de vedação, placas de concreto, manilhas, blocos de vedação etc. (VALE S.A., 2020).

3.1.1 Estéreis

O estéril é proveniente de uma camada de material sem valor comercial que se localiza acima do mineral a ser explorado. Normalmente, o mineral não fica completamente exposto, podendo ele estar parcialmente coberto com alguns pontos de afloramento ou completamente coberto pelo estéril. Sendo assim, para que seja viável a exploração da mina, faz-se necessário a retirada deste material de cobertura ou a escavação subterrânea até chegar ao veio de minério. O estéril geralmente possui duas origens distintas, ser fruto da decomposição da rocha sã do próprio minério ou ter origem da sedimentação de materiais distintos, proveniente de outros locais (RUSSO, 2007).

A retirada do estéril é realizada à medida que a mina avança sendo o material estocado geralmente na forma de pilhas nos talvegues e encostas próximas à área da lavra, mas pode

também ocorrer sua disposição de outras formas, como o preenchimento de antigas cavas de minas a céu aberto ou subterrâneas. A retirada do estéril bem como a construção das pilhas é realizada com auxílio dos próprios equipamentos da mineração, como pode ser observado na Figura 1 (RUSSO, 2007).

Figura 1 - Trator atuando no nivelamento da pilha de estéril da mina de Timbopeba da Vale



Fonte: Russo, 2007.

3.1.2 Resíduos

Resíduos tratados neste estudo são resultantes de processos de beneficiamento a que são submetidos os minérios, visando extrair os elementos de interesse econômico (produto final). Esses processos têm a finalidade de regularizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final. Os procedimentos empregados para esse fim são muito variados, pois dependem basicamente do tipo e da qualidade do minério a ser extraído. Alguns tratamentos comumente utilizados podem ser citados tais como britagem, moagem e concentração. São relatados também peneiramento, lavagem, secagem e calcinação. Entre os processos de concentração podem ser evidenciadas concentração por densidade (espirais), separação magnética, separação eletrostática, ciclonação e flotação (BEZERRA, 2017).

Em função do tipo de minério processado e dos tratamentos adotados podem ser encontrados resíduos com variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas.

Os resíduos, quando de granulometria fina, são denominados lama, e quando de granulometria grossa (acima de 0,074 mm), são denominados resíduos granulares, sendo que foi adotado o termo polpa para indicar esses resíduos granulares associados a um meio fluido de transporte (ESPÓSITO, 2000). Sua constituição é caracterizada pela presença de uma fração líquida e sólida, com concentração de 30% a 50% em peso. Os resíduos granulares possuem alta permeabilidade e resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade. Já as lamas, possuem alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade. No processo de beneficiamento para obtenção de minério de ferro, por exemplo, o minério é submetido a etapas sucessivas de peneiramento, britagem, moagem, deslamagem e flotação em colunas, obtendo-se o ferro concentrado e eliminando-se as impurezas, principalmente a sílica (ARAÚJO, 2006).

O descarte dos resíduos gerados na unidade de beneficiamento das empresas mineradoras pode ser feito na forma sólida (pasta ou granel) ou líquida (polpa). Na primeira situação o transporte e deposição dos resíduos em pasta são realizados através de caminhões ou correias transportadoras, como apresentado na Figura 2 e na segunda situação, ilustrada na Figura 3, por meio de tubulações. Com a técnica do aterro hidráulico, o material é lançado hidráulicamente e o transporte realizado por meio de tubulações. Este transporte pode ser por bombeamento ou gravidade. Normalmente, este lançamento é realizado com a utilização de hidrociclones ou canhões (ARAÚJO, 2006).

Figura 2 - Resíduo em pasta, disposto por caminhões



Fonte: Araújo, 2006.

Figura 3 - Disposição de resíduos granulares através de tubulações



Fonte: Espósito, 2000.

3.1.3 Aspectos socioambientais

Os riscos potenciais de se instalar uma barragem de resíduos de mineração podem ser claramente vistos observando os desastres ocorridos nos últimos anos em Minas Gerais. De acordo com dados do CNDH (2017), no dia 5 de novembro de 2015, a barragem de Fundão, da unidade industrial de Germano, no subdistrito de Bento Rodrigues, no Município de Mariana, Minas Gerais, se rompeu, causando uma enxurrada de lama e resíduos de mineração que destruiu o subdistrito, com 17 mortos, mais de 600 pessoas desabrigadas e desalojadas, milhares sem água e gerou gravíssimos danos ambientais e socioeconômicos a toda a Bacia do Rio Doce. A barragem, de responsabilidade da mineradora Samarco, possuía 55 milhões de metros cúbicos de resíduos de minério, retirado de minas na região, conforme estimativas do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, que se espalharam pelo leito do Rio Doce, por 600 quilômetros, até chegar ao litoral do Espírito Santo.

Os danos ambientais causados pelo rompimento da barragem de Fundão são incalculáveis, segundo a CPI de Brumadinho (2019). A lama de resíduos, ao invadir o rio Doce, tirou o sustento de mais de mil pescadores e provocou, apenas no primeiro momento, a morte de 11 toneladas de peixes. O rio Doce abrigava 12 espécies de peixes endêmicas e 11 ameaçadas de extinção, cujas populações foram dizimadas (BRASÍLIA, 2019).

Pouco mais de três anos após, em 25 de janeiro de 2019, por volta as 12h30min, houve outro rompimento de barragem de resíduos. A barragem B1 da mina de ferro de Córrego do Feijão, pertencente à empresa brasileira Vale S.A., despejou 13 milhões de m³ de lama de

resíduo na natureza, sobre o município de Brumadinho (MG). A barragem se localizava na bacia do ribeirão Ferro Carvão, afluente da margem direita do rio Paraopeba, que, por sua vez, é contribuinte do rio São Francisco e um dos formadores do reservatório de Três Marias. Este rompimento está entre os maiores desastres da indústria de mineração de ferro já relatados mundialmente (BRASÍLIA, 2019).

Os dados da CPI de Brumadinho e do desastre em Mariana (2015) mostram que as dimensões de todos os impactos causados por acidentes com barragens de resíduos são proporcionais ao tamanho e capacidade das mesmas. O fato de existirem centenas de barragens de grande porte espalhadas pelo Brasil, em sua maioria projetadas e construídas pelo método a montante, a forma mais barata de se alojar resíduos e também a menos segura, traz um caráter de urgência à destinação e reutilização desses resíduos (BRASÍLIA, 2019).

De acordo com Aristimunho et al. (2012), toda vez que um setor da indústria reaproveita um resíduo gerado por outro setor, diz-se que houve um ganho ambiental no processo produtivo dos dois setores, porque ocorre uma menor demanda por recursos naturais e energia. Isso ajuda a estabelecer um “ciclo fechado” de energia e recursos naturais, o que contribui para minimizar o impacto ambiental gerado por esses processos produtivos.

3.1.4 Caracterização de resíduos de minério de ferro

A caracterização dos resíduos de mineração de ferro tem sido foco de um grande número pesquisas. O reaproveitamento de resíduos provenientes de barragens já desativadas possui grande viabilidade econômica e reduz impacto ambiental gerado pela mineração. Para que isso ocorra, a caracterização dos resíduos é essencial, tornando possível o reaproveitamento do resíduo como subproduto na própria planta de beneficiamento ou em outros segmentos industriais (BORGES, 2008).

Oliveira (2006) analisou a composição química de faixas granulométricas de resíduos do espaçador de lama da Usina de Conceição - Vale. Os maiores teores de ferro ocorrem em partículas de 9 µm a 23 µm e maiores teores de sílica nas partículas entre 45 µm e 106 µm de diâmetro.

Em resíduos da flotação mecânica da empresa Samarco, concluiu-se que quanto maior as partículas, maior é a proporção de óxido de silício encontrado, e quanto menor os tamanhos das partículas, maior a fração de óxido de ferro (VIEIRA, 2008).

De acordo com Wolff (2009), o teor de ferro em resíduos de diversas minas da Vale, está entre 44 % e 64 %. Wolff ainda realizou um estudo sobre a quantidade de ferro em

diferentes faixas granulométricas, em resíduos de nove minas da Vale. Os resultados mostraram que a maior quantidade de ferro está presente em partículas de diâmetros de 10 μm a 15 μm , encontrando também grandes quantidades de ferro em partículas superiores as 15 μm e os menores valores sendo obtidos em partículas inferiores a 10 μm .

Rocha et al. (2009) analisou amostras de resíduos da mineradora Anglo Ferrous e encontrou teores de ferro 43 %, sílica 29 % e alumina 5 % em partículas com diâmetros menores que 7,1 μm .

Por fim, Gomes et al. (2011) caracterizou os finos de uma barragem de resíduo de mineração de ferro e encontrou teores médios de 48 % de Fe_2O_3 , 21 % de SiO_2 e 3 % de Al_2O_3 sendo que praticamente todo ferro se encontrava na forma de hematita.

A partir de tais estudos, pode se perceber uma tendência de que resíduos com partículas menores possuam maior quantidade de ferro, enquanto partículas maiores apresentem teores mais altos de sílica. Contudo não é possível afirmar que exista uma relação direta entre os tamanhos das partículas e a composição química dos resíduos.

3.2 Reutilização de Resíduos em Materiais da Construção Civil

3.2.1 Concreto e argamassas

De acordo com Tam et al. (2009), o concreto que possui em sua constituição agregados reciclados satisfaz três requisitos ditos "verdes", estabelecidos pela Organização Mundial do Meio Ambiente sendo: reciclar e reduzir recursos naturais e consumo de energia; não afetar o ambiente; e manter o desenvolvimento sustentável.

Lopez et al. (2007) substituíram o agregado miúdo por resíduo de cerâmica branca provinda de demolições e da indústria cerâmica, e verificaram que o concreto obtido possuía as mesmas características mecânicas que o concreto feito com areia convencional.

Segundo Leite (2001), a utilização da fração miúda do material reciclado sem notáveis prejuízos à performance mecânica dos concretos, é totalmente viável, sendo o agregado graúdo responsável por afetar mais a resistência à tração, módulo de deformação e trabalhabilidade dos concretos se comparado ao agregado miúdo reciclado. Ainda segundo a mesma autora, “uso de agregados reciclados é perfeitamente viável para produção de concretos, pelo menos do ponto de vista das propriedades mecânicas avaliadas. No entanto, é importante ressaltar que, para relações a/c (água/cimento) baixas, a combinação das duas frações de agregados reciclados merece atenção especial, visto que foram observadas reduções das resistências mecânicas”.

Dentre os produtos gerados no beneficiamento do minério de ferro, a lama de lavagem, na maioria dos casos, é armazenada em barragens de resíduos sem um aproveitamento comercial. Aristimunho et al. (2012) avaliou, do ponto de vista técnico, a aplicação desse resíduo na forma de pó em argamassa de cimento Portland. Desta forma, foram moldados corpos-de-prova com variadas proporções de cimento, areia e pó de minério de ferro e, posteriormente, submetidos a ensaios físicos e mecânicos. Os resultados demonstraram que as substituições da areia pelo resíduo (destaque para a substituição de 20%) melhoraram o desempenho mecânico das argamassas. Isso demonstra a viabilidade técnica do material em estudo.

3.2.2 Blocos para pavimentação

A prática da utilização de agregados reciclados como constituintes básicos de pavimentos, é muito comum em diversos países desenvolvidos, como Austrália, Estados Unidos e Europa, por exemplo, que criaram suas próprias especificações para controle de produção e aplicação de tais materiais, de forma que utilizam reciclados devido às boas propriedades e ao baixo custo tanto de produção como de execução da obra (AMADEI, 2011).

Poon et al. (2002) apresentaram resultados onde a substituição de agregados naturais por agregados reciclados, tanto miúdos quanto graúdos, entre os níveis de 25% e 50%, tiveram pouco efeito sobre a resistência à compressão dos blocos. Valores mais elevados de substituição diminuíram a resistência à compressão, porém, a resistência à flexão das amostras melhorou com maiores percentuais de substituição.

Ao estudar blocos de pavimentação substituindo agregados por resíduos de cerâmica, Poon et al. (2006) determinaram que, apesar do resíduo do tijolo cerâmico prejudicar algumas qualidades do concreto, os blocos com substituição de até 50% atendem os requisitos estabelecidos pelas normas vigentes locais.

Pesquisas de Poon et al. (2009), comprovam que o baixo grau de agregados reciclados oriundos de usinas de triagem de resíduos de construção tem potencial para serem utilizados como agregados para blocos de concreto pré-moldados, onde pode-se substituir até 50% dos agregados naturais.

Pagnussat (2004) observou os resultados adquiridos em pesquisas do meio técnico-científico, concluindo que a inserção de resíduos em produtos da construção civil é uma prática consideravelmente interessante. Contudo, é preciso conhecer propriedades do material a ser incorporado, para se delinear as potencialidades e os limites deste. Alguns pré-requisitos devem

ser estabelecidos para o emprego de resíduos em blocos de concreto, como a trabalhabilidade adequada, sem alterar as propriedades mecânicas; tecnologia envolvida de fácil assimilação; e investimento mínimo.

Almeida et al. (2009) confeccionou e caracterizou blocos para pavimentação utilizando resíduo de piso cerâmico proveniente da construção civil como agregados reciclados, e como resultado concluiu que os mesmos apresentam propriedades satisfatórias, estando estas compatíveis com as do produto encontrado no mercado da construção civil.

3.3 Pavimento Intertravado

Pavimento intertravado é um tipo de pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças (blocos) de concreto justapostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção (ABNT, 2013).

O piso intertravado é um tipo de pavimento em que o revestimento é formado por blocos de concreto com intertravamento por areia de selagem. As cargas a que o pavimento é exposto são distribuídas pelos blocos e resistidas em conjunto, por isso a importância do intertravamento adequado. Eles podem ser utilizados para a pavimentação de ruas, acessos internos e estacionamentos, calçadas e passeios. Em suas extremidades, é necessário inserir elementos de contenção, como cordões em concreto (que podem ser igualmente modulares). Um piso intertravado não se desloca lateralmente quando solicitado, nem rotaciona, nem translaciona. É muito importante que as faces de cada bloco sejam bem produzidas e paralelas, o que também garante o travamento. Esse é um critério de aceitação do material em função desse aspecto (PEREIRA, 2018).

3.4 Blocos de Concreto para Pavimentação

Os blocos são produzidos em vibroprensas que promovem boa compactação às peças, aumentando sua resistência mecânica e durabilidade. Após a moldagem nas vibroprensas, as peças são curadas em câmaras que mantém constante a umidade relativa acima dos 95%, garantindo assim a hidratação do cimento e proporcionando menor absorção de água da peça, que deve ser menor ou igual a 6% (ABCP, 2010).

Os blocos devem possuir algumas características definidas pela ABNT (2013), como medida nominal do comprimento e largura de no máximo 250 mm, medida nominal da espessura de no mínimo 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm, sendo que as tolerâncias para tais medidas são de 3mm.

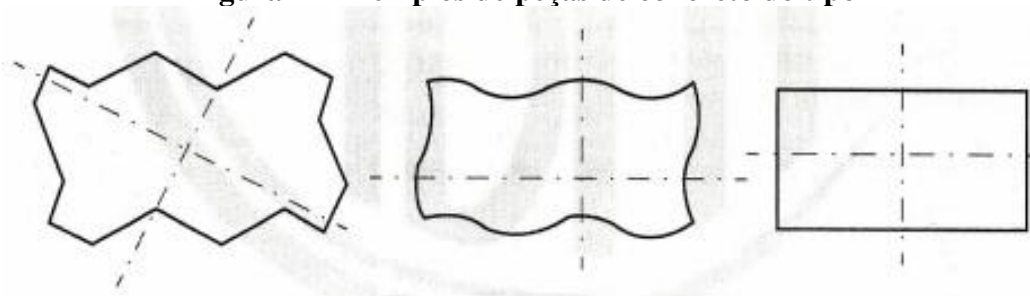
Ainda segundo ABNT (2013), em todos os casos as peças de concreto devem possuir resistência característica à compressão mínima igual a 35MPa e resistência à abrasão com cavidade máxima de 23mm, no caso de pavimentos para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. No caso de tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados, a resistência característica à compressão mínima exigida é de 50MPa e a resistência a abrasão deve possuir cavidade máxima de 20mm.

3.4.1 Tipos de blocos para pavimentação

As peças de concreto podem ser produzidas em diversos formatos. Alguns modelos se destacam por serem mais utilizados. Os pesquisadores não entraram num consenso sobre qual o melhor formato dos blocos intertravados. O único requisito recomendado com relação ao formato dos blocos é que ele seja capaz de permitir o assentamento em combinação bidirecional (WIEBBELLING, 2015). Estes formatos são agrupados conforme os tipos de peças, relatadas a seguir:

- **Tipo I:** As peças de concreto do tipo I (Figura 4) possuem um formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe (ABNT, 2013).

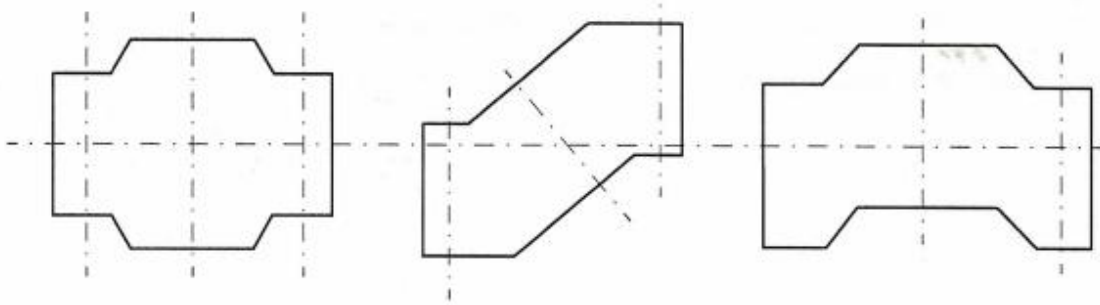
Figura 4 - Exemplos de peças de concreto do tipo I



Fonte: ABNT, 2013.

- **Tipo II:** As peças de concreto do tipo II possuem formato único, diferente do retangulares e que só podem ser assentadas em fileiras, conforme a figura 5 a seguir (ABNT, 2013).

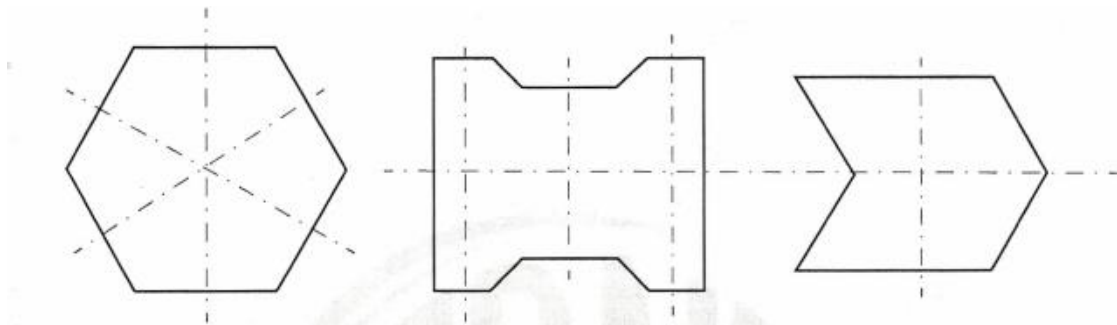
Figura 5 - Exemplos de peças de concreto do tipo II



Fonte: ABNT, 2013.

- **Tipo III:** Peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triedros etc., conforme ilustra a Figura 6, com peso superior a 4 kg (ABNT, 2013).

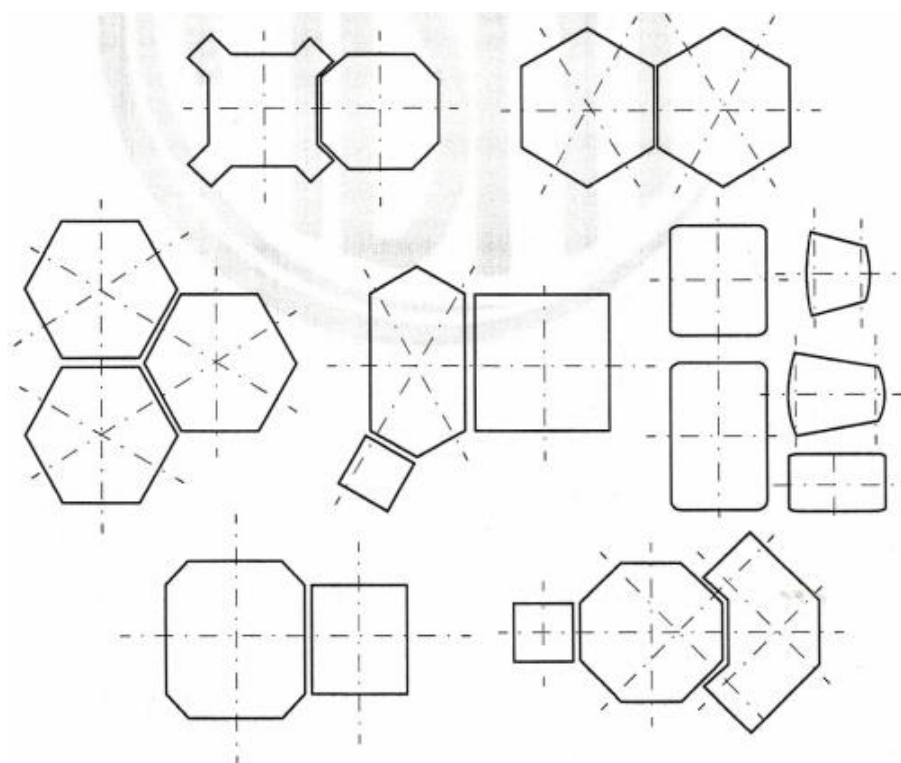
Figura 6 - Exemplos de peças de concreto do tipo III



Fonte: ABNT, 2013

- **Tipo IV:** Conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento conforme ilustra a Figura 7 (ABNT, 2013).

Figura 7 - Exemplos de peças de concreto do tipo IV



Fonte: ABNT, 2013.

3.4.2 Composição dos blocos para pavimentação

O concreto utilizado nas peças deve ser constituído de cimento Portland, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos e respeitando que o cimento Portland pode ser de qualquer tipo e classe, devendo obedecer às ABNT NBR 5732, ABNT NBR 5733, ABNT NBR 5735, ABNT NBR 5736, ABNT NBR 11578 e ABNT NBR 12989 (ABNT, 2013).

Os agregados podem ser naturais, industriais ou reciclados, obedecendo à ABNT NBR 7211 ou outras Normas Brasileiras pertinentes. Normalmente os fabricantes utilizam areias médias, com módulos de finura variando entre 2,5 e 3,2 evitando areias grossas que dificultam a compactação devido ao fenômeno de interferência entre partículas. Pode-se utilizar agregados miúdos artificiais, como pó de brita basalto, proveniente do processo de britamento de rochas estáveis para produção de agregados graúdos, que por sua vez também são resultantes do britamento de rochas estáveis (brita “0” ou “1”). Estes são os mais indicados na utilização em peças de concreto por apresentarem, geralmente, uma melhor aderência com a pasta de cimento, favorecendo a obtenção de resistências mecânicas mais elevadas (WIEBBELLING, 2015).

A água de amassamento deve atender à ABNT NBR 15900-1, que delimita valores de concentrações de impurezas orgânicas e inorgânicas (ABNT, 2013). E os aditivos devem atender à ABNT NBR 11768 que define sua adição durante o processo de fabricação do concreto, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício contida no concreto, com o objetivo de modificar propriedades no estado fresco e/ou endurecido; e os pigmentos devem ser de base inorgânica e atender à ASTM C 979/C 979M (ABNT, 2013).

3.4.2.1 Cimento Portland

O principal constituinte do cimento Portland é o clínquer Portland, material resultante da calcinação a aproximadamente 1450°C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregados de modo a garantir o quimismo. Esse quimismo refere-se a certa proporção de determinados compostos químicos da mistura, dentro de limites específicos, para proporcionar a formação de compostos hidráulicos e conferir a propriedade ligante do cimento Portland (BATTAGIN, 2011).

Assim, em escala industrial, para se obter o clínquer Portland, desenvolve-se uma operação complexa que consiste na extração e britagem das matérias-primas, seguindo-se à preparação adequada da mistura crua (farinha), isto é, moagem e homogeneização, com posterior queima por volta de 1450°C em forno rotativo, seguida de resfriamento no resfriador industrial. O cimento Portland é obtido a partir da moagem do clínquer com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, estas últimas empregadas em proporções que variam em massa de 3% a 5%, aproximadamente, com o objetivo principal de regular o tempo de pega ou endurecimento inicial do produto (BATTAGIN, 2011).

Ainda segundo Battagin (2011), o Brasil dispõe de oito tipos básicos normalizados de cimento Portland, os quais com seus subtipos e classes de resistência chegam a mais de duas dezenas disponíveis para as mais variadas aplicações. O cimento Portland comum (CP I), embora praticamente ausente do mercado, principalmente por questões ambientais e de racionalização de energia, continua como referência, por suas características e propriedades, a todos os tipos básicos de cimento Portland disponíveis no mercado brasileiro, pois foi o tipo de cimento pioneiramente produzido a partir de 1926 e constituiu o tipo predominante até o final da década de 1980. São os seguintes os tipos de cimento normalizados:

- Cimento Portland Comum (CP I):
 - CP I – Cimento Portland Comum
 - CP I-S – Cimento Portland Comum com Adicao;

- Cimento Portland Composto (CP II):
 - CP II-E – Cimento Portland Composto com Escoria;
 - CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana;
 - CP II-F – Cimento Portland Composto com Filer;
- Cimento Portland de Alto-Forno (CP III);
- Cimento Portland Pozolanico (CP IV);
- Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial (CP V-ARI);
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS);
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratacao (BC);
- Cimento Portland Branco (CPB).

Os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais. São identificados por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência (25, 32, 40 MPa ou ARI), acrescidas dos sufixos RS e BC, quando aplicáveis, tal qual mostra a Tabela 1 (ABNT, 2018).

Tabela 1 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Tipo	Subtipo	Sigla	Resistência (MPa)	Sufixo
Cimento Portland	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^c -
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	-
	Não Estrutural	CPB	-	

a. O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos para seu tipo e classe originais.

b. O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos para seu tipo e classe originais.

c. As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em Megapascal (Mpa), conforme método de ensaio estabelecido pela ANT NBR 7215.

d. Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta no primeiro dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: ABNT, 2018.

3.4.2.2 Agregados

Agregado é o material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. Pode ser de origem natural, que pode ser usado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser lavado classificado ou britado, de origem artificial resultante de processo industrial envolvendo alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original, ou reciclado, obtido de processos de reciclagem de resíduos ou subprodutos da produção industrial, mineração ou construção civil, incluindo agregados recuperados de concreto fresco por lavagem (ABNT, 2011).

Pode ser resultante da britagem de rochas cujo beneficiamento resulta numa distribuição granulométrica constituída por agregados graúdos e miúdos ou por mistura intencional de agregados britados e areia natural ou britada, possibilitando o ajuste da curva granulométrica em função das características do agregado e do concreto a ser preparado com esse material. Os limites referentes ao agregado total devem atender aos critérios de ponderabilidade em massa entre os agregados graúdos e miúdos que o compõem (ABNT, 2011; ABNT, 2005).

Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto (ABNT, 2011; ABNT, 2005).

O exame petrográfico realizado de acordo com a ABNT NBR 7389 e interpretado por profissional capacitado, fornece alguns dos subsídios necessários para o cumprimento destas condições (ABNT, 2005).

3.4.2.3 Agregados miúdos

São agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1. Podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto, materiais com distribuição granulométrica de acordo com as zonas estabelecidas na Tabela 2, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade (ABNT, 2005).

Tabela 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Abertura das Peneiras	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	10	20	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

1. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
2. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
3. O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT, 2005.

A areia, por exemplo, é um agregado miúdo originado através de processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas, ou provenientes de processos industriais. É chamada areia natural se resultante de ação de agentes da natureza, de areia artificial quando proveniente de processos industriais; de areia reciclada, quando proveniente de processos de reciclagem; e de areia de britagem, quando proveniente do processo de cominuição mecânica de rocha (ABNT, 2011).

3.4.2.4 Agregado graúdos

Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1. A distribuição granulométrica, determinada segundo a ABNT NBR NM 248, deve atender aos limites indicados na Tabela 3 para o agregado graúdo (ABNT, 2005).

Tabela 3 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura das Peneiras	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ⁽¹⁾				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 - 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ²⁾	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ²⁾	65 ²⁾ - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ²⁾ - 65 ²⁾	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 – 15 ²⁾	80 ²⁾ – 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 ²⁾ - 65 ²⁾	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ²⁾ – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-
<p>1) Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.</p> <p>2) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também ser distribuída em vários desses limites.</p>					

Fonte: ABNT, 2005.

São considerados agregados graúdos, segundo ABNT NBR 9935:

- Pedra britada ou brita: agregado originado da cominuição mecânica da rocha.
- Pedregulho ou cascalho: agregado que pode ser utilizado em concreto tal qual é encontrado na natureza, sem qualquer tratamento que não seja lavagem e seleção.
- Pedregulho britado ou cascalho britado: agregado graúdo originado da cominuição mecânica de pedregulho.

3.4.2.5 Água de amassamento

A água para uso em concreto deve estar em conformidade com parâmetros definidos pela norma NBR 15900-1, que mostra as exigências químicas, físicas e as exigências de tempo

de pega e resistência à compressão. A água classificada como água potável é considerada em conformidade com os requisitos necessários para sua aplicação em concreto.

Segundo Oliveira (2004) a quantidade de água empregada em um concreto seco gira em torno de 5 a 7,5 %; valores estes inferiores, quando comparados com as quantidades utilizadas na confecção de concretos plásticos (8 a 12 %). Ainda menciona que, desde que não haja prejuízo na desforma e alteração no formato do bloco, a quantidade de água ideal é a máxima possível compatível com a máquina vibro-compressora.

3.4.2.6 Aditivos

Podem ser adicionados aditivos químicos durante a confecção e preparo de concreto de cimento Portland, tanto para o concreto simples, armado e protendido, preparado na obra, dosado em central, ou para indústria de pré-moldados ou pré-fabricados (ABNT, 2011).

Segundo ABNT NBR 11768, existem vários tipos de aditivos com diversas funções distintas e combinações dessas funções, dentre as quais pode-se exemplificar algumas que possuem caráter plastificante:

- Aditivo redutor de água / plastificante: aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite reduzir o conteúdo de água de um concreto, ou que sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez, ou ainda esses dois efeitos simultaneamente.
- Aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo I: aditivo que, sem alterar a consistência do concreto, permite grande redução de água, ou que, sem alterar a quantidade de água, aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto, ou ainda, que produza esses dois efeitos simultaneamente.
- Aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo II: aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite uma elevadíssima redução no conteúdo de água de um concreto, ou que, sem alterar a quantidade de água, aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto, ou ainda, que produza esses dois efeitos simultaneamente.

3.5 Produção dos Blocos

3.5.1 Dosagem

De acordo com Clementino et al. (2013), são os procedimentos necessários para obtenção da proporção mais adequada dos materiais constitutivos do concreto como cimento, água, agregados, e eventualmente os aditivos. O produto final deve atender os requisitos necessários tanto no estado fresco quanto endurecido e deve-se sempre buscar expressar em massa seca de materiais.

Em resumo, os requisitos básicos normalmente buscados em uma dosagem são: Resistência mecânica, trabalhabilidade, durabilidade, deformabilidade e sustentabilidade. Como resultado da dosagem obtêm-se o traço, que é a indicação das proporções de cimento, sendo unitária, e as proporções de agregados, podendo ser dado em massa ou volume, a serem empregados na confecção de concreto ou argamassa (CLEMENTINO, 2013).

3.5.2 Mistura

De acordo com Fioratti (2013), o processo de mistura tem como objetivo o contato íntimo entre os materiais componentes do concreto, garantindo o recobrimento de pasta de cimento sobre as partículas dos agregados resultando na mistura geral dos materiais. O principal requisito de qualidade da mistura é a homogeneidade.

Fioratti (2013) ainda recomenda que a ordem de colocação dos materiais seja feita da seguinte forma: Primeiramente adiciona-se parte do agregado graúdo e parte da água do amassamento. Logo depois é colocado o cimento, o restante da água e a areia. E por fim o restante do agregado graúdo.

O tempo de mistura é contado a partir do instante em que todos os materiais tenham sido lançados na cuba. A NBR 6118 (ABNT, 2004), estabelece que, para concretos plásticos, o tempo deve ser de $120\sqrt{d}$ para betoneiras com eixo inclinado. E $60\sqrt{d}$ para as que contêm o eixo horizontal, sendo o que para ambas d é o diâmetro do misturador em metros e o tempo em segundos (FIORATTI, 2013).

3.5.3 Adensamento ou compactação

O processo vibroprensado é o processo de fabricação de blocos mais utilizado no mundo e o que resulta em melhor desempenho estético do produto aplicado. Altamente mecanizado é o que proporciona a mais alta produtividade com baixíssimo consumo de mão de obra. Neste processo o bloco é produzido em vibroprensas, equipamentos multifuncionais que podem ser utilizados na produção de uma grande família de produtos de artefatos de cimento, tais como: blocos de concreto, tijolos, meios-fios, grelhas, blocos para pavimentação e placas (FIORATTI, 2013).

Ainda segundo Fioratti (2013), a vibroprensa recebe tal denominação em razão do mecanismo de funcionamento empregado durante o processo de moldagem dos *pavers*: vibração associada à prensagem. A primeira função é responsável pelo preenchimento do molde e pelo adensamento da mistura; a segunda função influencia o adensamento e o acabamento dos blocos. O maior desafio da produção do paver prensado é utilizar de bons equipamentos e controlar o processo de forma a eliminar ao máximo os vazios da mistura na fase de adensamento, recurso que permite obter a máxima resistência das peças.

3.5.4 Cura

Cura é o nome que se dá ao conjunto de medidas com a finalidade de evitar a evaporação prematura da água necessária à hidratação do cimento que controla o processo de pega e seu endurecimento (FIORATTI, 2013).

Clementino et al. (2013) verificou que os artefatos de concreto são curados pelos processos convencionais de molhagem com mangueira, aspersão de água através de sistemas de irrigação de jardim, cobertura com lona plástica, saturação da umidade por meio de bicos do tipo *splinklers* ou ventiladores pressurizados.

A NBR 6118 (ABNT, 2004) exige proteção nos 7 primeiros dias contados do lançamento. As condições de umidade e temperatura, principalmente as de primeira idade, têm importância muito grande nas propriedades do concreto endurecido.

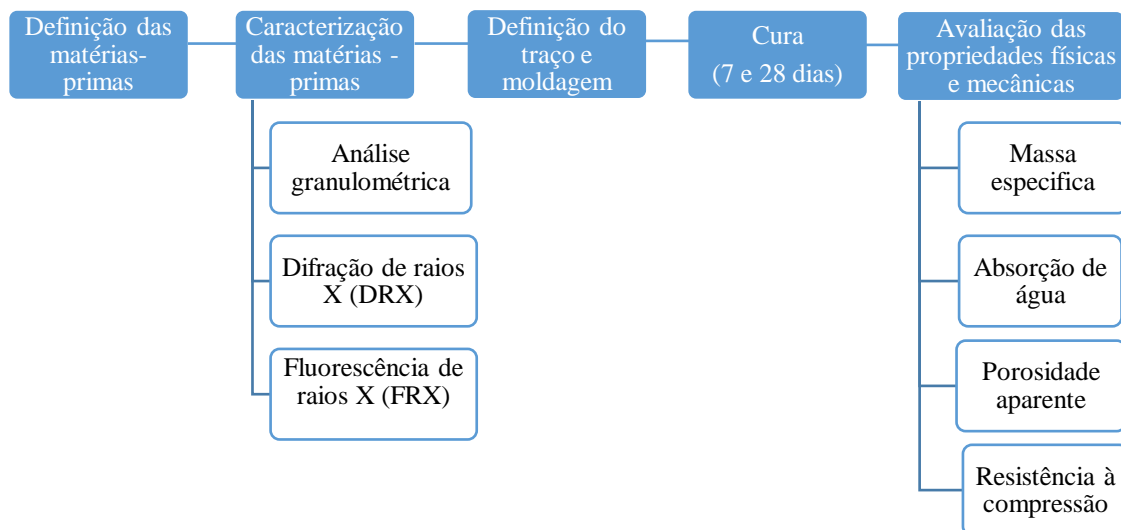
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para a realização desse estudo foram utilizados os seguintes materiais para a produção dos corpos de prova: Cimento Portland CP V – ARI Nacional, em função da sua alta resistência inicial nas primeiras idades (3 e 7 dias); resíduo de minério de ferro; agregado graúdo do tipo pedrisco (brita 0), pó de pedra, agregado miúdo areia industrial de gnaiss, aditivo superplastificante MC-Tecniflow 550 MC Bauchemie e água proveniente da Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA.

A Figura 8 ilustra todas as etapas que foram realizadas no trabalho, desde a escolha das matérias-primas à caracterização dos corpos de prova.

Figura 8 - Fluxograma dos materiais e métodos utilizados no trabalho



Fonte: Próprio autor.

4.1.1 Matérias-primas

Os resíduos utilizados para a confecção dos corpos de prova foram retirados do rompimento da barragem do Fundão, localizada em Bento Rodrigues distrito de Mariana-MG, de responsabilidade da Samarco por meio da PREALL Pré-moldados Água Limpa, indústria de artefatos de concreto pré-moldados situada na cidade de Nova Lima, Minas Gerais. O pó de pedra, areia industrial de gnaiss e aditivo superplastificante foram cedidos também pela

PREALL Pré-moldados Água Limpa. O pedrisco e o Cimento Portland CP V – ARI Nacional foram adquiridos em casa de materiais de construção.

4.1.2 Equipamentos

Neste estudo, foi necessária a utilização de equipamentos para caracterização dos materiais e corpos de prova, e confecção dos blocos de teste. Estes equipamentos estão listados a seguir:

- Agitador de peneiras;
- Série de peneiras - 6,730mm, 2,3 mm; 2mm; 1,16mm; 0,6mm; 0,425mm e 0,075mm;
- Analisador de partículas por difração a laser - CILAS modelo 1090;
- Difrátômetro de Raios X - Shimadzu XRD – 7000;
- Fluorescência e Raios X - Shimadzu EDX-720;
- Estufa;
- Máquina universal para ensaios, modelo EMIC GR048, com capacidade máxima de 300kN;
- Formas cilíndricas de aço com medidas internas sendo 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura;
- Recipiente polimérico para preparação de misturas;
- Ferramentas manuais;
- Balança analítica;
- Paquímetro digital.

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização das amostras de resíduo de minério de ferro, areia industrial de gnaiss e pó de pedra

As amostras foram secas em estufa a 100°C por 24 horas e, posteriormente, foram homogeneizadas e separadas em alíquotas de 200 g para realização das análises de caracterização química e mineralógicas e produção dos corpos de prova.

Análise granulométrica

As análises granulométricas da areia de gnaiss e do pó de pedra foram realizadas seguindo a NBR 7181 (ABNT, 1984), utilizando as peneiras da série Tyler com aberturas de 2 mm; 1,16 mm; 0,85 mm; 0,6 mm; 0,425 mm; 0,300 mm; e 0,150 mm. Para a análise do resíduo de minério de ferro foi utilizado o analisador de partículas por difração a laser (CILAS modelo 1090). O equipamento apresenta faixa analítica de 0,04 a 500 μm , 64 detectores, 100 classificações de tamanho de partículas e 2 emissores de laser.

Fluorescência de raios X (FRX)

A composição qualitativa da amostra foi determinada por meio de análises de FRX realizadas, utilizando o equipamento Shimadzu EDX-720. As análises foram realizadas sob vácuo e os resultados expressos em termos dos óxidos mais comuns.

Difração de raios X (DRX)

As análises DRX foram realizadas utilizando o difratômetro Shimadzu XRD – 7000, com radiação $\text{CuK}\alpha$ (35KV/ 40mA), velocidade do goniômetro $0,02^\circ$ em 2θ por passo, com tempo de contagem de 0,6 segundos por passo e dados coletados de 5° a 80° em 2θ . As interpretações dos espectros foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF 02 (ICDD, 2003).

4.2.2 Confeção dos corpos de prova

Foram confeccionados corpos de prova em formato cilíndrico com dimensões de 50 mm x 50 mm x 100 mm, de acordo com a norma ABNT (1996). Os mesmos foram conservados nos moldes para cura inicial (1 dia), sendo posteriormente submetidos à cura de água, até alcançar as idades específicas de 7 dias e 28 dias para realização dos ensaios.

4.2.3 Dosagem dos traços

Neste estudo, o traço referência (Tabela 4) foi baseado nos estudos de Silva et. al. (2015) e Fernandes (2012). Para a avaliação da substituição da areia por resíduo de minério de

ferro foram propostos 4 traços, nas proporções de substituição de 25%, 50%, 75% e 100% (Tabelas 5, 6, 7 e 8).

Tabela 4 - Traço referência

Materiais	Traço (proporção em massa)
Cimento (Portland V – ARI)	1
Areia	0,77
Pó de pedra	2,33
Pedrisco (brita 0)	1,11
Relação a/c (água/cimento)	0,43

Obs.: Adição de 1% em massa de aditivo plastificante na massa do cimento.

Fonte: Silva et. al. (2015).

Tabela 5 - Traço 1 – Substituição em 25% da areia por resíduo de minério de ferro

Materiais	Traço (proporção em massa)
Cimento (Portland V – ARI)	1
Areia	0,5775
Resíduo de minério de ferro	0,1925
Pó de pedra	2,33
Pedrisco (brita 0)	1,11
Relação a/c (água/cimento)	0,43

Obs.: Adição de 1% em massa de aditivo plastificante na massa do cimento.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 - Traço 2 – Substituição em 50% da areia por resíduo de minério de ferro

Materiais	Traço (proporção em massa)
Cimento (Portland V – ARI)	1
Areia	0,385
Resíduo de minério de ferro	0,385
Pó de pedra	2,33
Pedrisco (brita 0)	1,11
Relação a/c (água/cimento)	0,45

Obs.: Adição de 1% em massa de aditivo plastificante na massa do cimento

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - Traço 3 – Substituição em 75% da areia por resíduo de minério de ferro

Materiais	Traço (proporção em massa)
Cimento (Portland V – ARI)	1
Areia	0,1925
Resíduo de minério de ferro	0,5775
Pó de pedra	2,33
Pedrisco (brita 0)	1,11
Relação a/c (água/cimento)	0,48

Obs.: Adição de 1% em massa de aditivo plastificante na massa do cimento.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 - Traço 4 – Substituição em 100% areia por resíduo de minério de ferro.

Materiais	Traço (proporção em massa)
Cimento (Portland V – ARI)	1
Areia	0,0
Resíduo de minério de ferro	0,77
Pó de pedra	2,33
Pedrisco (brita 0)	1,11
Relação a/c (água/cimento)	0,5

Obs.: Adição de 1% em massa de aditivo plastificante na massa do cimento.

Fonte: Próprio autor.

Foram confeccionados 15 corpos de prova de cada traço sendo 5 para ensaios de absorção de água, porosidade aparente, compressão uniaxial e determinação de massa específica. Os ensaios de compressão foram realizados em 5 corpos de prova após 7 dias cura e em 5 corpos de prova após 28 dias de cura.

A relação água cimento foi aumentada gradativamente à medida que se aumentou a quantidade de resíduo, em virtude do aumento da quantidade de finos, de forma a possibilitar uma boa trabalhabilidade, uma vez que quanto maior a parcela de finos, mais difícil se mostra o manuseio do concreto, fato observado experimentalmente.

4.2.4 Caracterização dos corpos de prova

Após a confecção e cura os corpos de prova foram submetidos à determinação das propriedades físicas e mecânicas onde se avaliou a absorção de água, porosidade aparente, massa específica e resistência à compressão uniaxial.

4.2.4.1 Absorção de água

Este ensaio e os ensaios para determinação da porosidade aparente (4.2.4.2) e massa específica da amostra (4.2.4.3) foram executados de acordo com a norma ABNT 9778, nos corpos de prova após cura de 28 dias. Os corpos de prova foram secos em estufa a 105 °C por 24h e pesados utilizando uma balança analítica obtendo-se a massa seca (P_s). Posteriormente, foram submersos em água fervendo por 5 horas e resfriados em temperatura ambiente por 24 horas, em seguida foi retirada a água superficial de cada peça com o auxílio de papel toalha e as massas foram novamente registradas (P_u). Por fim, foram determinadas suas massas imersas com auxílio de balança hidrostática (P_i). O índice de absorção de água foi calculado de acordo com a Equação (1).

$$AA (\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

AA = Índice de absorção de água (em porcentagem);

P_u = Peso da peça saturada em água; úmida (g);

P_s = Peso da peça seca (g);

4.2.4.2 Porosidade aparente (porosidade aparente)

A porosidade aparente nos corpos de prova após cura de 28 dias foi calculado de acordo com a Equação 2 (ABNT, 2009):

$$PA (\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

PA = Porosidade aparente (%);

P_u = Peso da peça saturada em água; úmida (g);

P_s = Peso da peça seca (g);

P_i = Peso imerso (g).

4.2.4.3 Massa específica

A massa específica nos corpos de prova após cura de 28 dias foi determinada utilizando a Equação 3 (ABNT, 2009):

$$\rho_s = \frac{P_s}{P_u - P_i} \times \rho_{\text{água}} \quad (3)$$

Sendo:

ρ_s = Massa específica (g/cm^3);

P_u = Peso da peça saturada em água; úmida (g);

P_s = Peso da peça seca (g);

P_i = Peso imerso (g);

$\rho_{\text{água}} = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$

4.2.4.4 Resistência à compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão uniaxial, após cura dos copos de prova de 7 e 28 dias, foi realizado utilizando a máquina universal para ensaios, modelo EMIC GR048, com capacidade máxima de 300 kN. Em seguida, o RC foi calculado utilizando-se a Equação 4 (CANDIDO, 2012):

$$RC = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Sendo:

RC = Resistência à compressão uniaxial (MPa);

P = Carga de ruptura (kN);

A = Área da secção transversal (mm²).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

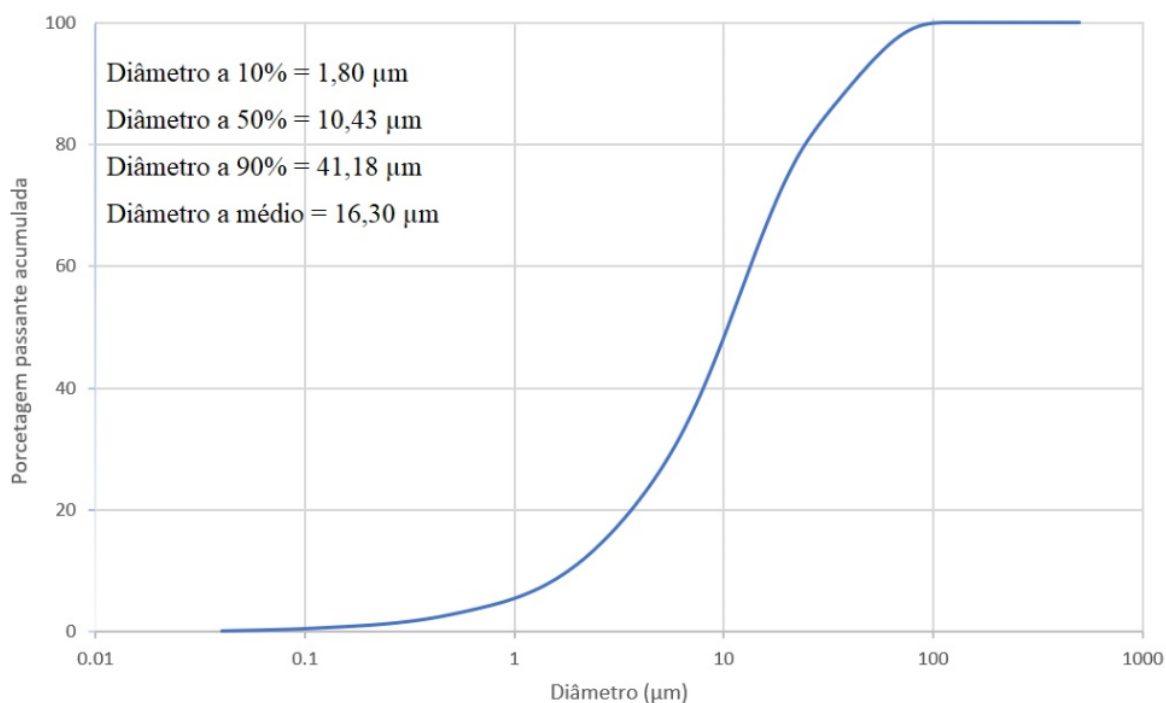
5.1 Caracterização das Matérias-Primas

5.1.1 Análise granulométrica

Resíduo de minério de ferro

Os resultados da distribuição granulométrica por difração a laser do resíduo de minério de ferro são mostrados na figura 9. Pode-se observar que 10% das partículas (D10) são menores que 1,80 μm , que 50% das (D50) são menores que 10,43 μm e que 90% das partículas (D90) são inferiores a 41,18 μm .

Figura 9 - Curva granulométrica do resíduo de minério de ferro



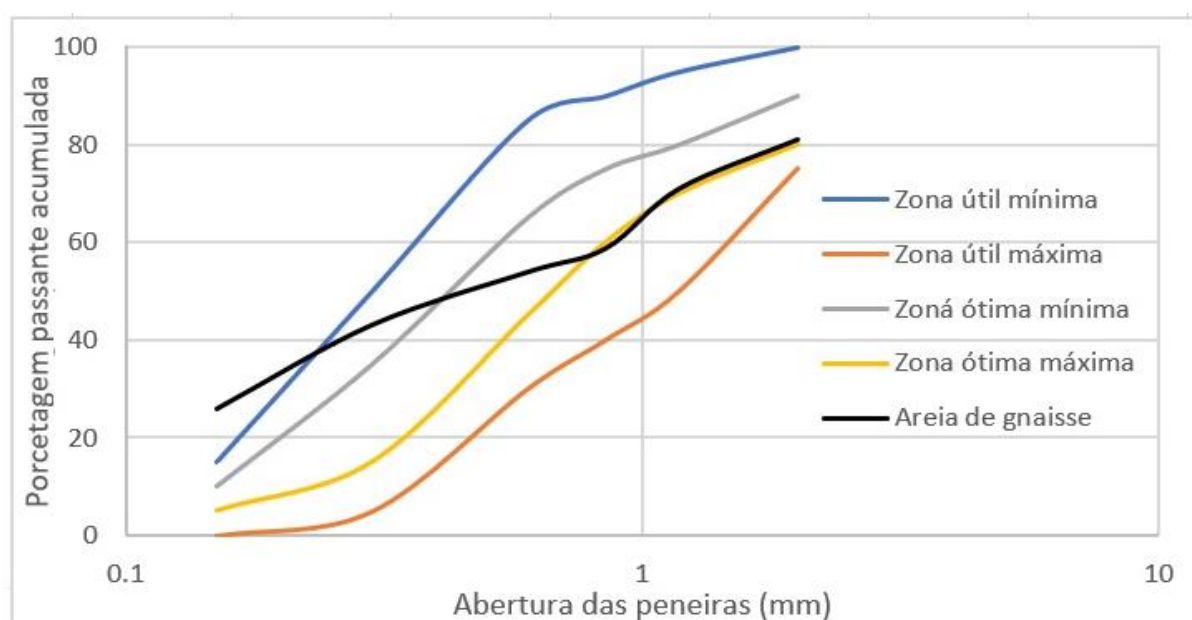
Fonte: Próprio autor.

Observa-se que a curva granulométrica do resíduo mostra um material muito fino, com 90% das partículas inferiores à 41,18 μm , resultados similares aos resultados encontrados com Wolff (2009) e Bezerra (2017).

Areia de gnaisse

Na Figura 10 é possível perceber que a distribuição granulométrica da areia de gnaisse (realizada por peneiramento a seco) encontra-se dentro da faixa utilizável para agregados miúdos de acordo com a NBR 7211/2005 (que estabelece limites de tamanho de grão para a utilização de agregados em concreto), exceto para partículas inferiores a 0,300 mm, onde pode-se observar uma maior quantidade de partículas finas. Tal fato pode ser explicado, provavelmente, pelo processo de beneficiamento do da areia de gnaisse.

Figura 10 - Distribuição granulométrica da areia de gnaisse e as zonas de utilização

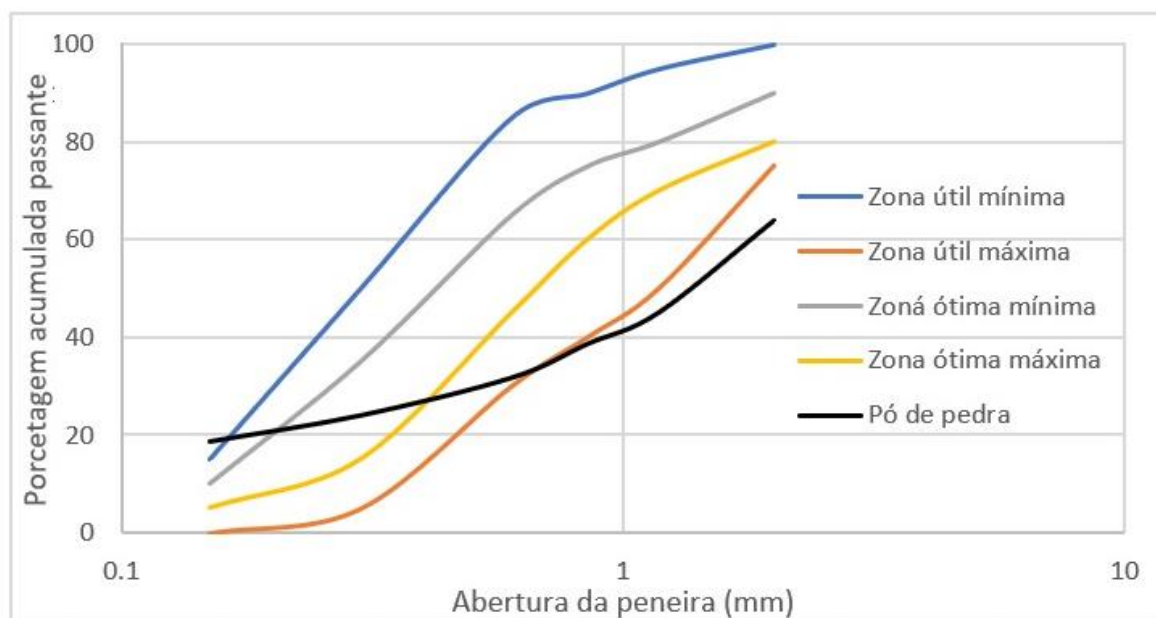


Fonte: Próprio autor.

Pó de pedra

A Figura 11 mostra que a granulometria do pó de pedra (realizada por peneiramento a seco) está fora da faixa utilizável estabelecida pela NBR 7211/2005 em partículas inferiores a 0,300 mm e superiores a 0,850 mm. Estes resultados vão de encontro aos estudos realizados por Borges (2008).

Figura 11 - Distribuição granulométrica do pó de pedra e as zonas de utilização



Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Análise química por fluorescência de raios X (FRX)

Resíduo de minério de ferro

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos para a análise química por fluorescência de raios X para as amostras de resíduo de minério de ferro, areia de gnaiss e pó de pedra, em termos de óxidos.

Tabela 9 - Análise química qualitativa para as amostras de resíduo de minério de ferro, areia de gnaiss e pó de pedra

Elementos	Resíduo (%)	Areia de gnaiss (%)	Pó de pedra (%)
Fe ₂ O ₃	51	3	3
SiO ₂	34	69	17
CaO	< 1	4	76
Al ₂ O ₃	13	17	1
K ₂ O	1	5	1
MnO	< 1	< 1	< 1
TiO ₂	---	< 1	< 1
Outros	< 1	< 1	< 1

Fonte: Próprio autor.

As análises químicas do resíduo mostraram uma predominância de óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃), com valores em torno de

51%, 34% e 13%, respectivamente, valores próximos aos encontrados nos estudos realizados por Wolff (2009).

A amostra de areia de gnaiss apresentou como composição majoritária dos óxidos de silício (69%) e alumínio (17%) e ainda indicou a presença dos óxidos de potássio (K_2O), cálcio (CaO) e ferro (Fe_2O_3). De acordo com Vieira et al (2008), a alta presença de SiO_2 , provavelmente, é devido a alta quantidade de quartzo presente neste tipo de material.

Na amostra de pó de pedra encontra-se a predominância de óxido de cálcio (CaO) e óxido de silício (SiO_2), com valores em torno de 76% e 17%, respectivamente indicando tratar-se de um pó de pedra calcária.

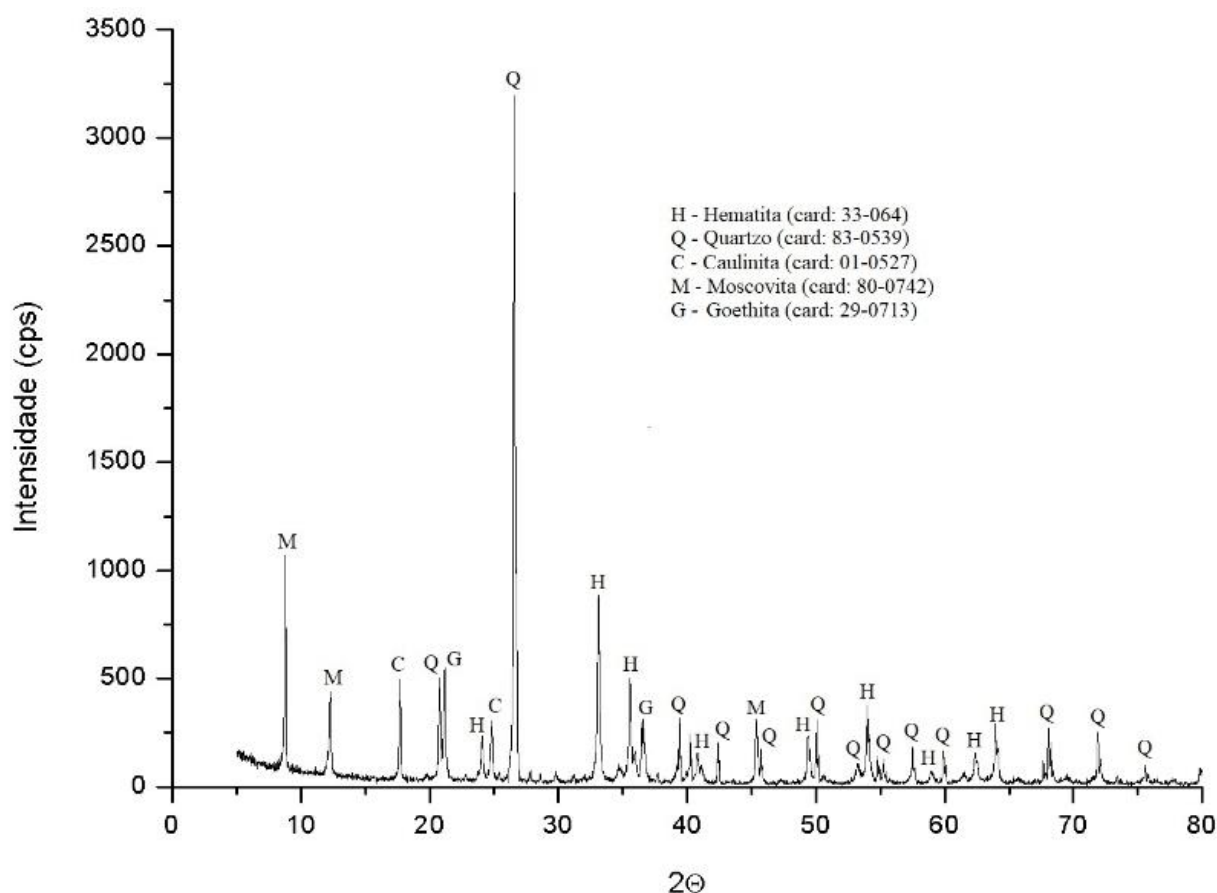
5.1.3 Difração de raios X (DRX)

Resíduo de minério de ferro

A Figura 12 mostra o difratograma obtido para a amostra de resíduo onde pode-se observar sua composto pelas fases hematita (Fe_2O_3) e goethita ($FeO(OH)$), quartzo (SiO_2), caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$) e moscovita ($KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$). Este resultado está coerente com a análise química qualitativa, que mostrou que a amostra de resíduo é composta, predominantemente, por óxidos de silício, alumínio e ferro. Estes resultados vão de encontro com os estudos realizados por Wolff (2009).

A fase quartzo é a principal impureza encontrada nos minérios e ferro, que também pode conter como impureza uma pequena proporção de caulinita e moscovita (SANTOS, 2003). A presença da goethita pode estar relacionada a drenagem deficiente, como no caso de uma barragem de resíduo, pois favorecem a hidratação da hematita, transformando-a em goethita (BARBOSA et al. (2009) e MOTTA et al. (2002). Além disso, por se tratar de um resíduo com granulometria muito fina (Figura 8) é esperado que o mesmo seja composto por argila e silte, podendo ser classificado como um material silte arenoso, sendo que as fases predominantes são hematita, quartzo, caulinita (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997).

Figura 12 - Difratoograma de DRX para a amostra de resíduo de minério de ferro



Fonte: Próprio autor.

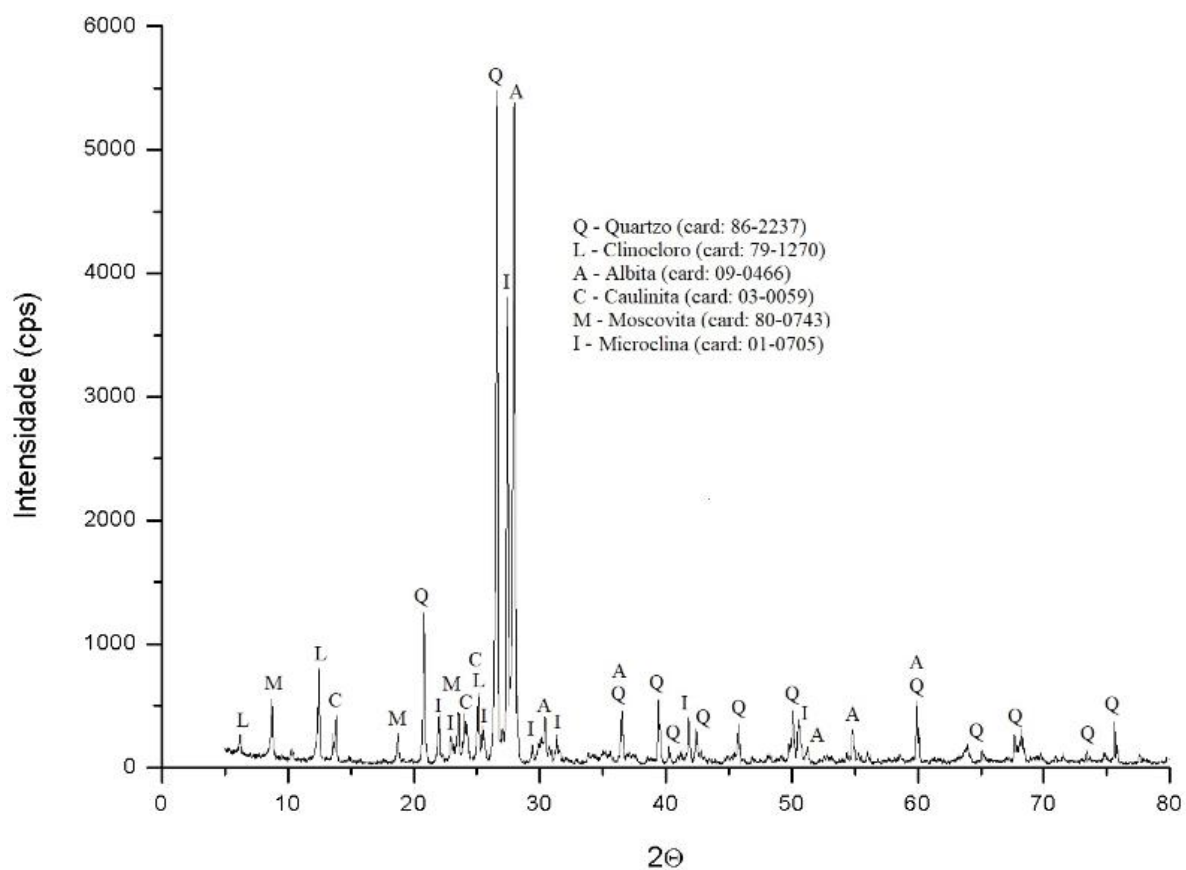
Pela presença de picos da fase de quartzo, aliado ao alto teor de SiO_2 (Tabela 9), pode-se concluir que o resíduo atende as especificações para ser utilizados como substituição/adição em concretos pois, de acordo com Wolf (2009), para um material ser utilizado como adição em concreto ou argamassa ele deve ser granular, quimicamente inerte e não reativo com o álcalis do cimento.

Areia de gnaiss

A Figura 13 mostra o difratograma obtido para a amostra de areia de *gnaisse*, pode-se observa-se que ele é composto pelas fases quartzo, clinoclóro ($(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), caulinita, moscovita e microclina ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$).

Este resultado reforça a análise química qualitativa, que mostrou que a amostra de areia e gnaiss é composta basicamente, por óxidos silício, alumínio, potássio, cálcio e ferro (Tabela 9). Estes resultados também estão de acordo com a composição mineralógica do gnaiss (VIEIRA et al, 2008 ; DUTRA 2015).

Figura 13 - Difratoograma de DRX para a amostra de areia de gnaise



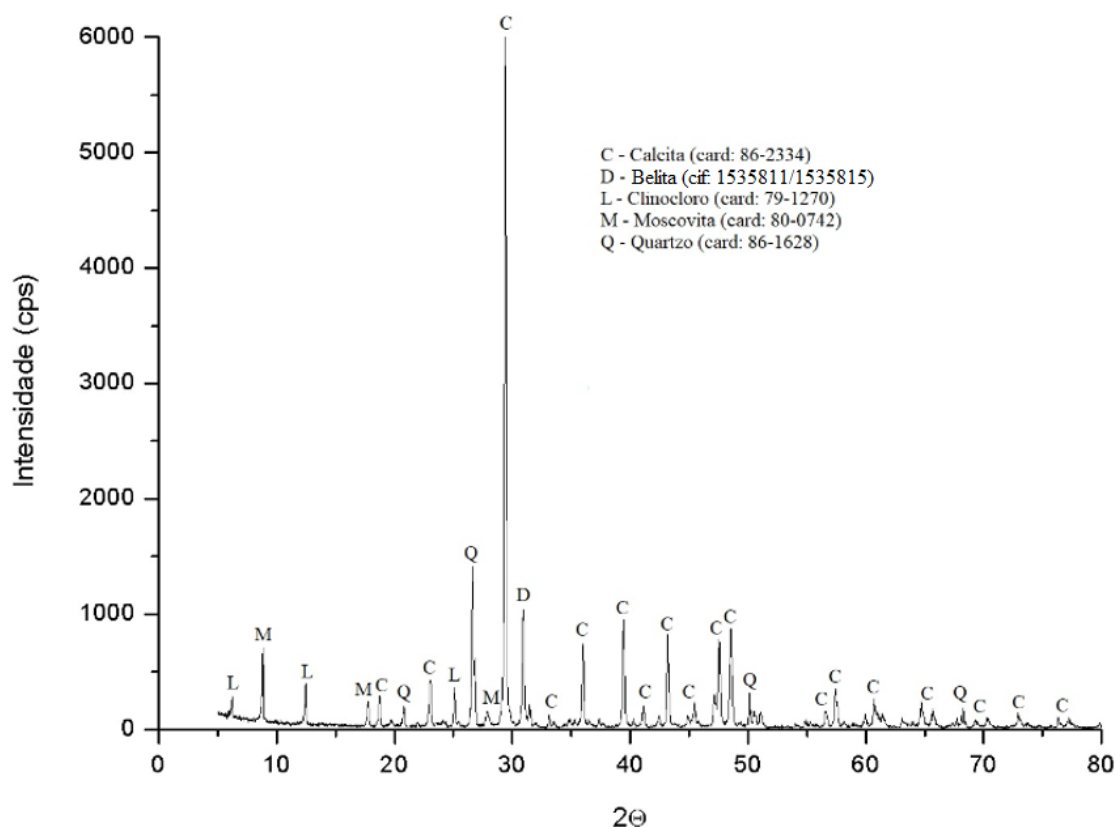
Fonte: Próprio autor.

Pó de pedra

A Figura 14 mostra o difratograma obtido para a amostra de pó de pedra, pode-se observa-se a presença das fases calcita (CaCO_3), quartzo, clinocloro, moscovita e belita.

Este resultado está coerente com a análise química qualitativa (Tabela 9), confirmando tratar-se de um pó de pedra calcária. Ressaltando que, o pó de pedra do beneficiamento de rochas calcárias apresenta características satisfatórias para sua utilização na produção de blocos de cimento, tal qual propôs Azevedo et al. (2018).

Figura 14 - Difratoograma de DRX para a amostra de pó de pedra



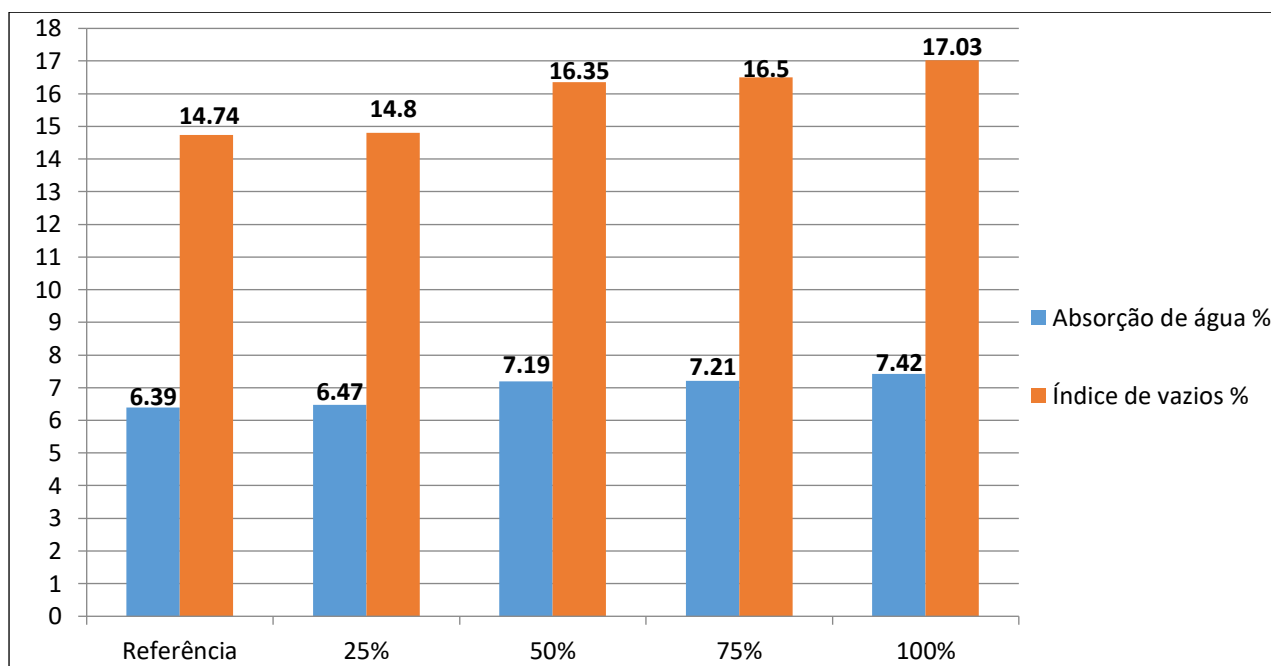
Fonte: Próprio autor.

5.2 Caracterização Física e Mecânica dos Corpos de Prova

5.2.1 Absorção de água e porosidade aparente

Os resultados obtidos mostram que não ocorre uma variação significativa da absorção de água entre nos corpos de prova com substituição de 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100% da areia pelo resíduo no concreto. A variação máxima foi de, aproximadamente, 1% comparando a referência com 100% de substituição da areia. Com relação a porosidade aparente pode-se observar que a variação máxima foi de, aproximadamente, 2% comparando 0% e 100% de substituição.

De acordo com as normas ABNT NBR15270-2/2005, blocos de concreto intertravados com valores de absorção de água ente 8% e 22% podem ser utilizados em vias de tráfego veicular. Portanto, pode-se afirmar que em termos de absorção e porosidade aparente as substituições não provocaram um efeito deletério quanto a sua utilização.

Figura 15 - Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova

Fonte: Próprio autor

5.2.2 Massa específica

Os resultados de massa específica obtidos (Tabela 10) mostram que não ocorre uma variação nos valores (em torno de $2,3 \text{ g/cm}^3$ ou 2300 kg/m^3), quando comparados os corpos de prova de referência com todos os de substituições (25%, 50%, 75% e 100%) da areia pelo resíduo de minério de ferro.

Estes resultados estão de acordo com a NBR8953:2015, onde concreto com massa específica compreendida entre 2000 kg/m^3 a 2800 kg/m^3 são classificados como concreto normal. Isto é um indicativo que a substituição da areia de guinasse pelo resíduo de minério de ferro não é prejudicial ao processo de produção, quando se refere a massa específica.

Tabela 10 - Massa específica

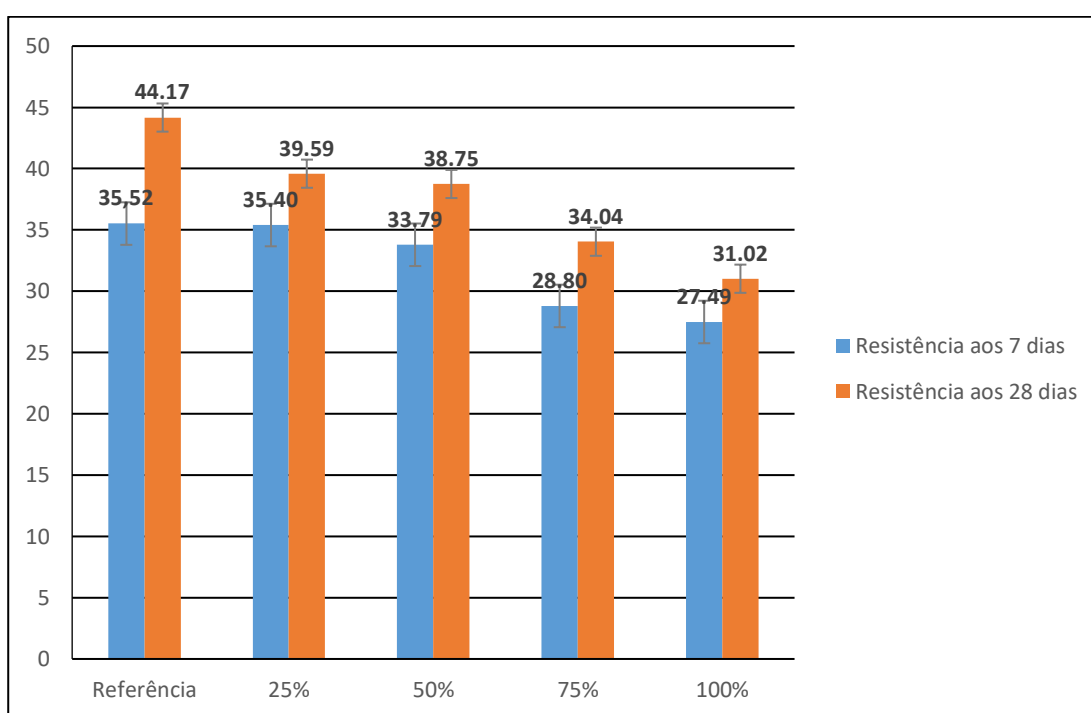
Traços	Substituições da areia de guinasse por resíduo de mineração				
	0% (Referência)	25%	50%	75%	100%
Massa específica (g/cm^3)	2,28	2,30	2,28	2,29	2,30

Fonte: Próprio autor.

5.2.3 Resistência à compressão uniaxial

A Figura 16 mostra os resultados de resistência à compressão uniaxial, ressaltando que, foram ensaiadas 5 amostras de cada traço, com 7 e 28 dias de idade, totalizando 10 corpos de prova para cada traço. Pode-se observar que ocorre uma diminuição da resistência à medida que se aumenta a concentração de resíduo de minério de ferro, como substituição da areia, na composição dos corpos de prova, tanto na resistência avaliada aos 7 dias quanto aos 28 dias de idade. O maior decréscimo da resistência é observada com as substituições da areia por 75% e de 100% de resíduo. Estes são corroborados com os estudos de Poon et al. (2002 e 2006).

Figura 16 - Resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura



Fonte: Próprio autor.

A produção de blocos com partículas de elevada finura, como o resíduo de minério de ferro (Figura 9), pode contribuir para redução da trabalhabilidade, devido à maior demanda de água na mistura, por causa da maior área superficial específica (GUODONG et al., 2014; HAN et al., 2017). Tal fato pode influenciar negativamente a confecção dos blocos de concreto intertravados, interferindo assim na resistência obtida nos ensaios, como foi observado nos traços com substituição de areia por resíduo acima de 50%, onde a relação água cimento foi aumentada gradativamente (Tabela 4 a 8).

Almeida (2002) que explica que quanto maior for a relação água/cimento, menor a resistência mecânica e maior é a trabalhabilidade do concreto. Isso vai de encontro aos resultados obtidos neste trabalho e por Kuranchie et al. (2015), que ainda cita que a maior demanda de água reduz a força de interação entre a pasta de cimento e o agregado.

Diante dos resultados obtidos (Figura 16), pode-se avaliar que, de acordo com a norma ABNT NBR 9781, os blocos produzidos, com as substituições de 25% e 50% da areia de gnaisse por resíduo do processamento de minério de ferro, podem ser utilizados para pavimentação quando existe circulação de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

6. CONCLUSÕES

O resíduo de minério de ferro utilizado nos ensaios pode ser reaproveitado para a fabricação de blocos de concreto intertravado em substituição à areia na proporção de até 50%, no caso de pavimentos para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

A granulometria fina do resíduo (diâmetro médio 16,30 μm) foi um fator relevante nos resultados, pois esta requer uma maior quantidade de água devido a sua elevada área superficial, assim como o pó de pedra e a areia de gnaiss também possuem, uma fração de finos considerável (aproximadamente 20% e 26% inferior à 0,150 mm), fora da faixa utilizável determinada pela literatura, alterando assim a trabalhabilidade e resistência mecânica dos blocos confeccionados.

A caracterização química e mineralógica do resíduo de minério, areia de gnaiss e pó de pedra mostraram que não há uma influência significativa das fases e da composição química dos mesmos nas propriedades dos blocos de concreto intertravados. Uma vez que, o resíduo de minério de ferro mostrou que sua composição é formada basicamente Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 , predominando as fases hematita (Fe_2O_3) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$) e moscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$). Em relação à areia de gnaiss sua composição é rica em SiO_2 e Al_2O_3 . Já o pó de pedra possui sua composição rica em CaO e SiO_2 , sob a forma de calcita (CaCO_3) e quartzo.

A caracterização física dos corpos de prova mostrou que a substituição da areia de gnaiss por resíduo de minério de ferro em todas as proporções não traz grandes alterações no que diz respeito à absorção de água, porosidade aparente e massa específica dos corpos de prova, onde todos os resultados atenderam às normas para aplicação do concreto.

Deste modo, a reutilização de resíduos de minério de ferro torna-se um ponto de extrema relevância, visto que esta prática leva a uma redução da demanda por recursos naturais primários, além de reduzir os danos ambientais associados ao seu descarte. Nesse contexto, o presente trabalho verificou a viabilidade para o reaproveitamento destes resíduos em um segmento promissor, de constante movimento e sempre necessário, que é o caso de materiais para construção civil, em especial blocos para pavimentação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. C. **CONCRETO - Notas de aula da disciplina: concreto armado**. Campinas: Unicamp, 2002. 24 p. Disponível em:

<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2021.

ALMEIDA, E. S.; COSTA, J. S. **Caracterização de blocos intertravados confeccionados com resíduos de piso cerâmico aplicados em calçamento urbano**. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 53., 2009, Guarujá. Anais[...]Guarujá,2009.

https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/53/13-047.pdf

AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do Município de Juranda/PR**. 2011. 153 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011. Disponível em: <http://www.peu.uem.br/Daysa2.pdf>.

Acesso em: 06 jan. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: ASTM - C 373-72, Standard test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, 1977.

ANM - Análise de Impacto Regulatório: Aproveitamento de estéril e resíduo. Aproveitamento de estéril e resíduo. 2020. Agência Nacional de Mineração. Disponível em:

https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/regulacao/analise-do-impacto-regulatorio-air/air_aproveitamento-de-esteril-residuos_02-2.pdf/view. Acesso em: 21 dez. 2021.

ARAÚJO, C. B. Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Resíduo de Mineração de Ferro (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 133p, 2006.

ARISTIMUNHO, P. B.; BERTOCINI, S. R. Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento portland. **Revista IBRACON Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 153-165, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 248: Agregados – Composição granulométrica, Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 3310-1: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico, Rio de Janeiro, ABNT, 1997.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação, Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, porosidade aparente e massa específica, Rio de Janeiro, ABNT, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9935: Agregados - Terminologia, Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15270-2: Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos, Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15900-1: Água para amassamento de concreto Parte 1: Requisitos, Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M. T.; ZANELATO, E. B.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N. **Caracterização do pó de pedra calcária para produção de blocos de encaixe**, Contribuição técnica ao 73º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil 2018.

BATTAGIN, A. F. Seção II: Materiais: Cimento Portland. Separata de: ISAIA, Geraldo Cechella (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2011. cap. Capítulo 6, ISBN 978-85-98576-16-9. Disponível em: <https://www.ibracon.org.br/>. Acesso em: 17 dez. 2021.

BEZERRA, C. G. **Caracterização do resíduo de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento**. Dissertação de mestrado apresentado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

BORGES, A. A. Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 61, n.1, p.29-34, 2008.

BRASÍLIA. Deputado Rogério Corrêa. Câmara dos Deputados. **Comissão Parlamentar de Inquérito: rompimento da barragem de brumadinho**. Brasília: Governo, 2019. 2287 p.

CANDIDO, V. S. Utilização de argilito e chamote de blocos de vedação na composição de massa de pavimento intertravado cerâmico adoquim. 2012. 129f. Tese (Mestrado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ.

CARVALHO, J. P. R. G. Estudo dos parâmetros técnicos do adoquim cerâmico com incorporação de resíduo de rocha ornamental. 2015. 126f. Tese (Mestrado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

CLEMENTINO, F. de C.; BARROS, G. R.; SANTOS, P. G. D. **Processo produtivo em uma indústria de artefatos de concreto**. 2013. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal D Goiás, Goiânia, 2013.

CNDH (2017). Relatório sobre o rompimento da barragem de resíduos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o vale do rio doce. Brasília: Agencia Nacional de Águas, 59p. Disponível em https://www.gov.br/mdh/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/old/cndh/relatorios/RelatriodaBarragemdoRioDoce_FINAL_APROVADO.pdf

Comissão Parlamentar de Inquérito: Rompimento da Barragem de Brumadinho. Brasília: Câmara do Deputados, 2019. 2287 p. Disponível em: <https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/RELAT%C3%93RIO-CPI-BRUMADINHO.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2021.

DUTRA, M. B. **Produção de concreto com areia de granulometria ótima obtida do resíduo da mineração de quartzo**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

ESPÓSITO, T. J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de resíduos construídas por aterro hidráulico. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, Brasil, 363p.

FERNANDES, I., Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade, São Paulo, ABCP, 2012, 182p.

FIORATTI A. N. **Processo de Produção do concreto**. Ficha complementar – texto para Orientação. Disponível em: http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/processo_de_produo_do_concreto.pdf (Acesso em 23/12/2021).

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Caracterização tecnológica de resíduo de minério de ferro. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto. v. 64. n. 2. 233-236 p., jun. 2011. Disponível em <. Acesso em 8 mai. 2018.

GUODONG Z., XIUZHI Z., ZONGHUI Z., XIN C. Preparation and properties of concrete containing iron tailings/manufactured sand as fine aggregate, *Advanced Materials Research*, v. 838-841, p. 152-155, 2014.

HAN, F.; LI, L.; SONG, S.; LIU, J. Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder, *Powder Technology*, v. 3015, p. 322-331, 2017.

IPEA. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. 2012. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**: Relatório de Pesquisa, Brasília: Ipea, 2012. Disponível em:

http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf.

Acesso em: 15 dez. 2021.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D.; MOHYEDDIN, A. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. *Cogent Engineering*, v. 2, n. 1, 2015.

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. 290 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LOPEZ, V.; LLAMAS, B.; JUAN, A; MORAN, J. M.; GUERRA, I. Ecoefficient Concretes: Impact of the Use of White Ceramic Powder on the Mechanical Properties of Concrete. *Biosystems Engineering*, Barcelona, n. 96, p. 559–564. Elsevier, 2007.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. 269 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87148>. Acesso em: 12 jan. 2022.

OLIVEIRA, P. S. **Rotas para recuperação de ferro fino contido no underflow do espessador de lama da Usina de Conceição**. 2006. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PAGNUSSAT, D. T. Utilização de escória granulada de fundição em blocos de concreto para pavimentação. 2004. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PEREIRA, C. Piso Intertravado: O que é, principais tipos, vantagens e desvantagens. **Escola Engenharia**, 2018. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/piso-intertravado/>. Acesso em: 7 de novembro de 2021.

POON, C. S.; KOU, S.; LAM, C. S. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, Hong Kong, n. 16, p. 281- 289. Elsevier, 2002.

POON, C. S.; KOU, S.; WAN, H.; ETXEBERRIA, M. Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates. *Waste Management*, Hong Kong, n. 29, p. 2369–2377. Elsevier, 2009. 146

PORTLAND, Associação Brasileira de Cimento. Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, São Paulo, 2010. 36p.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 02, p. 31–35, 1997

ROCHA, L.; PERES, A. E. C. Aproveitamento econômico das lamas de ferro. **REM: Ver. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 291-295, set. 2009. Disponível em: Acesso em 07 nov. 2021.

RUSSO, F. M. **Comportamento de Barragens de Resíduo Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-044/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 292 p., 2007.

SCHVAICKARDT, C. M.; MATTOS, J. R. G. Proposta de traço para blocos de concreto de pavimento intertravado. **Tecnológica**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 157, 31 jul. 2018. APESC - Associação Pro-Ensino em Santa Cruz do Sul.

<http://dx.doi.org/10.17058/tecnolog.v22i2.11797>. Disponível em:

<https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/11797>. Acesso em: 23 nov. 2021

SILVA, F. M.; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A. Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber, *Construction and Building Materials*, v. 91, p. 71-79, 2015.

TAM, V. W. Y.; GAO X. F.; TAM, C. M.; NG, K. M. Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete. *Journal of Hazardous Materials*. V. 163, p. 823–828, 2009.

UDAGAWA, S.; URABE, K. Crystal structure of modifications of calcium silicate Ca_2SiO_4 and their phase transformation. *Semento Hijutsu Nempo*, 1978, 32, 35-38

UDAGAWA, S.; URABE, K.; YANO, T. Crystal structure analysis of alpha- Ca_2SiO_4 *Semento Hijutsu Nempo*, 1977, 31, 26-29

VALE S.A. Vale inaugura fábrica que transforma resíduos da mineração em produtos para a construção civil. 2020. Elaborado por Vale S.A. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-inaugura-fabrica-que-transforma-residuos-da-mineracao-em-produtos-para-a-construcao-civil.aspx>. Acesso em: 17 jan. 2022.

VIEIRA C. M. F.; MONTEIRO S. N.; BARRETO C. G. W.; CARVALHOE. A.; PEITER C. **C. Substituição da areia de quartzo por finos de gnaiss em massa cerâmica para telhas: Teste industrial.** 2008, Laboratorio de Materiais Avançados LAMAV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

VIEIRA, M. G. Produção de um pellet feed a partir da concentração do resíduo da flotação mecânica da Samarco. 2008. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

WIEBBELLING, P. O. G. **PAVIMENTO COM BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO: ESTUDO DE CASO NA UNIVATES.** 2015. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2015. Disponível: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/953/1/2015PaulaOrvanaGuimaraesWiebbelling.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2022.

WOLFF, A. P. Caracterização de resíduos de minério de ferro de minas da VALE. 2009. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.