

# Avaliação da utilização do rejeito de minério de ferro na formulação de argamassas

## Evaluation of the use of iron ore tailings in mortar formulation

## Evaluación del uso de relaves de mineral de Hierro en la formulación de morteros

Recebido: 20/01/2022 | Revisado: 26/01/2022 | Aceito: 10/02/2022 | Publicado: 09/03/2022

**Wallyson Rodrigues de Paula Junior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-1789>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: [wallysonrpj@unifei.edu.br](mailto:wallysonrpj@unifei.edu.br)

**Carlos Augusto de Souza Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8826-1528>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: [carlosoliveira@unifei.edu.br](mailto:carlosoliveira@unifei.edu.br)

### Resumo

A pesquisa realizada teve como objetivo a realização de um estudo exploratório utilizando o rejeito proveniente do beneficiamento do minério de ferro na produção de argamassas. Para isso, foi realizada a caracterização dos materiais utilizados, dentre eles o rejeito do beneficiamento do minério de ferro. O rejeito de minério de ferro (RMF) foi utilizado na produção das argamassas, em substituição parcial ao agregado miúdo, sendo desenvolvidos traços de argamassa com teores de RMF de 0%, 25 %, 50% e 100% de substituição, em massa, ao agregado miúdo convencional. Foi avaliado comparativamente a influência da utilização desse rejeito na reologia e desempenho mecânico das argamassas, estabelecendo correlações entre os percentuais de rejeito utilizados e as mudanças nas propriedades desses materiais. Os resultados obtidos apontaram o potencial do uso do rejeito de minério de ferro na produção de argamassas, sendo o traço de argamassa com o teor de 25% de RMF que apresentou o melhor desempenho mecânico e parâmetros de durabilidade.

**Palavras-chave:** Rejeito de minério de ferro; Agregado miúdo; Argamassa.

### Abstract

The research aimed to conduct an exploratory study using the tailings from the beneficiation of iron ore in the production of mortars. For this, the characterization of the materials used was performed, among them the tailings from the beneficiation of iron ore. The iron ore tailings (RMF) was used in the production of mortars, as a partial replacement for fine aggregate. Mortar mixtures were developed with RMF contents of 0%, 25%, 50% and 100% replacement, by mass, of conventional fine aggregate. The influence of the use of this waste on the rheology and mechanical performance of the mortars was comparatively evaluated, establishing correlations between the percentages of waste used and the changes in the properties of these materials. The results obtained pointed out the potential of using iron ore tailings in the production of mortars, and the mortar mix with a 25% content of RMF showed the best mechanical performance and durability parameters.

**Keywords:** Iron ore tailings; Fine aggregate; Mortar.

### Resumen

El objetivo de la investigación era realizar un estudio exploratorio sobre la utilización de los residuos del beneficio del mineral de hierro en la producción de morteros. Para ello, se realizó la caracterización de los materiales utilizados, entre los que se encuentra el objetivo del beneficio del mineral de hierro. Los relaves de mineral de hierro (RMF) fueron utilizados en la producción de morteros, en sustitución parcial del agregado fino, siendo desarrolladas trazas de mortero con contenidos de RMF de 0%, 25%, 50% y 100% de sustitución, en masa, al agregado fino convencional. Se evaluó comparativamente la influencia del uso de estos residuos en la reología y el comportamiento mecánico de los morteros, estableciendo correlaciones entre los porcentajes de residuos utilizados y los cambios en las propiedades de estos materiales. Los resultados obtenidos muestran el potencial del uso del reciclaje de mineral de hierro en la producción de argamassas, siendo el tratamiento de la argamasa con un 25% de RMF el que presenta el mejor rendimiento mecánico y los mejores parámetros de durabilidad.

**Palabras clave:** Residuos de mineral de hierro; Agregado fino; Mortero.

## 1. Introdução

Ao se discutir sobre as atividades econômicas do Brasil, a mineração vem atingindo bons índices de crescimento, esse essencial para o desenvolvimento da economia.

Minas Gerais é considerado o mais importante estado minerador do país. Nesse estado a atividade de mineração está presente em mais de 250 municípios. Dos dez maiores municípios mineradores, sete se encontram em Minas Gerais, sendo o município de Itabira um deles (Ibram, 2014).

Paralelo a importância econômica dessa atividade tem-se a grande quantidade de resíduos, consequência comum dos processos de beneficiamento dos minérios, que, atualmente, a sua disposição tem despertado bastante atenção, devido aos rompimentos de barragens ocorridos, em especial, no Brasil. Resultando em significativos impactos ambientais negativos e danos à sociedade (Lage et al., 2020).

Em Minas Gerais, as barragens de rejeito se tornaram um grande problema, devido a insegurança com relação a estabilidade de algumas estruturas. Nesse cenário, destacam-se os rompimentos de barragens de rejeito de minério de ferro nos municípios mineiros de Mariana e Brumadinho, que acarretaram grandes desastres ambientais e morte de várias pessoas.

Diante desses fatos negativos é crescente a busca de soluções para sanar ou minimizar a formação de barragens de minério de ferro. Uma alternativa buscada pelos pesquisadores é o desenvolvimento de estudos voltados para o aproveitamento dos resíduos como material alternativo para as indústrias. A Construção Civil vem se tornando um dos alvos para as soluções de aplicação de resíduos sólidos. Esses resíduos têm sido aplicados principalmente na fabricação de concretos, que é considerado o material construtivo mais consumido no mundo, ficando depois da água, que é o insumo mais consumido mundialmente (Camargo, 2020).

A utilização de resíduos da mineração do ferro em substituição aos agregados naturais e adições minerais empregadas na produção de concretos e argamassas, além de poupar recursos naturais não renováveis, aproveitam descartes que podem gerar impactos ambientais se descartados de forma irregular.

Essa forma de aproveitamento do resíduo da mineração do ferro pode ser uma solução para a escassez de materiais apropriados para a utilização como agregado miúdo, situação essa, ocorrida em muitas regiões do Brasil, tendo em vista que a exploração da areia natural está sendo cada vez mais restringida pelos órgãos ambientais, devido aos impactos que a extração desse recurso ocasiona ao meio ambiente. Como adição mineral, o uso dos rejeitos de mineração de ferro diminui o consumo de cimento, diminuindo o custo do concreto e os impactos ambientais causados pela indústria cimentícia (Goulart Bezerra, 2017). Assim, estudos relativos ao emprego de resíduos de beneficiamento de minério de ferro em concretos e argamassas têm se tornado cada vez mais frequentes.

Segundo Lottermoser (2011), se quisermos garantir um futuro sustentável para a humanidade, devemos aprender a prevenir, minimizar, reutilizar e reciclar resíduos. A reutilização de rejeitos provenientes do beneficiamento do minério de ferro, têm sido objeto de pesquisas em diversas instituições, buscando soluções para uma destinação apropriada destes resíduos, garantindo assim maior sustentabilidade para o meio ambiente. O reaproveitamento de resíduos de mineração permite sua aplicação, assim convertendo-os em produtos de valor para fins específicos.

Segundo Trevizan (2013), a mineração tem sido uma fonte de materiais alternativos de grande importância no ponto de vista da Engenharia Civil, visto que a utilização dos resíduos gerados por essa atividade em substituição aos recursos naturais geralmente utilizados pode reduzir preço, consumo de matérias-primas e consumo de energia nos processos de construção.

É perceptível que resíduos provenientes de diferentes etapas do beneficiamento do minério de ferro têm sido estudados como materiais alternativos para a construção civil, podendo ser empregados como agregados miúdos ou adição mineral, mantendo as características dos concretos e argamassas e em muitos casos apresentando melhorias em seu desempenho. Como exemplo, já é possível encontrar estudos em cima do rejeito de sinter-feed visando seu emprego como

agregado miúdo para a produção de elementos pré-fabricados de concreto destinados à pavimentação e em alvenarias para edificações de nível térreo.

Soncim et al. (2021) estudaram a utilização do rejeito de flotação de minério de ferro para soluções asfálticas, procurando desenvolver uma maior estabilidade e resistência para o piso de rodagem, através da utilização desse rejeito.

Entretanto, apesar destes estudos apontarem o enorme potencial do rejeito de mineração como subproduto para a indústria da construção civil, ainda são necessárias mais pesquisas para consagrar o seu uso nesse ramo. Logo a pesquisa em questão, buscou avaliar o uso do rejeito da mineração do minério de ferro em argamassas, produto largamente utilizado na construção civil no assentamento de componentes e no revestimento de paredes.

## 1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar o rejeito proveniente do beneficiamento do minério de ferro na produção de argamassas.

## 1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar o rejeito de minério de ferro e os demais materiais que serão empregados na produção das argamassas;
- b) Formular argamassas com diferentes percentuais de rejeito de minério de ferro em substituição ao agregado miúdo convencional;
- c) Avaliar, comparativamente, como a utilização de diferentes porcentagens dos rejeitos influenciam nas propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido.

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1 Rejeito de Minério de Ferro

Ao ser explorado, o minério bruto não se encontra em sua forma pura, ou seja, geralmente é encontrado junto a outros materiais, de forma que para sua utilização industrial é necessário primeiro realizar seu beneficiamento.

Segundo Araújo (2014) e Guimarães (2011), podemos considerar o beneficiamento de minérios como sendo um tratamento industrial, que prepara granulometricamente e retira as impurezas do minério por métodos físicos ou químicos, sem alteração da estrutura química dos minerais, assim tornando-os aptos à utilização na indústria metalúrgica.

Os rejeitos da mineração são definidos como grãos finos de rocha oriundos de processos de beneficiamento mineral que envolvam água, e que não são aproveitados após o processo de beneficiamento (Rejeitos da mineração, 2016).

Laminatus (2019) diz que o rejeito de minério de ferro é considerado como sendo o que sobra quando se usa água para separar o minério do material que não tem valor comercial, sendo esse o processo mais barato de fazer o beneficiamento.

Os rejeitos encontrados no Brasil geralmente podem ser divididos nas seguintes categorias: (1) areia natural e silte; (2) lama ou mica; (3) argila; (4) pedras e seixos; (5) solos de decapeamento e turfa (Bates, 2002).

Subrahmanyam e Forssbeg (1990) discutiram a elevada quantidade de bens minerais que eram classificados como resíduos, principalmente levando em consideração sua granulometria, e o processamento de partículas finas. Para Luz & Lins (2010) as faixas finas podem ser subdivididas como supercoloidais ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ), coloidais ( $< 1 \mu\text{m}$ ), quase-coloidais ( $< 10 \mu\text{m}$ ), pré-coloidais ( $< 20 \mu\text{m}$ ) e finos ( $< 150 \mu\text{m}$ ), médios ( $< 50 \mu\text{m}$ ) e grossos ( $< 500 \mu\text{m}$ ).

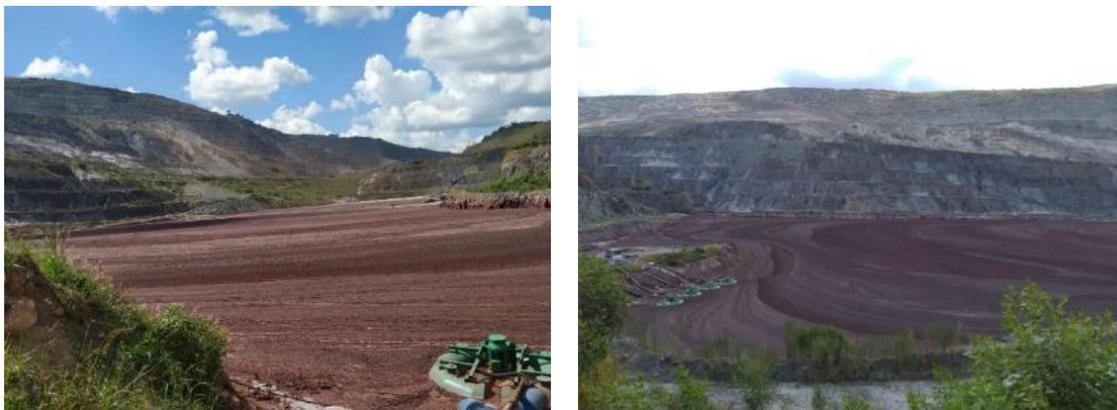
Rodrigues Bento (2017) relata que o rejeito oriundo da extração de minério de ferro, geralmente, é descartado em barragens ou em pilhas dentro ou ao entorno das mineradoras, tendo o risco de ocasionar uma série de agressões à fauna e à

flora local. Como exemplo pode-se citar o rompimento da barragem de rejeitos de córrego do feijão no município de Brumadinho (MG), que era uma barragem de rejeitos de minério de ferro, este desastre tomou proporções enormes na mídia nacional e mundial. Cerca de 14 milhões de toneladas de lama e rejeitos de minério de ferro percorreu 8 quilômetros em poucos dias, poluindo o rio Paraopeba e ocasionando em mais de 250 mortes (Retrospectiva: Rompimento da barragem de Brumadinho foi a primeira grande tragédia ambiental do ano - ((o))eco, 2019).

Como já mencionado, o descarte irregular do rejeito pode proporcionar grandes problemas ambientais, principalmente quando são depositados em barragens de contenção, que nos últimos anos se tornaram uma ameaça à vida ambiental e humana, decorrente da ameaça da ruptura dessas estruturas, como ocorrido nos municípios mineiros de Mariana e Brumadinho.

Em Itabira (MG) é possível encontrar boa parte dessas estruturas de retenção de rejeito, um exemplo de barragem de RMF encontrada no município é a estrutura da Cava do Onça, localizada na mina Periquito (Figura 1), onde se vê a contenção de um elevado volume de lama (rejeito).

**Figura 1:** Barragem de RMF, Cava do Onça, Itabira/MG.



Fonte: Autores (2021).

Os fatos negativos ocorridos com as estruturas de barragens levam a um grande apelo ambiental na busca de um destino correto e tecnicamente viável para os resíduos da mineração. Com isso, a indústria mineradora vem buscando alternativas para amenizar as problemáticas decorrentes do descarte dos sedimentos, procurando meios de aproveitá-los de forma consciente, tecnicamente viável e até mesmo de forma lucrativa.

Rodrigues Bento (2017) diz que apesar da atividade mineradora gerar lucros, ela traz consequências graves ao meio ambiente, em razão da grande produção de resíduos devido à extração de um elevado volume de material rochoso, causando assim, impactos para o meio físico, biótico e, conseqüentemente, fazendo alterações no equilíbrio ambiental, visto que a disposição final desses resíduos, muitas vezes é realizada de forma inadequada. Sendo que esses impactos causados pela mineração acabam se agravando quando há uma maior proximidade entre as áreas mineradoras e as áreas urbanas (Padro Azevedo, 2020).

Assim tem se tornado crescente o número de pesquisas que estudam a possibilidade do reaproveitamento do RMF, cabendo citar, por exemplo, os estudos relacionados a sua utilização na produção de argamassas de revestimento.

Kitobo et al. (2009) acreditam que o alto preço das commodities em conjunto a crescente consciência ambiental justificam o reprocessamento de materiais já dispostos em antigas barragens de rejeito.

Fazendo uma análise dos custos de extração, carregamento e transporte dos resíduos de uma mina até o seu último destino, considerando também os gastos com a preservação do meio ambiente, Struthers e Taylor (1997) e Edraki et al. (2014)

propuseram um sistema geral integrado de reciclagem que envolve a recuperação do metal estocado em antigas barragens de rejeitos.

Adiansyah et al. (2015, p.635) afirmam que a gestão dos rejeitos da mineração é um fator crucial dentre todos os demais presentes na indústria mineradora, devido aos impactos irreversíveis gerados por eles.

Com inúmeras problemáticas decorrentes do despejo de rejeitos de minério é sugerido o seu aproveitamento, que segundo Rodrigues Bento (2017), tem por objetivo a transformação destes em materiais aproveitáveis, buscando reintroduzi-los no ciclo produtivo, com resultados na redução de custos, consumo de matérias-primas e principalmente trazendo benefícios para o meio ambiente, o que de certa forma conduz bons aspectos para a imagem da empresa mineradora. Segundo Machado (2018), um dos principais setores em que os rejeitos de minério podem ser aplicados seria o setor da construção civil, por ser uma área de grande consumo de recursos naturais.

A valorização consiste no reemprego, reciclagem ou qualquer outra ação visando obter, a partir dos resíduos sólidos, materiais reutilizáveis ou energia, dando, de certa forma, um valor de mercado aos resíduos (Barros, 2012).

A indústria civil com o passar dos anos, vem aproveitando em maiores quantidades, os descartes da mineração como fonte de materiais alternativos, o que pode reduzir preços, o consumo de matérias primas e de energia.

### **2.1.1 Caracterização do Rejeito de Minério de Ferro**

Para um maior aproveitamento de um recurso mineral, a etapa de caracterização tecnológica é essencial. É um processo realizado para fazer o beneficiamento de minérios, estudando seus aspectos mineralógicos. Segundo Gomes (1984) as informações obtidas nesses estudos, são utilizadas para o desenvolvimento e a otimização de processos.

A caracterização aplicada a rejeitos de usinas de beneficiamento de minérios passou a ser mais utilizada a pouco tempo, como forma de diminuir o descarte de materiais que possuem valor para a mineradora. Borges et al. (2008) discutem que a preocupação em se realizar esse estudo da composição mineralógicos, passou a ser uma etapa do beneficiamento do minério, não só pela maior preocupação com questões ambientais, mas também, devido à possível escassez do minério e à depleção de reservas.

Devido à complexidade física e química dos RMF, torna-se fundamental a realização de estudos referentes a sua caracterização, sendo de grande relevância para identificar seus componentes e possivelmente estudar uma solução ambientalmente correta para sua reutilização. Neumann et al. (2004) dizem que a caracterização de um rejeito de minério determina e quantifica as fases presentes, bem como selecionam quais são os minerais contidos no material que possuem valor econômico.

Segundo Silva (2017), a realização da caracterização depende de vários fatores como, por exemplo, os objetivos, abrangência da caracterização, disponibilidade de tempo, capacidade analítica e recursos financeiros. Goulart Bezerra (2017) comenta que há inúmeras técnicas de caracterização de materiais, variando desde as mais avançadas, como por exemplo o uso de microscópios eletrônicos e tomógrafos computadorizados, até uma simples análise granulométrica em peneiras ou análise química por via úmida.

Silva (2017) em seus estudos, afirma que uma caracterização abrange entre outros processos a determinação da estrutura cristalina, composição química, quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases, determinação da natureza e distribuição dos defeitos cristalinos. Goulart Bezerra (2017) fala que os métodos de caracterização, permitem a identificação de elementos e fases presentes no material, permite também, avaliar a distribuição granulométrica e a microestrutura das partículas do material.

Um melhor conhecimento dos rejeitos possibilita a viabilidade de seu aproveitamento. Assim, segundo Borges et al. (2008), viabilizando-se seu reuso, minimiza-se o impacto ambiental e cria-se receita, onde antes havia despesas.

### 2.1.2 Granulometria do Rejeito de Minério de Ferro

Para a utilização do RMF é importante e necessário conhecer sua estrutura e granulometria. Estudos realizados por Wolff (2009), na Universidade Federal de Ouro Preto, revelam os resultados do teste do peneiramento a seco da amostra da mina Brucutu, situada no município de São Gonçalo do Rio Abaixo (MG), no equipamento GA-8 Gilsonic Ultrasiever (Tabela 1), revelando que praticamente não existem partículas menores do que 10  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 1** – Resultado do peneiramento a seco no equipamento GA-8 Gilsonic Ultrasiever.

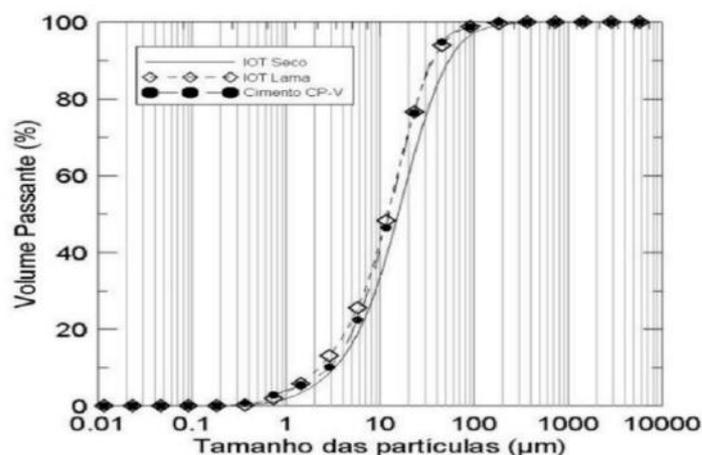
Diâmetro	% Retida Simples		
	10 min.	15 min.	20 min.
$>45 \mu\text{m}$	11.9	12.1	12.1
25-45 $\mu\text{m}$	22.8	21.2	21.2
10-25 $\mu\text{m}$	60.4	60.6	59.6
5-10 $\mu\text{m}$	4.9	6.1	6.1
$<5 \mu\text{m}$	0.00	0.00	1.01

Fonte: Wolff (2009).

Um estudo desenvolvido por Goulart Bezerra (2017) apresenta a distribuição granulométrica do rejeito de minério de ferro da unidade de Conceição II (Figura 2). A curva de distribuição granulométrica mostrou que 10% das partículas (D10) são menores que 2,16  $\mu\text{m}$ , que o tamanho médio das partículas (D50) é igual a 11,65  $\mu\text{m}$ , e que 90% (D90) das partículas são menores que 35,61  $\mu\text{m}$ .

Segundo Borges et al. (2008), a variação na distribuição de tamanho das partículas encontrada em diversas pesquisas seria uma indicação de geologia inerente às diferentes regiões e das propriedades das jazidas e do material, além do processo de esmagamento e compactação que os resíduos sofrem enquanto quebram.

**Figura 2** – Curvas granulométricas dos rejeitos de minério de ferro (IOT) na forma de lama e seca.



Fonte: Goulart Bezerra (2017).

### 2.2 Argamassa

Segundo a norma NBR 13529, da associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995), a argamassa consiste em uma “mistura homogênea de agregados(s) miúdo(s), aglomerantes(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento.”

## 2.2.1 Componentes

Segundo a NBR 13529 (ABNT, 1995), a argamassa é constituída basicamente por aglomerantes, agregados miúdos, água, podendo conter adições e aditivos.

Os aglomerantes constituem o cimento Portland e a cal. Os agregados miúdos segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), consiste no “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,15 mm, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003)”.

Já as adições, segundo a NBR 13529 (ABNT, 1995), são “materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração no proporcionamento”.

Por sua vez, o aditivo segundo a NBR 13529 (ABNT, 1995), é um “produto adicionado à argamassa em pequena quantidade, com a finalidade de melhorar uma ou mais propriedades, no estado fresco ou endurecido”.

Visando aprimorar a tecnologia das argamassas, pesquisas estão sendo desenvolvidas visando a incorporação de materiais alternativos na sua produção, com foco em melhorias de propriedades e de uma maior sustentabilidade no setor.

Nessa ótica, é crescente os estudos com a incorporação de rejeitos de processos industriais na formulação de argamassas, tais como os estudos realizados por Alcântara (2011), Fontes (2013), Araújo (2014), Carvalho et al. (2017) e Souza Dias (2017). Desta forma, esse trabalho busca contribuir para alavancar o uso do rejeito de minério de ferro na tecnologia das argamassas.

## 2.2.2 Propriedades da argamassa

### 2.2.2.1 Densidade no estado Fresco

Entre os fatores que influenciam na densidade das argamassas podemos citar, o tipo de cimento utilizado, o teor de ar incorporado na argamassa, e principalmente o agregado miúdo utilizado. Carasek (2010) afirma que o empacotamento, ou seja, uma maior união entre as partículas dos agregados miúdos que constituem a argamassa, possui significativa influência sobre o índice de vazios, porosidade e massa unitária do agregado.

Segundo Carasek (2010), os agregados para a confecção de argamassa devem ser selecionados com cautela, visto que eles representam cerca de 60% a 80% do consumo dos materiais da argamassa pronta, em massa, tendo influências no seu comportamento no estado fresco e endurecidos.

Gonçalves Silva (2006) relata que o aumento do teor de finos do agregado miúdo, aumenta a densidade de massa da argamassa no estado fresco e no estado endurecido. Segundo o referido autor o maior empacotamento provocado pelos finos, ou seja, há uma maior união entre as partículas dos agregados miúdos que constituem a argamassa.

Conforme Araújo (2014), a densidade de massa ou massa específica varia com o teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais constituintes. Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será ao longo do tempo, reduzindo o esforço do operário na aplicação e gerando, conseqüentemente, um aumento de produtividade na operação (Turra, 2016).

O procedimento para a análise da densidade da argamassa é apresentado na NBR 13278 (ABNT, 2005). As argamassas podem ser classificadas levando em consideração essa propriedade no estado fresco, conforme apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado fresco.

Classe	Densidade de massa no estado fresco ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )		Método de Ensaio
M1	$\leq 1400$		ABNT NBR 13278:2005
M2	1200 a 1600		
M3	1400 a 1800		
M4	1600 a 2000		
M5	1800 a 2200		
M6	$> 2000$		

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

Estudos de Ferreira et al. (2016) em argamassas (Tabela 3) demonstram a influência do RMF na densidade da argamassa, onde os autores obtiveram maiores valores de densidade com maiores adições do rejeito.

**Tabela 3** - Propriedades da argamassa no estado fresco.

Formulações		Propriedades da argamassa fresca		
Traço	a/c	Tempo de pega (seg)	Viscosidade (Pa.s)	Densidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
01:02	0,95	24060	13,98 $\pm$ 0,62	1866 $\pm$ 4
	1	31620	14,04 $\pm$ 0,77	1830 $\pm$ 7
01:2,5	0,95	21420	414,71 $\pm$ 109,00	1906 $\pm$ 10,7
	1	-	283,41 $\pm$ 54,01	1892 $\pm$ 10,2
01:02	0,95	26880	49,33 $\pm$ 3,02	1807 $\pm$ 1,7
	1	32760	17,02 $\pm$ 0,73	1832 $\pm$ 10
01:2,5	0,95	22260	474,94 $\pm$ 120,67	1839 $\pm$ 3,4
	1	22140	289,76 $\pm$ 48,20	1918 $\pm$ 7,4

Fonte: Ferreira et al. (2016).

### 2.2.3 Densidade no estado Endurecido

Segundo Freitas (2010), o valor da densidade de massa da argamassa é um indicativo da compacidade resultante da proporção de mistura agregado/ aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto.

A densidade de massa no estado endurecido é determinada segundo as orientações presentes na NBR 13280 (ABNT, 2005), sendo as argamassas classificadas levando em consideração sua densidade de massa no estado endurecido, de acordo com o apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4** - Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado endurecido.

Classe	Densidade de massa no estado fresco ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Método de Ensaio
M1	$\leq 1200$	ABNT NBR 13280:2005
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	$> 1800$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

Na pesquisa desenvolvida por Ferreira et al. (2016) é possível verificar que maiores teores de rejeito de minério de ferro na formulação da argamassa acarretaram o aumento da densidade no estado endurecido, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5** - Densidade da argamassa endurecida.

Formulações		propriedade
Traço	a/c	Densidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
01:02	0,95	1823 $\pm 14$
	1	1799 $\pm 35$
01:2,5	0,95	1864 $\pm 11$
	1	1869 $\pm 12$
01:02	0,95	1782 $\pm 17$
	1	1793 $\pm 15$
01:2,5	0,95	1877 $\pm 15$
	1	1833 $\pm 12$

Fonte: Ferreira et al. (2016).

#### 2.2.4 Trabalhabilidade da argamassa

Entre os fatores que influenciam na trabalhabilidade da argamassa, pode-se citar: quantidade de água adicionada a mistura, aditivos que melhoram a plasticidade da massa, o tipo e teor de cimento utilizado e o tipo de agregado miúdo utilizado, que pode possuir diferentes formas e textura (Schankoski et al., 2015).

A trabalhabilidade é considerada a propriedade mais importante da argamassa no estado fresco e essencial para garantir as características desejáveis no estado endurecido (Schankoski et al., 2015). No estado plástico a argamassa deve apresentar boa trabalhabilidade para facilitar o assentamento dos blocos e deve possuir capacidade de retenção de água adequada para garantir a hidratação do cimento.

Castro (2016) diz que a trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea.

A trabalhabilidade é resultado da combinação de várias propriedades. Segundo Castro (2016), a consistência e a plasticidade são os fatores principais na trabalhabilidade de uma argamassa. Ademais, ASTM C270-08 (2008, p.6) também se refere a coesão e a aderência como fatores de trabalhabilidade de uma argamassa.

A norma NBR 13276 (ABNT, 2016), padronizou a trabalhabilidade de uma argamassa através do ensaio de consistência (NBR 8798 para blocos vazados de concreto) que mede o diâmetro do espalhamento da argamassa de um cone.

### 2.2.5 Resistência à compressão da argamassa

A Norma NBR 13279 (ABNT, 2005) estabelece o método para determinação da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido.

Dallagnol (2018) discute que a resistência mecânica das argamassas é analisada pela sua capacidade de resistir a esforços mecânicos sem desagregação ou deformações plásticas visíveis e levando em consideração sua resistência ao desgaste superficial.

Pesquisas realizadas por Ferreira et al. (2016) revelaram que o RMF influencia na resistência à compressão (Tabela 6) da argamassa (Tabela 6), e, em seus achados, a argamassa com RMF que apresentou maior resistência à compressão foi aquela com o traço 1:2,5 e a relação água/cimento igual a 0,95.

**Tabela 6** - Valores de resistência à compressão da argamassa.

Formulações		propriedade
Traço	a/c	Resistência à compressão (Mpa)
01:02	0,95	15,4 ± 1,5
	1	14,8 ± 1,5
01:2,5	0,95	16,3 ± 1,4
	1	14,9 ± 1,5
01:02	0,95	13,9 ± 1,5
	1	13,1 ± 1,2
01:2,5	0,95	15,4 ± 1,6
	1	14,6 ± 1,4

Fonte: Ferreira et al. (2016).

### 2.2.6 Resistência à tração da argamassa

Segundo Carvalho Junior et al. (2005), os principais constituintes de uma argamassa e que podem influenciar na resistência mecânica da argamassa são o agregado miúdo, o cimento Portland e a cal. Segundo os pesquisadores a elevação do teor dos aglomerantes faz a resistência à tração diminuir. Já o agregado, quanto mais descontínua for a sua granulometria pior será as resistências mecânicas das argamassas, que também podem variar com a quantidade de adição de água e aditivos químicos.

A resistência de aderência à tração da argamassa (ou aderência), segundo Franciscon (2007), depende das propriedades da argamassa no estado fresco, dos procedimentos de execução do revestimento, da natureza e das características da base e da sua limpeza superficial.

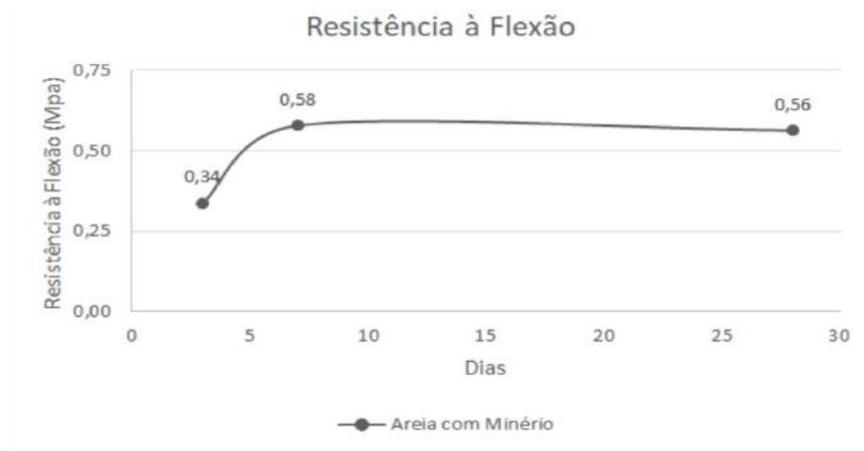
Segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010), a resistência de aderência à tração da argamassa consiste na tensão máxima suportada por uma área limitada de revestimento (corpo-de-prova), na interface de avaliação, quando submetido a um esforço normal de tração.

A Norma NBR 13279 (ABNT, 2005) estabelece o método para determinação da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos.

Os estudos encontrados em Carvalho Junior et al. (2005) revelam que a importância da avaliação da resistência de aderência ao cisalhamento, que está relacionada com a capacidade do revestimento resistir às tensões de cisalhamento que se produzem na interface do substrato.

Estudos desenvolvidos por Nascimento Milagres (2018) empregando RMF na formulação de argamassas obtiveram resistência à flexão aos 7 dias equivalente a 0,58 MPa, e aos 28 dias na ordem de 0,56 MPa (Figura 3).

**Figura 3** - Gráfico da argamassa com rejeito de minério com o traço 1:2:9 em volume.



Fonte: Nascimento Milagres (2018).

### 3. Metodologia

#### 3.1 Caracterização dos materiais

##### 3.1.1 Análise Granulométrica

A caracterização do agregado miúdo utilizado na produção da argamassa está alinhada aos objetivos da pesquisa.

A análise granulométrica do agregado convencional e do agregado de RMF foi realizada conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Em primeiro lugar, foi realizada redução do tamanho das amostras, por meio do processo de quarteamento manual do agregado, conforme ilustrado na Figura 4.

**Figura 4 -** Quarteamento manual do agregado.



Fonte: Autores (2021).

Após essa etapa, foram selecionadas para cada tipo de agregado duas amostras, que foram colocadas em um agitador eletromecânico composto por um conjunto de peneiras, para realizar a separação do agregado miúdo em diferentes tamanhos de grãos. Esse processo forneceu informações sobre a distribuição granulométrica dos agregados utilizados nessa pesquisa.

### 3.1.2 Massa Específica

O processo de caracterização do agregado miúdo continuou com a determinação da massa específica, com a realização do ensaio conforme a norma DNER-ME 194 (1998), sendo analisadas duas amostras por agregado.

### 3.1.3 Massa Unitária

A massa unitária do agregado convencional e do agregado do RMF foi determinada através dos processos indicados na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Figura 5 ilustra parte desse procedimento.

**Figura 5 -** Detalhes de partes dos procedimentos de obtenção da massa unitária.



Fonte: Autores (2021).

Por agregado, foram realizados três ensaios para determinação da massa unitária.

## 3.2 Definição do Traço de Argamassa

A preparação da argamassa foi feita de acordo com a NBR 16541 (ABNT, 2016). A proporção relativa entre cimento Portland e o agregado nas argamassas foi 1:3. O cimento Portland empregado nas misturas foi o CPIII 32 RS. Os traços de argamassa foram definidos considerando teores de 0%, 25%, 50% e 100% de substituição, em massa, do agregado miúdo

convencional pelo agregado de RMF. Foram realizados ao todo 4 formulações de argamassa, conforme apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Traços de argamassa.**

	Substituição por RMF			
	0%	25%	50%	100%
Formulações	0/0	75/25	50/50	0/100

Fonte: Autores (2021).

### 3.3 Avaliação das Propriedades da Argamassa no estado fresco

#### 3.3.1 Trabalhabilidade

Para o teste de trabalhabilidade da argamassa no estado fresco foram seguidos os parâmetros prescritos na NBR 13276 (ABNT, 2016), sendo utilizada uma mesa para índice de consistência, que é constituída por uma mesa horizontal lisa e plana de metal não corrosivo, com uma haste fixada em seu centro.

#### 3.3.2 Densidade

Para o teste de densidade da argamassa no estado fresco foram seguidas as diretrizes presentes na NBR 13278 (ABNT, 2005). O cálculo da densidade de massa da argamassa no estado fresco, em quilogramas por metro cúbico, foi determinado através dos parâmetros presentes na NBR 13278 (ABNT, 2005).

### 3.4 Avaliação das Propriedades da Argamassa no estado endurecido

#### 3.4.1 Densidade

Realizados a moldagem de três corpos-de-prova, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), eles passaram por um processo de cura em uma solução de água e cal até a idade de 28 dias. Foram moldados corpos de provas prismáticos com 4cmx4cmX16cm. Após o processo de cura foi determinado com o auxílio de um paquímetro, o volume de cada corpo de prova, por meio das medidas da altura, largura e do comprimento de cada corpo-de-prova, e também foi realizada a pesagem individual dos corpos-de-prova.

A densidade aparente no estado endurecido das argamassas foi determinada dividindo a massa do corpo de prova dividido pelo seu volume. Foram realizadas por traço de argamassa três ensaios.

#### 3.4.2 Porosidade

Para o ensaio de obtenção da porosidade da argamassa foram seguidos os critérios prescritos na NBR 9778 (ABNT, 2005). Foram ensaiadas para cada traço de argamassa duas amostras, ambas íntegras e isentas de materiais indesejáveis.

#### 3.4.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão da argamassa foi realizado conforme a metodologia descrita na norma NBR 13279 (ABNT, 2005), com a aplicação de uma carga de  $(50 \pm 10)$  N/s até a ruptura do corpo-de-prova. Foram ensaiados 3 corpos de provas por traço de argamassa, aos 28 dias de idade.

### 3.4.4 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial da argamassa foi realizado seguindo os fundamentos prescritos na NBR 13279 (ABNT, 2005). Para a realização desse ensaio foram usadas as metades dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão, posicionando-as no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio EMIC – modelo: DL20000, aplicando uma carga de  $(500 \pm 50)$  N/s até ocorrer a ruptura do corpo-de-prova.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Caracterização dos materiais

#### 4.1.1 Agregado miúdo convencional

O processo de caracterização do agregado miúdo iniciou-se com a realização do fracionamento do material em diversas peneiras no agitador eletromecânico. Os materiais retidos em cada peneira foram coletados, armazenados em recipientes conforme sua granulometria e em seguida foram pesados separadamente. A Figura 6 mostra as frações retidas nas peneiras e no fundo de peneira.

**Figura 6** - Frações retidas nas peneiras após o ensaio de granulometria do agregado miúdo.

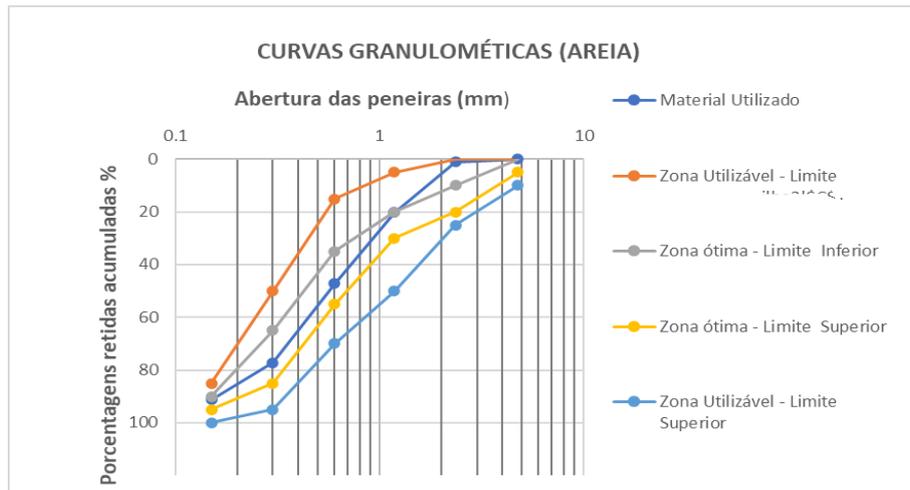


Fonte: Autores (2021).

O valor do Módulo de Finura do agregado miúdo convencional foi de 2,37, ficando superior ao encontrado por Carvalho Junior et al. (2005), que foi de 1,90. Já a Dimensão Máxima Característica (2,36 mm) foi o mesmo valor encontrado para o agregado miúdo utilizado no referido estudo.

No Gráfico 1 é apresentada a curva da composição granulométrica do agregado miúdo convencional, em escala logarítmica, contendo também as curvas com os limites de utilização do agregado recomendados pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005).

**Gráfico 1:** Curvas da composição granulométrica do agregado miúdo utilizado.



Fonte: Autores (2021).

É observado que o agregado miúdo convencional possui uma boa graduação, estando seus limites granulométricos dentro dos limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo, prescritos na NBR 7211 (ABNT, 2005).

Com relação a massa específica do agregado miúdo convencional o valor obtido foi de  $2,64 \text{ g/cm}^3$ , valor bem próximo do encontrado por Carrijo (2005), que foi de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ .

Na Tabela 8 são apresentados os resultados da massa unitária. Winter de Mello (2018), cita que a massa unitária dos agregados miúdos comumente utilizados na produção de argamassa é da faixa de  $1291 \text{ kg/m}^3$ , valor próximo do obtido nessa pesquisa.

**Tabela 8 -** Determinação da massa unitária do agregado miúdo.

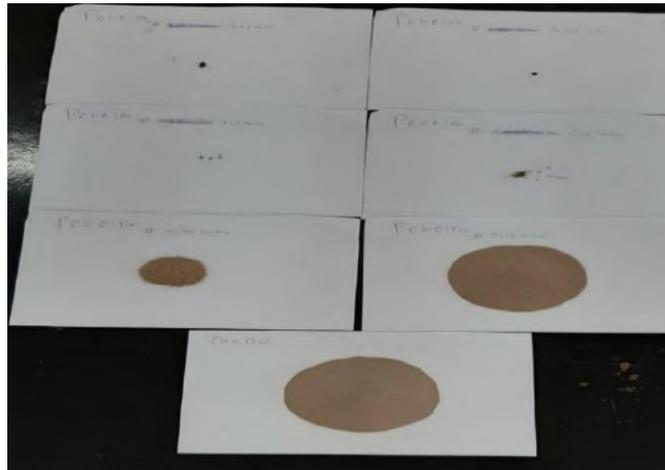
NBR/NM 45:2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios			
Amostras	1	2	3
Peso kg	7,66	7,68	7,68
$\rho_{ap} \text{ kg/m}^3$	1276,6	1280,0	1280,0
$\rho_{ap} \text{ kg/m}^3$ (média)		1278,9	

Fonte: Autores (2021).

#### 4.1.2 Rejeito de Minério de Ferro

As amostras de RMF passaram pelo processo de peneiramento, onde foram usadas as mesmas peneiras utilizadas para o agregado miúdo convencional. A Figura 7 mostra as frações retidas nas peneiras nas peneiras.

**Figura 7** - Frações retidas nas peneiras após o ensaio de granulometria do RMF.



Fonte: Autores (2021).

Feita a pesagem das frações, os dados encontrados foram lançados em uma planilha no Excel para a definição da composição granulométrica, dados apresentados na Tabela 9.

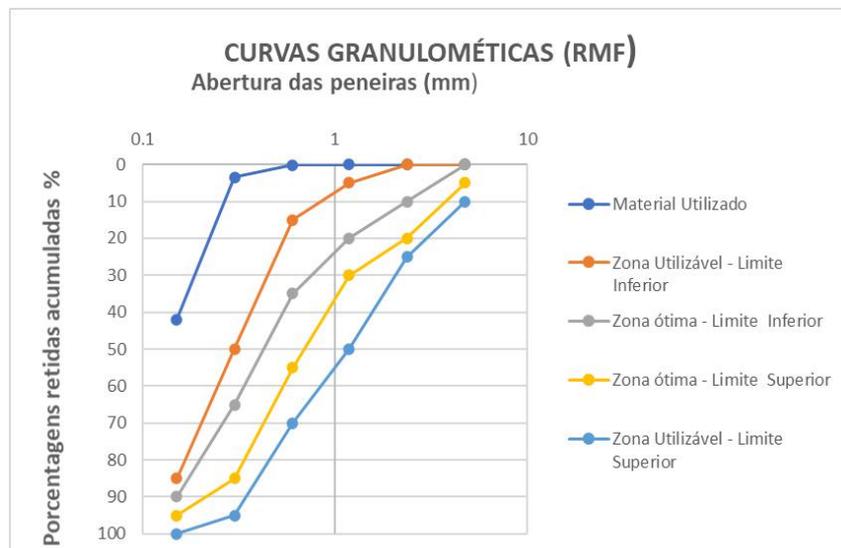
**Tabela 9** - Composição granulométrica do Rejeito de Minério de Ferro.

Composição Granulométrica do							
NBR NM 248 – Agregados: Determinação da composição granulométrica							
Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1) (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Variação	Média %	Acumulada %
	M1	M2	M1	M2			
4,75	0,3	0,0	0,1	0,0	0,1	0	0
2,36	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0	0
1,18	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0	0
0,6	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0	0
0,3	17,0	16,6	3,4	3,3	0,1	3	3
0,15	177,0	206,4	35,5	41,4	5,9	38	42
Fundo	304,0	275,5	61,0	55,2	5,7	58	100
<b>Módulo de Finura</b>				MF = $[(3+42)/100] = 0,45$			
<b>Dimensão Máxima</b>				$D_{max} = 0,30$ mm			

Fonte: Autores (2021).

Com os dados do peneiramento foi possível construir a curva granulométrica (Gráfico 2) em escala logarítmica, contendo também as curvas com os limites de utilização do agregado.

**Gráfico 2** - Curva granulométrica do RMF utilizado.



Fonte: Autores (2021).

Nesse teste foram adotados como parâmetro de referência os mesmos limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo convencional, prescritos na NBR 7211(ABNT, 2005), já que o rejeito será usado em substituição ao agregado miúdo.

Percebe-se que a composição granulométrica do RMF ficou fora dos limites de distribuição granulométrica prescritos na NBR 7211(ABNT, 2005). A porcentagem retida acumulada do material concentrou-se entre as peneiras 0,30 mm e 0,15

mm, revelando que o material possui uma composição de grãos bem finos. Esse resultado sinaliza que a utilização parcial ou total desse agregado em substituição ao agregado miúdo convencional utilizado nesse estudo na produção da argamassa, certamente demandará em acréscimos da quantidade de água nas misturas.

Destaca-se que algumas aplicações de argamassas requerem formulações com agregados finos, tais como argamassas flexíveis e argamassas para rejuntamentos.

A massa específica encontrada para o RMF em estudo, foi de  $2,71 \text{ g/cm}^3$ , valor um pouco inferior em comparação aos valores encontrados nos estudos de caracterização do rejeito realizados por Santos (2018) e por Pereira (2016), que foram de  $3,49 \text{ g/cm}^3$  e  $3,20 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. Possivelmente, os RMF estudados por esses pesquisadores possuíam um teor de ferro superior ao rejeito utilizado nesta pesquisa.

Para o ensaio da obtenção da massa unitária do RMF, foram obtidas as medidas de massa de cada amostra, onde foi calculada a massa unitária para cada uma e em seguida a média aritmética das massas unitárias, dados e resultados presentes na Tabela 10.

**Tabela 10 - Determinação da massa unitária do RMF.**

<b>NBR/NM 45:2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios</b>			
Amostras	1	2	3
Peso kg	8,24	8,22	8,24
$\rho_{ap} \text{ kg/m}^3$	1373,3	1370,0	1373,3
$\rho_{ap} \text{ kg/m}^3$ (média)	1372,2		

Fonte: Autores (2021).

O valor encontrado da massa unitária para o rejeito foi de  $1372,2 \text{ kg/m}^3$ , valor superior ao encontrado por Ferreira et al. (2016) em seu estudo do reaproveitamento do rejeito de minério de ferro da região de Morro do Pilar/MG, onde obteve uma massa unitária de  $1270 \text{ kg/m}^3$ . Essa diferença pode ser atribuída a maior presença de ferro na composição do RMF estudado.

## 4.2 Avaliação das propriedades das argamassas

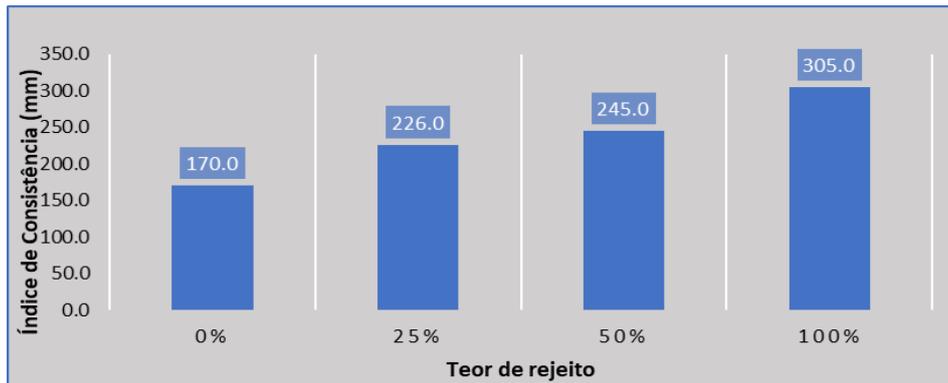
### 4.2.1 No estado fresco

#### 4.2.1.1 Trabalhabilidade

No Gráfico 3 são apresentados os resultados médios dos testes de consistência das argamassas, seguindo os parâmetros da NBR 13276 (ABNT, 2016). Verifica-se que à medida que se elevou a utilização do RMF, em substituição a massa do agregado convencional, maior foi o índice de consistência da argamassa. Tal comportamento foi observado nos resultados encontrados por Fontes (2013), que certamente está relacionado com a granulometria bastante fina do RMF.

A utilização de agregados finos em argamassas tende a demandar maior quantidade de água de amassamento, levando ao aumento do índice de consistência da argamassa (Augusto Romano, 2004).

**Gráfico 3 - Índice de consistência das argamassas.**



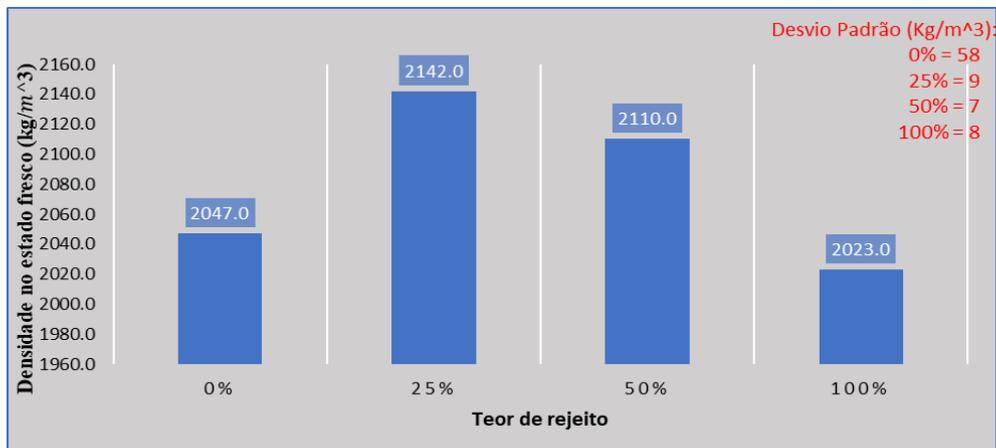
Fonte: Autores (2021).

Entretanto, segundo Dallagnol (2018) e Segat (2005), embora o excesso de água aumente a trabalhabilidade das argamassas de cimento Portland, em uma obra isso é prejudicial, devido ao enfraquecimento da resistência final da argamassa, assim sendo indicado o uso de aditivos plastificantes em substituição ao excesso de água.

#### 4.2.1.2 Densidade

Realizados os passos estabelecidos pela NBR 13278 (ABNT, 2005) para a determinação da densidade da argamassa no estado fresco, os valores encontrados para cada traço estão presentes no Gráfico 4.

**Gráfico 4 – Resultados da densidade das argamassas no estado fresco.**



Fonte: Autores (2021).

Fazendo a análise dos resultados presentes no Gráfico 4, conclui-se que o traço de 25% de substituição em massa de RMF foi o que apresentou maior densidade. Destaca-se que a quantidade de água empregada na produção da argamassa com 25% de RMF foi a mesma da argamassa de controle. Já para as argamassas com 50% e 100% RMF a demanda de água aumentou com o teor de substituição do agregado convencional. Portanto, o melhor desempenho da argamassa com 25% de RMF pode ser atribuído ao melhor empacotamento entre os agregados proporcionado pelo teor de substituição adotado. Assim, provavelmente ocorreu uma menor porosidade na estrutura da argamassa.

Os menores valores de densidades nas argamassas com 50% e 100% de RMF são decorrentes da elevação da quantidade de água na mistura.

#### 4.2.2 No estado endurecido

##### 4.2.2.1 Porosidade

No ensaio para a obtenção da absorção de água, do índice de vazios e da massa real da argamassa, foram seguidos os critérios prescritos na NBR 9778 (ABNT, 2005), sendo os valores de absorção de água (A), índice de vazios ( $I_v$ ) e massa específica real ( $P_r$ ) apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11** - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica real.

Traço	Absorção de água			Índice de vazios			Massa específica real		
	Média (%)	D.P (%)	C.V (%)	Média (%)	D.P (%)	C.V (%)	Média (g)	D.P (g)	C.V (%)
<b>0%</b>	10,97	0,17	0,02	21,04	0,28	0,01	2,43	0,02	0,63
<b>25%</b>	10,85	0,27	0,03	20,91	0,45	0,02	2,44	0,02	0,65
<b>50%</b>	12,48	0,27	0,02	23,54	0,41	0,20	2,47	0,00	0,24
<b>100%</b>	15,62	0,52	0,03	27,85	0,68	0,02	2,47	0,00	0,19

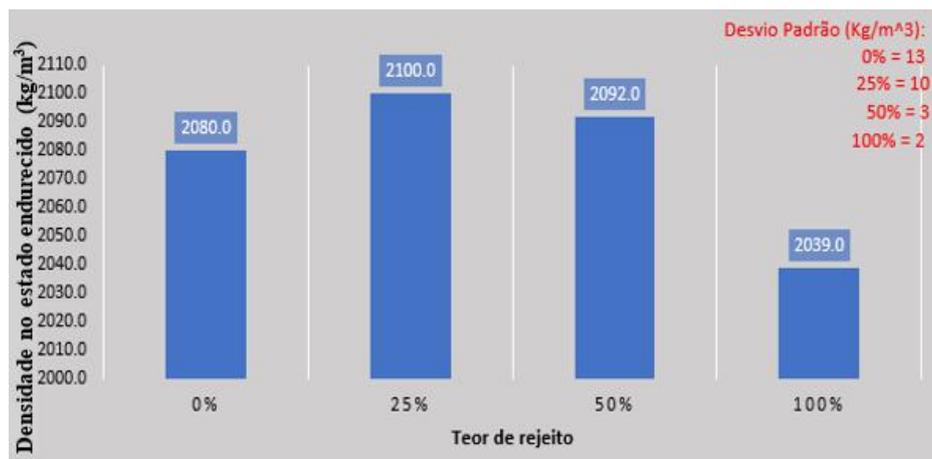
Legenda: D.P – desvio padrão; C.V – coeficiente de variação. Fonte: Autores (2021).

Os resultados demonstram que a argamassa formulada com o traço de 25% de substituição em massa do RMF, apresenta menor absorção de água e menor índice de vazios, assim constituindo a argamassa com menor concentração de porosidade. Isso, principalmente devido ao melhor agrupamento das partículas dos agregados na argamassa em comparação com os outros traços.

##### 4.2.2.2 Densidade

Seguindo as prescrições dadas pela NBR 13280 (ABNT, 2005) para a determinação da densidade da argamassa no estado endurecido, os valores encontrados para cada traço estão presentes no Gráfico 5.

**Gráfico 5** - Valores de densidade no estado endurecido para cada traço.



Fonte: Autores (2021).

Constata-se no Gráfico 5 que o traço de 25% de substituição em massa de RMF foi o que apresentou maior densidade, devido sua menor porosidade. Valores bem próximos dos valores encontrados por Ferreira et al. (2016) em seu estudo sobre argamassas com utilização de RMF.

A menor densidade da argamassa com 100 % de RMF é atribuída à elevação da quantidade de água na mistura. Para esse caso o uso de aditivos químicos na formulação das argamassas poderá ser uma rota alternativa para minimizar os efeitos negativos da elevação da água de amassamento devido a elevada finura do RMF.

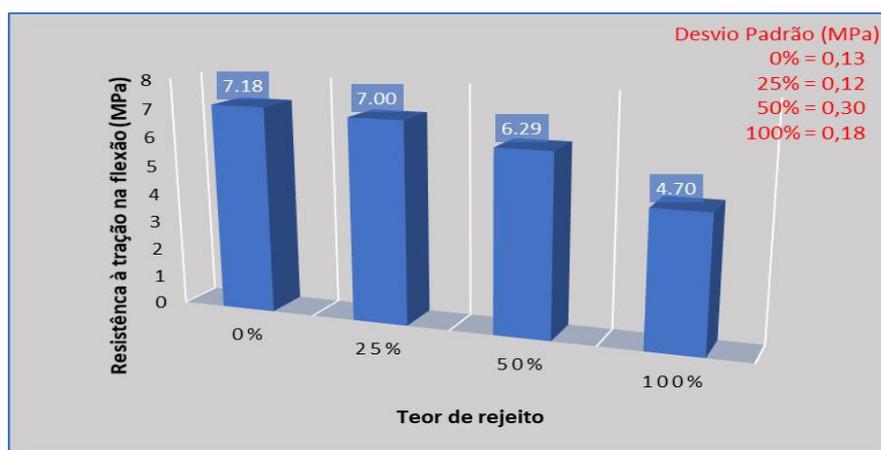
Segundo Silva (2006), o aumento do teor de finos dos agregados miúdos, aumenta a densidade de massa no estado fresco e no estado endurecido devido ao maior empacotamento provocado pelos finos. Entretanto, com o uso de maiores quantidades de água na mistura, acaba influenciando negativamente na densidade da argamassa.

#### 4.2.2.3 Resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão para cada traço de argamassa, podem ser visualizados no Gráfico 6.

Os resultados encontrados para a resistência à tração na flexão, revelam que os traços compostos com RMF apresentaram um bom comportamento à tração, mas com a substituição em massa cada vez maior do agregado miúdo convencional por RMF, a resistência à tração na flexão da argamassa reduziu em comparação a argamassa referência (0% de RMF). Entretanto, a argamassa com 25% de RMF não apresentou diminuição significativa na resistência à tração em comparação com a argamassa de referência, sendo a redução nessa propriedade na ordem 2,5%.

**Gráfico 6 - Resistência à tração na flexão das argamassas.**



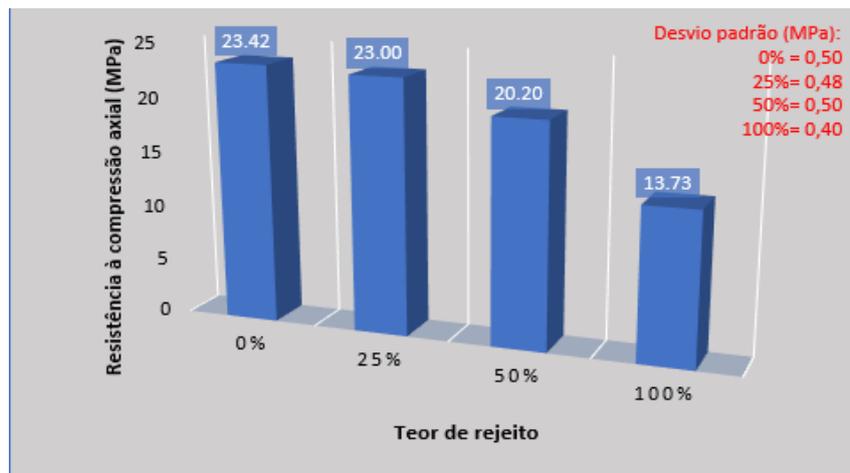
Fonte: Autores (2021).

A queda de desempenho das argamassas está diretamente relacionada a elevação da porosidade, que está relacionada com o aumento do uso de água nas misturas de argamassas. Faria et al. (2019) discutem que a resistência mecânica da argamassa é influenciada por diversos fatores, sendo o principal a relação água/cimento.

#### 4.2.2.4 Resistência à compressão

No Gráfico 7 são expressos os resultados de resistência à compressão axial de cada traço de argamassa. Esses resultados representam a média de três corpos de provas ensaiados.

**Gráfico 7 - Resistência à Compressão axial das argamassas.**



Fonte: Autores (2021).

Assim como na resistência à tração na flexão, os resultados encontrados para a resistência à compressão axial, também apresentaram um bom comportamento quanto a compressão, devido ao envolvimento dos grãos de rejeito com os demais constituintes da argamassa. No entanto, os resultados também revelam que com a substituição em massa cada vez maior do agregado miúdo convencional por RMF tende a reduzir a resistência à compressão da argamassa.

A argamassa com 25% de RMF não apresentou diminuição significativa na resistência à compressão, em comparação com a argamassa de referência (0% de RMF), sendo a diminuição nessa propriedade mecânica em torno de 1,8%.

Comparando os resultados de resistência mecânica encontrados, pode-se afirmar que a utilização de RMF nos traços de argamassa, proporcionou bons resultados tanto na tração e na compressão. Novamente ressalta-se que a melhoria da performance mecânica das argamassas obtidas pode ser alcançada por meio da inclusão de aditivos químicos, tipo plastificantes, de forma a minimizar os efeitos negativos do aumento da demanda de água devido a finura do RMF.

As argamassas estudadas se enquadram nas especificações da norma NBR 13281 (ABNT, 2005), segundo as seguintes classificações:

- Resistência à Compressão: classe (P6);
- Resistência à Tração na flexão: classe (R6);
- Densidade de massa no estado fresco: classe (D6);
- Densidade de massa aparente no estado endurecido: classe (M6);
- Retenção de água: classe (U1).

## 5. Conclusão

O estudo avaliou o emprego do rejeito de minério de ferro como agregado miúdo em misturas de argamassas para assentamento e revestimento. Os resultados sinalizaram o potencial de aplicação do rejeito como material alternativo para confecção de argamassas.

O rejeito estudado apresentou módulo de finura igual a 0,45 e 58% do material passante pela peneira de 0,15 mm, configurando-se em um agregado miúdo muito fino, apresentando massa específica de  $2,71 \text{ g/cm}^3$  e massa unitária de  $1372 \text{ kg/m}^3$ .

Para a argamassa no estado fresco, chegou-se à conclusão que o seu índice de consistência aumentou com o aumento do teor de rejeito, em razão da maior quantidade de finos na composição da argamassa, o que demandou maior utilização de

água.

O traço de argamassa com 25 % de substituição agregado miúdo convencional por agregado de RMF foi o que apresentou a maior densidade no estado fresco, obtendo o valor de  $2142 \text{ kg/m}^3$ .

Referente a argamassa no estado endurecido, os resultados encontrados para a absorção de água, demonstraram que a argamassa com 25% de rejeito apresentou melhor comportamento, ou seja, menor absorção de água, cerca de 0,12% a menos que a argamassa de controle ou de referência.

A argamassa 25% de rejeito apresentou o melhor parâmetro de durabilidade, devido à sua menor porosidade.

Os resultados encontrados para a resistência à tração na flexão, revelam que os traços compostos com RMF apresentaram um bom comportamento à tração, principalmente o traço com 25% de substituição do rejeito, que não apresentou diminuição significativa na resistência à tração em comparação com a argamassa de referência.

Assim como na tração, os resultados encontrados para a resistência à compressão axial, também apresentaram um bom comportamento.

Os resultados e informações obtidas nesta pesquisa, além de serem de real importância para o aprendizado dos envolvidos, também são relevantes para a indústria mineradora, para a área da construção Civil e colabora com o papel da Universidade Federal de Itajubá como polo gerador de conhecimento e desenvolvimento regional.

O rejeito de minério de ferro que normalmente é descartado no meio ambiente, com os resultados encontrados neste estudo, sinaliza um potencial de torná-lo um recurso utilizável para a produção de argamassas, possuindo um destino ambientalmente correto e tecnicamente viável.

## Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científica e Tecnológico (CNPq), ao grupo de pesquisa Materiais para Indústria da Construção Civil e Mecânica – MATCIME e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) – Campus de Itabira, pela oportunidade dada e pela confiança para o desenvolvimento da pesquisa.

## Referências

- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1050–1062. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.139>
- Alcântara, P. S. X. (2011). *Desenvolvimento de argamassas para revestimento utilizando resíduos de cerâmica vermelha de caruaru/PE como material pozolânico e/ou agregado alternativo* [Dissertação (Graduação) não publicada]. Universidade Federal de Pernambuco.
- Aparecida Faria, I. (2019). Avaliação da influência do uso de água residuária na resistência de argamassas. *Interfaces do conhecimento*.
- Araújo, N. N. d. (2014). *Desempenho de argamassas de revestimentos produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da Grande Natal-RN* [PublishedVersion, Universidade Federal do Rio Grande do Norte]. <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/14856>
- Associação brasileira de normas técnicas. (1983). *Agregado em estado compactado seco - Determinação da massa unitária* (NBR 7810).
- Associação brasileira de normas técnicas. (1995). *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas* (NBR 13529).
- Associação brasileira de normas TÉCNICAS. (2003). *Agregados – Determinação da composição granulométrica* (NBR NM 248).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2005a). *Agregado para concreto* (NBR 2711).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2005b). *Agregados para concreto - Especificação* (NBR 7211).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2005c). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido* (NBR 13280).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2005d). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado* (NBR 13278).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2005e). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. (NBR 13279).

- Associação brasileira de normas técnicas. (2005f). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos* (NBR 13281).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2006). *Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios* (NBR NM 45).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2010). *Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração* (NBR 13528).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2016a). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência* (NBR 13276).
- Associação brasileira de normas técnicas. (2016b). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios* (NBR 16541).
- Augusto Romano, C. (2004). Blogs UFVJM | Gerenciador de Blogs da UFVJM. <http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2013/04/Concreto-02.pdf>
- Barros, J. A. d. A. (2013). *Estudo do aproveitamento do rejeito da mineração de esmeraldas na produção de refratários conformados isolantes* [PublishedVersion, Universidade Federal do Rio Grande do Norte]. <http://repositorio.ufm.br:8080/jspui/handle/123456789/15711>
- Bates, J. (2002, 1 de fevereiro). Barragens de rejeitos. *Signus*.
- Benvindo da Luz, A., & Antonio Freitas Lins, F. (2010). Introdução ao tratamento de minérios. *CETEM/MCT*.
- Borges, A. A., Luz, J. A. M. d., & Ferreira, E. E. (2008). Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito. *Rem: Revista Escola de Minas*, 61(1), 29–34. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672008000100006>
- Camargo, P. (2020). concreto, depois da água, o material mais consumido pelos seres humanos. *Gazeta de Bebedouro*.
- Carasek, H. (2010). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Isaia, G.C.*
- Carrijo, P. M. (2005). *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto* [PublishedVersion, Universidade de São Paulo]. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-11052006-143829/>
- Carvalho, A. C., Oliveira de S, C. A., & Oliveira, A. (n.d.). *Uso de rejeitos de mineração como agregado miúdo na fabricação de argamassas*.
- Carvalho Jr, A. N., Brandão, P. R. G., & Freitas, J. M. C. (2005). Relação entre a resistência de aderência de revestimento de argamassa e o perfil de penetração de pasta de aglomerante nos poros do bloco cerâmico. *ANTAC*, 518–529.
- Castro, M. (2016, 1 de outubro). *Argamassas*. [http://moemacastro.weebly.com/uploads/5/7/9/8/57985191/cap\\_4\\_argamassas](http://moemacastro.weebly.com/uploads/5/7/9/8/57985191/cap_4_argamassas)
- Cincotto, M. A., Silva, M. A. C., & Carasek, H. (1995). Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. *Instituto de Pesquisas Tecnológicas*.
- Crasek, H. (2016). *Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento*.
- DallagnoL, G. H. (2018). *Estudo sobre as características nos estados fresco e endurecido de uma argamassa para revestimentos estabilizada por 72 horas variando o tempo de aplicação a partir de sua mistura na central dosadora*. [TCC (Trabalho de conclusão de curso, do Curso de Engenharia Civil) não publicado]. Universidade de Caxias Do Sul.
- Departamento nacional de estradas de rodagem. (1998). *Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman* (ME 194).
- Dias, L. S. (2017). *Rejeito de mineração de quartzito como agregado para produção de argamassa colante* [Dissertação (Pós-graduação) não publicada]. Universidade Federal De Ouro Preto.
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., & Moran, C. J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>
- Farias, M. M., & Palmeira, E. M. (2007). Agregados para construção civil.: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia dos Materiais*, 481–524.
- Ferreira, K. C. (2016). *Estudos do aproveitamento de rejeitos de um rejeito de minério de ferro Itabirítico da região do Morro do Pilar*.
- Fontes, W. C. (2013). *Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento* [PublishedVersion, reponame:Repositório Institucional da UFOP]. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/5709>
- Franciscon, M. (2007). *Tecnologia da Argamassa* [Monografia (Trabalho de conclusão de curso, do Curso de Engenharia Civil) não publicado]. Universidade São Francisco.
- Freitas, C. d. (2010). *Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da Região Metropolitana de Curitiba* [PublishedVersion, reponame:Repositório Institucional da UFPR]. <http://hdl.handle.net/1884/24528>
- Gomes, C. B. (1984). Técnicas analíticas instrumentais aplicadas á geologia. *Edgard Blucher Ltda*.
- Goulart Bezerra, C. (2017). *Caracterização do rejeito 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) não publicada]. Universidade Federal Do Rio De Janeiro.

- Guimaraes, N. C. (2011). *Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro Visando a sua Disposição em Pilhas* [PublishedVersion, Universidade Federal de Minas Gerais]. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8MTF32>
- Ibram. (n.d.). *Informações sobre a Economia Mineral do Estado de Minas Gerais*. <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00004355>
- Junior, A. N. d. C. (2005). *Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico* [PublishedVersion, Universidade Federal de Minas Gerais]. <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-6NARYH>
- Kitobo, W., Lunga, A., Frenay, J., Gaydardzhiev, S., & Basti, D. (2009). Bacterial leaching of complex sulphides from mine tailings altered by acid drainage. In *Hydrocopper*. 365–373.
- Lage, F. L., Gonçalves, K. d. M., Cordeiro, J. S., & Lage, M. A. (2020). Utilização dos rejeitos de minério de ferro na construção civil: uma análise cienciométrica. *Research, Society and Development*, 9(4), Artigo e94942871. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.2871>
- Laminatus | Aplicação do rejeito de minério de ferro na Construção Civil*. (n.d.). Laminatus. <https://laminatus.com.br/aplicacao-rejeito-minerio-de-ferro>
- Lottermoser, B. G. (2011). Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes. *Elements*, 7(6), 405–410. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.405>
- Machado, M. S. M. M. (2018). *Blocos para construção civil feitos com rejeitos depositados na Barragem de Candonga* [Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) não publicada]. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento. (2006). In *II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais*.
- Nascimento MILAGRES, A. (2018). *Fabricação de argamassa mista utilizando areia contaminada com resíduos de rejeito da barragem de Fundão – Mariana/MG*. [Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) não publicada]. UNIVICOSA.
- N.d.). Site da FECFAU. [http://www.fec.unicamp.br/~caxd/falcetta/\\_resumos/eng5](http://www.fec.unicamp.br/~caxd/falcetta/_resumos/eng5)
- Neumann, R., Scheneider, C. L., & Neto, A. A. (2004). Caracterização Tecnológica de Minérios, Tratamento de Minérios. 55–109.
- Pereira, M. M. (2016). *Avaliação da Biodisponibilidade de Metais em Rejeitos de Mineração Empregando Extrações Simples* [Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental não publicada]. Universidade de Brasília.
- Prado Azevedo, I. (2020). *Impactos socioeconômicos da atividade mineradora* [Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) não publicada]. Universidade Federal De Ouro Preto.
- Rejeitos da mineração*. (n.d.). InfoEscola. <https://www.infoescola.com/ecologia/rejeitos-da-mineracao>
- Retrospectiva: Rompimento da barragem de Brumadinho foi a primeira grande tragédia ambiental do ano - ((o))eco*. (n.d.). ((o))eco. <https://www.oeco.org.br/noticias/rompimento-da-barragem-de-brumadinho-e-a-primeira-grande-tragedia-ambiental-do-ano/>
- Rodrigues Bento, G. (2017). *Fechamento de barragens de contenção de rejeitos da mineração* [Dissertação (Pós-graduação em Geotecnia) não publicada]. Universidade Federal De Ouro Preto.
- Salomão, M. C. d. F. (2016). *Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água* [PublishedVersion, reponame:Repositório Institucional da UnB]. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/22750>
- Santos, T. G. d. (2018). *Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e geoambiental* [PublishedVersion, reponame:Repositório Institucional da UnB]. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/34120>
- Schankoski, R. A., Prudêncio Jr., L. R., & Pilar, R. (2015). Influência do tipo de argamassa e suas propriedades do estado fresco nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto para edifícios altos. *Materia (Rio de Janeiro)*, 20(4), 1008–1023. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620150004.0104>
- Segat, G. T. (2005). Manifestações patológicas observadas em revestimentos de argamassa: estudo de caso em conjunto habitacional popular na cidade de Caxias do Sul (RS) [PublishedVersion, reponame:Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da UFRGS]. <http://hdl.handle.net/10183/10139>
- Silva, R. R. R. (2004). *Sistemas de reagentes surfatantes na flotação catiônica reversa de minério de ferro* [PublishedVersion, Universidade Federal de Minas Gerais]. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8DHJZ3>
- Silva, N. G. (2006). *Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária* [Dissertação (Mestrado) não publicada]. Universidade Federal do Paraná.
- Silva, R. G. O. (2017). *Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero* [Tese (Doutorado em geotecnia) não publicada]. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Soncim, S. P.; Oliveira, J. H. de C.; Almeida, M. O. de; Oliveira, C. A. de S.; Belotti, F. M.; Cavalcante, E. H.; Resende, L. Investigating mechanical properties of hot mix asphalt containing iron ore flotation tailing. *Research, Society and Development*, 10(17), e122101724220. 10.33448/rsd-v10i17.24220. <https://www.rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/24220>.
- Struthers, S., Brumley, J., & Taylor, G. (1997). An integrated system for recycling base metal mine tailings. *Journal American Society of Mining and Reclamation*, 1997(1), 579–592. <https://doi.org/10.21000/jasmr97010579>
- Subrahmanyam, T. V., & Forssberg, K. S. E. (1990). Fine particles processing: shear-flocculation and carrier flotation — a review. *International Journal of Mineral Processing*, 30(3-4), 265–286. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(90\)90019-u](https://doi.org/10.1016/0301-7516(90)90019-u)

Trevizan, E. V. (2013). *Aproveitamento de rejeitos na mineração* [TCC (Graduação) não publicada]. Universidade Federal de Goiás.

Turra, D. G. (2016). *Contribuições para o estudo de algumas propriedades nos estados fresco e endurecido da argamassa estabilizada por 72 horas* [Monografia (Graduação em Engenharia Civil) não publicada]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Winter de Mello, C. (2018). *Influência dos parâmetros de forma do agregado na formulação de argamassas de projeto* [Tese (Doutorado em Engenharia Civil) não publicada]. Universidade do Rio Grande do Sul.

Wolff, A. P. (2009). *Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale* [PublishedVersion, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto]. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2345>