

Rejeitos de mineração gerados na microrregião de São João Del Rei, MG: estudo da viabilidade técnica do aproveitamento destes materiais em aplicações dentro da construção civil

Robinson Antônio Aparecido Alves^{a*}, Katrine Stefânia Couto^a, Laura Pinto Y Sousa^a

^a Laboratório de Solos e de Concreto, Núcleo Tecnológico de Engenharia Civil, Centro Universitário Presidente Tancredo de Almeida Neves, UNIPTAN, Av. Dr. José Caetano de Carvalho 2199, Jardim Central, 36307-251, São João Del Rei, MG

* engenheirorobinson@yahoo.com.br

Resumo:

As atividades de mineração estão presentes no território brasileiro desde o período colonial. Com o passar dos anos a mineração sofreu grandes transformações, mas continua sendo considerada fundamental para a economia do país. Contudo, a mineração gera sérios riscos e graves impactos socioambientais para as localidades onde estão instaladas. As recentes rupturas de barragens de rejeitos localizadas nos municípios de Mariana e Brumadinho, MG, evidenciaram os graves impactos ambientais e sociais relacionados a possíveis falhas nessas estruturas. Os episódios com as barragens de Mariana e Brumadinho geraram grande preocupação para a população que mora nas proximidades dessas estruturas e reacenderam a discussão sobre os riscos da acumulação progressiva de resíduos produzidos por atividades de mineração. Neste contexto, o objetivo desse projeto foi estudar alternativas sustentáveis e propor soluções tecnicamente viáveis dentro da construção civil para absorver os rejeitos gerados pela mineração na microrregião de São João Del-Rei, MG. Para o desenvolvimento do estudo foi realizada a coleta e a caracterização granulométrica, química e mineralógica de três diferentes tipos de rejeitos gerados por uma das mineradoras da região. A partir da caracterização dos rejeitos foi constatado que os materiais estudados possuem grande potencial para serem usados como material pozolânico na produção de concreto, argamassa e pasta, assim como também serem utilizados como adição mineral pozolânica na fabricação de cimento Portland.

Palavras-chave: Sustentabilidade; mineração; rejeito; cimento Portland; construção civil.

1. INTRODUÇÃO:

O Brasil é um país extremamente rico em recursos minerais e isso faz dele um dos principais produtores de minério do mundo. O setor de mineração é considerado fundamental para a economia do país, e sobretudo, para a economia do estado de Minas Gerais. A indústria da mineração tem um peso substancial na arrecadação de impostos do estado, além de ser responsável pela geração de milhares de empregos diretos e indiretos nas cidades onde estão instaladas [1].

Mas a indústria da mineração também gera riscos à segurança da população e graves impactos ambientais nas localidades onde estão instaladas. O processo de extração e beneficiamento do minério produz uma grande quantidade de resíduos que não possuem interesse econômico por parte

das empresas de mineração. Os resíduos sólidos gerados na extração do minério são denominados estéreis, já os resíduos produzidos a partir do beneficiamento do minério são chamados de rejeitos. A quantidade de estéreis e rejeitos produzidos depende da localização da jazida em relação à superfície, da qualidade do minério e do processo tecnológico utilizado para extração e beneficiamento do material [2]. O estéril é retirado para possibilitar a lavra do minério e normalmente é armazenado a seco em pilhas de estéril. O rejeito gerado no processo de beneficiamento do minério é disposto em minas subterrâneas, em cavas exauridas de minas, em pilhas por empilhamento a seco ou em barragens [3]. Alguns métodos de beneficiamento de minérios exigem a moagem dos materiais e adição de água e produtos químicos. Nesse processamento é produzido um grande volume de rejeito, que na maioria das vezes é armazenado em barragens. Atualmente no estado de Minas Gerais as barragens caracterizam a principal forma de disposição de rejeitos, acumulando cerca de 85% dos rejeitos produzidos pela mineração [4].

De acordo com a Fundação Estadual de Meio Ambiente [5], apenas no estado de Minas Gerais existem 698 barragens cadastradas no banco de declarações ambientais. Dessas barragens, 62,3% são dedicadas à disposição de rejeitos da mineração. Essas estruturas geram muitos impactos ambientais, como o desmatamento na fase de construção, poluição da água superficial e subterrânea durante a operação e após o fechamento da mina, geração de poeira na praia de rejeito e impacto visual em todas as fases da vida útil da barragem. Além dos impactos ambientais gerados na fase de construção e operação, as barragens construídas pelas mineradoras representam um grande risco à segurança da população que mora nas proximidades destas estruturas [3].

Recentemente o Brasil sofreu grandes perdas ambientais e humanas com o rompimento de duas grandes barragens de rejeitos localizadas nos municípios de Mariana e Brumadinho, ambas no estado de Minas Gerais. A ruptura dessas barragens evidenciou os graves impactos ambientais e sociais relacionados a possíveis falhas nessas estruturas. Com relação aos prejuízos e danos gerados, destaca-se o desabastecimento de água para milhares de pessoas, a supressão vegetal, perdas irreparáveis de fauna e flora, o desalojamento de grande parte da população local, impacto na economia da região e perdas humanas [6].

Na microrregião de São João Del-Rei, MG, existem quatro barragens de rejeitos de minério de grande porte, duas barragens localizadas no município de Nazareno, MG, e duas barragens situadas no município de São Tiago, MG. De acordo com o Sistema de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM) da Associação Nacional de Mineração (ANM), as quatro barragens são classificadas como de baixo risco. Entretanto, com relação ao dano potencial associado, as duas barragens de São Tiago são classificadas como de médio dano potencial associado, enquanto as duas barragens de Nazareno são classificadas como de alto dano potencial associado [7].

Os recentes acontecimentos ocorridos com as barragens de Mariana e Brumadinho geraram grande preocupação para a população que mora nas proximidades desse tipo de estruturas e reacenderam a discussão sobre o problema da acumulação progressiva de resíduos produzidos por atividades de mineração. Uma alternativa para o problema é a busca por soluções sustentáveis, tecnicamente e economicamente viáveis dentro da engenharia visando o aproveitamento dos rejeitos gerados nas atividades de mineração.

Atualmente muitos pesquisadores vêm realizando estudos sobre o aproveitamento de rejeitos oriundos do beneficiamento de minério de ferro e outros tipos de minérios em aplicações diversas [3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Entretanto, não há registro de trabalhos publicados sobre o aproveitamento de rejeitos provenientes da mineração de pegmatito, principal recurso mineral explorado pelas mineradoras da microrregião de São João Del Rei.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi verificar a viabilidade técnica do aproveitamento de rejeitos gerados por mineradoras instaladas na microrregião de São João Del Rei, MG em aplicações dentro da construção civil. Para a realização dessa análise uma das mineradoras da região disponibilizou amostras de três diferentes tipos de rejeitos gerados em seu processo produtivo, denominados: feldspato sódico, magnéticos e lamas. A partir das amostras fornecidas foram realizadas as caracterizações granulométrica, química e mineralógica dos três diferentes tipos de rejeitos, visando identificar potenciais alternativas dentro da construção civil para absorver esses materiais, e conseqüentemente, reduzir os impactos e riscos causados pelas barragens de rejeitos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

O trabalho foi dividido em quatro etapas principais: coleta e preparação das amostras, análise da composição granulométrica, análise da composição química e mineralógica e verificação da viabilidade técnica do aproveitamento dos rejeitos em aplicações dentro da construção civil.

2.1. Coleta e preparação das amostras:

Uma das mineradoras da região se disponibilizou a fornecer amostras dos rejeitos gerados no processo produtivo para a realização do presente trabalho. A mineradora forneceu amostras de três diferentes tipos de rejeitos gerados ao longo do processo de beneficiamento mineral, denominados: feldspato sódico, magnéticos e lamas.

A coleta das amostras foi realizada por colaboradores da mineradora de acordo com as recomendações da norma NBR 10007 [14], que determina os procedimentos para a amostragem de resíduos sólidos em barragens.

A preparação das amostras para a realização da análise da composição granulométrica consiste na remoção da umidade presente no material para obtenção de constância da massa. O procedimento de remoção da umidade presente nas amostras foi realizado no Laboratório de Solos e de Concreto do Centro Universitário Presidente Tancredo de Almeida Neves (UNIPTAN) utilizando uma estufa térmica com controle de temperatura. As amostras dos três diferentes tipos de rejeitos foram levadas e permaneceram em estufa à temperatura controlada de 105 ± 5 °C por um período de 24 horas para obtenção de constância da massa, conforme recomendado pela norma NBR NM 248 [15].

2.2. Análise da composição granulométrica dos rejeitos:

O objetivo da determinação da composição granulométrica de um material é classificar as partículas de uma amostra de acordo com as suas dimensões e verificar a proporção correspondente à cada faixa de tamanho. Como não existe uma norma específica para a determinação da composição granulométrica de rejeitos de mineração, os materiais estudados neste projeto foram submetidos à análise granulométrica por peneiramento de acordo com as recomendações da norma NBR NM 248 [15]. Essa norma estabelece os critérios para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos usados na produção de concreto.

De acordo com a norma NBR NM 248 [15], "O material mais fino que a abertura da malha de 75 μ m pode ser separado das partículas maiores de forma mais eficiente e completa por peneiramento úmido do que através do uso de peneiramento seco". Portanto, antes da realização do peneiramento seco, foi realizado o peneiramento úmido dos três tipos de rejeitos fornecidos pela mineradora, seguindo as recomendações da norma NBR NM 46 [16].

A partir da realização do procedimento de peneiramento úmido foi possível determinar o percentual de material fino que passa através da peneira 75 μ m por lavagem para cada um dos três tipos de rejeitos investigados.

Após a realização do peneiramento úmido foi realizado o peneiramento seco, seguindo as recomendações da norma NBR NM 248 [15]. O peneiramento seco foi realizado para a parte das amostras que ficaram retidas na peneira de abertura 75 μ m usada no procedimento de peneiramento úmido (após estas passarem por um processo de remoção de umidade em estufa).

De acordo com a norma NBR NM 248 [15], a composição granulométrica de agregados deve ser realizada através de um conjunto sucessivo de peneiras das séries normal e intermediária.

A determinação da composição granulométrica de agregados miúdos deve ser realizada utilizando a série normal, enquanto a série intermediária é normalmente aplicada na composição granulométrica de agregados graúdos. As peneiras devem ser previamente limpas e encaixadas de modo a formar um único conjunto de peneiras com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo [15].

O procedimento de peneiramento seco foi realizado para amostras dos rejeitos denominados: feldspato sódico e magnéticos. A amostra do rejeito denominado lamas passou em sua totalidade pela peneira de abertura 75 μ m no procedimento de peneiramento úmido, portanto, não foi necessário realizar o procedimento de peneiramento seco para esse tipo de rejeito.

O peneiramento seco foi realizado utilizando um conjunto de peneiras padronizadas e um agitador mecânico de peneiras instalado no Laboratório de Solos e de Concreto do UNIPTAN.

Os resultados obtidos no procedimento de peneiramento seco foram usados em conjunto com os resultados obtidos no procedimento de peneiramento úmido para determinação da composição granulométrica do rejeito feldspato sódico e do rejeito magnéticos.

2.3. Análise da composição química e mineralógica dos rejeitos:

A análise da composição química de cada um dos três tipos de rejeitos investigados nesse trabalho foi realizada no laboratório de análises químicas da própria mineradora que forneceu as amostras para o estudo. A identificação e quantificação dos compostos químicos presentes nas amostras foi realizada por meio do método espectrométrico de fluorescência de raios X (FRX) com análise semianalítica. As análises foram efetuadas em um espectrômetro de fluorescência de raios X de marca Panalytical modelo Axios.

A análise da composição mineralógica dos rejeitos foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Universidade de São Paulo (USP). As fases minerais presentes nas amostras foram identificadas por difratometria de raios X (DRX). Devido às características das amostras não foi possível realizar a quantificação de fases com precisão, portanto foram realizadas análises apenas qualitativas. As amostras analisadas contêm argilomineral e uma fase com lítio que inviabilizam tanto o fechamento químico (validações internas) quanto o próprio refinamento, visto que a baixa cristalinidade da argila prejudica a simulação comparativa do método de Rietveld.

As análises foram efetuadas através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X Empyrean marca Panalytical, com detector sensível à posição modelo Pixel 3D. As condições para obtenção dos difratogramas foram: radiação de $\text{Cu}_{K\alpha}$; potência 45 kV/40 mA; filtro de Ni no feixe incidente; monocromador no feixe difratado; faixa angular 2,5 a 70°; passo angular 0,02°; velocidade de 1,125°/min; preparação da amostra pelo método backload. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação dos difratogramas das amostras com os bancos de dados PDF2 do ICDD, International Centre for Diffraction Data e ICSD, Inorganic Crystal Structure Database.

2.4. Verificação da aplicabilidade do rejeito:

A partir do levantamento das características físicas, químicas e mineralógicas dos rejeitos investigados foi possível vislumbrar potenciais usos desses materiais em aplicações diversas. Isso foi feito pela comparação das características dos rejeitos com as características de materiais tradicionalmente usados dentro da construção civil.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

3.1. Análise da composição granulométrica dos rejeitos:

3.1.1. Feldspato sódico:

Na Tab.1 é apresentada a composição granulométrica do rejeito denominado 'feldspato sódico'. A composição granulométrica foi obtida aglutinando os resultados coletados nos procedimentos de peneiramento seco e peneiramento úmido realizados de acordo com as recomendações das normas NBR NM 248 [15] e NBR NM 46 [16], respectivamente.

A norma NBR 7211 [17] especifica os intervalos granulométricos para o agregado miúdo de origem natural já encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Como não existe uma norma específica para agregados obtidos por processos industriais, como subprodutos, essa norma foi usada como referência nesse trabalho. De acordo com a norma NBR 7211 [17], as partículas de diâmetro inferior a 0,075 mm também são conhecidas como finos ou material pulverulento. Conforme apresentado na Tab.1, o rejeito 'feldspato sódico' é constituído por 36% de material pulverulento. A norma NBR 7211 [17] estabelece que o material a ser utilizado como agregado miúdo na produção de concreto deve apresentar um valor máximo de material pulverulento entre 3% a 5%, tornando dessa forma inviável o uso do rejeito nessa aplicação.

Tabela 1. Composição granulométrica do rejeito feldspato sódico

PENEIRA		AMOSTRA 1 (300,070 g)		AMOSTRA 2 (300,076 g)		% Média		
NÚMERO ASTM / ABNT	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	Massa retida (g)	% Retida	Retida	Retida Acumulada	Passante Acumulada
3"	75,0	0	0,0	0	0,0	0	0	100
1.1/2"	37,5	0	0,0	0	0,0	0	0	100
3/4"	19,0	0	0,0	0	0,0	0	0	100
3/8"	9,5	0	0,0	0	0,0	0	0	100
4	4,75	0	0,0	0	0,0	0	0	100
8	2,36	0	0,0	0	0,0	0	0	100
16	1,18	0	0,0	0	0,0	0	0	100
30	0,600	0,103	0,0	0,099	0,0	0	0	100
50	0,300	3,923	1,3	4,049	1,4	1	1	99
100	0,150	82,8	27,7	87,432	29,2	28	30	70
200	0,075	105,117	35,1	101,122	33,8	34	64	36
PARTÍCULAS < 0,075		107,270	35,9	106,746	35,6	36	100	0
TOTAL		299,213	100,0	299,448	100,0	100		31
DIMENSÃO MÁX. CARAC. (mm)			0,300		MÓDULO DE FINURA			0,31

Conforme mostrado na Tab.1, o rejeito 'feldspato sódico' apresenta dimensão máxima característica 0,300 mm e módulo de finura 0,31. De acordo com o estabelecido pela norma NBR 7211 [17], o módulo de finura da zona ótima varia entre 2,20 e 2,90, o módulo de finura da zona utilizável inferior varia entre 1,55 e 2,20 e o módulo de finura da zona utilizável superior varia entre 2,90 e 3,50. Observa-se, portanto, que o rejeito 'feldspato sódico' apresenta dimensões muito inferiores às exigidas para aplicação como agregado miúdo na produção de concreto. Essa característica do rejeito 'feldspato sódico' se deve às operações de moagem que o pegmatito é submetido visando a redução do tamanho das partículas para atender às etapas de separação magnética e flotação no processo de beneficiamento mineral.

Por meio dos valores de porcentagem média retida acumulada obtidos para cada peneira (Tab.1) foi possível gerar a curva granulométrica para o rejeito 'feldspato sódico', apresentada na Fig.1. Na Fig.1 também são apresentadas as curvas referentes às delimitações da zona ótima e da zona utilizável para agregado miúdo estabelecidas pela norma NBR 7211 [17], para efeito de comparação com a curva granulométrica do feldspato sódico.

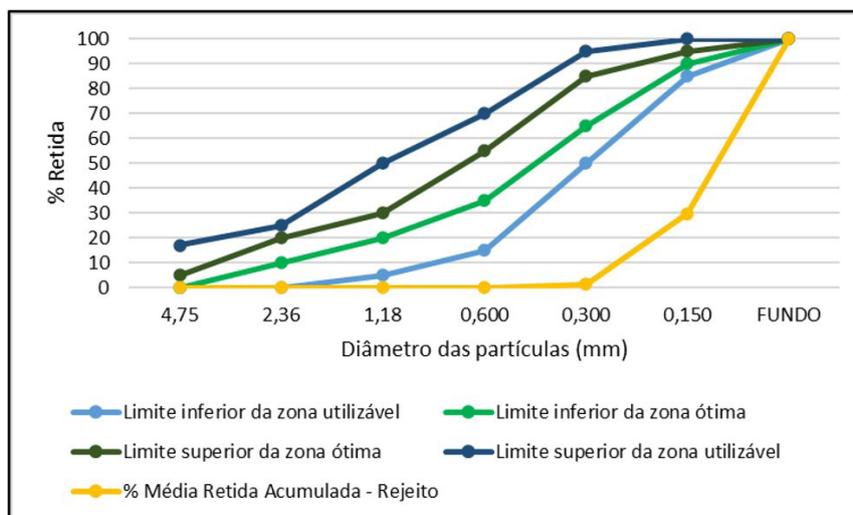


Figura 1. Curva granulométrica do rejeito feldspato sódico e zonas ótima e utilizável para agregado miúdo de acordo com a norma NBR 7211 [17]

Conforme pode ser observado na Fig.1, a curva granulométrica apresentada pelo rejeito 'feldspato sódico' fica fora da zona considerada utilizável estabelecida pela NBR NM 7211 [17]. Portanto, como salientado pela norma, para ser utilizado como agregado miúdo na produção de concreto, estudos prévios de dosagem que comprovem sua aplicabilidade devem ser realizados.

Em contrapartida, estudos mostram que a granulometria fina do rejeito é um ponto favorável tendo em vista sua potencial utilização como adição mineral em cimento Portland [4, 12, 18] e também com relação à sua incorporação na fabricação de produtos cerâmicos [13, 11, 19, 20, 21, 22].

3.1.2. Magnéticos:

Na Tab.2 é apresentada a composição granulométrica do rejeito denominado 'magnéticos'. A composição granulométrica foi obtida aglutinando os resultados coletados nos procedimentos de peneiramento seco e peneiramento úmido realizados de acordo com as recomendações das normas NBR NM 248 [15] e NBR NM 46 [16], respectivamente.

Tabela 2. Composição granulométrica do rejeito magnéticos

PENEIRA		AMOSTRA 1 (300,244 g)		AMOSTRA 2 (300,131 g)		% Média		
NÚMERO ASTM / ABNT	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	Massa retida (g)	% Retida	Retida	Retida Acumulada	Passante Acumulada
3"	75,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0	0	100
1.1/2"	37,5	0,000	0,0	0,000	0,0	0	0	100
3/4"	19,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0	0	100
3/8"	9,5	0,000	0,0	0,000	0,0	0	0	100
4	4,75	0,000	0,0	0,000	0,0	0	0	100
8	2,36	0,000	0,0	0,000	0,0	0	0	100
16	1,18	0,000	0,0	0,000	0,0	0	0	100
30	0,600	0,298	0,1	0,278	0,1	0	0	100
50	0,300	8,810	2,9	8,455	2,8	3	3	97
100	0,150	104,685	35,0	105,450	35,2	35	38	62
200	0,075	98,542	32,9	93,826	31,4	32	70	30
PARTÍCULAS < 0,075		87,008	29,1	91,274	30,5	30	100	0
TOTAL		299,343	100,0	299,283	100,0	100		41
DIMENSÃO MÁX. CARAC. (mm)			0,300	MÓDULO DE FINURA				0,41

Conforme apresentado na Tab.2, o rejeito 'magnéticos' é constituído por 30% de material pulverulento. A norma NBR 7211 [17] estabelece que o material a ser utilizado como agregado miúdo na produção de concreto deve apresentar um valor máximo de material pulverulento entre 3% a 5%, tornando dessa forma inviável o uso do rejeito nessa aplicação.

Conforme mostrado na Tab.2, o rejeito 'magnéticos' apresenta dimensão máxima característica 0,300 mm e módulo de finura 0,41. Observa-se, portanto, que o rejeito 'magnéticos' apresenta dimensões muito inferiores às exigidas para aplicação como agregado miúdo na produção de concreto. Essa característica do rejeito 'magnéticos' se deve às operações de moagem que o pegmatito é submetido visando a redução do tamanho das partículas para atender às etapas de separação magnética e flotação no processo de beneficiamento mineral.

Por meio dos valores de porcentagem média retida acumulada obtidos para cada peneira (Tab.2) foi possível gerar a curva granulométrica para o rejeito magnéticos, apresentada na Fig.2. Também são apresentadas as curvas referentes às delimitações da zona ótima e da zona utilizável para agregado miúdo estabelecidas pela norma NBR 7211 [17], para efeito de comparação com a curva granulométrica do rejeito.

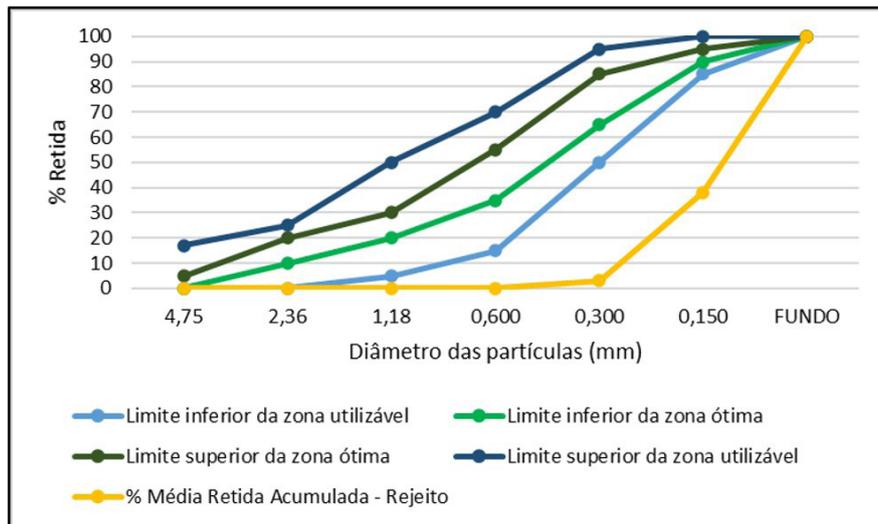


Figura 2. Curva granulométrica do rejeito 'magnéticos' e zonas ótima e utilizável para agregado miúdo de acordo com a norma NBR 7211 [17]

Conforme pode ser observado na Fig.2, a curva granulométrica apresentada pelo rejeito 'magnéticos' fica fora da zona considerada utilizável estabelecida pela NBR NM 7211 [17]. Portanto, como salientado pela norma, para ser utilizado como agregado miúdo na produção de concreto, estudos prévios de dosagem que comprovem sua aplicabilidade devem ser realizados.

A granulometria fina do rejeito é favorável à sua utilização como adição mineral em cimento Portland [4, 12, 18] e também à sua incorporação na fabricação de produtos cerâmicos [13, 11, 19, 20, 21, 22].

3.1.3. Lamas:

A amostra do rejeito denominado 'lamas' passou em sua totalidade pela peneira de abertura 75 µm no procedimento de peneiramento úmido, portanto, não foi necessário realizar o procedimento de peneiramento seco para esse tipo de rejeito. Dessa forma constatou-se que o rejeito denominado 'lamas' é constituído por 100% de material pulverulento. Como os demais rejeitos, de acordo com a norma NM 7211 [17], essa característica inviabiliza a utilização desse rejeito como agregado miúdo na produção de concreto. Como para os demais rejeitos, a granulometria fina favorece sua utilização como adição mineral em cimento Portland [4, 12, 18] e sua incorporação na fabricação de produtos cerâmicos [13, 11, 19, 20, 21, 22].

3.2. Análise da composição química e mineralógica dos rejeitos:

3.2.1. Feldspato sódico:

O resultado da análise da composição química do rejeito denominado feldspato sódico obtido por fluorescência de raios X (FRX) é apresentado na Tab.3.

Tabela 3. Composição química do rejeito feldspato sódico (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Rb ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	WO ₃	MgO
75,9	14,4	5,6	2,7	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1

A análise química por fluorescência de raios X apontou que aproximadamente 90% da massa do rejeito denominado 'feldspato sódico' é constituída por sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃). O composto químico predominante no rejeito feldspato sódico é a sílica, com 75,9% em massa, mas também se observou um percentual significativo de alumina (14,5%).

A partir do resultado obtido por meio da análise química é possível inferir que o rejeito ‘feldspato sódico’ apresenta potencial para ser enquadrado como um material pozolânico. Confirmada essa possibilidade o rejeito pode ser usado em conjunto com cimento Portland na produção de concreto, argamassa e pasta. Os materiais pozolânicos possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante agindo isoladamente, entretanto, na presença de água e quando finamente divididos reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente produzindo compostos com propriedades aglomerantes [23]. De acordo com a norma NBR 12653 [23], umas das exigências químicas para que um determinado material seja classificado como material pozolânico é que o somatório percentual de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ seja de no mínimo 70% para as classes N e C e de no mínimo 50% para a classe E. Segundo o resultado apresentado na Tab.3, o somatório percentual de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ do rejeito feldspato sódico é de 90,6%. A norma também estabelece que o material deve conter um percentual máximo de trióxido de enxofre (SO_3) de 4,0% para a classe N e de 5,0% para as classes C e E. De acordo com o resultado apresentado na Tab.3, o rejeito ‘feldspato sódico’ também atende essa exigência, pois não foi constatada presença de trióxido de enxofre (SO_3) na análise química realizada. Entretanto, para o rejeito ser classificado como material pozolânico e poder ser usado em conjunto com cimento Portland na produção de concreto, argamassa e pasta ensaios adicionais devem ser realizados, a fim de determinar: teor de umidade, perda ao fogo, álcalis disponíveis em Na_2O , material retido na peneira de 0,045 mm, índice de desempenho com cimento Portland aos vinte e oito dias, atividade pozolânica com cal aos sete dias [23]. Confirmada a classificação do rejeito como material pozolânico surge também a possibilidade de utilização do material como adição mineral na produção de cimento Portland composto com material pozolânico (CP II-Z) e cimento Portland pozolânico (CP-IV). Entretanto, para confirmar essa possibilidade ensaios adicionais devem ser realizados de acordo com as recomendações da norma NBR 16697 [24].

A análise química do feldspato sódico também indica que do ponto de vista da composição química o rejeito possui potencial para ser usado como agregado miúdo na produção de concreto, pois não foram identificadas impurezas orgânicas, materiais carbonosos, cloretos e sulfatos, compostos químicos prejudiciais para essa aplicação [3]. Entretanto, existe a limitação do ponto de vista do percentual de material pulverulento e da composição granulométrica do rejeito.

A análise da composição mineralógica do rejeito denominado ‘feldspato’ sódico foi realizada mediante o uso de difratometria de raios X utilizando o método do pó. O difratograma obtido para o rejeito ‘feldspato sódico’ (cor vermelha) pode ser observado na Fig.3.

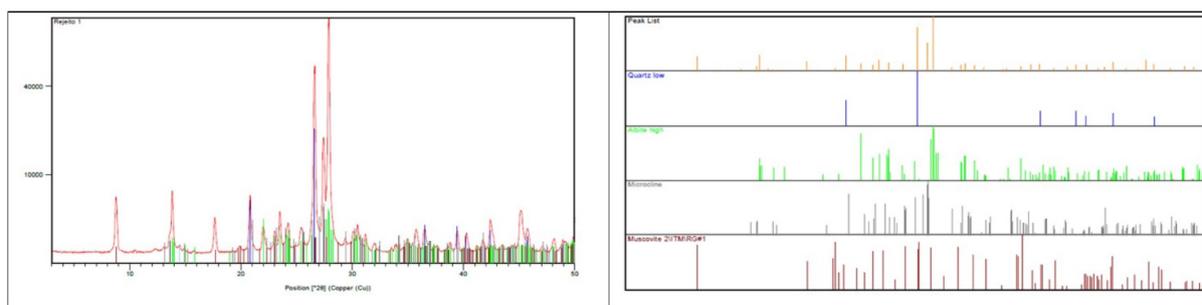


Figura 3. Difratograma do rejeito feldspato sódico e comparação com bases de dados ICDD e ICSD

A identificação das fases cristalinas presentes na amostra do rejeito foi obtida por comparação do difratograma do rejeito (Fig.3) com os bancos de dados PDF2 do ICDD, International Centre for Diffraction Data, e ICSD, Inorganic Crystal Structure Database (Fig.3) (Tab.4).

Tabela 4. Composição mineralógica do rejeito feldspato sódico

ICDD	Mineral	Fórmula	Observação
01-089-6425	Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	***
01-083-0539	Quartzo	SiO_2	***
01-074-2428	Muscovita	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	**
98-001-7925	Microclínio	KAlSi_3O_8	**

Nota: ***abundante; **frequente; *escasso; pp = possível presença.

De acordo com a análise qualitativa da composição mineralógica do rejeito 'feldspato sódico' apresentada na Tab.4, é possível constatar que o rejeito é composto predominantemente pelos minerais albita e quartzo, característicos do pegmatito. Em menor quantidade, porém frequentes, foram identificados também os minerais muscovita e microclínio.

As principais matérias-primas utilizadas na fabricação de produtos cerâmicos tradicionais são as argilas e o caulim. As argilas e o caulim possuem elevada plasticidade quando misturados à água e são constituídos predominantemente por argilominerais, minerais do grupo dos filossilicatos. Contudo, matérias-primas não plásticas e fundentes como o quartzo e o feldspato também são adicionadas no processo de fabricação dos produtos cerâmicos tradicionais [25]. O resultado da análise mineralógica apresentado na Tab.4 indica que os minerais mais abundantes no rejeito 'feldspato sódico' não fazem parte do grupo dos argilominerais, contudo, são minerais que podem ser usados como adição na fabricação de produtos cerâmicos tradicionais. Entretanto, ensaios adicionais que visam investigar as propriedades mecânicas dos produtos cerâmicos fabricados com a adição do rejeito devem ser realizados para comprovar a possibilidade de uso do material.

3.2.2. Magnéticos:

O resultado da análise da composição química do rejeito denominado 'magnéticos' obtido por fluorescência de raios X (FRX) é apresentado na Tab.5.

Tabela 5. Composição química do rejeito magnéticos (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Rb ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Y ₂ O ₃
61,7	17,6	5,8	4,7	3,7	2,4	2,0	0,8	0,5	0,4	0,2	0,1

A análise química por fluorescência de raios X apontou que aproximadamente 79% da massa do rejeito denominado 'magnéticos' é constituída por sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃). O composto químico predominante no rejeito magnéticos é a sílica, com 61,6% em massa, mas também se observou um percentual significativo de alumina (17,5%).

A partir do resultado obtido por meio da análise química é possível inferir que o rejeito 'magnéticos' apresenta potencial para ser enquadrado como um material pozolânico. Confirmada essa possibilidade o rejeito pode ser usado em conjunto com cimento Portland na produção de concreto, argamassa e pasta. Segundo o resultado apresentado na Tab.5, o somatório percentual de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ do rejeito magnéticos é de 84,8%. De acordo com o resultado da Tab.5, o rejeito 'magnéticos' também atende à exigência do teor máximo de SO₃, pois foi identificada apenas 831 ppm de trióxido de enxofre (SO₃) na análise química realizada. Entretanto, para o rejeito ser classificado como material pozolânico e poder ser utilizado em conjunto com cimento Portland na produção de concreto, argamassa e pasta ensaios adicionais devem ser realizados [23], bem como para ser utilizado como adição mineral na produção de cimento Portland tipo CP II-Z e CP-IV, de acordo com as recomendações da NBR 16697 [24].

A análise química do 'magnéticos' também indica que o rejeito possui potencial para ser usado como agregado miúdo na produção de concreto, pois não foram identificadas quantidades significativas de impurezas orgânicas, materiais carbonosos, cloretos e sulfatos, compostos químicos prejudiciais para essa aplicação [3]. Há a limitação quanto ao percentual de material pulverulento e da composição granulométrica do rejeito.

A análise da composição mineralógica do rejeito denominado 'magnéticos' foi realizada por difratometria de raios X utilizando o método do pó. O difratograma obtido para o rejeito magnéticos (cor vermelha) pode ser observado na Fig.4.

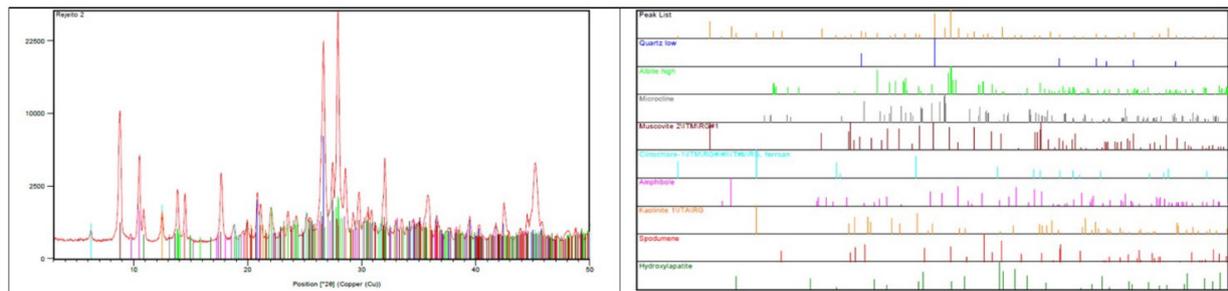


Figura 4. Difratoograma do rejeito magnéticos e comparação com bases de dados ICDD e ICSD

A identificação das fases cristalinas presentes na amostra do rejeito foi obtida por comparação do difratograma do rejeito (Fig.4) com os bancos de dados PDF2 do ICDD, International Centre for Diffraction Data, e ICSD, Inorganic Crystal Structure Database (Fig.4) (Tab.6).

Tabela 6. Composição mineralógica do rejeito magnéticos

ICDD	Mineral	Fórmula	Observação
01-089-6425	Albita	NaAlSi ₃ O ₈	***
01-083-0539	Quartzo	SiO ₂	***
01-084-1306	Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	***
98-001-7925	Microclínio	KAlSi ₃ O ₈	**
01-073-1135	Anfibólio	Al _{3,2} Ca _{3,4} Fe _{4,02} K _{0,6} Mg ₆ NaSi _{12,8} O ₄₄ (OH) ₄	**
01-072-2300	Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
98-007-6692	Espodumênio	LiAl(Si ₂ O ₆)	*
00-029-0701	Clorita	(Mg,Fe) ₆ (SiAl) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	pp
01-073-1731	Hidroxiapatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	pp

Nota: ***abundante; **frequente; *escasso; pp = possível presença.

De acordo com a análise qualitativa da composição mineralógica do rejeito magnéticos apresentada na Tab.6 é possível constatar que o rejeito é composto predominantemente pelos minerais albita, quartzo e muscovita, característicos do pegmatito. Em menor quantidade, porém frequentes, foram identificados também os minerais microclínio e anfibólio.

O resultado da análise mineralógica apresentado na Tab.6 indica que os minerais mais abundantes no rejeito magnéticos não fazem parte do grupo dos argilominerais, contudo, são minerais que podem ser usados como adição na fabricação de produtos cerâmicos tradicionais. Entretanto, ensaios adicionais devem ser realizados para comprovar a possibilidade de uso do material.

3.2.3. Lamas:

O resultado da análise da composição química do rejeito denominado 'lamas' obtido por fluorescência de raios X (FRX) é apresentado na Tab.7.

Tabela 7. Composição química do rejeito lamas (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Rb ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
66,9	19,2	4,8	2,9	2,6	1,4	0,9	0,6	0,2	0,2	0,2

A análise química por fluorescência de raios X apontou que aproximadamente 86% da massa do rejeito denominado 'lamas' é constituída por sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃). O composto químico predominante no rejeito lamas é a sílica, com 66,9% em massa, mas também se observou um percentual significativo de alumina (19,2%).

A partir do resultado obtido por meio da análise química é possível inferir que o rejeito 'lamas' apresenta potencial para ser enquadrado como um material pozolânico. Confirmada essa possibilidade o rejeito pode ser usado em conjunto com cimento Portland na produção de concreto, argamassa e pasta. Segundo o resultado apresentado na Tab.7, o somatório percentual de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ do

rejeito 'lamas' é de 88,9%. O rejeito 'lamas' também atende à exigência de SO₃ máximo, pois foram identificados apenas 267 ppm de trióxido de enxofre (SO₃) na análise química realizada. Ensaios adicionais devem ser realizados para definir se o rejeito pode ser usado com cimento Portland na produção de concreto, argamassa e pasta ou como adição mineral na produção de cimento Portland CP II-Z e CP-IV.

A análise química do rejeito 'lamas' também indica que o rejeito possui potencial para ser usado como agregado miúdo na produção de concreto, pois não foram identificadas quantidades significativas de impurezas orgânicas, materiais carbonosos, cloretos e sulfatos, compostos químicos prejudiciais para essa aplicação [3], mas há a limitação do percentual de material pulverulento e da composição granulométrica do rejeito.

A análise da composição mineralógica do rejeito denominado 'lamas' foi realizada por difratometria de raios X utilizando o método do pó. O difratograma obtido para o rejeito lamas (cor vermelha) pode ser observado na Fig.5.

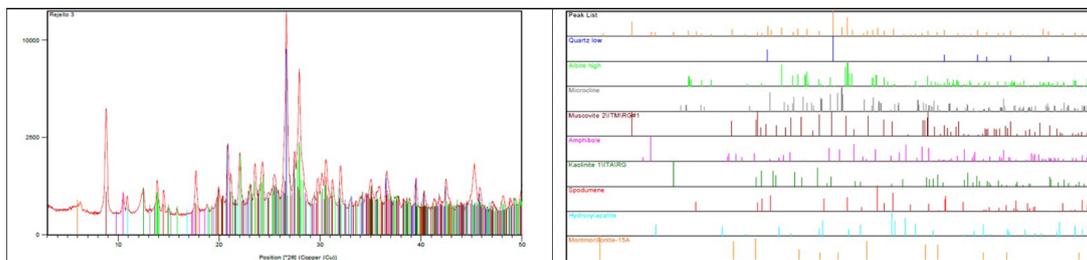


Figura 5. Difratograma do rejeito lamas e comparação com bases de dados ICDD e ICSD

A identificação das fases cristalinas presentes na amostra do rejeito foi obtida por comparação do difratograma do rejeito (Fig.5) com os bancos de dados PDF2 do ICDD, International Centre for Diffraction Data, e ICSD, Inorganic Crystal Structure Database (Fig.5) (Tab.8).

Tabela 8. Composição mineralógica do rejeito lamas

ICDD	Mineral	Fórmula	Observação
01-089-6425	Albita	NaAlSi ₃ O ₈	***
01-083-0539	Quartzo	SiO ₂	***
01-084-1306	Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	***
98-001-7925	Microclínio	KAlSi ₃ O ₈	**
01-073-1135	Anfibólio	Al _{3,2} Ca _{3,4} Fe _{4,02} K _{0,6} Mg ₆ NaSi _{12,8} O ₄₄ (OH) ₄	*
01-072-2300	Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
98-007-6692	Espodumênio	LiAl(Si ₂ O ₆)	*
01-073-1731	Hidroxiapatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	pp
00-013-0135	Esmectita	Ca _{0,2} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂₄ H ₂ O	pp

Nota: ***abundante; **frequente; *escasso; pp = possível presença.

De acordo com a análise qualitativa da composição mineralógica do rejeito 'lamas' apresentada na Tab.8, é possível constatar que o rejeito é composto predominantemente pelos minerais albita, quartzo e muscovita, característicos do pegmatito. Em menor quantidade, porém frequente, foi identificado também o mineral microclínio.

O resultado da análise mineralógica apresentado na Tab.8 indica que os minerais mais abundantes no rejeito 'lamas' não fazem parte do grupo dos argilominerais, contudo, são minerais que podem ser usados como adição na fabricação de produtos cerâmicos tradicionais. Ensaios adicionais devem ser realizados para comprovar a possibilidade de uso do material.

4. CONCLUSÃO:

As caracterizações granulométrica, química e mineralógica dos rejeitos denominados 'feldspato sódico', 'magnéticos' e 'lamas' geraram resultados promissores no que diz respeito à viabilidade técnica de aproveitamento desses materiais em aplicações na construção civil.

Os resultados obtidos a partir das caracterizações dos rejeitos demonstraram que os materiais estudados apresentam significativo potencial para serem usados como material pozolânico em conjunto com cimento Portland na produção de concreto, argamassa e pasta. Os resultados também indicam que os rejeitos possuem potencial para serem utilizados como adição mineral pozolânica na produção de cimento Portland composto (CP-II-Z) e de cimento Portland pozolânico (CP IV). Entretanto, em ambas as situações ensaios adicionais devem ser realizados para atestar essas possibilidades.

As análises realizadas também demonstraram que os rejeitos estudados possuem potencial para serem utilizados na fabricação de produtos cerâmicos tradicionais. Apesar dos rejeitos não serem constituídos predominantemente por argilominerais, eles reúnem características que possibilitam seu uso como matérias-primas não plásticas e fundentes, também necessários na produção desses produtos.

As análises químicas realizadas não identificaram quantidades significativas de impurezas orgânicas, materiais carbonosos, cloretos e sulfatos nos materiais estudados. Esses resultados indicam que do ponto de vista de composição química os rejeitos são adequados para serem usados como agregado miúdo na produção de artefatos de concreto, entretanto, existem limitações do ponto de vista físico. Os três tipos de rejeitos estudados apresentaram um percentual de material pulverulento acima do máximo admitido por norma para essa aplicação. Além disso, os três rejeitos também apresentaram curvas granulométricas fora da zona considerada utilizável para aplicações como agregado miúdo na produção de concreto. Portanto, para serem utilizados como agregado miúdo na produção de concreto, estudos prévios de dosagem que comprovem a aplicabilidade devem ser realizados.

5. AGRADECIMENTOS:

Os pesquisadores agradecem o apoio do Centro Universitário Presidente Tancredo de Almeida Neves (UNIPTAN).

Financiamento: Este trabalho foi financiado pela Fundação Nacional de Desenvolvimento de Ensino Superior Particular (FUNADESP).

REFERÊNCIAS:

- [1] IBRAM, 2020. Informações sobre a economia mineral brasileira 2020. Ano base 2019. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração. <https://portaldaminerao.com.br/acervo/publicacoes/?pagina=1>
- [2] IPEA, 2012. Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas: Relatório de pesquisa. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=15164&Itemid=1
- [3] Andrade L C R, 2014. Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil. Doutorado em Engenharia Civil. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.
- [4] Viveiros D C S, 2017. Rejeito do minério de manganês como material de construção civil. Mestrado em Engenharia Civil. Belém: Universidade Federal do Pará.
- [5] FEAM, 2018. Inventário de barragens do Estado de Minas Gerais: ano 2017. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente. http://feam.br/images/stories/2018/BARRAGENS/Invent%C3%A1rio_de_Barragens_2017.pdf
- [6] Gomes A C F, 2017. Estudo de reaproveitamento de rejeito de mineração. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- [7] ANM, 2023. Sistema de gestão de segurança de barragem de mineração. Dispõe sobre a classificação nacional de barragens de mineração. Agência Nacional de Mineração. <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem>
- [8] Sant' Ana Filho J N, 2013. Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para o uso na pavimentação das rodovias e fabricação de blocos intertravados. Mestrado em Engenharia de Materiais. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- [9] Rodrigues L S, Silva J C, Angelica R S, Rabelo A A, Fagury R L R P, Fagury Neto E, 2014. Avaliação tecnológica de cerâmicas tradicionais incorporadas com rejeito do minério de manganês. *Cerâmica* 60, 580-585.
- [10] Costa A V, Gumieri A G, Brandão P R G, 2016. Estudo de caracterização e viabilidade do emprego do rejeito de sínter feed como alternativa de substituição das areias naturais como agregado na produção de concreto. *Construindo* 08, 02, 15.
- [11] Barbosa P C, 2017. Aproveitamento de rejeito da concentração de minério de ferro na produção de cerâmica vermelha. Departamento de Engenharia de Minas. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- [12] Bezerra C G, 2017. Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento. Mestrado em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [13] Assis D M, Queiroga F O C S, Mendes J C, 2018. Utilização de rejeitos de barragem de minério de ferro na fabricação de tijolos maciços. *Revista Agora* 3, 1, 191-200.
- [14] NBR 10007, 2004. Amostragem de resíduos sólidos: procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- [15] NBR NM 248, 2003. Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [16] NBR NM 46, 2003. Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] NBR 7211, 2009. Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] Borges P H R, Santos F A, Milikic N, Belieny F J, Barsante C A, 2016. Lithium aluminosilicate residue as raw material in the production of sustainable concrete masonry units: A Brazilian case. *The Open Construction and Building Technology Journal* 10, 418-430.
- [19] Silva F L, 2014. Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica. Mestrado em Engenharia de Materiais. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- [20] Zhang Y, Chen Y, Chen T, Zhao Y, Bao S, 2011. Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. *Construction and Building Materials* 25, 2107–2111.
- [21] Nociti D M, 2011. Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelha. Mestrado em Engenharia Mecânica. Guaratinguetá: UNESP.
- [22] Vieira C M F, Souza C C, Monteiro S N, 2006. Efeito da incorporação de resíduo de minério de ferro nas propriedades e microestrutura da cerâmica argilosa. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 112-023.
- [23] NBR 12653, 2015. Materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [24] NBR 16697, 2018. Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [25] Motta J F M, Zanardo A, Júnior M C, Tanno L C, Cuchierato G, 2004. As matérias-primas plásticas para a cerâmica tradicional: argilas e caulins. *Cerâmica industrial* 9, 33-46