



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Giulia Madrid Cesar Rezende

**Estudo da atividade pozolânica da escória de forno panela em matrizes
cimentícias**

Ouro Preto

2018

Giulia Madrid Cesar Rezende

Estudo da atividade pozolânica da escória de forno panela em matrizes cimentícias

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia Civil

Área de concentração: Materiais de Construção

Orientadores: Prof. D.Sc Guilherme Jorge Brigolini Silva

Prof. Humberto Dias Andrade

Ouro Preto

2018

R467e

Rezende, Giulia Madrid Cesar.

Estudo da atividade pozolânica da escória de forno panela em matrizes cimentícias [manuscrito] / Giulia Madrid Cesar Rezende. - 2018.

60f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.

Coorientador: Prof. MSc. Humberto Dias Andrade.

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

1. Atividade Pozolânica. 2. Escória de Forno Panela. 3. Reciclagem de Resíduos . 4. Pozolana. 5. Resíduos Industriais . I. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. II. Andrade, Humberto Dias. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Giulia Madrid Cesar Rezende

Estudo da atividade pozolânica da escória de forno panela em matrizes cimentícias

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto,
defendida e aprovada em 20 de julho de
2018 pela banca examinadora constituída



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



Prof. Humberto Dias Andrade – Orientador – UFOP



Prof. M.Sc. Keoma Defáveri do Carmo e Silva – UFOP

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos bons espíritos que me guiaram durante o percurso. À minha mãe, por ter oferecido todas as oportunidades, e pela confiança. Alícia, pelo apoio incondicional. A meu pai e toda a minha família, pelo carinho e estímulo. Lucas, pela compreensão, paciência e incentivo.

Ao professor Guilherme Brigolini, pela orientação e aprendizado. Keoma, Humberto, Júnio e Fernanda pela disponibilidade e ajuda durante a realização deste trabalho. A todo o Grupo RECICLOS pelas experiências, ensinamentos e bons momentos.

RESUMO

O modelo de produção a base de recursos naturais não renováveis e alta geração de resíduos são causa de problemas ambientais e econômicos que tem causado preocupação nas últimas décadas. A indústria siderúrgica gera um grande volume de resíduos em suas etapas. Entretanto, as escórias de aciaria são resíduos com alto potencial de reinserção no processo produtivo. O último estágio da aciaria é o refino redutor em forno panela, que é responsável pelo ajuste da composição química do aço através da adição de desoxidantes. A escória proveniente deste processo pode ser reutilizada em processos siderúrgicos e em vários outros setores. Sua utilização na construção civil tem sido amplamente estudada, sobretudo como adição na produção de materiais como concreto e cerâmicas em geral. É um produto rico em óxido de cálcio, e também apresenta considerável teor de sílica. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a atividade pozolânica da escória de forno panela (EFP), através de métodos diretos e indiretos. O beneficiamento da escória consistiu nos processos de moagem e separação magnética, e foi realizada sua caracterização física e química por granulometria a laser e fluorescência de raios X. Os ensaios de avaliação de atividade pozolânica foram Análise Térmica (TGA), método da condutividade elétrica e método da resistência à compressão simples em argamassa de cimento Portland. Os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando que a EFP pode ter potencial para ser utilizado como adição no cimento, embora seja necessário o aprofundamento das pesquisas para consolidar esta ideia.

Palavras chave: Atividade Pozolânica; Pozolana; Escória de Forno Panela; Reciclagem de Resíduos; Resíduos Industriais.

ABSTRACT

The production model based on natural and non-renewable resources, associated to elevate levels of waste production is an environmental and economic issue that has been reason of concern in last decades. Steel industry produces a great amount of waste in its phases. However, the steel slags are materials that have big capability of reinsertion in productive processes. The last steelmaking stage is the refiner in a ladle furnace, where an adjustment of the steel chemical composition is made by the addition of deoxidants. This process has the ladle furnace slag as a side product, which can be reused in steelmaking processes and in several other sectors. Its use in civil construction has been widely studied, especially as an addition in production of materials as concrete and ceramic products. It is a material composed mainly by calcium oxide, and it has a relevant quantity of silica, as well. The purpose of the present paper is to evaluate the pozzolanic activity of ladle furnace slag, by direct and indirect methods. The slag used in the research was dried, grounded in horizontal mill and passed through magnetic separator. The physicochemical characterization was performed by laser particle analysis and X ray's fluorescence. The tests for evaluation of pozzolanic activity was Thermal Analysis (TGA), Electric Conductivity Method (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989) and the method proposed by ABNT NBR 5752:2014, of compression strength in Portland cement mortars. The results were satisfactory, although further researches are required to consolidate this concept.

Keywords: Pozzolanic Activity; Pozzolan; Ladle Furnace Slag; Waste Recycling; Industrial Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos. Fonte: ABNT (2004).....	4
Figura 2 - Tipos de resíduos diretos e coprodutos gerados na produção do aço em 2015. Fonte: Instituto Aço Brasil, 2016.....	8
Figura 3 - Destinação das escórias geradas na aciaria no ano de 2015. Fonte: Instituto Aço Brasil.....	9
Figura 4 - Aplicação das escórias geradas na aciaria no ano de 2015. Fonte: Instituto Aço Brasil (2016)	9
Figura 5 - Representação esquemática dos processos de produção do aço e escórias geradas. Fonte: Masuero (2001).....	11
Figura 6 - Materiais e Equipamentos para Ensaio de Condutividade Elétrica. Fonte: a autora.....	25
Figura 7 - Procedimento do Ensaio de Condutividade Elétrica. Fonte: A autora.....	27
Figura 8 - Produção de argamassa. Fonte: a autora.	29
Figura 9 - Medição do Índice de Consistência da argamassa. Fonte: a autora.	29
Figura 10 - Corpos de prova recém moldados. Fonte: a autora.	30
Figura 11 - Corpos de prova desmoldados e identificados. Fonte: a autora.....	30
Figura 12 - Corpos de prova capeados com enxofre para ensaio de resistência à compressão. Fonte: a autora.....	30
Figura 13 - Peneiramento da pasta de cimento após moagem na idade especificada. Fonte: a autora.	32
Figura 14 - Resultado do ensaio de granulometria a laser, realizado com a amostra de EFP. Fonte: a autora	33
Figura 15 - Resultados do Método da Condutividade Elétrica. Fonte: a autora.....	36
Figura 16 - Resultados de Resistência Média à Compressão e Desvio Padrão das argamassas A-REF e A-EFP. Fonte: a autora.	38
Figura 17 - Índice de Atividade Pozolânica das argamassas com adição nas idades de 28, 56 e 91 dias. Fonte: A autora.....	39

Figura 18 - Análise Térmica (TGA) da PREF. Fonte: a autora.....	40
Figura 19 - Análise Térmica (TGA) da PEFP. Fonte: a autora.....	40
Figura 20 - Teores de Hidróxido de Cálcio nas pastas PREF e PEFP nas idades de 28, 56 e 91 dias. Fonte: a autora.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de materiais pozolânicos proposta por Mehta e Monteiro (1994).....	17
Tabela 2 - Propriedades Físico-Químicas das pozolanas previstas pelas NBR 12653:2012 e ASTM C618:2017	18
Tabela 3 - Parâmetros do índice de pozolanidade para o Método da Condutividade Elétrica. Fonte: Luxán, Madruga e Saavedra (1989).....	21
Tabela 4 - Características e componentes das argamassas produzidas. Fonte: a autora.	28
Tabela 5 - Características e componentes das pastas de cimento produzidas ..	31
Tabela 6 - Resultado do processo de separação magnética da EFP. Fonte: a autora	34
Tabela 7 - Resultado do ensaio de fluorescência de raios x da amostra de EFP. Fonte: a autora	34
Tabela 8 - Análise química de EFP. Fonte: [1] Setián, Hernández e González (2009); [2] Marinho (2013); [3] Rocha (2011); [4] Rodríguez et al. (2013); [5] Manso et al. (2005); [6] Papayianni e Anastasiou (2012).....	35
Tabela 9 - Resultado do ensaio de pozolanidade pelo Método da Condutividade Elétrica. Fonte: a autora	36
Tabela 10 - Índice de Consistência das argamassas produzidas. Fonte: a autora	37
Tabela 11 - Valores de massa das amostras de PREF e PEFP nas temperaturas e idades especificadas. Fonte: a autora.....	41

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ASTM – American Society for Testing and Materials

CCABrasil – Centro de Coprodutos Aço Brasil

CE – Condutividade Elétrica

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Corpo de Prova

EFP – Escória de Forno Panela

IAB – Instituto Aço Brasil

IAP – Índice de Atividade Pozolânica

Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

NBR – Norma Brasileira

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSIs – Resíduos Sólidos Industriais

SIBR – Sistema Integrado de Bolsas e Resíduos

TGA – Termogravimetria

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	IV
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE SIGLAS.....	VII
SUMÁRIO.....	VIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo Geral.....	2
1.2 Objetivos Específicos.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Resíduos Sólidos Industriais.....	3
2.1.1 Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais.....	6
2.1.2 Resíduos Sólidos da Produção do Aço.....	7
2.2 Escória de Forno Panela.....	10
2.3 Atividade Pozolânica.....	14
2.3.1 Pozolana.....	14
2.3.2 Reação Pozolânica.....	14
2.3.3 Classificação e Características Físico-Químicas das Pozolanas.....	15
2.3.4 Métodos para a determinação da pozolanidade.....	20
3 METODOLOGIA.....	23

3.1	Beneficiamento	23
3.2	Caracterização física e química.....	23
3.3	Atividade Pozolânica	24
3.3.1	Método da Condutividade Elétrica.....	24
3.3.2	Método proposto pela NBR 5752:2014	27
3.3.3	Avaliação de Hidróxido de Cálcio.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	Caracterização.....	32
4.1.1	Análise Granulométrica	32
4.1.2	Separação Magnética.....	33
4.1.3	Fluorescência de Raios X.....	34
4.2	Atividade Pozolânica	35
4.2.1	Método da Condutividade Elétrica.....	35
4.2.2	Método proposto pela NBR 5752:2014	37
4.2.3	Avaliação de Hidróxido de Cálcio.....	39
5	CONCLUSÃO	43
6	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o modelo de produção a base de recursos naturais não renováveis e alta geração de resíduos tem apresentado problemas ambientais e econômicos, na medida que os recursos se tornam escassos e a natureza não tem capacidade para absorver os resíduos gerados. Fatores que impactam nessa questão são a intensa industrialização, o surgimento de novas tecnologias, a urbanização e o crescimento populacional (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2000).

As dificuldades enfrentadas envolvem a escassez de áreas de deposição de resíduos, causados pela ocupação e valorização das áreas urbanas, além de problemas relacionados aos impactos ambientais causados pela contaminação gerada por rejeitos e a exploração de recursos naturais (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2000).

A indústria siderúrgica é um setor altamente gerador de resíduos. Segundo o Instituto Aço Brasil (2016), este setor gerou, no ano de 2015, cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos e coprodutos. Dentre esses coprodutos, denominados agregados siderúrgicos, estão as escórias provenientes do refino do ferro gusa e do aço. Algumas delas já possuem aplicabilidade consagrada no mercado, como a escória de alto forno utilizada na produção de cimento.

As escórias geradas na aciaria possuem grande potencial para serem reinseridas em outros processos produtivos. Algumas de suas possíveis aplicações são: correção do pH do solo, estabilização de solos, utilização como base para pavimentação de rodovias e lastros de ferrovias, sistemas de drenagem, aplicação como agregado miúdo ou graúdo na produção de concretos e argamassas em geral, substituição de matéria prima na produção de cimento, adição em matrizes cimentícias, entre outras (CNI; IAB, 2012)

A escória de forno panela é um subproduto da etapa final de produção do aço, que tem por finalidade reduzir o teor de impurezas e melhorar a qualidade do produto final (ASTH, 2011). Também conhecida como escória de refino secundário do aço, ela tem uma composição diferente das escórias de redução e de refino primário, e por isso apresenta certas limitações às suas possíveis reutilizações (GERDAU, 2003).

Pesquisas recentes têm avaliado seu potencial para reciclagem em diferentes processos, incluindo o próprio ciclo produtivo siderúrgico, e também na área de materiais de construção, como adição em estruturas de solo-cimento ou em concretos e argamassas.

Dentre as possibilidades de utilização de resíduos na construção civil, está a aplicação como material pozolânico em matrizes cimentícias, com o objetivo de melhorar o desempenho da estrutura.

A NBR 12653:2012 define pozolana como um material que, por si só não apresenta potencial aglomerante, mas na presença de água, em partículas finas, e combinado ao hidróxido de cálcio, forma compostos aglomerantes que aumentam a resistência mecânica de matrizes cimentícias. Desta forma, é de grande interesse ambiental e econômico identificar em resíduos sólidos industriais propriedades como esta, e ampliar a capacidade da indústria do cimento de absorver resíduos, trazendo benefícios também para a indústria geradora deste, e para o meio ambiente.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a possibilidade de utilização da Escória de Forno Panela (EFP) como material pozolânico em matrizes cimentícias, através de métodos experimentais.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização física e química da EFP, após o beneficiamento;
- Determinar o índice de atividade pozolânica da EFP através do método de resistência a compressão simples com cimento Portland (NBR 5752:2014) e do Método da Condutividade Elétrica (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989);
- Analisar o consumo de hidróxido de cálcio, por análise térmica (TGA), em pasta de cimento com adição de EFP.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Sólidos Industriais

De acordo com o CONAMA (2002), resíduo sólido industrial é:

[...] todo resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semi-sólido, gasoso – quando contido, e líquido – cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

A NBR 10004:2004 trata da classificação de resíduos sólidos no Brasil, e os distribui em duas classes, como demonstrado na Figura 1.

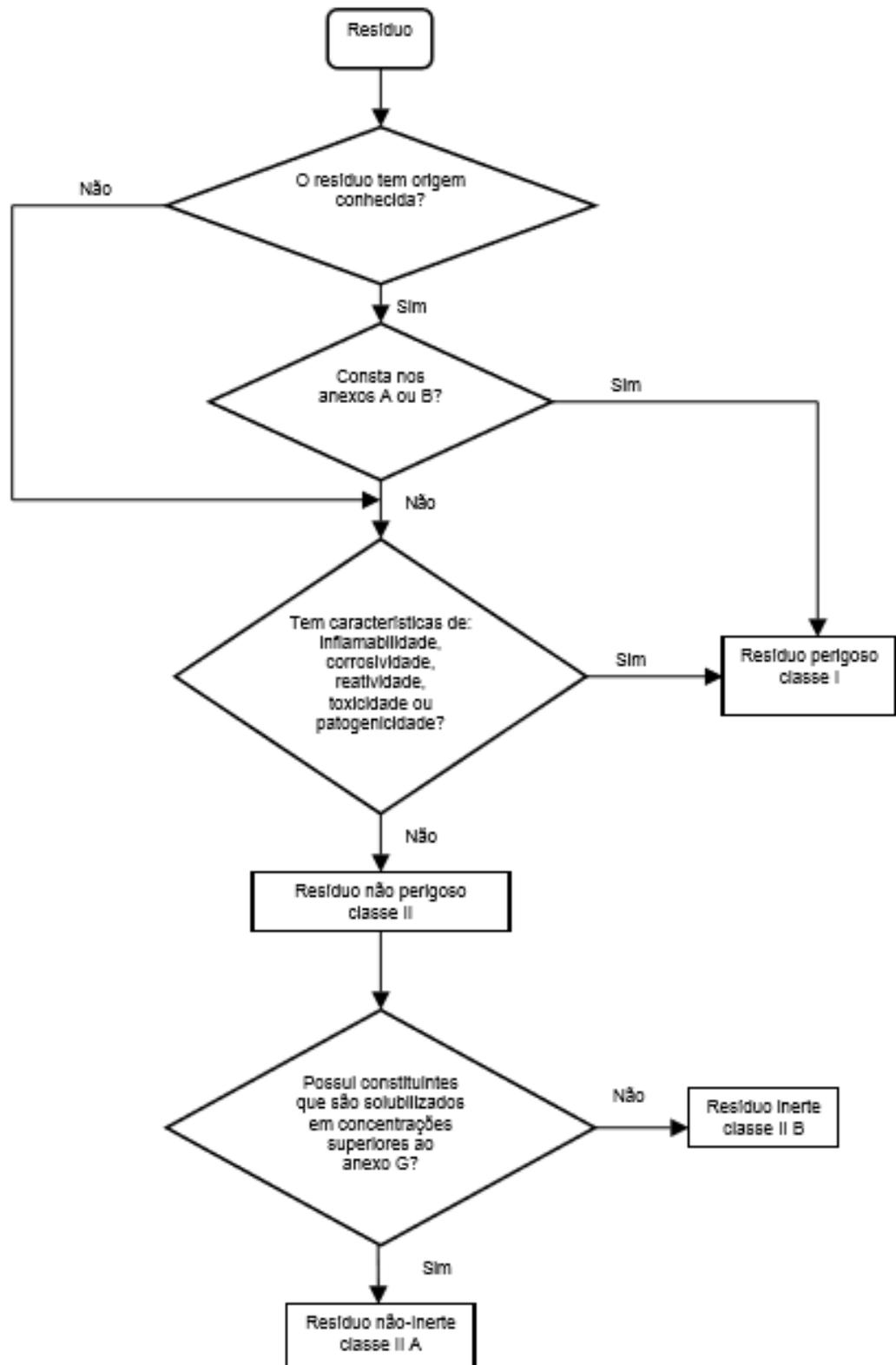


Figura 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos. Fonte: ABNT (2004).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, regulamenta o gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos sólidos, estabelecendo princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações a serem adotadas. A PNRS estabelece como ordem de prioridades na questão de geração de resíduos: a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e, em último caso, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Esta lei possui, entre seus princípios, o desenvolvimento sustentável e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável ou reciclável, como um bem econômico e de valor social. No que tange a esfera do setor industrial, a PNRS reconhece como resíduo sólido industrial aqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais, e determina obrigações para o setor produtivo. Uma delas determina que os grandes empreendedores devem escolher entre reduzir, reutilizar ou reciclar seus resíduos, admitindo seu valor econômico e fomentando a integração das indústrias entre si e com cooperativas de reciclagem.

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) realizou um Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais, em 2012. Em seu relatório de pesquisa, o Instituto chama a atenção para as positivas taxas de crescimento econômico brasileiro nos últimos anos, caracterizadas pela inclusão social e aumento do consumo, que acabam resultando também em maiores impactos ambientais e no aumento da geração de resíduos sólidos em todas as fases do sistema de produção.

A pesquisa realizada pelo IPEA baseou-se nos dados cadastrados pelo Sistema Integrado de Bolsas de Resíduos – SIBR, administrado pela Confederação Nacional da Indústria. No estado de Minas Gerais, estão cadastradas 1.460 indústrias dos mais variados setores, e de acordo com o IPEA (2012), essas empresas são responsáveis pela geração anual de aproximadamente 800 mil toneladas de resíduos sólidos industriais perigosos (classe I) e pouco mais de 14 milhões de toneladas de resíduos sólidos industriais não perigosos (classe II). A principal destinação desses resíduos, tanto os perigosos como os não perigosos, é a reutilização dentro da própria indústria.

A preocupação com o correto gerenciamento de resíduos sólidos industriais envolve interesses privados e públicos, na medida que a responsabilidade legal e os

investimentos partem da iniciativa privada, e o risco ambiental é público e afeta toda a sociedade (IPEA, 2012).

2.1.1 Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais

Os programas de reciclagem auxiliam no adequado gerenciamento de resíduos, uma vez que recupera valores neles contidos, reinserindo-os no processo produtivo, e dessa forma, reduzindo o volume de material a ser tratado e disposto na natureza. As etapas do processo de reciclagem de resíduos são a coleta, a segregação, a valoração e a destinação dos materiais (IPEA, 2012).

As maiores vantagens ambientais e econômicas da reciclagem de resíduos são a redução do consumo de recursos naturais não-renováveis, redução de área necessária para aterro, redução na poluição e, em alguns casos, redução da energia gasta no processo de produção (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2000).

No que se refere à atividade industrial, ressalta-se a alta variabilidade da origem e das características dos resíduos sólidos industriais – RSI, visto que são provenientes dos mais diversos ramos de atividades da indústria. Desta forma, é essencial a separação do resíduo sólido industrial, atendendo às primeiras etapas do processo de reciclagem e reduzindo os impactos causados por resíduos não recicláveis. No entanto, esta prática não é amplamente disseminada no setor (IPEA, 2012).

A etapa de valoração do resíduo consiste no melhoramento das características do material, para facilitar seu transporte e manuseio, e possibilitar a sua aplicação em um processo produtivo (IPEA, 2012). Nesta etapa, é imprescindível o estudo das características físico-químicas e as propriedades do resíduo através de ensaios e métodos adequados (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2000). Essas informações servirão como base para estabelecer a melhor estratégia de reciclagem do material, aproveitando da melhor forma o seu potencial como insumo. Também são informações importantes nesta etapa a atividade industrial que deu origem ao resíduo, bem como a variabilidade das fontes de fornecimento do mesmo, o que pode levar a variações na composição e impactar no seu processo de reciclagem (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2000).

Outro fator que deve ser levado em consideração no processo de reciclagem de resíduos são os custos envolvidos na atividade. O estudo da viabilidade econômica da reciclagem de um resíduo deve contemplar os custos de não-reciclagem, como licenças ambientais para deposição de resíduos, transporte, possíveis multas ambientais e outros, bem como os custos de estratégia e implantação do sistema de reciclagem, e o faturamento obtido da comercialização do novo insumo produzido. O valor de venda do produto deve ser competitivo com do produto equivalente ou da técnica já consagrada no ramo, e para que a solução de reciclagem atraia o gerador do resíduo, considerando fatores estritamente financeiros, todo o processo, incluindo gastos de implantação e operação e lucro gerado, deve reduzir os custos gerados pela não-reciclagem dos resíduos (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2000).

Ângulo, Zordan e John (2000) explicam que a construção civil tem grande potencial para incorporar resíduos sólidos industriais em seus processos produtivos, sendo a indústria cimenteira a que mais utiliza recursos reciclados, sobretudo escórias de alto forno e cinzas volantes. De acordo com os autores, “existe uma grande quantidade de resíduos com potencial de emprego na construção civil e que ainda são ignorados pelo mercado e até por pesquisadores brasileiros”.

O IPEA (2012) destaca que os RSIs, para serem utilizados como insumos em outro processo produtivo, devem ser caracterizados e analisados quanto à sua estabilidade no ambiente. O Instituto ressalta ainda que a produção de bens utilizando insumos reciclados, como asfalto, telhas, cimento, entre outros produtos incorporadores de resíduos, devem atender as normas da Associação Brasileira e Normas Técnicas (ABNT), do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), do Conselho Nacional de Meio Ambiente, entre outras normalizações vigentes.

2.1.2 Resíduos Sólidos da Produção do Aço

Segundo o Instituto Aço Brasil (2016), o setor siderúrgico brasileiro é composto por 29 usinas, controladas por 11 diferentes grupos empresariais. Embora essas usinas estejam presentes em dez estados brasileiros, a maior concentração produtiva,

cerca de 94% da produção, encontra-se nos quatro estados da região Sudeste (CNI; IAB, 2012).

No ano de 2015, o país produziu pouco mais de 33 milhões de toneladas de aço, representando 2,1% da produção mundial, e 52,3% da América Latina. Esta produção gerou, naquele ano, 19,8 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos diretos, levando a uma geração específica de 594 kg de resíduos por tonelada de aço bruto produzido. As escórias de alto-forno e aciaria representaram 71% do total desses resíduos, como pode ser observado no gráfico da Figura 2 (IAB, 2016).

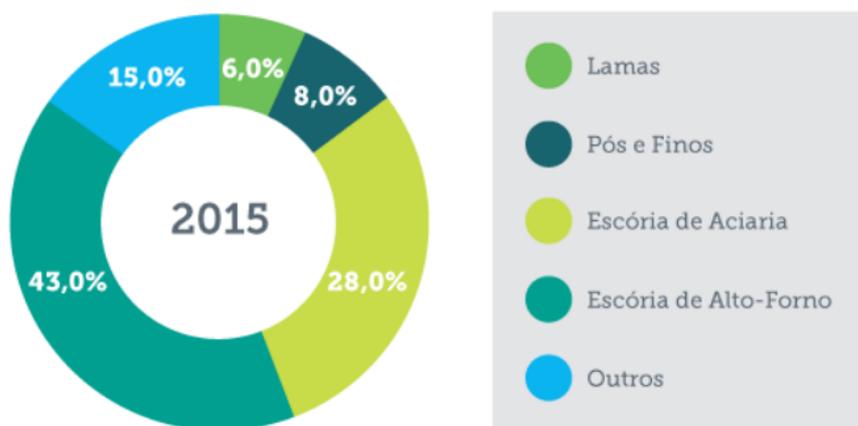


Figura 2 - Tipos de resíduos diretos e coprodutos gerados na produção do aço em 2015. Fonte: Instituto Aço Brasil, 2016

De acordo com o IPEA (2012), no estado de Minas Gerais, as escórias siderúrgicas estão entre os 10 resíduos industriais mais gerados.

Enquanto 99% da escória de alto-forno é vendida para a produção de cimento, a destinação e utilização das outras escórias siderúrgicas são mais variáveis (IAB, 2016). O gráfico da Figura 3 relaciona as destinações das escórias de aciaria produzidas no ano de 2015, enquanto o gráfico da Figura 4 estabelece quais foram suas aplicações.

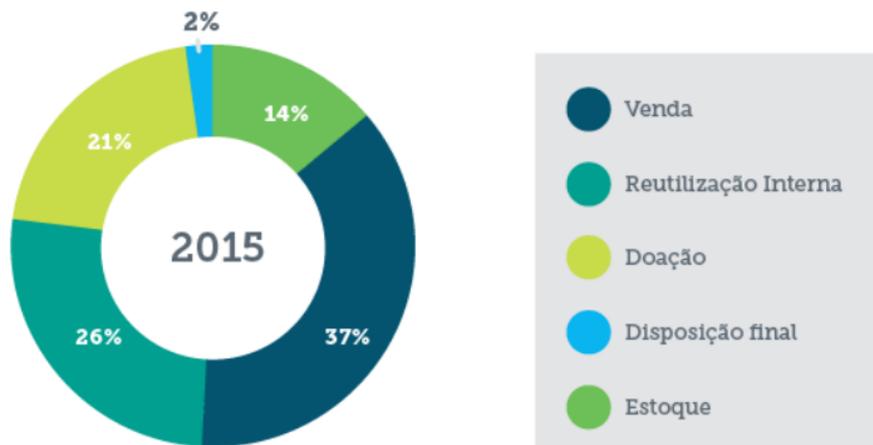


Figura 3 - Destinação das escórias geradas na aciaria no ano de 2015. Fonte: Instituto Aço Brasil.

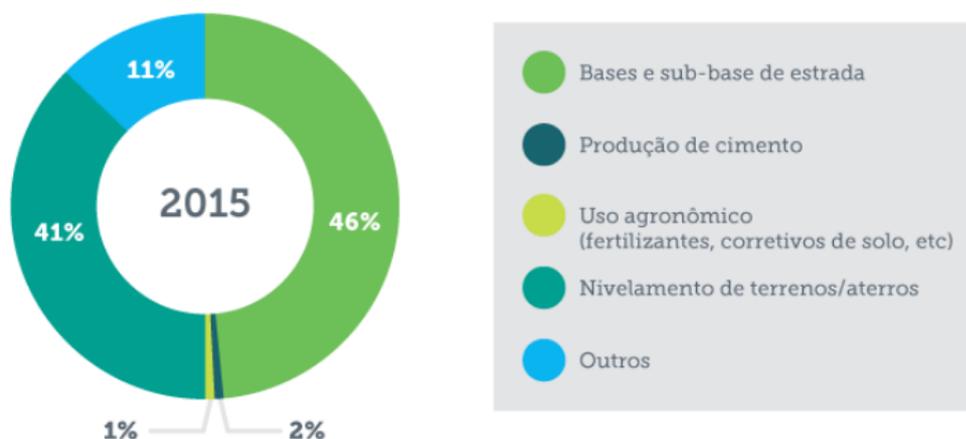


Figura 4 - Aplicação das escórias geradas na aciaria no ano de 2015. Fonte: Instituto Aço Brasil (2016)

Foi criado em 2011, pelo Instituto Aço Brasil, o Centro de Coprodutos Aço Brasil – CCABrasil, que tem como objetivo ser um centro de referência na utilização dos resíduos provenientes da fabricação do aço. Dentre as atividades do CCABrasil, destacam-se a coleta e divulgação de dados estatísticos, promoção e troca de conhecimento e experiências técnicas, o desenvolvimento e disseminação das aplicações desses materiais, fomento a normalização para sua utilização e divulgação de novos processos e tecnologias. Para isso, o Centro trabalha com parceiras com

instituições de pesquisa, universidades, empresas, órgãos públicos e setores com potencial consumidor dos coprodutos (CNI; IAB, 2012).

O Instituto Aço Brasil pontua que, atualmente, um dos maiores desafios do setor siderúrgico é promover o uso de coprodutos da siderurgia.

2.2 Escória de Forno Panela

Com a evolução tecnológica dos processos industriais, o mercado passa a exigir materiais com desempenho cada vez melhor. A indústria siderúrgica, para atender a demanda, desenvolveu o tratamento do aço líquido em painéis, processo conhecido como refino secundário do aço, que visa ajustar a composição química e a limpidez do produto (ROCHA, 2011).

No Brasil, o aço é fabricado a partir do refino do ferro-gusa líquido em fornos LD, ou a partir da fusão e do refino da sucata em fornos elétricos à arco (GEYER, 2001). Ambos os processos são denominados refino primário.

No processo realizado em forno elétrico à arco, utilizando sucata como matéria prima, após o refino primário, o aço é levado ao forno painel, onde passará pelo refino secundário, para a correção da composição química, da limpidez e da temperatura do material. A escória utilizada nesse tratamento tem o papel fundamental de absorver as impurezas e impedir a reoxidação do aço pelo oxigênio presente na atmosfera (ASTH, 2011). O processo de produção do aço, bem como as escórias geradas em cada etapa, está ilustrado na Figura 5.



Figura 5 - Representação esquemática dos processos de produção do aço e escórias geradas. Fonte: Masuero (2001)

O refino secundário do aço acontece em quatro etapas. A primeira etapa é a desoxidação, cujo objetivo é eliminar o oxigênio dissolvido no aço líquido, introduzindo elementos químicos que formem óxidos mais estáveis. Os elementos geralmente utilizados nessa etapa são o silício e o manganês (GERDAU, 2003). A cal também é adicionada nesta etapa com a finalidade de neutralizar os óxidos ácidos, aumentando a basicidade do aço, além de absorver as impurezas. No final do processo, esses óxidos serão os subprodutos do tratamento. A segunda parte é a dessulfuração, e consiste na elevação da temperatura do aço para eliminar o teor de enxofre contido no material (MARINHO, 2015). A terceira etapa é o ajuste da composição química do aço, quando são introduzidos os elementos de liga, e última etapa consiste no ajuste final de temperatura.

Ao final do procedimento, o aço líquido segue para o processo de lingotamento, onde será separado da escória por diferença de densidade. A escória é então derramada em um pátio para resfriamento e, após a britagem, segue para o destino final (MASUERO, 2001).

De acordo com o CONAMA (2002), as escórias provenientes da fabricação de ferro e aço, como é o caso da EFP, são consideradas resíduo Classe II (não perigoso) – classificação da NBR 10004:2004.

Segundo Asth (2011), um componente usual em escórias de refino de aço é a sílica. Além disso, a escória de forno panela é composta fundamentalmente por: escória de passagem do refino primário, produtos da desoxidação do refino primário, escória restante da corrida anterior não removida na etapa de preparação da panela, material refratário, fluorita, escória sintética ou adição de cal calcítica e dolomítica.

Graças à adição de cal, as escórias de forno panela costumam apresentar alto teor de óxido de cálcio. Segundo Rago (1999), na utilização em pastas e argamassas de cimento, a cal tem influência na viscosidade, tornando-a mais trabalhável. Estudos realizados por Quarcioni (2008) indicaram que a presença de cal em matrizes cimentícias alteram o processo de hidratação do Clínquer, aumentando a taxa de calor liberado, e gerando a saturação antecipada de íons de cálcio e hidroxila.

Dentre as possibilidades de reciclagem da EFP, destaca-se a utilização na própria siderúrgica, como fundente ou proteção do revestimento refratário dos fornos, como substituição de matéria prima na produção de cimento, dada a presença de silicatos dicálcico e tricálcico, e como adição em matrizes cimentícias (ROCHA, 2011). Sua utilização como agregado na produção de concreto e argamassa, bem como seu emprego em bases de rodovias e lastros de ferrovias deve ser cuidadosamente avaliado, pois sua composição e propriedades características de uma escória sintética podem torna-la inapropriada para esses fins (SOUZA, 2007).

Um dos maiores problemas da utilização da EFP é sua instabilidade e expansão, devido a presença de cal livre (CaO) em altos teores. Esta é uma questão que deve ser levada em conta principalmente em escórias novas. Deve-se proceder, portanto, com um tratamento de envelhecimento e hidratação da escória, regando-a no pátio constantemente, para que os elementos instáveis sejam hidratados (GEYER, 2001).

Um estudo realizado por Montenegro e outros (2013) investigou o comportamento expansivo da EFP aplicada à utilização em aterros. Foi constatado que, para escórias não envelhecidas, o processo de hidratação gerou, de forma imediata, algumas alterações em sua composição mineralógica devido à hidratação de aluminatos. A expansão tardia do material ocorreu devido à hidratação de periclásio e a formação de hidróxido de cálcio, brucita e hidromagnesita, gerando uma expansão de 12% a 39%. Os ensaios foram realizados com água à 70°C para acelerar o processo de expansão, portanto, acredita-se que, em campo, as reações químicas aconteçam de forma mais lenta e gerem taxas de expansão inferiores às encontradas em laboratório.

Outra limitação da EFP é seu processo de resfriamento lento, responsável por causar mudanças estruturais que acarretam em quebra da sua estrutura, e por consequência, geração de pó. Além de ser o principal problema da geração da EFP do ponto de vista ambiental, este pó dificulta o transporte do resíduo, que acaba influenciando negativamente no seu processo de reciclagem (ROCHA, 2011).

Pesquisas realizadas por Papayianni e Anastasiou (2012) testaram a influência da granulometria da EFP em sua utilização como adição em matrizes cimentícias. Para isso, foram analisadas amostras de EFP envelhecida submetidas ao processo de moagem e outras apenas ao peneiramento, sendo que a amostra moída apresentou os melhores resultados e tinha 79% de material passante na peneira 45 µm. Os resultados indicaram que a eficácia do resíduo como material cimentante e potencialmente pozolânico aumenta conforme diminui-se o tamanho das partículas. Além disso, as amostras submetidas à moagem apresentaram ligeiro aumento no teor de sílica reativa, e testes realizados com argamassa de cal e cimento indicaram pequeno índice de pozolanicidade.

Outras linhas de pesquisa têm investigado o potencial da EFP como material de construção em diferentes contextos, como em misturas de solo-cimento para estabilização de taludes (MONTENEGRO et al., 2013), utilização na execução de pavimentos e na fabricação de argamassas de assentamento e de revestimento (MANSO et al., 2005). Embora trate-se de um subproduto não homogêneo da produção siderúrgica, a princípio sujeito à instabilidade química, sua composição mineralógica pode favorecer sua utilização na construção civil (SETIÉN; HERNÁNDEZ; GONZÁLEZ, 2009).

2.3 Atividade Pozolânica

2.3.1 Pozolana

De acordo com a NBR 12653:2012, pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos, sem propriedades aglomerantes próprias, mas que, na presença de água e em partículas finas, tem o poder de reagir com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e formar compostos aglomerantes.

O termo “pozolana” é derivado da cidade de Pozzuoli, na Itália, onde foram encontradas cinzas vulcânicas com essas propriedades. Dessa forma, todos os materiais naturais ou artificiais que possuem as mesmas características daquelas cinzas levam o nome de pozolana. As principais pozolanas de origem natural são os tufos vulcânicos e terras diatomáceas, e as artificiais são as argilas calcinadas, a cinza volante, sílica ativa e cinza de casca de arroz (GAVA, 1999).

A diferença entre materiais pozolânicos e materiais cimentantes é que o primeiro necessita do hidróxido de cálcio, além da água, para produzir compostos cimentantes, enquanto o segundo já contém suficiente quantidade de cálcio e necessita apenas de água para provocar uma reação que produza os mesmos resultados (MALHOTRA; MEHTA, 1996 apud GAVA, 1999).

2.3.2 Reação Pozolânica

O cimento Portland é formado por partículas angulares, com dimensões que variam de 1µm a 50µm, e é produzido a partir da moagem de Clínquer com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio. O Clínquer, por sua vez, é fabricado a partir da reação de diversos compostos à alta temperatura, sendo os principais deles óxido de cálcio, sílica, alumina e óxido de ferro (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Como resultado, o cimento Portland é constituído por quatro compostos principais: silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) que, ao reagirem com a água, formam compostos hidratados (NEVILLE, 1997).

O C₃A e o C₃S são processados logo nas primeiras horas, sendo o primeiro responsável pela pega e endurecimento do cimento, e o segundo pelo desenvolvimento de resistência até os 28 dias. Após os 28 dias, o C₂S tem sua hidratação iniciada, e é o principal responsável pelo aumento da resistência a partir dessa idade (GAVA, 1999).

Após a hidratação completa da pasta de cimento, 50% a 60% de seu volume é composta por silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) que, apesar de não terem composição e morfologia bem definidas, são partículas estáveis sob influência das forças de Van der Waals, e as principais responsáveis pela resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A hidratação do C₃S e do C₂S também gera a formação de hidróxido de cálcio que, comparado ao potencial do C-S-H, tem pouca contribuição na resistência do material (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A sílica amorfa encontrada nos materiais pozolânicos, na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio, formando mais silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). À esta reação se dá o nome de reação pozolânica (CORDEIRO, 2006).

Para que o material apresente atividade pozolânica, é necessário que a sílica e a alumina que o compõe tenham baixo grau de cristalinidade. Quanto maior for seu potencial pozolânico, mais longe ele está de seu estado cristalino (NEVILLE, 1997). A caracterização do material quanto a grau de cristalinidade pode ser avaliada pelo ensaio de difração de raios X.

Deve-se observar que a reação pozolânica possui uma taxa de liberação de calor e um desenvolvimento de resistência de forma lenta, visto que ela necessita da prévia reação de hidratação do C₃S e do C₂S, para a formação do hidróxido de cálcio. Além disso, o consumo de hidróxido de cálcio pode aumentar a durabilidade do concreto frente ao ataque químico (GAVA, 1999).

2.3.3 Classificação e Características Físico-Químicas das Pozolanas

A norma brasileira NBR 12653:2012 classifica as pozolanas em três tipos de acordo com sua origem, conforme descrição abaixo:

- **Classe N:** pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- **Classe C:** cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.
- **Classe E:** qualquer pozolana cujos requisitos difiram das classes anteriores, podendo apresentar propriedades aglomerantes.

De forma semelhante, a norma americana ASTM C618:2017 classifica as pozolanas da seguinte forma:

- **Classe N:** pozolanas naturais calcinadas ou não, como terras diatomáceas, cherts e xistos opalinos, turfas e cinzas vulcânicas ou pedra-pomes, calcinadas ou não, e outros materiais que requerem calcinação para obter propriedades satisfatórias com algumas argilas e xistos.
- **Classe F:** cinza volante com propriedades pozolânicas.
- **Classe C:** cinzas volantes com propriedades pozolânicas e cimentantes.

De acordo com Gava (1999), a classificação apresentada pelas normas brasileira e americana é pouco abrangente, pois classifica as pozolanas baseadas apenas na sua origem, e exclui materiais altamente reativos, como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz. Por isso, Mehta e Monteiro (1994) propuseram uma classificação baseada nas composições químicas e mineralógicas e característica das partículas das adições minerais, que está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de materiais pozolânicos proposta por Mehta e Monteiro (1994).

Classificação	Adição Mineral	Composição química e mineralógica	Características das partículas
<i>Cimentantes e pozolânicos</i>	Cinza volante com alto teor de cálcio	Silicatos vítreos, contendo basicamente cálcio, alumínio e álcalis. Pequena quantidade de matéria cristalina, geralmente cálcio. Teor de carbono inferior a 2%.	10 a 15% de partículas maiores que 45µm. Partículas esféricas com diâmetro inferior a 20µm.
<i>Cimentantes</i>	Escória granulada de alto-forno	Silicatos vítreos, contendo basicamente cálcio, alumínio, álcalis e sílica. Em pequenas quantidades, compostos de Melilita.	O material não processado tem dimensão de um grão de areia. Para ser usado deve ser moído em partículas de tamanho inferior a 45µm. Partículas de textura rugosa.
<i>Pozolanas altamente reativas</i>	Sílica ativa Cinza de casca de arroz	Sílica pura na forma não cristalina.	Pó fino de forma esférica de diâmetro médio de 0,1µm. Área específica em torno de 20m ² /g. Partículas geralmente inferiores a 45µm. Altamente celulares com área específica de 60m ² /g
<i>Pozolanas comuns</i>	Cinza volante com baixo teor de cálcio Materiais naturais	Silicatos vítreos contendo basicamente alumínio, ferro e álcalis. Pequena quantidade de quartzo, mulita, sillimanita, hematita e magnetita. Contém quartzo, feldspato, mica e vidro de aluminossilicatos.	Pó com 15 a 30% de partículas maiores do que 45 µm. Partículas esféricas com 20 µm de diâmetro médio. Partículas moídas com finura inferior a 45 µm. Com textura rugosa.
<i>Pozolanas pouco reativas</i>	Escória granulada de alto forno resfriada lentamente, cinza de grelha, escória, cinza de casca de arroz, queimada em campo.	Silicatos cristalinos com pequena quantidade de matéria não cristalina	Devem ser moídos a um pó muito fino para desenvolver certa atividade pozolânica. Textura rugosa.

Ambas as normas estabelecem também, para cada classe, requisitos físicos e químicos que os materiais devem atender para serem considerados pozolânicos. Estes requisitos estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades Físico-Químicas das pozolanas previstas pelas NBR 12653:2012 e ASTM C618:2017

Propriedades	NBR 12653:2012			ASTM C618:2017		
	Classe N	Classe C	Classe E	Classe N	Classe F	Classe C
Químicas						
<i>SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃</i>	≥ 70%	≥ 70%	≥ 50%	≥ 70%	≥ 70%	≥ 50%
<i>SO₃</i>	≤ 4%	≤ 5%	≤ 5%	≤ 4%	≤ 5%	≤ 5%
<i>Teor de umidade</i>	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%
<i>Perda ao fogo</i>	≤ 10%	≤ 6%	≤ 6%	≤ 10%	≤ 6%	≤ 6%
<i>Álcalis disponíveis em Na₂O</i>	≤ 1.5%	≤ 1.5%	≤ 1.5%	≤ 1.5%	≤ 1.5%	≤ 1.5%
Físicas						
<i>Material retido na peneira 45µm</i>	≤ 34%	≤ 34%	≤ 34%	≤ 34%	≤ 34%	≤ 34%
<i>IAP com cimento aos 28 dias, em relação ao controle</i>	≥ 75%	≥ 75%	≥ 75%	≥ 75%	≥ 75%	≥ 75%
<i>IAP com cal aos 7 dias</i>	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa			
<i>Água requerida</i>	≤ 115%	≤ 110%	≤ 110%	≤ 115%	≤ 105%	≤ 105%

No entanto, essas propriedades físicas e químicas são, em sua maioria, restritivas. Gava (1999) pontua que tais exigências não apresentam correlação com o desempenho do material como adição, e podem inibir o seu uso em concretos e argamassas.

O teor mínimo de óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) não garante as propriedades pozolânicas do material, uma vez que estes óxidos podem estar presentes na forma cristalina e, portanto, não reativa (GAVA, 1999).

Controlar a quantidade de sulfatos e álcalis também não se mostrou uma medida efetiva. Segundo Malhotra e Mehta (1996) apud Gava (1999), muitas cinzas volantes que apresentaram bom desempenho em concretos, continham teores de SO_3 e álcalis superiores aos permitidos por norma.

Para Mehta (1986), a única exigência química que deve ser seguida é a perda ao fogo. Este aspecto está relacionado à quantidade de material carbonoso presente na adição, que possui elevada área específica, e por isso pode influenciar na demanda de água. Apesar disso, não há evidência de influência negativa do teor de material carbonoso na resistência e desempenho do concreto com adição. Uma vez que a demanda elevada de água pode ser combatida com aditivos redutores de água, amplamente empregados na produção de concreto, restringir o limite de perda ao fogo pode inibir a utilização de pozolanas que tem demonstrado bom desempenho. Pelo mesmo motivo, a limitação quanto à água requerida também se mostra desnecessária (GAVA, 1999).

Gava (1999) acredita também que o teor de umidade não deve ser uma exigência limitante e que demande muita atenção, pois seu cumprimento não interfere no desempenho da adição, desde que seja levado em consideração na dosagem do concreto, de forma a controlar a relação água/aglomerante.

A finura é o aspecto mais importante da análise de atividade pozolânica de uma adição. Segundo Gava (1999):

Parece haver um consenso por parte dos pesquisadores de que as propriedades pozolânicas e/ou cimentantes de um material aumentam na proporção direta que aumenta a quantidade de partículas finas e área específica.

Mehta (1986) nota que, em geral, partículas com diâmetro maior que $45\mu\text{m}$ não apresentam reatividade, e por isso considera que o limite máximo para partículas de diâmetro superior a este valor é a restrição mais importante na avaliação de uma adição como material pozolânico.

Álvarez, Salas e Veras (1988) observou, em estudos utilizando dois tipos de cinzas volantes, que as amostras que tinham menor porcentagem de material retido na peneira 45µm apresentaram melhor desempenho. A medida em que se reduzia o teor de partículas retidas nessa peneira, aumentava-se não só a área superficial específica, mas também a resistência à compressão em argamassas e concretos. O autor também demonstrou a influência da porcentagem de substituição do cimento por pozolana. Amostras com menor teor de material retido na peneira 45µm e com substituição de 10% e 30% apresentaram bons resultados, no entanto, o melhor resultado foi a amostra com substituição de 60%. Desta forma, nota-se que a finura do material e a quantidade de substituição são fatores essenciais no desenvolvimento de resistência.

2.3.4 Métodos para a determinação da pozolanicidade

Os métodos para avaliação da atividade pozolânica de um material podem ser diretos ou indiretos. São métodos diretos aqueles que avaliam a quantidade de hidróxido de cálcio que não reagiu após a atuação da pozolana. Os métodos indiretos baseiam-se em parâmetros ou ensaios mecânicos que podem ser relacionados à atividade pozolânica (SILVA, 2016).

O método direto para determinação de atividade pozolânica da EFP utilizado neste trabalho foi a análise térmica (TGA) realizada em pasta de cimento. Enquanto isso, os métodos indiretos empregados foram o método da condutividade elétrica (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989) e o método de resistência à compressão simples em argamassa de cimento Portland descrito pela NBR 5752:2014.

2.3.4.1 Índice de Atividade Pozolânica pelo Método da Condutividade Elétrica

O Método da Condutividade Elétrica foi proposto por Luxán, Madruga e Saavedra (1989) para a avaliação de atividade pozolânica em materiais argilominerais. Este ensaio se baseia na variação da condutividade elétrica de uma solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 40°C após 120 segundos da adição de 5g da pozolana em análise.

O decréscimo da condutividade elétrica da solução acontece devido à redução da quantidade de íons de Ca^{2+} e $(\text{OH})^-$ na solução, uma vez que a pozolana deve reagir com o hidróxido de cálcio.

Com base nessa variação de condutividade elétrica, obtém-se o Índice de Atividade Pozolânica do material, que pode ser classificado em três tipos diferentes, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do índice de pozolanicidade para o Método da Condutividade Elétrica. Fonte: Luxán, Madruga e Saavedra (1989).

Pozolanicidade do material	Variação de condutividade (mSi)
Não pozolânico	< 0,4
Pozolanicidade variável	0,4 – 1,2
Boa pozolanicidade	> 1,2

2.3.4.2 Índice de Atividade Pozolânica por Ensaio de Resistência à Compressão (NBR 5752:2014)

A NBR 5752:2014 estabelece o procedimento para a determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) através da relação entre a resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos de argamassa de cimento Portland produzidos com a pozolana em análise e corpos de prova de referência, na idade de 28 dias.

O procedimento para a confecção das argamassas, bem como a moldagem, condições de cura e ensaio para determinação da resistência a compressão devem seguir a NBR 7215:1996.

Neste ensaio, a atividade pozolânica é medida através do ganho de resistência mecânica da argamassa com adição de pozolana. É um método físico, que apresenta limitações, pois deixa de levar em consideração diversos fatores externos que podem influenciar no resultado final (GAVA, 1999).

O IAP é determinado pela razão entre a resistência à compressão média dos corpos de prova de argamassa com adição do material pozolânico e a resistência à compressão média dos corpos de prova de argamassa referência.

2.3.4.3 Determinação de Atividade Pozolânica por Análise Térmica

A Termogravimetria (TGA) é uma técnica termoanalítica que acompanha o valor da variação de massa da amostra em função da variação de temperatura. A curva gerada pelos resultados obtidos permite observar patamares bem definidos, que representam a decomposição das substâncias que compõe a amostra (DENARI; CAVALHEIRO, 2012).

Este método é amplamente utilizado para a determinação das fases que compõe uma pasta de cimento endurecida, uma vez que os produtos de hidratação do cimento Portland têm a característica de perderem água em intervalos de temperatura específicos (SILVA, 2011 apud SILVA, 2016).

Este é um dos melhores métodos para avaliar a atividade pozolânica de um material, visto que os resultados permitem determinar a quantidade de Ca(OH)_2 presente na amostra, levando em consideração que este composto sofre uma decomposição entre aproximadamente 450°C e 550°C. Desta forma, pode-se comparar o teor de hidróxido de cálcio de uma pasta de cimento referência (sem adição) com o resultado obtido para uma pasta de cimento com adição de pozolana (ROSZCZYNIANSKI, 2002).

Sabendo-se a faixa de temperatura em que ocorre a decomposição do hidróxido de cálcio, é possível calcular seu teor em porcentagem conforme a Equação 1:

$$W_{CH} = \frac{4,11 \cdot (W_{Ti} - W_{Tf})}{W_i} \times 100\%$$

(Equação 1)

Onde:

W_{CH} : quantidade de $Ca(OH)_2$ presente na amostra

4,11: fator de conversão para taxa molar de CO_2 para $Ca(OH)_2$ (EL-JAZAIRI; ILLSTON, 1980 apud SILVA, 2016).

W_{Ti} : perda de massa da amostra na temperatura inicial de decomposição do $Ca(OH)_2$

W_{Tf} : perda de massa da amostra na temperatura final de decomposição do $Ca(OH)_2$

W_i : massa inicial da amostra

3 METODOLOGIA

3.1 Beneficiamento

A escória de forno panela utilizada no ensaio é proveniente da Usina Siderúrgica Arcelor Mittal, no município de Piracicaba – SP, e esteve estocada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas – UFOP, em compartimentos fechados, por mais de 5 anos.

Feita a amostragem, o material foi seco em estufa à $100^{\circ}C$ por 24h, e então, moído por 1 hora em moinho de bolas de baixa energia Marconi MA 500®. Uma amostra foi retirada para análise granulométrica. Então, 2kg do material moído foi submetido a processamento em separador magnético cilíndrico para a retirada de fração metálica.

Após a separação magnética, foi separada uma amostra para o ensaio de fluorescência de raio X (FRX), que foi destorroada em um almofariz e peneirada até que todo material fosse passante na peneira $150\mu m$.

3.2 Caracterização física e química

A análise granulométrica foi realizada por granulometria a laser no equipamento Bettersize2000® que se encontra no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas/UFOP.

A análise química por fluorescência de raios X foi realizada por equipamento Panalytical®, modelo Epsilon3x, instalado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas/UFOP.

3.3 Atividade Pozolânica

3.3.1 Método da Condutividade Elétrica

Para a realização deste ensaio, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Chapa elétrica com agitador magnético;
- Barras de teflon para agitação;
- Condutímetro Hanna HI 2550®;
- Balança;
- Termômetro;
- Funil de Buchner e papel de filtração;
- Becker;
- Hidróxido de Cálcio;
- Água destilada
- Amostra de EFP.

A Figura 6 exibe os materiais e equipamentos utilizados no ensaio.



Figura 6 - Materiais e Equipamentos para Ensaio de Condutividade Elétrica.
Fonte: a autora.

Visto que este ensaio foi criado para ser utilizado em materiais argilominerais, e o material de estudo é um resíduo siderúrgico, o procedimento realizado para a elaboração do presente trabalho teve algumas adaptações em relação ao método original, proposto por Luxán, Madruga e Saavedra (1989).

Uma adaptação foi feita em relação à medição da condutividade elétrica da solução. Como a EFP possui alto teor de óxido de cálcio, a condutividade elétrica da própria escória em solução poderia mascarar a redução da condutividade elétrica da solução final devido à reação pozolânica ocorrida. Na tentativa de evitar essa distorção no resultado, foi medida também a condutividade elétrica da solução composta apenas por água destilada e EFP, e este valor foi subtraído do valor obtido para a solução final de hidróxido de cálcio com adição de escória.

Além disso, optou-se por testar o material aplicando também variações de duração, além do tempo original de 120 segundos. Embora os parâmetros para determinação do índice de atividade pozolânica da amostra, descritos na Tabela 3, tenham sido estabelecidos para a variação da condutividade elétrica da solução após 2 minutos da adição do material analisado, neste trabalho o teste foi realizado também para os tempos de 5 e 10 minutos. Esta variação foi feita com o objetivo de observar a evolução da reação pozolânica com o tempo, levando-se em consideração que esta é uma reação química lenta. Os parâmetros apresentados na Tabela 3 não podem ser adequadamente aplicados aos ensaios realizados com tempo superior a 2 minutos.

No entanto, os resultados dos ensaios realizados com 5 e 10 minutos foram analisados de forma comparativa, auxiliando na análise do tempo demandado pela reação pozolânica.

Desta forma, para a realização deste ensaio, foram feitas três soluções:

Solução I: 200ml de solução saturada de Ca(OH)_2 à 40°C;

Solução II: solução I após a adição de 5g de EFP e agitação por 2, 5 e 10 minutos, mantida a 40°C;

Solução III: solução contendo apenas água destilada e 5g de EFP, após agitação por 2, 5 e 10 minutos, também mantida a 40°C.

A chapa elétrica com as barras de teflon foi utilizada para aquecer e agitar as soluções. Para a produção da solução I, foi adicionado a pouco mais de 200ml de água destilada à 40°C quantidade mais que suficiente de Ca(OH)_2 para saturar a solução, que manteve-se em agitação por alguns minutos. Em seguida, a solução passou pelo funil de Buchner para que fosse separado o material não dissolvido. Então, um Becker contendo 200ml da solução saturada voltou a chapa elétrica para que a temperatura se estabilizasse em 40°C. Com o auxílio do condutivímetro, aferiu-se a condutividade elétrica da solução, obtendo-se o valor da condutividade elétrica da solução I (CEI).

Prosseguiu-se então para a solução II. Com o agitador magnético ligado e a chapa elétrica mantendo a temperatura constante, adicionou-se 5g de EFP ao Becker com a solução de hidróxido de cálcio. A solução foi mantida em agitação por 2 minutos, e então aferiu-se a condutividade elétrica da solução II (CEII).

Para a obtenção da condutividade elétrica da solução III, foi adicionado à 200ml de água destilada à 40°C, 5g de EFP. Foi mantida a agitação por dois minutos, como na solução II, e então, mediu-se a condutividade (CEIII).

O procedimento está ilustrado na Figura 7, e foi repetido duas vezes, alterando-se o tempo de agitação das soluções II e III para 5 e 10 minutos.



Figura 7 - Procedimento do Ensaio de Condutividade Elétrica. Fonte: A autora.

A variação de condutividade elétrica (ΔCE) foi calculada subtraindo-se do valor de CEII, os valores CEI e CEIII. Assim, a variação da condutividade elétrica provocada pela EFP foi calculada pela Equação 2:

$$\Delta CE = |CEII - CEI - CEIII|$$

(Equação 2)

3.3.2 Método proposto pela NBR 5752:2014

Os corpos de prova de argamassa foram produzidos conforme procedimento descrito na NBR 5752:2014. A argamassa referência foi denotada com a sigla A-REF, enquanto a argamassa com adição de escória recebeu a denominação de A-EFP.

A EFP foi peneirada na peneira 150 μ m antes de ser utilizada nas argamassas, para eliminar eventuais partículas maiores ou torrões.

O cimento utilizado foi o CP-II-F 32, armazenado em sacos plásticos hermeticamente fechados.

A areia normal utilizada foi seca em estufa à 100°C por 24h, peneirada no peneirador da marca Produtest®, no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Minas/UFOP, e separada nas frações 2,4mm, 1,2mm, 600µm e 300µm.

Na argamassa com adição de EFP, foi substituído 25% do peso do cimento por escória. Os traços e quantidades de material utilizado em cada argamassa estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Características e componentes das argamassas produzidas.
Fonte: a autora.

Cód.	Argamassa	Cimento	Água	Areia	EFP	Traço	Fator a/c	Número de CPs
A-REF	Argamassa Referência	624g	374,4 g	468g de cada fração = 1872g	-	1:3	0,6	6
A-EFP	Argamassa com adição de EFP	468g	374,4 g	468g de cada fração = 1872g	156g	1:3	0,6	6

Cada argamassa, com as quantidades descritas na Tabela 4, foi produzida três vezes, uma para cada idade de análise (28, 56 e 91 dias), resultando em 18 corpos de prova de cada tipo de argamassa.

A argamassa foi produzida com misturador mecânico da marca Fortest®, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas – UFOP, conforme procedimento estabelecido pela NBR 7215:1996 (Figura 8).



Figura 8 - Produção de argamassa. Fonte: a autora.

Após a produção das argamassas, foi realizado teste de consistência, seguindo as instruções apresentadas na norma, conforme ilustrado na Figura 9.



Figura 9 - Medição do Índice de Consistência da argamassa. Fonte: a autora.

Após o teste de consistência, os corpos de prova foram moldados conforme procedimento indicado pela NBR 5752:2014 (Figura 10), mantidos em câmara úmida e desmoldados após 24h. Após o desmolde, eles foram numerados, identificados (Figura 11) e levados para cura submersa com água saturada de cal até o dia do rompimento.



Figura 10 - Corpos de prova recém moldados. Fonte: a autora.



Figura 11 - Corpos de prova desmoldados e identificados. Fonte: a autora.

Ao atingir a idade especificada, os corpos de prova foram retirados da água saturada de cal, secos ao ar e capeados com enxofre (Figura 12).



Figura 12 - Corpos de prova capeados com enxofre para ensaio de resistência à compressão. Fonte: a autora.

Foram rompidos 6 corpos de prova de cada argamassa com 28 dias, 6 com 56 dias e 6 com 91 dias.

3.3.3 Avaliação de Hidróxido de Cálcio

Foram produzidas pastas de cimento referência (PREF) e com substituição de 25% em peso de cimento por EFP (PEFP), com quantidades conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Características e componentes das pastas de cimento produzidas

Código	Pasta	Cimento	Água	EFP	Fator a/c
PREF	Pasta Referência	300g	150g	-	0,5
PEFP	Pasta com adição de EFP	225g	150g	75g	0,5

Assim como na produção de argamassas, a EFP utilizada nas pastas foi peneirada na peneira 150 μ m, para eliminar torrões e eventuais partículas maiores. Para a confecção da pasta PEFP, o cimento com a escória foi homogeneizado por 2 minutos. Para ambas as pastas, o tempo de mistura entre água e aglomerantes foi de 5 minutos. Logo após a mistura, cada pasta foi dividida em três recipientes plásticos, afim de serem submetidas ao ensaio de resistência à compressão nas idades de 28, 56 e 91 dias. Os recipientes foram fechados com plástico e armazenados em câmara úmida até a idade de análise.

Para a moagem da pasta, foi adotado o seguinte procedimento:

- Retirou-se a pasta endurecida do copo plástico;
- Quebrou-se a pasta com auxílio de cinzel e marreta;
- Eliminou-se a face superior da pasta, que estava exposta a carbonatação;
- A pasta quebrada em partículas grandes foi colocada dentro de um saco plástico e moída com um martelo;
- A amostra foi passada na peneira de 75 μ m (Figura 13).



Figura 13 - Peneiramento da pasta de cimento após moagem na idade especificada. Fonte: a autora.

Uma amostra foi então retirada para análise termogravimétrica em equipamento DTA-TG Shimadzu® DTG-60H, de 10°C a 1000°C, passo de 10°C.min⁻¹ e atmosfera de nitrogênio (50ml/min), instalado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas – UFOP.

Este procedimento foi realizado com as duas pastas, nas três idades determinadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização

4.1.1 Análise Granulométrica

A granulometria a laser forneceu como resultado o gráfico apresentado na Figura 14.

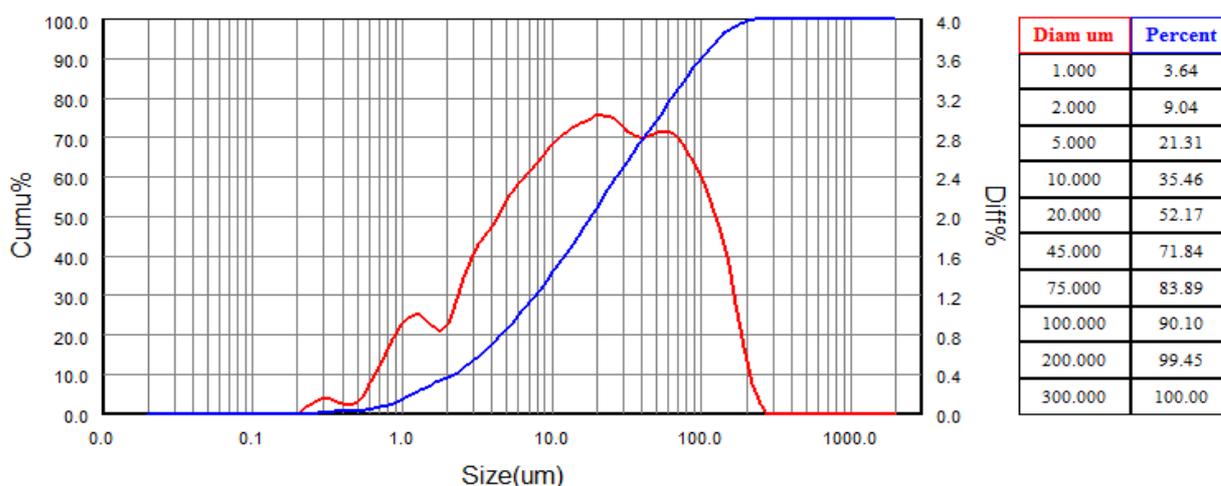


Figura 14 - Resultado do ensaio de granulometria a laser, realizado com a amostra de EFP. Fonte: a autora

Os dados obtidos nesse ensaio indicam que cerca de 90% da amostra tem diâmetro inferior a 100 μ m, sendo que 83,89% da amostra pode ser considerada passante na peneira 75 μ m. Tem-se D50 igual a 18,72 μ m e D10 igual a 2,247 μ m.

A especificação normativa para materiais pozolânicos (NBR 12653:2012) determina que o limite para material retido na peneira 45 μ m é 34%. Na amostra analisada, a porcentagem de material retido nesta peneira foi de 28,16%.

Percebe-se que o material utilizado nos ensaios apresentou uma distribuição granulométrica satisfatória para a finalidade proposta, de avaliação de atividade pozolânica.

4.1.2 Separação Magnética

A amostra submetida ao processo de separação magnética forneceu os resultados apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 - Resultado do processo de separação magnética da EFP. Fonte: a autora

	Peso (g)	Porcentagem
Material Retido no Imã	134,5	6.7%
Material Passante	1793,7	89.7%
Perda	71,8	3.6%
Total	2000	100.0%

Os resultados indicaram que a amostra continha aproximadamente 7% do seu peso de material com teor metálico. Além disso, durante o processo, foram perdidos cerca de 72 gramas da amostra inicial, por se tratar de um procedimento em equipamento aberto, sujeito a pulverização de partículas.

4.1.3 Fluorescência de Raios X

Para análise química da EFP, o ensaio de fluorescência de raios X forneceu os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado do ensaio de fluorescência de raios x da amostra de EFP. Fonte: a autora

Composto	CaO	SiO₂	MgO	Al₂O₃	SO₃	Fe₂O₃	MnO	TiO₂
Concentração (%)	59,7	25,47	4,01	3,75	3,55	1,89	0,81	0,42

Nota-se que o material é rico em óxido de cálcio, e ainda que as concentrações de sílica, alumina e óxido de ferro, compostos que caracterizam materiais pozolânicos, somam 31,1% da amostra.

Para efeitos de comparação, análises químicas de EFP de outros autores estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise química de EFP. Fonte: [1] Setién, Hernández e González (2009); [2] Marinho (2013); [3] Rocha (2011); [4] Rodríguez et al. (2013); [5] Manso et al. (2005); [6] Papayianni e Anastasiou (2012).

Composto	Resultado	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
CaO	59,7%	55%	57,3 - 64,4%	45 - 55%	56%	58%	55,8%
SiO ₂	25,47%	15%	24,5 - 36,8%	20 - 25%	17%	17%	24,1%
Al ₂ O ₃	3,75%	12,5%	1,08 - 3,94%	3 - 9%	11%	12%	1,5%
MgO	4,01%	7,5%	6,15 - 8,37%	8 - 12%	10%	10%	5,9%
Fe ₂ O ₃	1,89%	2,1%	0,68 - 4,55%	0,5 - 3,5%			1,6%
MnO	0,81%	0,36%	0,17 - 1,64%	0,5 - 3,5%			
K ₂ O		0,02%					0,3%
Na ₂ O		0,03%					0,6%
Cr ₂ O ₃		0,01%	0,37 - 1,42%				
P ₂ O ₅		<0,001%	0,14 - 0,29%				
TiO ₂	0,42%	0,33%					
SO ₃	3,55%					1%	
Cal livre		19%					0,7%
Outros					6%	2,5%	

Como pode ser observado na Tabela 8, os resultados obtidos neste trabalho são coerentes com os resultados encontrados na literatura. O óxido de cálcio é o composto predominante na composição da escória de forno panela, seguido da sílica. No entanto, o teor de outros elementos apresenta grande variabilidade, o que está relacionado ao processo de aciaria empregado na obtenção da escória, e também à composição do aço em que ela foi utilizada.

4.2 Atividade Pozolânica

4.2.1 Método da Condutividade Elétrica

Os resultados do Método da Condutividade Elétrica, calculados pela Equação 2 estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado do ensaio de pozolanicidade pelo Método da Condutividade Elétrica. Fonte: a autora

Soluções	Condutividade Elétrica (mSi)		
	2 minutos	5 minutos	10 minutos
<i>Solução I</i>	9,95	9,77	9,79
<i>Solução II</i>	10,13	9,7	9,45
<i>Solução III</i>	2,44	2,5	2,48
<i>Varição da Condutividade Elétrica</i>	2,26	2,57	2,82

De acordo com a Tabela 9, a variação de condutividade elétrica obtida para o teste com tempo de 120 segundos foi de 2,26 mSi, que é um valor superior ao limite de 1,2 mSi, exibido na Tabela 3, o que sugere que a EFP possui boa pozolanicidade.

A Figura 15 apresenta um gráfico para ilustrar o aumento da variação de condutividade elétrica do ensaio com o tempo.

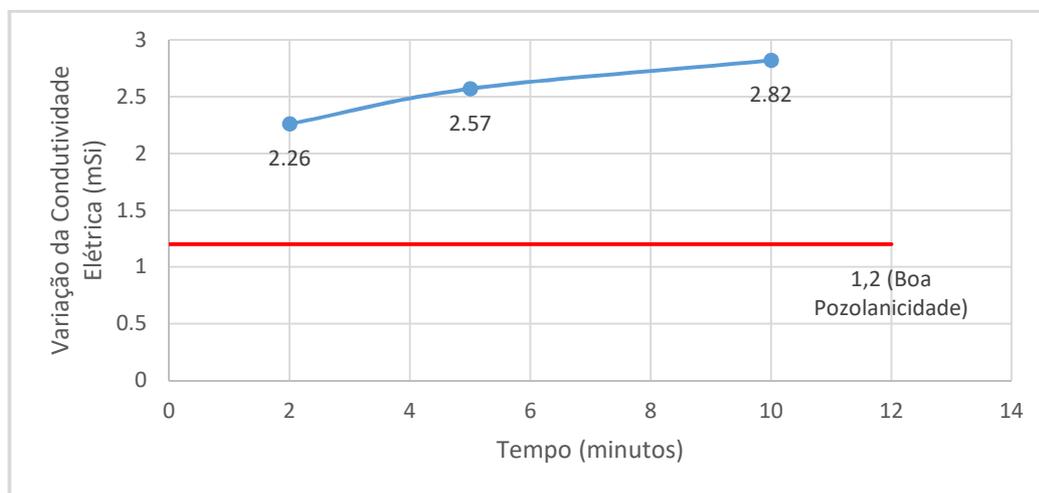


Figura 15 - Resultados do Método da Condutividade Elétrica. Fonte: a autora

Os resultados para os testes com tempo superior a 120 segundos aumentaram de forma singela e gradativa, podendo indicar a evolução lenta da atividade pozolânica.

4.2.2 Método proposto pela NBR 5752:2014

Os traços apresentados na norma não deram bons resultados quanto à consistência e trabalhabilidade das argamassas. Como este é um experimento apenas comparativo, optou-se pela elevação do fator a/c para todas as argamassas, em vez da utilização de aditivo plastificante. Os resultados obtidos no teste de índice de consistência para cada argamassa estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Índice de Consistência das argamassas produzidas. Fonte: a autora

ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA				
Argamassa	D1 (mm)	D2 (mm)	D (mm)	ΔD (mm)
REF28	250,9	252,9	251,9	1,4
EFP28	248,9	252,1	250,5	
REF56	236,4	236,3	236,35	1,5
EFP56	236,6	233,1	234,85	
REF91	255,6	251,8	253,7	8,4
EFP91	260,7	263,5	262,1	

A NBR 5752:2014 determina que, caso a argamassa analisada apresente variação de índice de consistência maior que 10mm em relação à argamassa referência, a consistência deve ser corrigida com aditivo plastificante. Como nenhuma argamassa apresentou variação de consistência maior que o permitido, a utilização de aditivo foi dispensada.

Os corpos de prova produzidos foram rompidos com 28, 56 e 91 dias. Com base nos dados obtidos, foram calculadas as médias das resistências de cada argamassa de cada idade, bem como o desvio padrão. Estes resultados estão demonstrados no gráfico da Figura 16.

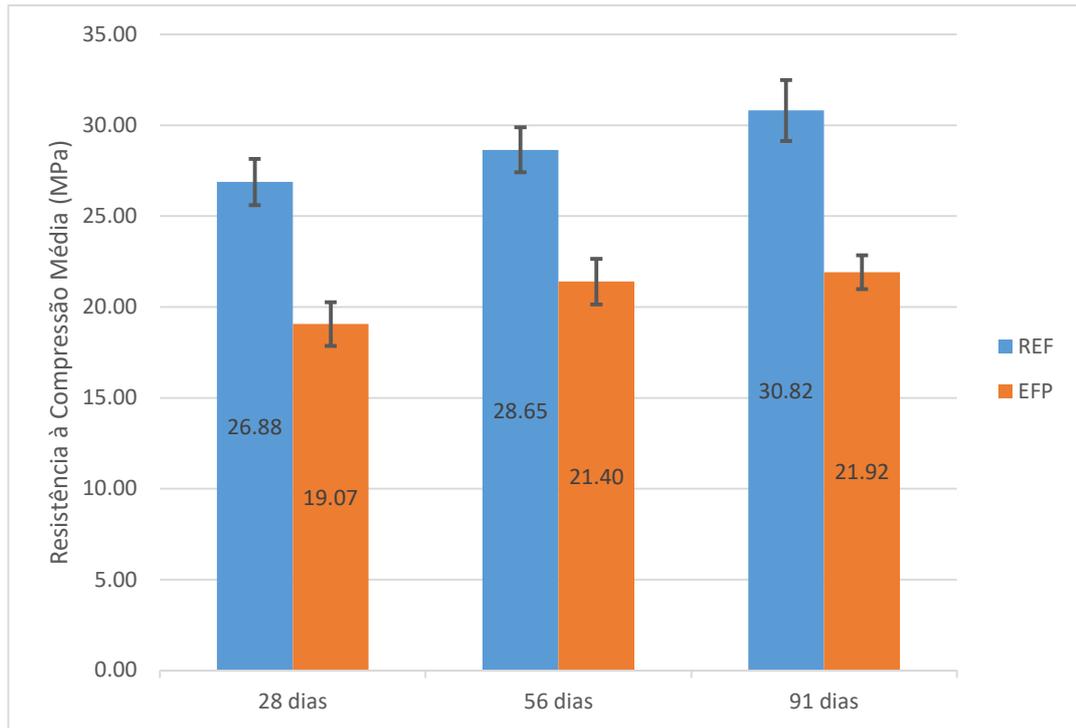


Figura 16 - Resultados de Resistência Média à Compressão e Desvio Padrão das argamassas A-REF e A-EFP. Fonte: a autora.

Com a resistência à compressão média obtida para as argamassas referência e com adição, foi determinado o Índice de Atividade Pozolânica para cada idade, calculando-se a porcentagem da resistência da A-EFP em relação à A-REF. Tanto a NBR 12653:2012 quanto a norma americana ASTM C618:2017 determinam que o IAP mínimo para pozolanas, para argamassas de cimento Portland aos 28 dias, é de 75%. Os resultados de IAP obtidos estão demonstrados no gráfico da Figura 17.

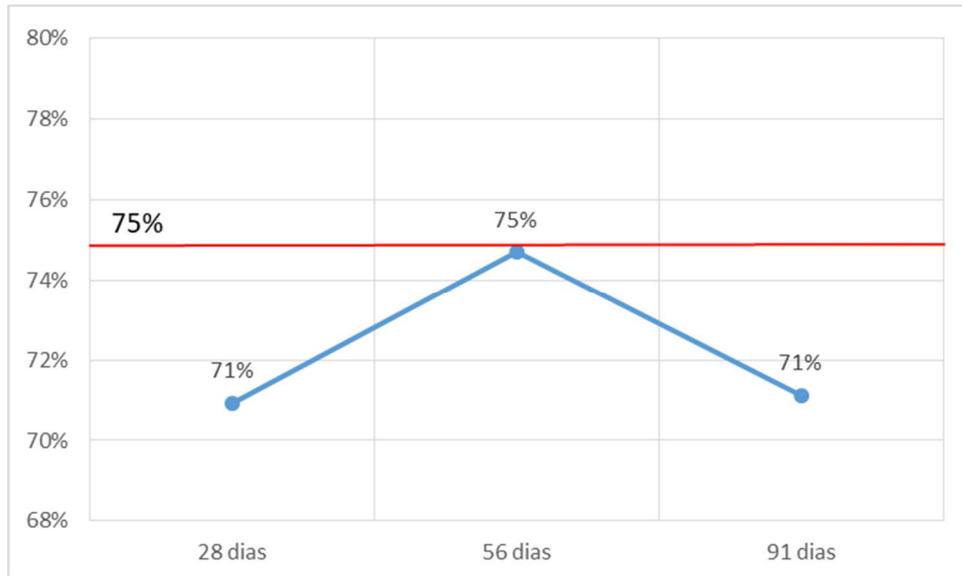


Figura 17 - Índice de Atividade Pozolânica das argamassas com adição nas idades de 28, 56 e 91 dias. Fonte: A autora.

O IAP da argamassa com adição para 28 dias foi de 71%, assim como para a idade de 91 dias, sendo o índice calculado para a argamassa de 56 dias o único que atendeu a especificação normativa mínima.

Segundo Gava (1999), este é um método que apresenta limitações, por deixar de levar em consideração fatores externos que podem influenciar no resultado final.

4.2.3 Avaliação de Hidróxido de Cálcio

Os resultados obtidos no ensaio de Análise Térmica (TGA) das pastas de cimento referência e com adição de EFP estão apresentados nas Figuras 18 e 19 respectivamente, sendo as curvas (a) referentes às pastas analisadas com 28 dias, as curvas (b) referentes às pastas analisadas com 56 dias, e por fim, as curvas (c) referentes às pastas com análise realizada aos 91 dias.

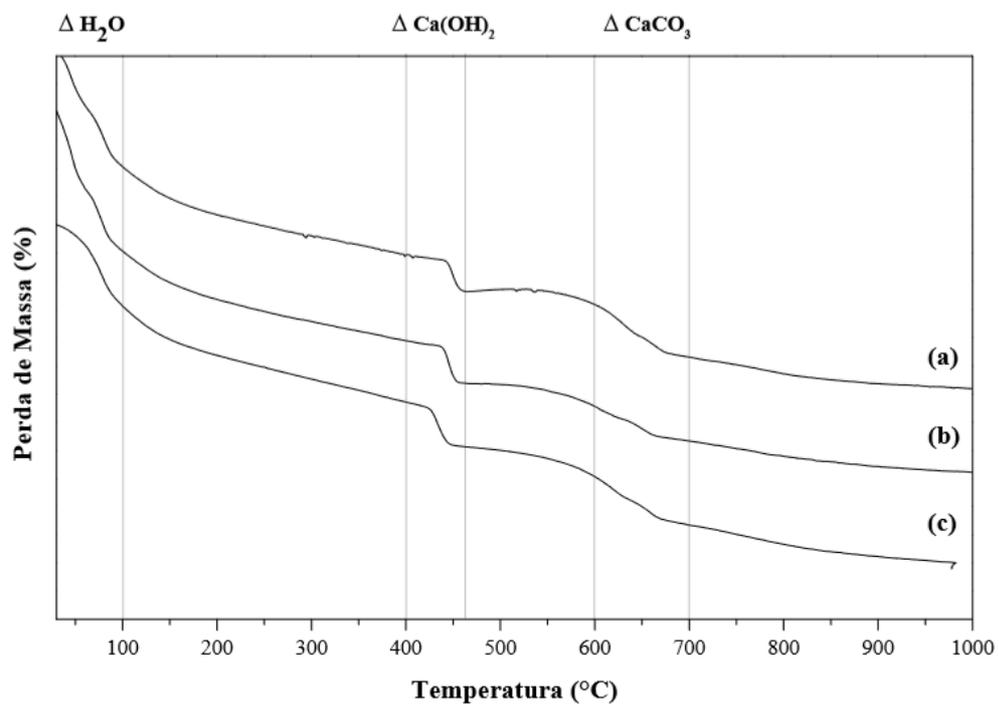


Figura 18 - Análise Térmica (TGA) da PREF. Fonte: a autora.

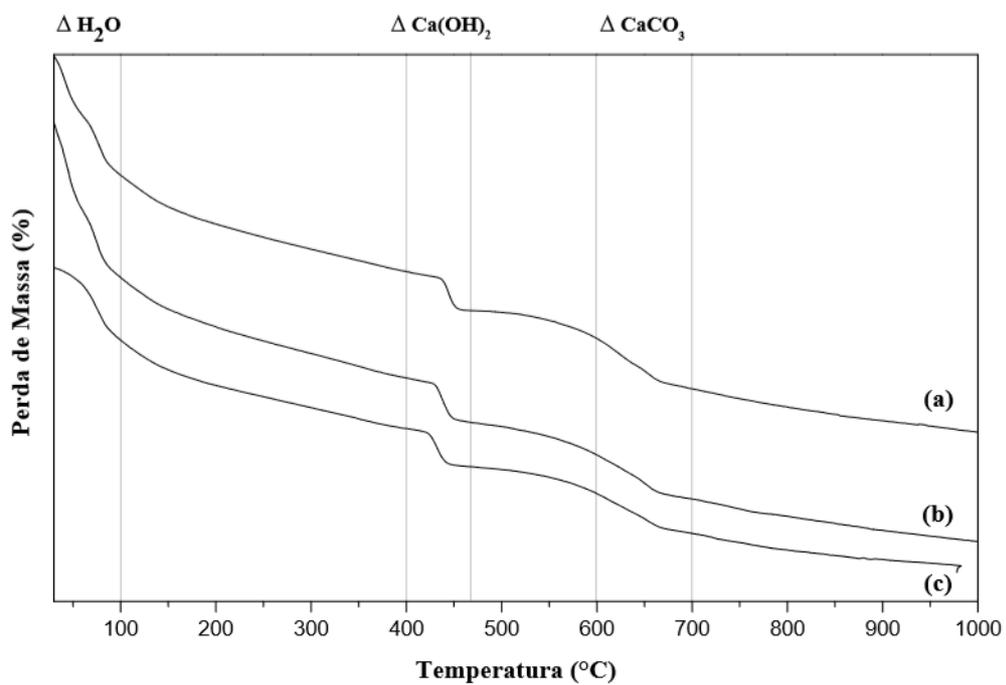


Figura 19 - Análise Térmica (TGA) da PEFP. Fonte: a autora

Os gráficos indicam que a decomposição do Ca(OH)_2 se deu na faixa de temperatura de 400°C a 460°C . Estes foram os valores utilizados no cálculo da porcentagem de hidróxido de cálcio presente na pasta.

As curvas não apresentaram variação significativa no intervalo de temperatura em que ocorre a decomposição do CaCO_3 , indicado no gráfico, de 600°C a 700°C . Isto pode indicar que a amostra não continha quantidade relevante deste composto.

Os valores de massa da amostra, apresentados em miligramas, nas temperaturas inicial (W_i), de 400°C (W_{Ti}) e 460°C (W_{Tf}), estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de massa das amostras de PREF e PEFP nas temperaturas e idades especificadas. Fonte: a autora.

Idade da pasta	PREF			PEFP		
	W_i	W_{Ti}	W_{Tf}	W_i	W_{Ti}	W_{Tf}
28 dias	5.480503	4.512600	4.339500	4.806400	3.929501	3.777103
56 dias	4.472801	3.513599	3.345901	5.500799	4.314800	4.136799
91 dias	5.556299	4.361599	4.142601	5.854799	4.563801	4.381901

Estes valores foram aplicados à Equação 1 para a obtenção dos teores de hidróxido de cálcio em cada uma das pastas. Foi também calculada a variação do teor de Ca(OH)_2 da pasta com adição de escória, em comparação com o valor encontrado para a pasta referência. Estes resultados estão apresentados no gráfico da Figura 20, que permite visualizar a tendência da quantidade de hidróxido de cálcio em cada pasta, em função do tempo.

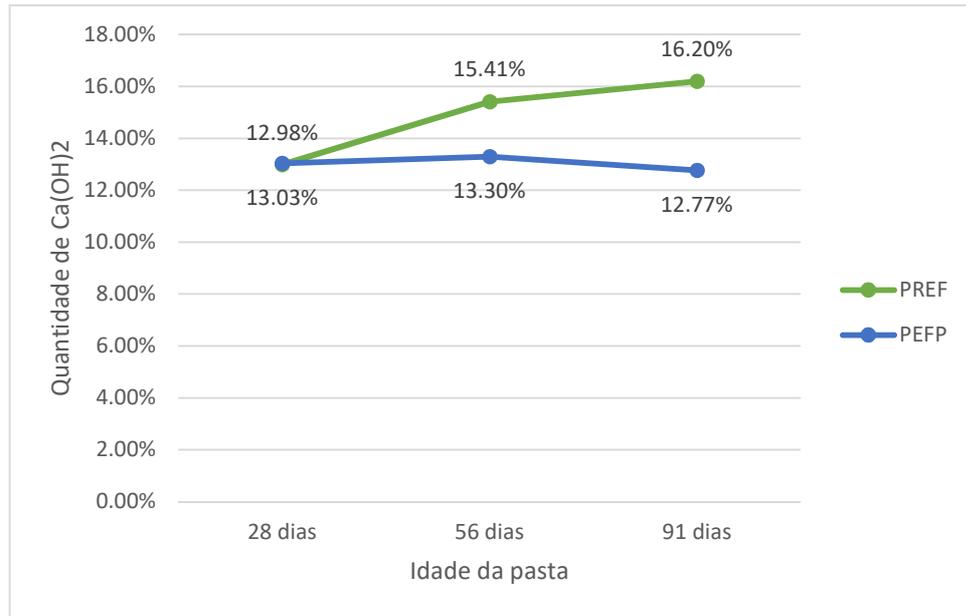


Figura 20 - Teores de Hidróxido de Cálcio nas pastas PREF e PEFP nas idades de 28, 56 e 91 dias. Fonte: a autora.

Como pode ser observado, a pasta de cimento com adição de escória quase não apresentou variação no teor de hidróxido de cálcio em relação à referência nas pastas analisadas aos 28 dias. No entanto, a redução no teor de Ca(OH)_2 da pasta com adição, em comparação com a referência, fica evidente conforme aumenta-se a idade da pasta. A redução do teor de hidróxido de cálcio na PEFP, em relação à PREF, na idade de 56 dias, foi de 2,11%, enquanto na pasta com idade de 91 dias, essa redução foi de 3,43%. Este resultado é coerente com as características da atividade pozolânica, que é uma reação lenta e tardia, pois só ocorre após a completa hidratação do cimento Portland.

Além disso, a verificação de que a amostra não apresentou teores significativos de carbonato de cálcio elimina a hipótese de que a redução do teor de Ca(OH)_2 tenha se dado pela carbonatação da pasta. Desta forma, pode-se associar o consumo de hidróxido de cálcio nas pastas de cimento com adição de EFP analisadas aos 56 e 91 dias, à atividade pozolância da adição.

5 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios realizados com a EFP na fase de caracterização indicaram que o processo de beneficiamento foi efetivo. A curva granulométrica revelou que menos de 30% do material era retido na peneira 45 μ m, atendendo ao requisito normativo, sendo um dos parâmetros mais importantes na avaliação de atividade pozolânica. A análise química indicou um teor de quase 60% de óxido de cálcio, e pouco mais de 30% para os teores de sílica, alumina e óxido de ferro somados. Este resultado não atende aos parâmetros normativos quanto ao teor de óxidos, mas está coerente com a composição de EFP encontrada na literatura.

O ensaio de condutividade elétrica para avaliação de atividade pozolânica necessitou de adaptações, afim de aprimorar a precisão do resultado. O resultado foi positivo, indicando que a EFP possui boa pozolanicidade. Além disso, a variação da duração do ensaio permitiu observar um singelo aumento no potencial pozolânico da escória com o passar do tempo.

O ensaio de resistência à compressão em argamassas de cimento Portland resultou em um IAP ligeiramente inferior ao esperado e estipulado em norma. Ressalta-se que este é um método que avalia a pozolanicidade de forma indireta, e está sujeito à fatores externos que podem influenciar no resultado.

A Análise Térmica (TGA) foi o único método direto de avaliação de atividade pozolânica adotado, e seus resultados foram satisfatórios. Foi observada uma redução no teor de hidróxido de cálcio na pasta de cimento com adição de EFP com o aumento da idade, comparado à pasta referência.

Os resultados obtidos indicam, portanto, que há a possibilidade de utilização da escória de forno panela como pozolana em matrizes cimentícias, embora estudos aprofundados sejam necessários para confirmar a contribuição pozolânica da escória de forno panela, observada neste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ, M.; SALAS, J.; VERAS, J.. Properties of concrete made with fly ash. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 10, n. 2, p.109-120, 1988.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C618-15**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohoken: ASTM 2017.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Eduardo; JOHN, Vanderley Moacyr. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. São Paulo: EPUSP, 2000. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

ASTH, Hudson Guerra. **Desenvolvimento de escórias de refino secundário para o forno panela da V&M do Brasil**. 2011. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

BRASIL. Constituição (2010). Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF.

CONAMA. Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002. **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais**. Brasília, DF.

CNI; IAB. **A indústria do aço no Brasil**. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2012.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2012.

EL-JAZAIRI, B.; ILLSTON, J.. The hydration of cement paste using the semi-isothermal method of derivative thermogravimetry. **Cement And Concrete Research**. [s.l.], p. 361-366. 1980.

GAVA, Giovanna Patrícia. **Estudo Comparativo de Diferentes Metodologias para a Avaliação da Atividade Pozolânica**. 1999. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GERDAU. **Metalurgia Aplicada ao Forno Panela**: Módulo de Capacitação. [s.l.]: Gerdau, 2003.

GEYER, Rejane Maria Tubino. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. 187 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Instituto Aço Brasil – IAB. **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2016.

IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J.. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement And Concrete Research**. [s.l.], p. 63-68. 1989.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K.. **Pozzolanic and cementitious materials**. Canadá: CANMET, 1996.

MANSO, Juan M. et al. Ladle Furnace Slag in Construction. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. [s.l.], v. 17, n. 5, p.513-518, out. 2005. American Society of Civil Engineers (ASCE).

MARINHO, Ana Luiza Borges. **Aglomerante Ecológico para Argamassa – Reciclagem da Escória de Forno Panela**. 2015. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

MARINHO, Ana Luiza Borges. **Produção de ligantes para argamassa obtida a partir da reciclagem de resíduo sólido de siderurgia - Escória de Forno Panela**. 2013. 74 f. TCC (Graduação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

MASUERO, Angela Borges. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 289 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEHTA, P. K.. Pozzolanic and Cementitious Byproducts as Mineral Admixtures for Concrete - A Critical Review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND OTHER MINERAL BYPRODUCTS IN CONCRETE, 1º, 1983, Montebello. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1983. p. 1 - 46.

MEHTA, P. K.. Standard Specification for Mineral Admixtures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL

POZZOLANAS IN CONCRETE, 2º, 1986, Madrid. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1986. v. 2, p. 637 - 658.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MONTENEGRO, J. M. et al. Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. [s.l.], v. 25, n. 8, p.972-979, ago. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE).

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2º ed. São Paulo: PINI, 1997.

PAPAYIANNI, Ioanna; ANASTASIOU, Eleftherios. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 34, n. 3, p.400-407, mar. 2012. Elsevier BV.

QUARCIONI, Valdecir Angelo. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland - Estudo em Pasta**. 2008. 188 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RAGO, Fabiola. **Características Reológicas de Pastas de Cales Hidratadas Nomalizadas e de Cimento**. 1999. 207 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ROCHA, Bruno Paiva. **Estudo da Viabilidade da Reutilização da Escória do Refino Secundário no Forno Elétrico a Arco**. 2011. 66 f. TCC (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

RODRÍGUEZ, A. et al. Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. **Materials & Design**. [s.l.], v. 52, p.987-994, dez. 2013. Elsevier BV.

ROSZCZYNIALSKI, W.. Determination of Pozzolanic Activity of Materials by Thermal Analysis. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**. [s.l.], p. 387-392. 2002.

SETIÉN, J.; HERNÁNDEZ, D.; GONZÁLEZ, J.j.. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. **Construction And Building Materials**. [s.l.], v. 23, n. 5, p.1788-1794, maio 2009. Elsevier BV.

SILVA, Guilherme Jorge Brigolini. **Estudo da Atividade Pozolânica do Resíduo de Polimento de Porcelanato**. 2011. 234 f. Tese (Doutorado) – Ceqgem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SILVA, Keoma Defáveri do Carmo e. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lâ de rocha, fibra de vidro e lâ de vidro**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SOUZA, Eduardo Bezerra de Oliveira e. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.