



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

Carina Miranda Mol Santos

ESCÓRIA DE FORNO PANELA EM SUBSTITUIÇÃO À CAL HIDRATADA EM ARGAMASSAS

Ouro Preto

2019

Escória de Forno Panela em substituição à cal hidratada em argamassas

Carina Miranda Mol Santos

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 17 de julho de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Orientadores: Prof^a. M.Sc. Júlia Castro Mendes - UFOP

Prof. D.Sc. Ricardo André Fiorotti Peixoto – UFOP

Ouro Preto

2019

M538v Mendes, Julia Castro.
Viabilidade técnica do uso de Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio como aditivo incorporador de ar para matrizes cimentícias [manuscrito] / Julia Castro Mendes. - 2016.
96f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto: Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Estrutura Metálicas.

1. Cimento - Aditivos. 2. Detergentes. 3. Argamassa. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

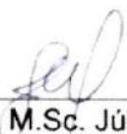
CDU: 666.94

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

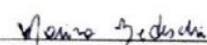
Escória de Forno Panela em substituição à cal hidratada em argamassas

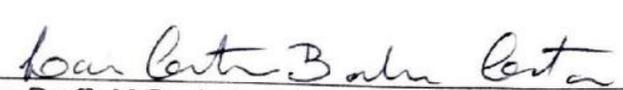
Carina Miranda Mol Santos

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 17 de julho de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:


Orientadora: Prof^a. M.Sc. Júlia Castro Mendes - UFOP


Orientador: Prof. D.Sc. Ricardo André Fiorotti Peixoto - UFOP


Membro: Prof^a. M.Sc. Marina Bedeschi Dutra- UFOP


Membro: Prof^a. M.Sc. Laís Cristina Barbosa Costa- UFOP

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por me guiarem até aqui, por acreditarem em mim e sonharem meu sonho junto comigo, a minha eterna gratidão. Às minhas irmãs pelo companheirismo, amor e amizade. Ao Tony, pela dose de humor diária. Às minhas avós, por me incentivarem e vibrarem por cada vitória minha.

Aos amigos Thaís, Felipe e Cristiano, pelo incentivo e parceria.

À minha orientadora, Professora Júlia Mendes, pelo estímulo, atenção e ensinamentos. Ao Professor Ricardo Fiorotti pelos conhecimentos transmitidos. À Ana Luiza Marinho, pelo companheirismo e dedicação. Ao grupo de pesquisa RECICLOS/CNPq, pelo auxílio e bons momentos.

À Arcelor Mital pelo fornecimento dos materiais.

À UFOP, Fundação Gorceix e à CAPES pelo apoio financeiro e pela oportunidade.

RESUMO

A indústria siderúrgica e a construção civil apresentam impactos ambientais significativos, principalmente devido à alta geração de resíduos e extração de recursos naturais. Assim, este trabalho avalia a utilização de um resíduo do processo de produção do aço, a escória de forno panela (EFP), como ligante para argamassas mistas de assentamento e revestimento, em substituição integral à cal hidratada (CH). Inicialmente, esse resíduo foi beneficiado através de remoção dos metálicos, moagem e redistribuição granulométrica. Em seguida, a EFP e a CH foram caracterizadas física e quimicamente. Na sequência, todos os requisitos para uma cal hidratada foram verificados de acordo com a NBR 7175, para ambos os aglomerantes. Finalmente, foram produzidas argamassas mistas de EFP e de CH, de dois traços diferentes, em que foi observado o comportamento mecânico, além de suas principais propriedades no estado fresco e endurecido. Dois métodos de cura foram adotados a fim de comparar a performance das argamassas sob condições de cura diferentes. As propriedades mecânicas e químicas da EFP foram muito próximas às da CH. Os resultados encontrados indicam a viabilidade da EFP como aglomerante em argamassas mista em substituição à CH, contribuindo para a sustentabilidade na construção civil e na indústria siderúrgica.

Palavras-chaves: escória de forno panela; argamassa; resíduo da siderurgia; sustentabilidade; construção civil.

ABSTRACT

The steel and construction industries have significant environmental impacts, mainly due to the high generation of waste and extraction of natural resources. Thus, the present work evaluates the use of a by-product of the secondary refining of steel, ladle furnace slag (EFP), as a binder for mortars for laying and coating, replacing hydrated lime (CH). Initially, this residue was treated and characterized physically and chemically in its processed form. CH was also characterized for comparative purposes. Subsequently, all requirements for a hydrated lime were verified according to NBR 7175 for both binders. Finally, mortars with EFP and CH were produced, with two different mix proportions. Their mechanical behavior was observed, along with their main properties in the fresh and hardened state. Two different curing methods were adopted in order to compare the performance of the mortars under different curing conditions. The mechanical and chemical properties of EFP were very close to those of CH. The results indicate the viability of EFP as a binder for mortars replacing the CH, contributing to the sustainability in the civil construction and the steel industry.

Keywords: ladle furnace slag; binder; waste recycling; steel production; civil construction.

SUMÁRIO

Agradecimentos	III
Resumo	I
Abstract.....	II
Sumário	III
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
1.1.1 Objetivos Específicos.....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Argamassas.....	3
2.1.1 Argamassas de assentamento.....	3
2.1.2 Argamassas de revestimento.....	4
2.1.3 Propriedades de interesse das argamassas	4
2.2 Cal hidratada	9
2.2.1 Definição	9
2.2.2 Origem e fabricação.....	9
2.2.3 Reações de endurecimento	11
2.2.4 Aplicação em matrizes cimentícias	12
2.2.5 Requisitos de qualidade.....	13
2.2.6 Impacto ambiental.....	15
2.3 Escória de Forno Panela	16
2.3.1 Origem e Composição	16

2.3.2	Impacto ambiental.....	20
2.3.3	Aplicações.....	22
3	Metodologia.....	24
3.1	Materiais.....	25
3.1.1	Cimento.....	25
3.1.2	Areia.....	25
3.1.3	Cal hidratada.....	25
3.1.4	EFP.....	25
3.2	Processamento da EFP.....	26
3.2.1	Remoção de metálicos.....	26
3.2.2	Moagem.....	27
3.2.3	Distribuição granulométrica.....	28
3.3	Caracterização Química dos aglomerantes- Fluorescência de Raio X..	28
3.4	Caracterização Física dos aglomerantes.....	28
3.4.1	Distribuição granulométrica.....	28
3.4.2	Massa específica.....	29
3.4.3	Massa unitária.....	29
3.5	Cumprimento às exigências da NBR 7175/2003.....	30
3.5.1	Consistência normal.....	30
3.5.2	Plasticidade.....	31
3.5.3	Retenção de água.....	31
3.5.4	Capacidade de incorporação de areia.....	32
3.5.5	Estabilidade.....	33
3.5.6	Finura.....	33

3.6	Produção das argamassas	34
3.7	Caracterização física da argamassa no estado fresco	35
3.7.1	Índice de consistência.....	35
3.7.2	Retenção de água	35
3.7.3	Densidade de massa no estado fresco	36
3.7.4	Teor de ar incorporado.....	36
3.8	Caracterização física e mecânica da argamassa no estado endurecido	
	37	
3.8.1	Densidade de massa	37
3.8.2	Resistência à compressão	37
3.8.3	Resistência à tração na flexão	38
3.8.4	Ensaio de determinação da resistência potencial de aderência à	
tração	39	
4	Resultados	41
4.1	Caracterização Química dos aglomerantes.....	41
4.2	Caracterização Física dos aglomerantes.....	41
4.2.1	Distribuição granulométrica.....	41
4.2.2	Massa específica	42
4.2.3	Massa unitária.....	43
4.3	Cumprimento às exigências da NBR 7175/2003	44
4.3.1	Consistência Normal	44
4.3.2	Plasticidade.....	44
4.3.3	Retenção de água	45
4.3.4	Capacidade de incorporação de areia	46

4.3.5	Estabilidade.....	47
4.3.6	Finura.....	47
4.4	Caracterização física da argamassa no estado fresco	48
4.4.1	Índice de consistência.....	48
4.4.2	Retenção de água.....	49
4.4.3	Densidade de massa	50
4.4.4	Teor de ar incorporado.....	51
4.5	Caracterização física e mecânica da argamassa no estado endurecido	52
4.5.1	Densidade de massa no estado endurecido	52
4.5.2	Resistência à compressão	52
4.5.3	Resistência à tração na flexão	54
4.5.4	Resistência potencial de aderência à tração.....	54
5	Conclusão	56
6	Referências	58

1 INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente se tornou motivo de preocupação em todo o mundo. A preocupação no Brasil era, inicialmente, com a poluição do ar e das águas (Juras, 2015). No entanto, nas últimas décadas ficou evidente a inadequada gestão dos resíduos gerados pelas atividades industriais (Juras, 2015).

No que se refere a essa questão, a indústria siderúrgica apresenta significativo impacto. De acordo com o Instituto Aço Brasil (IABr, 2018), o processo de produção do aço gerou em 2017 cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos, dentre eles destaca-se a escória de alto-forno, de aciaria LD, de forno elétrico e de forno panela. Esses resíduos podem gerar a esterilidade nas áreas de estocagem, contaminação dos rios em virtude do carregamento de partículas finas para os cursos d'água, poluição visual dos pátios de estocagem, dentre outros impasses (Marinho, 2015).

Paralelamente, a indústria da construção civil é considerada uma das maiores consumidoras de matérias primas naturais, desde a produção dos insumos utilizados até a energia que é consumida durante todo o processo. Estima-se que esse setor é responsável pelo consumo de 20 a 50% das matérias primas naturais (Sjostrom & Ticiani, 2005). Além disso, cerca de 80% da energia utilizada em uma construção é consumida no transporte e produção de materiais (Construction & Ticiani, 2005).

Dentre esses materiais, a argamassa possui diversas aplicações na construção civil, sendo largamente utilizada no assentamento de alvenarias e no revestimento em geral, além de impermeabilização e regularização de superfícies. Só o consumo de argamassas de assentamento de blocos no Brasil é em torno de 100 milhões de toneladas por ano (ABAI, 2010), o que exige uma reflexão a respeito da degradação ambiental causada pelo processo produtivo dos seus insumos.

Considerando o consumo de materiais naturais pela construção civil e a geração de resíduos pela indústria siderúrgica, este trabalho pretende contribuir de maneira significativa com o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para esses setores, propondo a produção de uma argamassa sustentável com a substituição integral do aglomerante aéreo por um resíduo siderúrgico, a escória de forno panela - EFP.

1.1 Objetivo

Avaliar a viabilidade técnica de argamassas mistas de revestimento e assentamento produzidas a partir da substituição integral da cal hidratada (CH) pela escória siderúrgica de forno panela (EFP).

1.1.1 Objetivos Específicos

- Investigar as propriedades físicas e químicas da EFP processada e da CH;
- Analisar a EFP quanto à conformidade com a norma que especifica a utilização de cales hidratadas;
- Avaliar as propriedades de interesse das argamassas para aplicação em argamassas de assentamento de alvenarias e revestimento produzidas com EFP no estado fresco e endurecido em comparação com argamassas convencionais de CH.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Argamassas

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como uma mistura homogênea com propriedades de aderência e endurecimento, obtida a partir da mistura de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água, podendo conter aditivos ou adições minerais, e ser dosada em obra ou em instalação própria.

Essa norma traz os requisitos exigíveis para a argamassa, e as classifica conforme seu desempenho. Essa classificação é determinada pelos ensaios de densidade de massa no estado fresco e no estado endurecido, coeficiente de capilaridade, retenção de água e resistência mecânica (compressão, tração na flexão e resistência potencial de aderência à tração).

No que se refere ao aglomerante utilizado, as argamassas podem ser classificadas em argamassas de cal, de cimento ou mista de cal e cimento. Suas funções estão associadas diretamente à sua finalidade ou aplicação. Na construção civil as argamassas são empregadas principalmente como argamassas de assentamento ou revestimento.

2.1.1 Argamassas de assentamento

A argamassa de assentamento é utilizada para unir blocos ou tijolos de alvenaria. Carasek (2010) explica que, quando utilizadas com essa finalidade, as argamassas devem ser capazes absorver as deformações, resistir e distribuir as cargas atuantes e unir solidariamente as unidades de alvenaria. Além disso, também são responsáveis por selar as juntas contra a penetração de água da chuva.

Algumas propriedades são essenciais para cumprir essas funções. A trabalhabilidade garantirá as condições de execução principalmente através de retenção de água, consistência e plasticidade e adequadas (Carasek, 2010). Sabbatini (1986) acrescenta que elas devem apresentar adequada aderência aos blocos, resistência suficiente, ser durável e ter capacidade de absorver deformações.

2.1.2 Argamassas de revestimento

Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013) a argamassa de revestimento é utilizada para cobrir uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, apta a receber revestimento decorativo ou constituir-se em um acabamento final. Ainda segundo essa norma, elas podem ser classificadas em chapisco, emboço ou reboco de acordo com a função da camada do revestimento.

Quando empregadas como revestimento de paredes, pisos e tetos, as argamassas têm a função de proteger a alvenaria, cobrir as irregularidades e contribuir com o acabamento estético da edificação (Cardoso, 2009). Elas exercem, ainda papel fundamental no sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com as exigências de segurança e habitabilidade, vez que interfere na estanqueidade à água e no isolamento térmico e acústico (Carasek, 2010).

Afim de exercer essas funções, algumas propriedades de interesse são apontadas por Carasek (2010). Nas argamassas de revestimento a trabalhabilidade é responsável por garantir as condições de execução e o adequado desempenho, especialmente através da consistência, plasticidade e adesão inicial. Outras características essenciais a serem avaliadas são a retração, aderência, permeabilidade à água, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações.

2.1.3 Propriedades de interesse das argamassas

2.1.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é considerada a principal propriedade de uma argamassa devido à sua influência em outras características importantes da argamassa no estado fresco e endurecido (PCA, 2004). Ela é definida por Carasek (2010) como a facilidade de uma argamassa fresca de ser misturada, transportada, aplicada, consolidada e acabada, em uma condição homogênea. Sabbatini (1986) entende que uma argamassa é trabalhável quando ela se distribui facilmente ao ser assentada, preenchendo todas as reentrâncias; adere à colher de pedreiro; não segrega ao ser

transportada; não enrijece em contato com as unidades de alvenaria e permanece plástica por tempo suficiente.

A trabalhabilidade de uma argamassa pode ser facilmente reconhecida pelo pedreiro ao manuseá-la. No entanto, essa propriedade é de difícil mensuração em laboratório, já que é uma combinação de diversas outras propriedades. As propriedades consideradas de maior influência na trabalhabilidade são a retenção de água, consistência, plasticidade, densidade de massa, aderência inicial e coesão (PCA, 2004).

2.1.3.2 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade da argamassa fresca de reter a água de amassamento quando em contato com as unidades de alvenaria ou por evaporação (Carasek, 2010). Essa propriedade interfere no desempenho da argamassa tanto no estado fresco como endurecido. A retenção de água influencia no processo de acabamento e na retração plástica e tem papel fundamental nas reações químicas de endurecimento das argamassas, garantindo a hidratação dos aglomerantes, ganho de resistência, aderência e durabilidade adequadas (Carasek, 2010).

De acordo com Sabbatini (1986), a retenção de água é alterada em função da composição da argamassa e do potencial de sucção do substrato que está em contato com ela. Devido à sua elevada superfície específica e à alta capacidade adsorptiva de seus cristais, a cal apresenta características de retenção de água consideráveis.

2.1.3.3 Consistência

Bauer (2005) define consistência como a propriedade pela qual a argamassa tende a resistir às deformações que lhe são impostas no estado fresco. Segundo Carasek (2010), dependendo da quantidade de pasta aglomerante existente ao redor dos agregados, a argamassa pode apresentar consistência seca, plástica ou fluida.

2.1.3.4 Plasticidade

A plasticidade é definida por Carasek (2010) como a propriedade pela qual a argamassa se deforma sem ruptura, mantendo a deformação depois de retiradas as tensões de deformação. Bauer (2005) explica que os fatores que influenciam a consistência e a plasticidade são, em geral, os mesmos, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1- Fatores que influenciam a consistência e plasticidade (Bauer, 2005).

Fatores internos	Fatores externos
Teor de água muitas vezes definida em função da consistência necessária	Tipo de mistura
Proporção entre aglomerantes e agregado	Tipo de transporte
Natureza e teor dos plastificantes (cal, finos argilosos, etc)	Tipo de aplicação no substrato
Distribuição granulométrica e forma e textura dos grãos do agregado	Operações de sarrafeamento e desempenho
Natureza e teor de aditivos	Características do substrato– tipo de preparo, rugosidade, absorção.

2.1.3.5 Aderência

De acordo com Sabbatini (1986), a aderência não é uma propriedade intrínseca da argamassa, já que ela depende também das características do substrato. Bauer (2005) considera a aderência uma propriedade básica e fundamental tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Maciel, Barros e Sabbatini (1998) definem a aderência inicial como um fenômeno mecânico que ocorre devido à ancoragem da argamassa no estado fresco na base a partir da entrada da pasta nos poros da base, seguido do endurecimento gradativo da pasta. Já a aderência no estado endurecido é a propriedade da argamassa de se

manter fixa ao substrato, através da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface substrato-revestimento (Maciel, et al., 1998).

Em argamassas de revestimento, ao ser lançada na parede, a argamassa deve ser capaz de fixar à parede sem escorrer ou desprender, permitindo manipulações, além de garantir o contato efetivo entre os materiais (o que proporcionará a aderência após o endurecimento). Em argamassas de assentamento, a aderência inicial permitirá à parede resistir aos esforços solicitantes, além de garantir a estanqueidade das juntas (CARASEK, 2010).

2.1.3.6 Teor de ar incorporado

Teor de ar incorporado é a quantidade de ar existente em um certo volume de argamassa (Maciel, et al., 1998). Quanto mais elevado o teor de ar, menor será a massa específica da argamassa. Ainda, uma argamassa com menor massa específica e maior teor de ar apresenta melhor trabalhabilidade (Maciel, et al., 1998).

Aditivos incorporadores de ar são capazes de incorporar teor de ar nas argamassas. No entanto, de acordo com o autor anterior, um aumento no teor de ar incorporado pode prejudicar a resistência mecânica e a aderência da argamassa.

2.1.3.7 Resistência mecânica

A resistência mecânica é entendida como a capacidade que as argamassas possuem de suportar os esforços de diferentes naturezas, devido ao impacto, à abrasão superficial e à contração termohigroscópica (Maciel, et al., 1998).

Apesar da resistência à compressão da alvenaria aumentar com a utilização de uma argamassa mais resistente, esse aumento não é proporcional ao aumento de resistência da argamassa (PCA, 2004). Estudos mostram que um aumento de 130% de resistência da argamassa resultam em apenas 10% de aumento da resistência da alvenaria (Fishburn, 1961).

No entanto, a determinação dessa propriedade permite um controle estatístico da qualidade da argamassa em si e reflete o grau de hidratação da argamassa (que influencia outras características de desempenho, como a durabilidade da própria argamassa) (Sabbatini, 1998). Os ensaios de resistência das argamassas possibilitam verificar se as condições internas de solidificação são suficientes para suportar os estresses mecânicos solicitantes, além de ter uma boa correlação com outras propriedades intrínsecas do material, como o módulo de deformação estático e entender a resistência do revestimento às intempéries (Silva, 2006).

2.1.3.8 Retração

A argamassa sofre uma redução de volume no decorrer do seu processo de endurecimento devido à perda de água de amassamento tanto pelo processo de evaporação quanto devido às reações de hidratação e carbonatação dos aglomerantes (Fiorito, 2010). Esse fenômeno é conhecido como retração e é possível ser notado até aproximadamente quatro meses de idade, de acordo com Fiorito (2010). A retração pode acabar causando a formação de fissuras em revestimentos. No estado endurecido, essas fissuras podem permitir a percolação da água pelo revestimento, comprometendo sua estanqueidade à água (Maciel, et al., 1998).

Fatores que influenciam essa propriedade são as características e a proporção dos materiais presentes na argamassa; a espessura e o intervalo de aplicação das camadas e o respeito ao tempo de sarrafeamento e desempenho (Maciel, et al., 1998). Esses autores ainda observam que quanto maior o teor de cimento, mais propícia ao aparecimento de fissuras, trincas e descolamentos estará a argamassa.

2.1.3.9 Resiliência

Maciel, Barros e Sabbatini (1998) definem resiliência ou capacidade de absorver deformações como a propriedade da argamassa de se deformar sem apresentar ruptura, ou somente apresentar fissuras microscópicas ou capilares não prejudiciais. Esses autores explicam que as fissuras são provenientes do alívio de tensões

originadas pelas deformações do substrato. O aparecimento de fissuras pode comprometer a durabilidade da argamassa, além da aderência, estanqueidade e do acabamento superficial.

A resiliência de uma argamassa depende tanto de fatores operacionais quanto de fatores intrínsecos à argamassa. Segundo Maciel, Barros e Sabbatini (1998), quanto menor o módulo de deformação e mais espessas as camadas, maior a capacidade de absorver deformações. De acordo com esse autor, as juntas de trabalho de um revestimento e a técnica de execução também afetam nessa propriedade.

2.1.3.10 Durabilidade

Durabilidade da argamassa é sua habilidade de resistir aos agentes agressores químicos, físicos e biológicos; mantendo suas características físicas e mecânicas ao longo do tempo (PCA, 2004). A deterioração das argamassas pode ser causada tanto por fatores internos quanto por causa externas à própria argamassa (Carasek, 2010). Alguns dos fatores que comprometem sua integridade são: retração por secagem; absorção de água da chuva; temperaturas de congelamento; choque térmico; agentes corrosivos atmosféricos; agentes agressivos biológicos (Sabbatini, 1986).

2.2 Cal hidratada

2.2.1 Definição

A NBR 7175 (ABNT, 2003) define a cal hidratada como um pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

2.2.2 Origem e fabricação

Após a extração da jazida, a pedra calcária é transportada até a fábrica para ser submetida a um processo de britagem. Em seguida, pode ser moída e embalada para

comercialização ou pode ser levada ao forno de calcinação para ser transformada. Após a calcinação, a cal pode ser moída e comercializada na forma de cal virgem, ou pode ainda sofrer um processo de hidratação e ser finalmente comercializada como cal hidratada (Coelho, et al., 2009). A Figura 1 representa um esquema simplificado do processo de fabrico da cal.

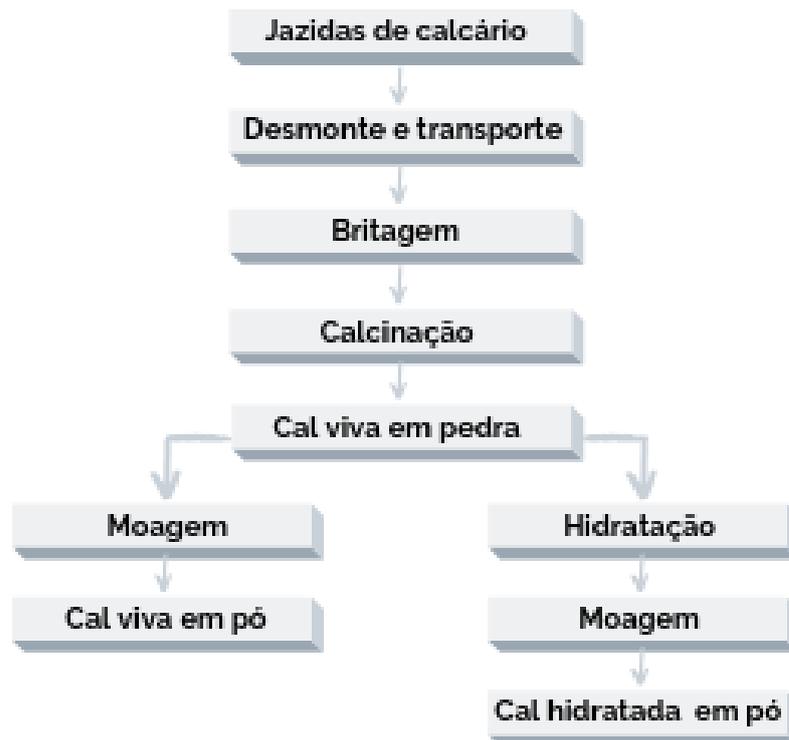
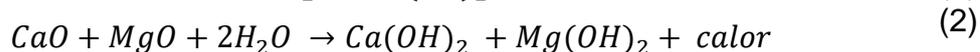
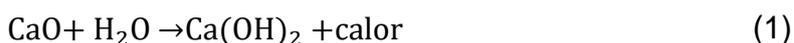


Figura 1- Sequência do fabrico da cal. Adaptado de Coelho et al. (2009).

A pedra calcária, matéria prima que origina os produtos à base de cal, é composta majoritariamente por carbonato de cálcio (CaCO_3) e uma menor quantidade de outros constituintes, como sílica e óxidos de ferro e de alumínio (Coutinho, 2006). A autora acrescenta que uma cal de boa qualidade deve apresentar uma elevada porcentagem de carbonato de cálcio. Frequentemente o carbonato de cálcio é substituído, em determinada proporção, pelo carbonato de magnésio, que não constitui uma impureza propriamente dita.

A cozedura ou calcinação de calcários com elevado grau de pureza produz as cales aéreas, que podem ser de origem cálcica ou dolomítica. A primeira delas é constituída por óxido de cálcio (CaO) e a última por óxido de cálcio e óxido de magnésio, majoritariamente (Coutinho, 2006). Margalha (2011) esclarece que a temperatura de cozedura da rocha cálcica é em torno de 900°C, enquanto o processo de decomposição da rocha dolomítica é bastante inferior, podendo variar entre 400°C e 480°C. No início do processo de calcinação, a rocha libera a água que contém e só a partir de uma temperatura mais elevada é que se inicia a decomposição do carbonato de cálcio (Margalha, 2011).

Os produtos obtidos através da calcinação do óxido de cálcio e do óxido de magnésio são designados por cal viva (Margalha, 2011). A cal viva (CaO ou CaO + MgO) apresenta-se sob a forma de grãos de grandes dimensões com 10, 15 ou 20cm – são as pedras (ou blocos) de cal viva ou em forma de pó. Ela é um produto sólido, de cor branca com grande avidez por água (Coutinho, 2006). Para a obtenção e posterior aplicação do hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ é necessário proceder a hidratação da cal viva. Se uma quantidade de água estritamente necessária à hidratação é acrescentada à cal viva, tem-se uma reação de extinção por aspensão, obtendo a cal hidratada (Ca(OH)₂ ou Ca(OH)₂ + Mg(OH)₂) em pó, como representado nas equações (1) e (2) a seguir:

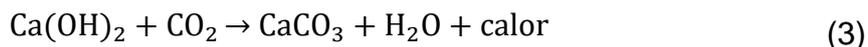


No caso de ser adicionada água em excesso, tem-se uma extinção por imersão. Nesse caso os blocos de cal viva são mergulhados em água obtendo uma pasta de cal hidratada (Coutinho, 2006).

2.2.3 Reações de endurecimento

Coutinho (2006) considera que o processo de endurecimento da cal aérea acontece em duas fases. Na primeira fase dá-se a evaporação da umidade em excesso, ao fim da qual a cal está firme ao tato mas ainda é marcável com a unha. Na

segunda fase, chamada por Coutinho (2006) de recarbonatação, dá-se uma reação química muito lenta, ao ar (daí o nome de aérea), em que o hidróxido se reconverte em carbonato de cálcio por recombinação com o dióxido de carbono (CO₂). A velocidade da segunda fase depende da temperatura, da estrutura porosa e da umidade da pasta podendo demorar anos a completar-se. A equação (3) a seguir representa esse processo:



2.2.4 Aplicação em matrizes cimentícias

A cal hidratada exerce um importante papel na construção civil. Ela tem um excelente poder aglomerante, capaz de unir os grãos de areia da argamassa.

De acordo com Rago e Cincotto (1999), no estado fresco a cal propicia maior plasticidade à argamassa, permitindo melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, maior produtividade na execução do revestimento. Isso acontece porque suas partículas finas funcionam como lubrificantes, reduzindo o atrito entre os grãos de areia (Coelho, et al., 2009). Além disso, permite também que a argamassa tenha maiores deformações, sem fissuração, do que teriam somente com cimento Portland.

Outra propriedade da cal no estado fresco citada por Rago e Cincotto (1999) é a retenção de água, importante no desempenho da argamassa, relativo ao sistema base/revestimento, por evitar a sucção excessiva de água pela base e a sua evaporação demasiadamente rápida. Assim, as argamassas de cimento contendo cal retêm mais água de amassamento e garantem resistência suficiente quanto à compressão e à aderência, tanto para assentamentos como para revestimentos, além de evitar uma retração brusca da argamassa, com possível fissuração (Coelho, et al., 2009).

Coelho et al. (2009) explica que, devido à sua característica alcalina, a cal hidratada impede a oxidação das ferragens, além de atuar como agente bactericida e fungicida. Essas características ainda evitam que se formem manchas e o

apodrecimento precoce dos revestimentos; proporciona economia de tinta, pois permite acabamento mais liso e de cor clara; e é compatível com qualquer tipo de tinta e outros acabamentos, como fórmica e papéis de parede.

A adição de cal hidratada às argamassas de cimento reduz significativamente o módulo de elasticidade, sem afetar, na mesma proporção, a resistência à tração que, em última análise, é a máxima resistência de aderência da argamassa, acrescenta Coelho et al. (2009). Dessa forma, a presença da cal na argamassa permite uma melhor absorção das movimentações da estrutura, evitando fissuras e o deslocamento ou queda dos revestimentos, aumentando a vida útil do revestimento (Coelho, et al., 2009).

2.2.5 Requisitos de qualidade

Devido às grandes variações na qualidade das cales encontradas no comércio e às exigências dos construtores na qualidade das argamassas, torna-se necessária uma melhor fiscalização no processo de fabricação e no controle de qualidade. Rago e Cincotto (1999) afirmam que a qualidade da cal é absolutamente essencial para uma argamassa durável.

De acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003), a cal pode ser classificada em cal hidratada I (CH-I), cal hidratada II (CH-II) e cal hidratada III (CH-III), segundo algumas exigências químicas e físicas. Esta norma estabelece os requisitos exigíveis no recebimento da cal hidratada a ser empregada em argamassas para a construção civil.

Para fins de verificação das exigências químicas da cal hidratada, as normas NBRF 6471/1998 e NBR 6473/2003 devem ser seguidas e as condições indicadas na Tabela 2 devem ser verificadas. Esses ensaios visam verificar a “pureza” da cal, avaliando o processo de fabricação do produto e a qualidade da sua matéria prima, tendo influência direta sobre o desempenho do produto.

Tabela 2- Exigências químicas da cal hidratada segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003).

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO+MgO) ²		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

As exigências físicas devem ser verificadas de acordo com os métodos de ensaios indicados nas normas NBR 9289/2000, NBR 9205/2001, NBR 9206/2003, NBR 9207/2003 e na NBR 9290/1996. A cal hidratada deve atender às condições físicas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3- Exigências físicas da cal hidratada segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003).

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≤ 110	≤ 110	≤ 110

2.2.6 Impacto ambiental

Entre os principais impactos ambientais relacionados à produção da cal estão as emissões de gases poluentes, alto consumo de energia, produção de resíduos, mudança na paisagem devido à mineração, ruído e poeira, assim como afirmam os autores a seguir.

A alta emissão de dióxido de carbono (CO₂) pelo processo de produção da cal é considerada como um impacto em âmbito global por John, Punhagui e Cincotto (2014). Além do dióxido de carbono, a esse processo emite outros gases como óxido de nitrogênio, resultante da reação em alta temperatura entre o nitrogênio e o oxigênio no ar de combustão ou da reação dos compostos nitrogenados presentes no combustível com o oxigênio do ar de combustão (John, et al., 2014). Esse autor explica que esses gases são resultantes e variam segundo o tipo de forno, condições de funcionamento, tipo de combustíveis, características da matéria-prima e técnica de redução de emissões empregadas.

O processo de fabricação da cal consome muita energia na etapa de calcinação, que ocorre em fornos a temperaturas de aproximadamente 900°C. Além dos combustíveis utilizados nos fornos, é necessário somar aos insumos energéticos os combustíveis dos veículos de transporte e equipamentos (britador, perfuratriz, carregadeira, etc.) e a energia elétrica usada nos demais equipamentos empregados no setor (John, et al., 2014). De acordo com Silva (2009), nas minas os principais equipamentos são movidos a diesel, e nas usinas de beneficiamento, os equipamentos, principalmente os moinhos, são movidos por motores elétricos, o que demanda uma quantidade considerável de energia.

Segundo John, Punhagui e Cincotto (2014), a produção da cal gera resíduos com granulometrias e níveis de decarbonatação não apropriados ao mercado. De acordo com esse autor, os resíduos podem ser gerados através da partida ou desligamento dos fornos para manutenção; deficiências na calcinação; ou nas etapas de mineração e beneficiamento. Além disso, Silva (2009) lembra que a remoção do capeamento superficial também gera resíduos provenientes da exploração mineral.

O consumo de água dependerá das atividades dentro de cada etapa de produção e do controle na hidratação da cal. Porém, a preocupação se dá especialmente em relação à possível deterioração dos recursos hídricos da região da área de lavra, por conta da grande movimentação de minério e estéril (Silva, 2009). A extração do calcário pode também interferir no ciclo da água, já que os afloramentos de calcário são responsáveis por recolher e direcionar a água das chuvas aos corpos d'água subterrâneos (CETEM, 2013).

2.3 Escória de Forno Panela

2.3.1 Origem e Composição

De acordo com o IABr (2018), as usinas de aço são classificadas de acordo com o processo produtivo em integradas e semi-integradas. A primeira possui as fases de redução, refino e laminação e produzem aço a partir do minério de ferro, carvão e materiais fundentes. Neste tipo de produção o processo de refino é feito através do convertedor a oxigênio Linz Donowitz (LD). Já as usinas semi-integradas não têm a etapa de redução e usam sucata de aço e ferro gusa como matéria prima. Nesse processo, o refino é feito a arco elétrico (FEA). A Figura 2 ilustra o processo de produção de aço via elétrica e LD.

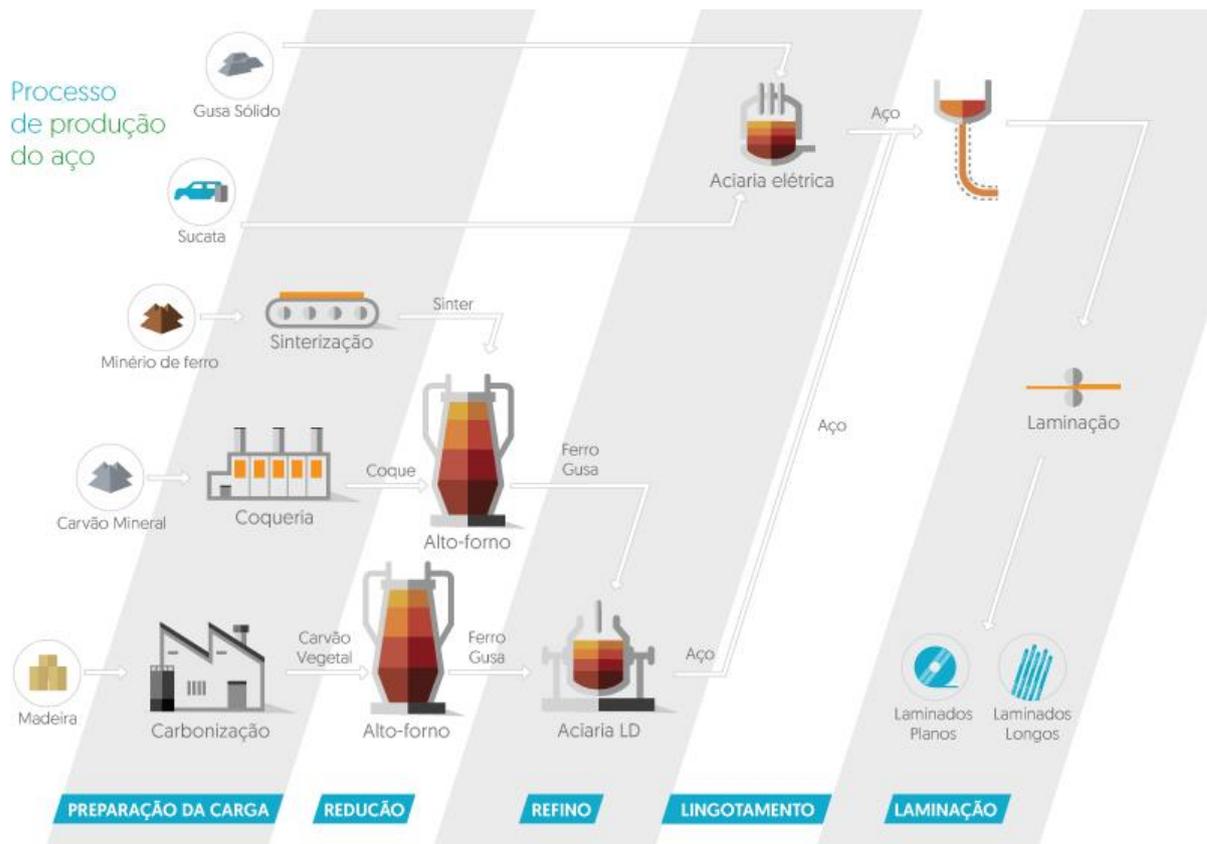


Figura 2- Processo de produção do aço. Esquema de uma usina semi-integrada, onde a etapa de redução é inexistente; e posteriormente as etapas em uma usina integrada. (IABr, 2018).

Na década de 1950, os fornos até então utilizados já não supriam as exigências de qualidade e consistência do aço em relação às suas propriedades mecânicas (Rocha, 2011). A busca de um alto nível de controle de parâmetros do processo motivou o desenvolvimento de vários tipos de tratamentos de aço líquido em panelas. Atualmente este processo é conhecido como refino secundário e ocorre mais comumente no forno panela.

Após a elaboração do aço no forno primário (refino primário) ocorre o refino secundário ou metalurgia secundária. Lobato (2014) explica que o processo que ocorre no forno panela consiste, basicamente, no acerto da composição química e

temperatura do aço líquido que será posteriormente enviado ao lingotamento contínuo para ser solidificado.

Duarte (2009) descreve o processo de refino secundário que ocorre no forno panela. Cal e escória sintética são adicionadas antes do início do aquecimento para adequar o volume de escória e evitar a exposição do metal líquido ao arco elétrico e à atmosfera. A variação da altura dos eletrodos garante o controle da temperatura, enquanto a adição de elementos de liga é responsável pelo ajuste da composição química. A injeção de gases inertes durante o tratamento, principalmente o argônio, garante a homogeneização e aquecimento do metal líquido, evitando a segregação de elementos químicos e permitindo um controle mais eficaz da temperatura.

No forno panela há a formação de um resíduo, a escória de forno panela (EFP), também conhecida por escória de refino redutor. Sua geração se dá a partir da adição de desoxidantes e de cal, que tem como objetivo contribuir para a eliminação do oxigênio e do enxofre do aço líquido e o ajuste da composição do aço, pela adição de ferro-ligas (Masuero, et al., 2004). Geyer et al. (1997) explica que normalmente essa escória é vazada em uma panela e/ou descarregada em locais onde possa solidificar em forma cristalina. Após o resfriamento, ela é britada, separada por granulometrias e passa por um eletroímã que separa a escória rica em ferro para reutilização no processo. A Figura 3 mostra o circuito da geração de resíduos na aciaria elétrica (FEA) e na aciaria à oxigênio (LD).

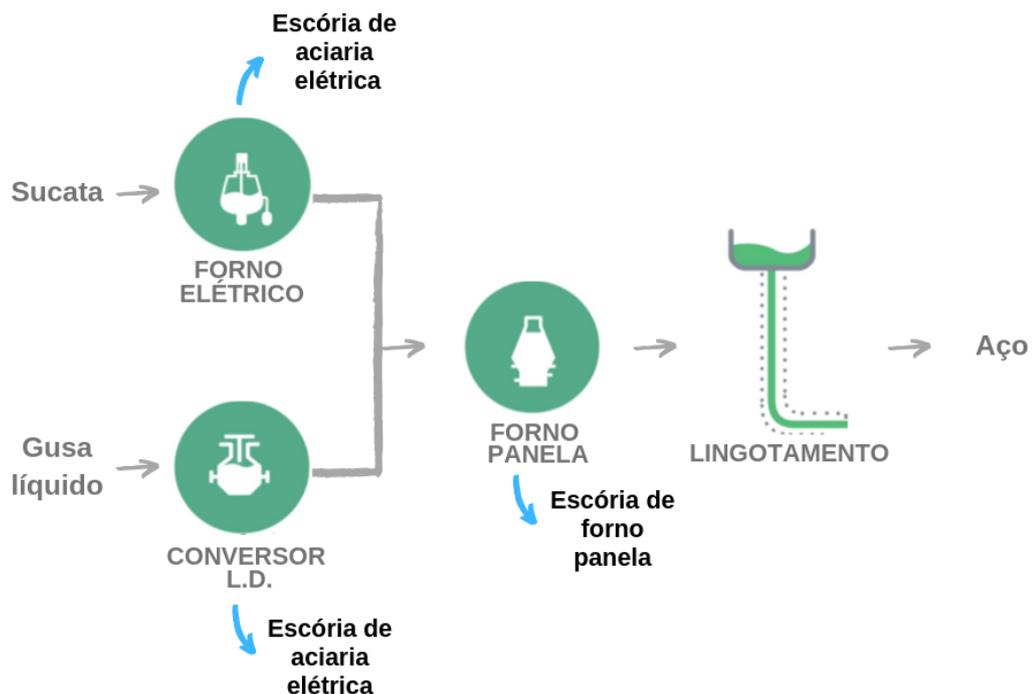


Figura 3- Esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica e à oxigênio (LD). Adaptado de Geyer (1997).

As características físicas (densidade, granulometria e propriedades estruturais) desses resíduos são determinadas a partir do modo como são resfriadas (Geyer, et al., 1997). No Brasil, as escórias normalmente têm um resfriamento lento ao ar, recebendo pequenos jatos d'água para auxiliar no processo. Geyer (2001) explica que se a escória é resfriada naturalmente ao ar, os seus óxidos componentes se cristalizam e perdem as características hidráulicas, podendo ser considerada inerte.

A composição química da escória está diretamente relacionada ao tipo de aço produzido, ao tipo de revestimento refratário utilizado na panela e à composição química da sucata utilizada como matéria prima (Marinho, 2015). A EFP apresenta óxidos de cálcio, magnésio, silício, ferro e manganês, em quantidade e concentrações decorrentes dos fatores acima relacionados (Lobato, 2014).

Salienta-se que as escórias de refino oxidante e redutor (como é o caso da EFP) diferem das escórias de redução (alto-forno) porque participam ativa e

fundamentalmente do processo, enquanto que as últimas principalmente incorporam as impurezas (Geyer, 2001). A EFP possui um teor significativamente inferior de óxidos ferrosos, além de uma menor granulometria se comparada às outras escórias siderúrgicas (Papayianni & Anastasiou, 2012). A Tabela 4 apresenta o intervalo de composição da EFP.

Tabela 4- Composição química típica da EFP gerada no Brasil (adaptado de (Geyer, 2001).

Componentes	Composição (%)
CaO	45 - 55
SiO₂	20 - 25
Al₂O₃	3 - 9
MgO	8 - 12
FeO	0,5 - 3,5
MnO	0,5 - 3,5
CaO/SiO₂	2,2 - 2,25

2.3.2 Impacto ambiental

De acordo com o IABr (2018), o setor siderúrgico brasileiro é formado por 30 usinas, das quais 15 são integradas e 15 semi-integradas. Apesar de estarem distribuídas em 8 estados, a maior concentração é na região Sudeste, que representa 89% da produção do aço.

No ano de 2017, o país produziu pouco mais de 34 milhões de toneladas de aço, representando 2,1% da produção mundial, e 53,5% da América Latina. Essa produção gerou, naquele ano, cerca de 20,9 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos diretos, levando a uma geração específica de 607 kg de resíduos por tonelada de aço bruto produzido. As escórias de alto-forno e aciaria representaram 69% do total desses resíduos, como pode ser observado no gráfico da Figura 4 (IABr, 2018).

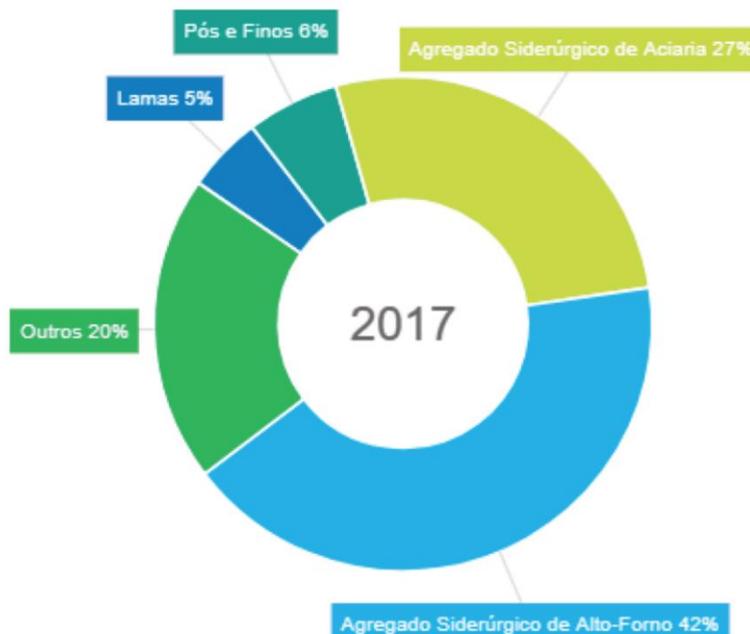


Figura 4- Resíduos diretos e coprodutos gerados no processo de produção do aço em 2017 (IABr, 2018).

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2012), no estado de Minas Gerais, as escórias siderúrgicas estão entre os 10 resíduos industriais mais gerados. Enquanto 92% da escória de alto-forno em 2017 foi vendida para a produção do cimento, a destinação e utilização das outras escórias siderúrgicas são mais variadas (IABr, 2018).

Papayianni e Anastasiou (2012) consideram a utilização de escórias de aciaria como de importância relevante para a sustentabilidade das indústrias siderúrgicas. Isso porque seu descarte é um inconveniente ambiental reconhecido e a legislação recente oferece incentivos financeiros extras para sua utilização. Assim, de acordo com esses autores, embora a EFP seja produzida em volumes menores em comparação às outras escórias siderúrgicas, sua utilização também é muito significativa para as indústrias siderúrgicas.

2.3.3 Aplicações

No processo de produção de aço, durante o refino do ferro-gusa, a escória retém parte da cal virgem empregada para retirar e neutralizar os elementos fosforo, enxofre e silício (Geyer, 2001). Geyer (2001) explica que, quando exposta ao ar, a cal pode apresentar expansão por hidratação, o que limita a utilização da EFP na fabricação de concretos, argamassas e pavimentação. Esta é uma questão que deve ser levada em conta principalmente em escórias novas. O autor sugere um tratamento de envelhecimento e hidratação da escória, regando-a no pátio constantemente, para que os elementos instáveis sejam hidratados previamente à sua aplicação.

Rodriguez et al. (2009) realizaram um estudo comparando a argamassa convencional com argamassas produzidas a partir da EFP substituindo parcialmente areia e cimento. Com adições apropriadas de EFP, as argamassas apresentaram melhorias significativas na resistência mecânica e trabalhabilidade. Além disso, eles chamam atenção para a economia de areia e cimento, redução do impacto ambiental e redução de custos.

Papayianni e Anastasiou (2012) avaliaram a influência da granulometria da EFP envelhecida em sua utilização como adição em matrizes cimentícias. Os resultados indicaram que a EFP poderia fornecer um material cimentante complementar alternativo e de baixo custo. Além disso, eles determinaram que a eficácia do resíduo como material cimentante e potencialmente pozolânico aumenta conforme diminui-se o tamanho das partículas.

Destaca-se também sua reutilização internamente nas usinas siderúrgicas substituindo parte da cal e do calcário, respectivamente, na aciaria e nos altos-fornos (Geyer, 2001). Rocha (2011) mostra em seu estudo a viabilidade da reutilização da EFP no forno elétrico, e sugere um tratamento prévio desse material para tornar essa aplicação mais eficiente.

No estudo de Geyer (2001), ele sugere utilizar uma mistura de EFP e escória de aciaria elétrica como adição ao cimento Portland na confecção de concreto. Esse trabalho mostra que adições de até 35% no concreto são tecnicamente viáveis. Além disso, o estudo mostra que, para confecção de concreto numa proporção de até 10%

de adição dessa mistura, este material pode ser utilizado sem prejuízo à qualidade final do concreto no que diz respeito à expansibilidade, mesmo quando se usa uma escória nova, recém-saída do forno (idade de referência zero).

Outras linhas de pesquisa têm investigado o potencial da EFP em outras áreas, como aplicação como mecanismo de controle de drenagem ácida de mineração de carvão (Machado & Schneider, 2008); em misturas de solo-cimento para estabilização de taludes (Montenegro, et al., 2013); como estabilizador de solos e terraplanagem (Manso, et al., 2013); na execução de pavimentos e na fabricação de argamassas de assentamento e revestimento (Manso, et al., 2005); dentre outros.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho está demonstrada, de forma simplificada e esquemática, no fluxograma da Figura 5.

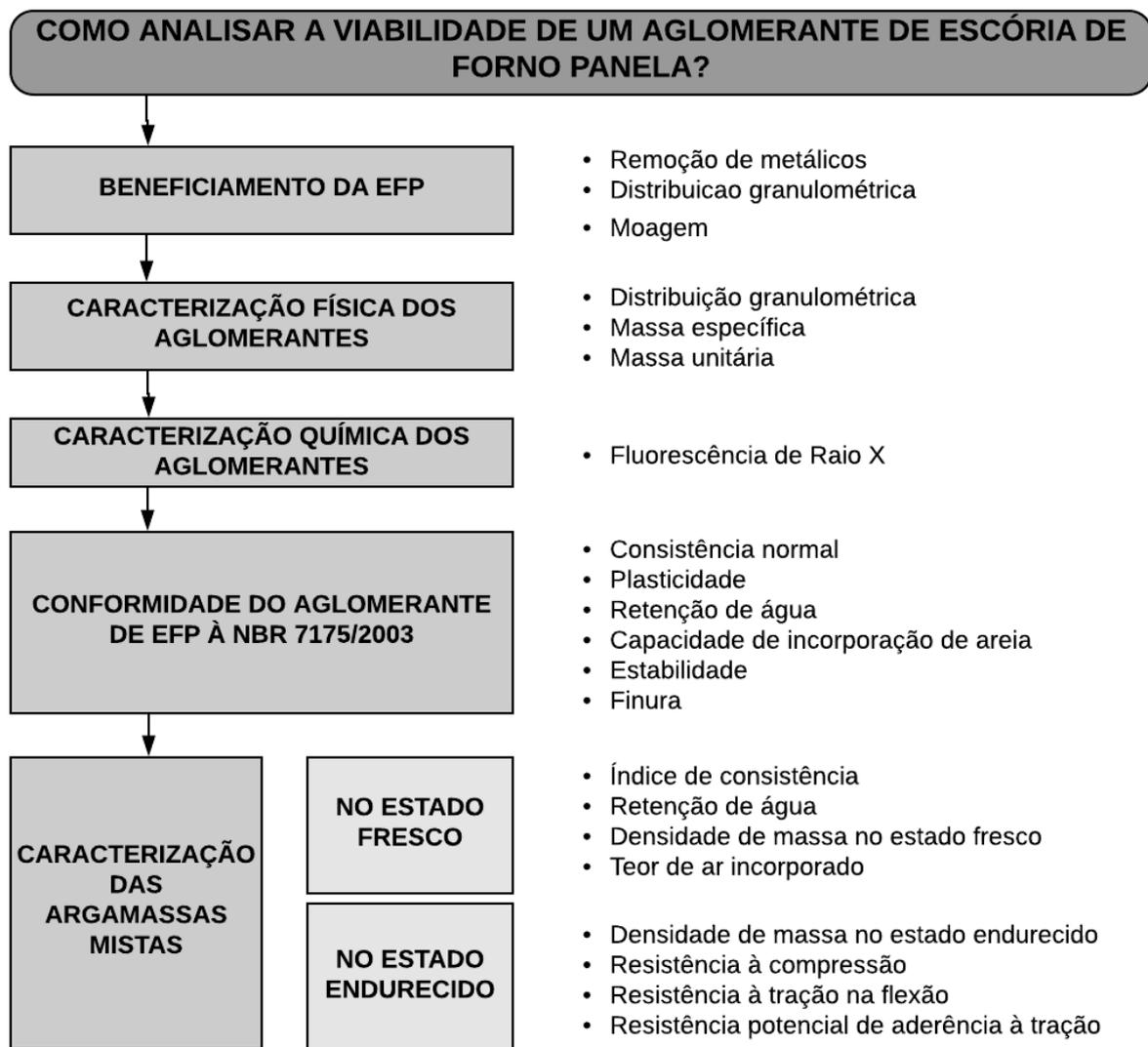


Figura 5- Fluxograma da metodologia utilizada.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland composto CP II Z-32 Itaú, produzido pela empresa Votorantim Cimentos, segundo prescrições normativas estabelecidas pela NBR 11578 (ABNT, 1991), com disponibilidade e custo acessíveis. O CP II-Z-32 leva de 6 a 14% de pozolana em sua composição, material que proporciona maior impermeabilidade ao concreto e à argamassa, garantindo maior durabilidade; e até 10% de material carbonático (ABCP, 2002).

3.1.2 Areia

A areia utilizada é proveniente do Rio Piranga, extraída no município de Ponte Nova, Minas Gerais. A amostra utilizada possui partículas com diâmetro inferior a 4,80 mm, obtidas por processo de peneiramento. Para garantir a qualidade das argamassas no experimento e evitar o processo de inchamento do agregado miúdo, a areia foi seca em estufa, em seguida peneirada e armazenada em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados.

3.1.3 Cal hidratada

A cal hidratada (CH) ou aérea utilizada nos experimentos foi a cal hidratada CHI, tipo cálcica, fabricada pela empresa ICAL segundo prescrições normativas estabelecidas pela NBR 7175 (ABNT, 2003) e disponível na região a custo acessível. A cal foi armazenada em recipientes plásticos após sua aquisição, de modo a preservar suas propriedades, evitar contaminações e alterações de umidade.

3.1.4 EFP

A EFP utilizada no experimento é proveniente de usinas siderúrgicas da região sudeste do país. A coleta das amostras foi efetuada de forma representativa, segundo prescrições da NBR 10007 (ABNT, 2004), e enviadas ao Laboratório de Materiais de

Construção Civil da Escola de Minas/UFOP em bombonas plásticas devidamente identificadas e hermeticamente lacradas.

3.2 Processamento da EFP

Devido à presença de materiais ferrosos nas amostras de escória, ela foi inicialmente submetida a um processo de remoção de metálicos. Posteriormente, a granulometria desse material foi determinada. Esse ensaio constatou que a EFP possuía grãos muito maiores que a CH, o que levou à sua moagem. Após esse procedimento, realizou-se novamente a determinação da granulometria da escória e determinaram-se porcentagens de cada fração para compor o aglomerante a ser utilizado.

As rotas de processamento da EFP foram estabelecidas e conduzidas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas/UFOP. Os procedimentos são descritos nos itens seguintes.

3.2.1 Remoção de metálicos

A amostra de EFP utilizada foi seca em estufa a 105°C até constância de massa. Esse material foi processado para segregação das frações metálicas em rolo magnético INBRAS (HF CC 12"x12") com intensidade de campo 950 GAUSS, frequência de vibração 60 HERTZ, ilustrado na Figura 6. O material retido, que é a fração metálica da amostra, foi completamente removido e determinado seu peso. O processo de circulação da amostra repetiu-se até que a fração metálica (materiais magnéticos) retida fosse inferior a 1,0% da massa da amostra inicial.



Figura 6- Rolo magnético INBRAS utilizado para segregação dos materiais metálicos da EFP.

3.2.2 Moagem

Com a finalidade de produzir um aglomerante com distribuição similar ao aglomerante convencional, a EFP foi peneirada e a fração de EFP com diâmetro inferior a 0,075mm foi moída. Foi definido o tempo de moagem de 10 minutos no moinho de baixa eficiência MARCONI MA500. Este tempo foi determinado considerando a granulometria do material e o custo-benefício, relacionado ao menor tempo de moagem possível e ao tipo de moinho utilizado.



Figura 7- Moinho utilizado no processamento da EFP.

3.2.3 Redistribuição granulométrica

Para a composição do aglomerante de EFP estudado neste trabalho, utilizou-se o material retido nas peneiras de nº 30, 50, 100, 200 e o material moído passante na peneira de nº 200. A fim de produzir um aglomerante de EFP com distribuição granulométrica similar ao da CH, a porcentagem de cada fração foi fixada como detalhado na Tabela 5.

Tabela 5- Distribuição granulométrica da EFP.

Peneira	Abertura em mm	Porcentagem (%)
Retida na 30	0,600	0,5
Retida na 50	0,300	0,5
Retida na 100	0,150	1,0
Retida na 200	0,075	13
Passante na 200	0,075	85

3.3 Caracterização Química dos aglomerantes- Fluorescência de Raio X

O ensaio de Fluorescência de Raio X (FRX) foi realizado para determinar a composição química das amostras. As análises foram realizadas pelo laboratório NanoLab no Departamento de Metalurgia da Escola de Minas/UFOP através do equipamento de modelo Rayny EDX 720, da marca Shimadzu.

3.4 Caracterização Física dos aglomerantes

3.4.1 Distribuição granulométrica

Para determinar a composição granulométrica das amostras, o material de diâmetro superior a 0,075mm foi submetido ao processo de peneiramento de acordo com prescrições normativas da NBR NM 248 (ABNT, 2003). O de diâmetro inferior a 0,075mm foi analisado por difração a laser BETTERSIZÉ, modelo 2000.

3.4.2 Massa específica

O ensaio para determinação da massa específica dos aglomerantes foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas pela NBR NM 23 (ABNT, 2000). Nesse ensaio, uma massa conhecida do material é colocada dentro de um frasco com querosene em temperatura equalizada. São registrados os volumes antes e após a colocação do material no frasco. Assim, a massa específica (ρ) é determinada em função da massa da amostra (m) sobre a diferença entre o volume depois e antes da colocação da amostra (V_1 e V_2 , respectivamente), conforme a Equação (4).

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (4)$$



Figura 8- Frasco de Le Chatelier utilizado no ensaio de determinação da massa específica.

3.4.3 Massa unitária

O ensaio de determinação da massa unitária seguiu as prescrições normativas estabelecidas pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). Essa propriedade é definida como a relação entre a massa do material e o volume ocupado considerando os vazios entre os grãos e poros permeáveis.

3.5 Cumprimento às exigências da NBR 7175/2003

As cales hidratadas disponíveis no mercado brasileiro devem cumprir as exigências estabelecidas pela NBR 7175 (ABNT, 2003). Esta norma especifica as características da cal hidratada a ser empregada em argamassas para a construção civil. A CH e a EFP foram submetidas aos ensaios estabelecidos por essa norma a fim de verificar a conformidade desses aglomerantes em relação à normatização vigente, além de servirem como parâmetros comparativos entre esses dois materiais.

3.5.1 Consistência normal

A NBR 14399 (ABNT, 1999) descreve os procedimentos de determinação da água que confere consistência normal às pastas. Este ensaio utilizou o aparelho de Vicat modificado, ilustrado na Figura 9. Preparou-se, inicialmente, uma pasta com 500g de aglomerante e uma quantidade de água determinada por meio de tentativas, até que um valor de penetração de (20 ± 2) mm fosse atingido. Quando isso ocorre, a pasta é considerada de consistência normal e esse fator água/aglomerante é utilizado para os demais ensaios.



Figura 9- Aparelho de Vicat modificado utilizado para realizar o ensaio de determinação da consistência normal.

3.5.2 Plasticidade

O ensaio para a determinação da plasticidade foi conduzido de acordo com a NBR 9206 (ABNT, 2003) e adaptado para a mesa de consistência. Primeiramente foi preparada uma pasta de consistência normal, determinada no ensaio anterior. Essa pasta permaneceu coberta com um pano úmido por um período de aproximadamente 22h. Posteriormente, foi remisturada e acrescentou-se água até obter novamente a consistência normal. Posteriormente, o índice de consistência foi monitorado por um período de 5 minutos em intervalos de 1 em 1 minuto. A Figura 10 ilustra parte do procedimento do ensaio.



Figura 10- Aferição de medida na mesa de consistência para determinação da plasticidade da pasta.

3.5.3 Retenção de água

O ensaio da determinação da retenção de água dos aglomerantes foi realizado através do funil de Buchner modificado e seguiu as prescrições normativas da NBR 9290 (ABNT, 1996). O valor do índice de retenção de água (RA) é determinado em função da consistência antes e após a sucção no funil de Buchner modificado (A e B , respectivamente), conforme a equação (5). A Figura 11 ilustra os instrumentos utilizados no ensaio.

$$RA = \frac{A - 125}{B - 125} \times 100 \quad (5)$$



Figura 11- Instrumentos utilizados no ensaio de determinação da retenção de água das argamassas pelo método do funil de Buchner.

3.5.4 Capacidade de incorporação de areia

O ensaio para determinação da capacidade de incorporação de areia foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas pela NBR 9207 (ABNT, 2000) e adaptado para a mesa de consistência. O ensaio permite determinar a quantidade máxima de areia-padrão que pode ser misturada a um ligante para argamassas sem prejudicar a trabalhabilidade da mistura resultante.

O procedimento consistiu na mistura de 500g de aglomerante e 500g de areia normal padrão, conforme NBR 7214 (ABNT, 2015). A quantidade de água foi ajustada para o índice de consistência normal de (240 ± 5) mm. A operação foi repetida, aumentando a proporção areia/aglomerante até que ocorresse o cisalhamento da argamassa, quando não é mais possível determinar o índice de consistência. A Figura 12 ilustra parte do procedimento.



Figura 12- Procedimento de determinação da capacidade de incorporação de areia do ligante.

3.5.5 Estabilidade

O ensaio de determinação da estabilidade dos aglomerantes foi executado segundo as prescrições normativas da NBR 9205 (ABNT, 2001). O procedimento consiste no espalhamento de uma massa com consistência de (280 ± 5) mm em placas de vidro. Essa massa é deixada em repouso em estufa por 18h a temperatura de 40°C . A primeira análise visual quanto à presença de protuberâncias e/ou pipocamentos na amostra é feita após esse período. Posteriormente, essas amostras são submetidas a uma temperatura de 100°C em ambiente saturado por 5h e uma segunda observação é realizada.

3.5.6 Finura

A norma NBR 9289 (ABNT, 2000) foi utilizada na determinação da finura dos aglomerantes para argamassas. Nesse ensaio, o material é lavado nas peneiras com abertura de malha de 0,075mm e 1,18mm até que a água passante se torne clara. A finura do aglomerante é determinada de acordo com o material seco retido em cada peneira em relação à massa inicial.

3.6 Produção das argamassas

Os traços propostos no planejamento experimental foram de 1:1:6 e 1:2:9 em volume, para argamassas de revestimento e assentamento, respectivamente. Essa dosagem foi baseada em Sabbatini (1986), que sugere um preenchimento otimizado dos vazios do agregado miúdo pelo aglomerante para uma proporção aglomerante/agregado de 1:3.

Foram estabelecidos dois tipos de argamassas mistas distintas em relação ao aglomerante utilizado. Uma delas é constituída de cimento Portland, EPF processada e areia. A outra, produzida a fim de servir como referência em análises comparativas, é composta de cimento Portland, cal hidratada e areia. A determinação da massa unitária (aparente) do cimento, dos aglomerantes (CH e EFP) e da areia permitiu a conversão dos traços em volume para traços em massa. A Tabela 6 apresenta o traço em volume e em massa das quatro argamassas avaliadas.

Tabela 6- Dosagem das argamassas.

Materiais	Traço em volume	Traço em massa
cimento:CH:areia	1:1:6	1:0,44:8,66
cimento:CH:areia	1:2:9	1:0,89:12,99
cimento:EFP:areia	1:1:6	1:0,91:8,66
cimento:EFP:areia	1:2:9	1:1,81:12,99

A fim de analisar o comportamento dessas argamassas em diferentes condições de temperatura e umidade relativa foram utilizados dois ambientes de cura: a cura ao ar e a cura úmida. Na cura ao ar, de forma a avaliar o efeito de uma cura em condições consideradas de referência, os corpos de prova foram submetidos a condições de umidade relativa de $(65\pm 5)\%$ e temperatura de $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ numa sala fechada e climatizada por 28 dias no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas/UFOP. Na cura úmida, de forma a avaliar o efeito de condições de umidade elevada, os corpos de prova permaneceram em uma câmara de umidade modelo SS600UM da marca Equilam, mantendo o ambiente saturado $(98\pm 2)\%$ e em

temperatura ambiente de 25°C por 28 dias. A Figura 13 mostra a câmara de umidade utilizada.



Figura 13- Câmara de umidade utilizada.

3.7 Caracterização física da argamassa no estado fresco

3.7.1 Índice de consistência

Este ensaio foi realizado de acordo com as prescrições normativas da NBR 13276 (ABNT, 2005). Determinou-se o fator água/aglomerante capaz de produzir uma argamassa de índice de consistência recomendado de (260 ± 5) mm. Os demais ensaios no estado fresco e endurecido utilizaram esse fator água/aglomerante.

3.7.2 Retenção de água

O ensaio para a determinação da retenção de água foi conduzido de acordo com a NBR 13277 (ABNT, 2005). Este ensaio estimou a quantidade de água que as argamassas em análise são capazes de reter. O valor do índice de retenção de água (Ra) é determinado em função das massas: do conjunto de discos molhados de papel-filtro (M_f), do conjunto de discos secos (M_{se}), de água acrescentada à mistura (M_w), de argamassa (M) e do molde de argamassa (M_{ma}), conforme a equação (6). A Figura 14 ilustra o instrumento utilizado no ensaio.

$$Ra = \left[1 - \left(\frac{M_f - M_{se}}{(M_w / (M + M_w)) \times (M_{ma} - M_{se})} \right) \right] \times 100 \quad (6)$$



Figura 14- Ensaio de determinação da retenção de água.

3.7.3 Densidade de massa no estado fresco

O ensaio de determinação da densidade de massa no estado fresco foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas pela NBR 13278 (ABNT, 2005) e teve como objetivo mostrar o estado de agregação dos constituintes da mistura. A densidade de massa no estado fresco (d) é determinada em função da massa de um recipiente contendo a argamassa do ensaio (m_c), a massa do recipiente cilíndrico vazio (m_v) e o volume do recipiente (V_r), conforme a equação (7).

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000 \quad (7)$$

3.7.4 Teor de ar incorporado

O ensaio para a determinação do teor de ar incorporado no estado fresco seguiu as prescrições normativas da NBR 13276 (ABNT, 2005), executado pelo método pressométrico. A Figura 15 mostra o equipamento da Solotest utilizado nesse ensaio. O procedimento consistiu no preenchimento do molde com a argamassa, acoplado, posteriormente, um dispositivo de vedação e leitura.



Figura 15- Equipamento utilizado no ensaio de teor de ar incorporado.

3.8 Caracterização física e mecânica da argamassa no estado endurecido

3.8.1 Densidade de massa

Os procedimentos do ensaio de determinação da densidade de massa seguem as prescrições normativas estabelecidas pela NBR 13280 (ABNT, 2005). A densidade de massa no estado endurecido é determinada em função da massa e do volume dos corpos de prova.

3.8.2 Resistência à compressão

O ensaio de determinação da resistência à compressão foi conduzido de acordo com prescrições normativas estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 1995). Para cada tipo de argamassa, esse parâmetro foi obtido a partir da média das resistências individuais obtidas, em MPa, de 4 corpos de prova cilíndricos rompidos aos 28 dias de idade. O equipamento utilizado foi a prensa EMIC, modelo DL 20000 e a célula de carga de capacidade de 200kN. A Figura 16 ilustra a execução do ensaio.



Figura 16- Ensaio de determinação da resistência à compressão.

3.8.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de determinação da resistência à tração na flexão foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 1995). Para cada tipo de argamassa esse parâmetro foi obtido a partir da média das resistências individuais obtidas, em Mpa, dos 4 corpos de prova prismáticos rompidos aos 28 dias de idade. O equipamento utilizado foi a prensa EMIC, modelo DL 20000, e a célula de carga com capacidade de 20kN. A resistência à tração na flexão (R_f) é calculada em função da carga aplicada verticalmente no centro do prisma (F_t) e da distância entre os apoios (L) conforma a equação (8). A Figura 17 ilustra a execução do ensaio.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_t \times L}{40^3} \quad (8)$$

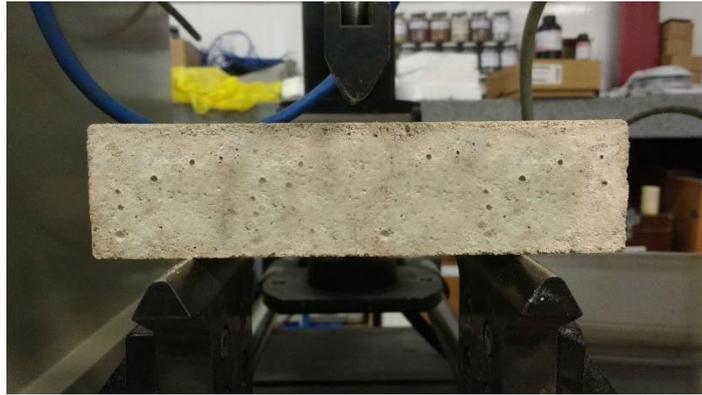


Figura 17- Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão.

3.8.4 Ensaio de determinação da resistência potencial de aderência à tração

De acordo com os procedimentos descritos na NBR 15258 (ABNT, 2005), um equipamento de tração é acoplado às pastilhas metálicas e um esforço de tração perpendicular é aplicado aos corpos de prova com a taxa de carregamento constante de (250 ± 50) N/s, até a ruptura. Para cada tipo de argamassa foram rompidos 10 corpos de prova distribuídos no substrato de concreto prescrito na norma, aos 28 dias de idade. O equipamento utilizado foi o Aderímetro Contenco, modelo N1500. A resistência de aderência à tração (R_a) é determinada pela razão entre a carga de ruptura (P) e a área da pastilha (A), conforme a equação (9). A Figura 18 ilustra a execução do ensaio.

$$R_a = \frac{P}{A} \quad (9)$$



Figura 18- Ensaio de determinação da resistência potencial de aderência à tração.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização Química dos aglomerantes

A Tabela 7 apresenta a composição química das amostras analisadas na Fluorescência de Raio X. Ela mostra que a CH é composta de óxido de cálcio em quase sua totalidade, enquanto a EFP processada apresenta basicamente óxido de cálcio, sílica e óxido de magnésio. Esses resultados são compatíveis com achados de Rodriguez et al. (2009), que verificaram o predomínio de óxido de cálcio e sílica nas amostras de EFP.

Tabela 7- Composição química das amostras obtida por FRX.

	EFP processada	CH
CaO	60,0%	96,0%
SiO₂	26,9%	1,9%
MgO	6,2%	
SrO	0,2%	0,6%
SO₃	5,2%	0,6%
Fe₂O₃	1,2%	0,2%
TiO₂	0,4%	
MnO	0,5%	
K₂O		0,5%

4.2 Caracterização Física dos aglomerantes

4.2.1 Distribuição granulométrica

A Figura 19 mostra as curvas granulométricas da EFP bruta, da EFP processada e da CH obtidas. A EFP bruta apresentou partículas de tamanho muito superior à CH. Assim, a moagem e a redistribuição granulométrica da EFP foram necessárias para obtenção de um aglomerante com característica física similar ao aglomerante convencional.

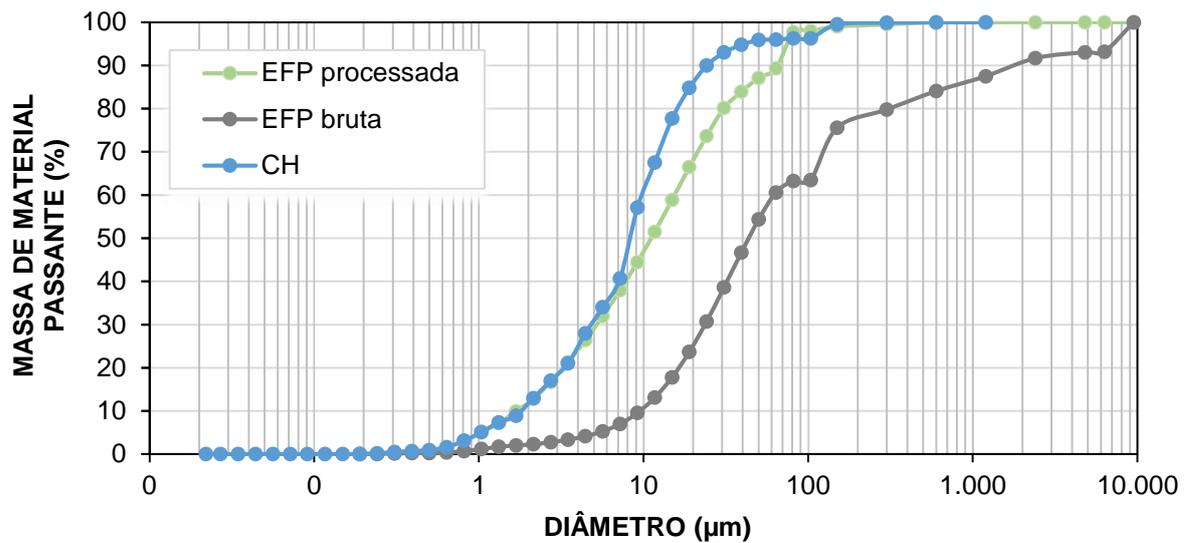


Figura 19- Distribuição granulométrica dos aglomerantes.

Deste ponto em diante, a menção de “EFP” diz respeito à EFP processada, com ajuste granulométrico e remoção de metálicos.

4.2.2 Massa específica

A determinação da massa específica diz respeito à aplicabilidade do material como elemento construtivo, relativamente à qualidade das misturas no estado fresco e endurecido, produtividade dos operadores, dentre outros parâmetros de interesse. A Figura 20 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica realizados nas amostras, de acordo com os parâmetros normativos.

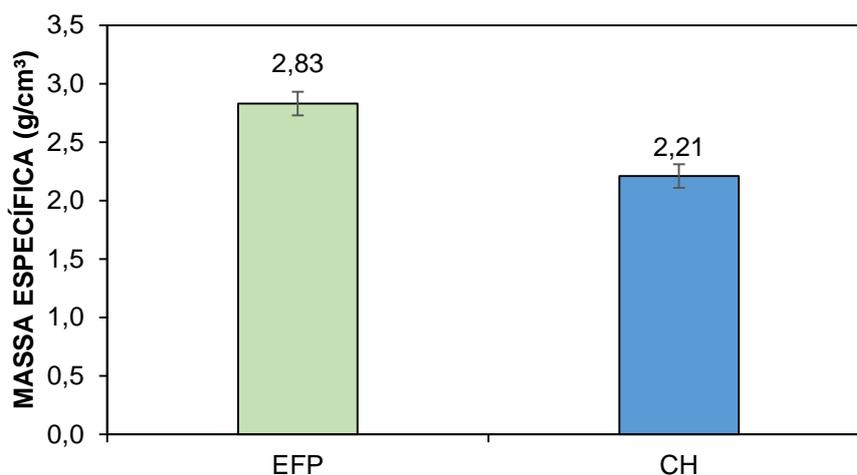


Figura 20 - Massa específica dos aglomerantes.

Os resultados mostram que a massa específica da EFP é superior à da CH. Essa diferença se deve aos materiais constituintes de cada um dos materiais analisados e pode ser explicado devido à maior incidência de Fe_2O_3 na EFP. A massa específica da EFP encontrada neste experimento está em concordância com os valores encontrados por Cardoso (2009) e Rodriguez (2009) para o mesmo tipo de escória.

4.2.3 Massa unitária

A determinação da massa unitária se faz necessária para determinar a dosagem das argamassas, uma vez que permite converter o traço volumétrico no traço em massa. A Figura 21 apresenta os valores de massa unitária dos materiais utilizados na produção das argamassas mistas. A EFP apresentou massa unitária muito superior à CH. Isso pode ser explicado pela diferença na composição mineralógica desses materiais.

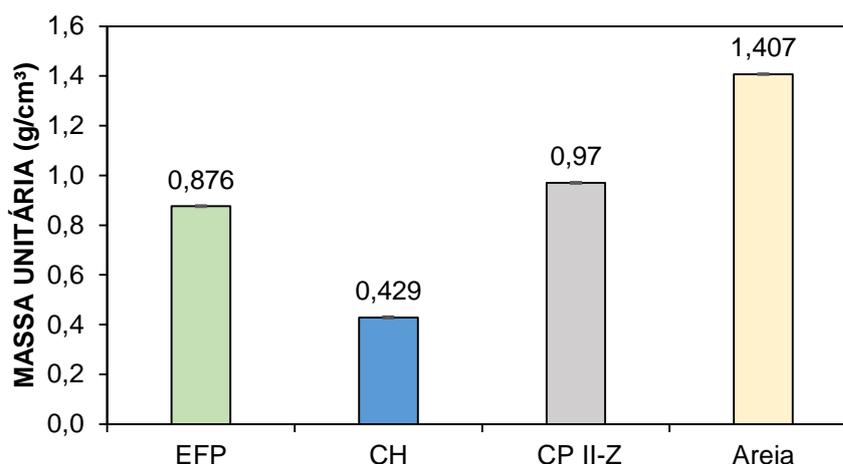


Figura 21- Massa unitária dos materiais.

4.3 Cumprimento às exigências da NBR 7175/2003

4.3.1 Consistência Normal

Este índice representa a quantidade de água necessária para a produção de uma argamassa trabalhável e é utilizado na determinação do índice de plasticidade. A Tabela 8 apresenta o resultado do ensaio do índice de consistência dos aglomerantes. A argamassa utilizando a CH como aglomerante apresentou percentual de água da pasta normal bastante superior à argamassa com o aglomerante de EFP.

Tabela 8- Índice de consistência normal das pastas.

ARGAMASSA (%)	
EFP	45%
CH	94%

4.3.2 Plasticidade

A Figura 22 apresenta os resultados da análise da plasticidade das argamassas. Os resultados mostram que a argamassa de EFP apresenta maior plasticidade que a

argamassa de CH e ambas estão dentro do limite delimitado pela norma NBR 7175 (ABNT, 2003) (≥ 110).

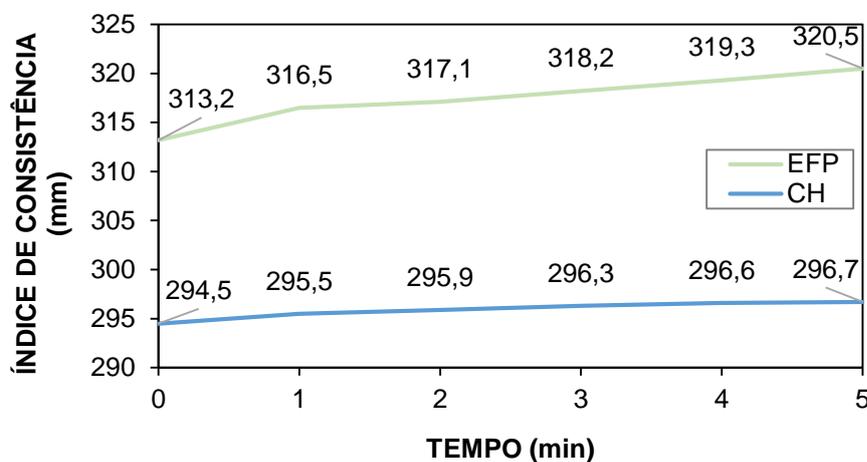


Figura 22- Resultados do ensaio de determinação da plasticidade.

Esse fato pode ser explicado em decorrência da EFP apresentar predominância de grãos volumétricos, pelo fato de ser uma escória beneficiada industrialmente e moída, como aponta Cardoso (2009), distribuindo melhor seus grãos pela massa. Esse resultado também é compatível com achados de Rodriguez et al. (2009), que o justifica devido à finura da EFP e à sua baixa hidraulicidade a curto prazo.

4.3.3 Retenção de água

A Figura 23 apresenta os resultados do ensaio de determinação da retenção de água dos aglomerantes. A CH apresentou retenção de água maior que a EFP. A NBR 7175 (ABNT, 2003) estabelece o valor mínimo de retenção de água de 75%. Assim, ambos os aglomerantes estão em conformidade com o limite proposto pela norma.

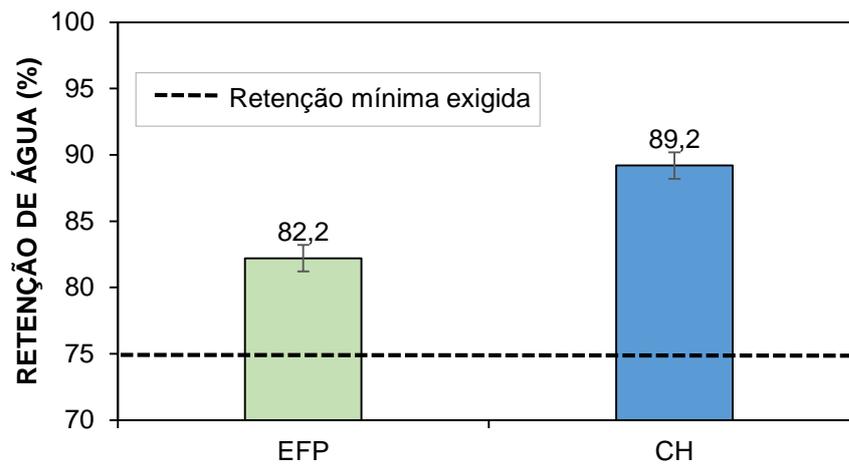


Figura 23- Resultado do ensaio de determinação da retenção de água dos aglomerantes.

4.3.4 Capacidade de incorporação de areia

A Figura 24 apresenta os resultados da análise da capacidade de incorporação de areia dos aglomerantes. Observa-se que incrementos de areia resultam na redução do índice de consistência. Argamassas de CH são capazes de incorporar areia até a proporção areia/cal de 2,1 (IC=161) sem prejudicar sua trabalhabilidade. Para argamassas de EFP a proporção encontrada foi de até 1,6 (IC=154). Como a norma sugere incorporação de areia acima de 3,0, nenhum dos aglomerantes atendeu à essa exigência.

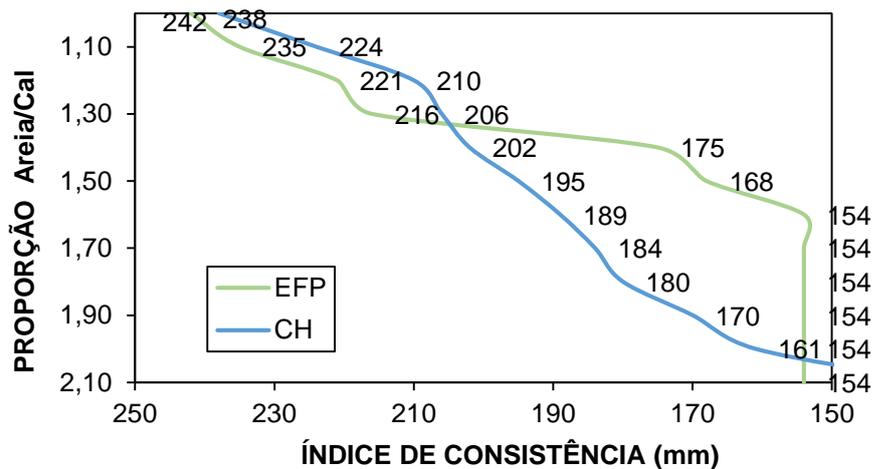


Figura 24- Resultados do ensaio de incorporação de areia.

Esse resultado sugere que argamassas de CH possuem melhor capacidade de incorporação de areia se comparadas às de EFP. Isso se deve provavelmente à maior retenção de água pela cal. Uma maior incorporação de areia sugere maior rendimento da argamassa, assim como apresentado por Rago e Cincotto (1999).

4.3.5 Estabilidade

As amostras de EFP não apresentaram nenhum pipocamento ou protuberância. Já as amostras de CH apresentaram fissuras. Dessa forma, as amostras de EFP atenderam às especificações da NBR 7175/2003 quanto ao quesito estabilidade, o que não ocorreu com a CH. As fissuras nas amostras CH se devem, provavelmente, à perda de água inicial, que pode estar relacionada à maior quantidade de água necessária para conferir uma consistência normal à essa pasta.

4.3.6 Finura

Os resultados do ensaio de finura executados estão apresentados na Figura 25. Observa-se que os dois materiais atendem aos limites normativos especificados na NBR 7175 (ABNT, 2003).

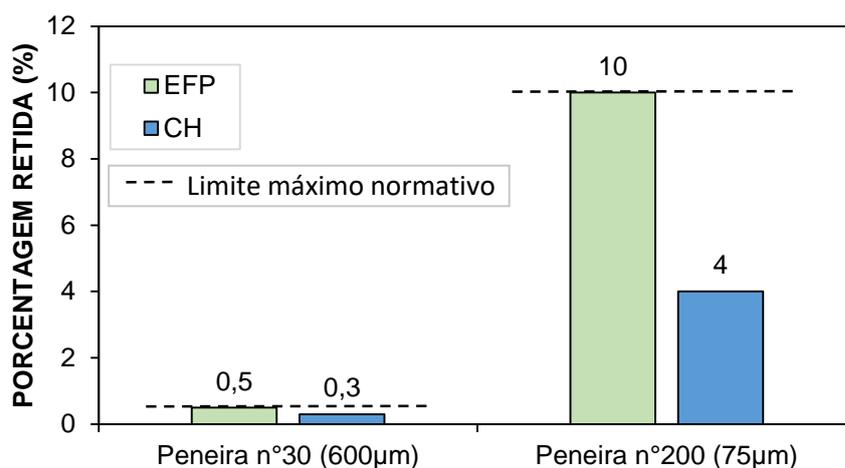


Figura 25- Finura dos aglomerantes.

Os resultados mostram que a CH possui menor finura que a EFP. Isso pode ser explicado pela distribuição granulométrica dos materiais e por seu processo de moagem e justifica a maior retenção de água pela CH. Apesar de não caracterizar a curva granulométrica como um todo, o ensaio de finura é geralmente executado por ser um método de controle de qualidade mais rápido.

4.4 Caracterização física da argamassa no estado fresco

4.4.1 Índice de consistência

A Figura 26 apresenta a proporção água/aglomerantes (a/a) capaz de proporcionar um espalhamento na ordem de (260 ± 5) mm, de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2005). Esse valor foi convencionado como uma consistência capaz de obter níveis aceitáveis de trabalhabilidade.

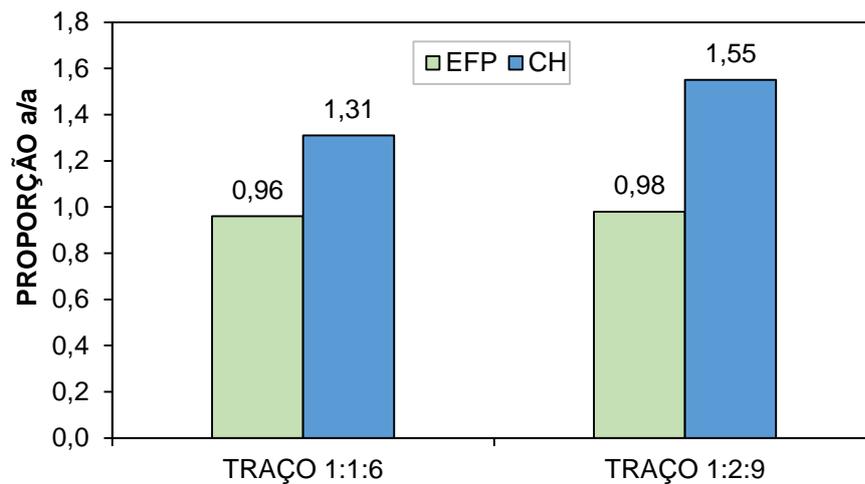


Figura 26- Índice de consistência das argamassas.

Os resultados mostram que os traços produzidos com EFP apresentam menor consumo de água. Outro fator importante é a maior massa específica da EFP. Essa característica influi no comportamento reológico da argamassa de escória, aumentando a abertura na mesa de consistência para o mesmo nível de impactos. Observa-se, também, que um aumento na relação cal/cimento das argamassas de cal induz um aumento na quantidade de água para manter a mesma consistência. O mesmo não acontece significativamente com a argamassa de EFP. Isso provavelmente se deve à maior área superficial da cal em relação à EFP, consequência da sua finura.

4.4.2 Retenção de água

A Figura 27 apresenta os resultados da análise da retenção de água das argamassas. As argamassas de CH apresentaram maior retenção de água se comparadas às de EFP, o que pode ser explicado pela maior finura da CH. Materiais mais finos demandam maior quantidade de água para obter a fluidez desejada, de acordo com Rodriguez et al. (2009).

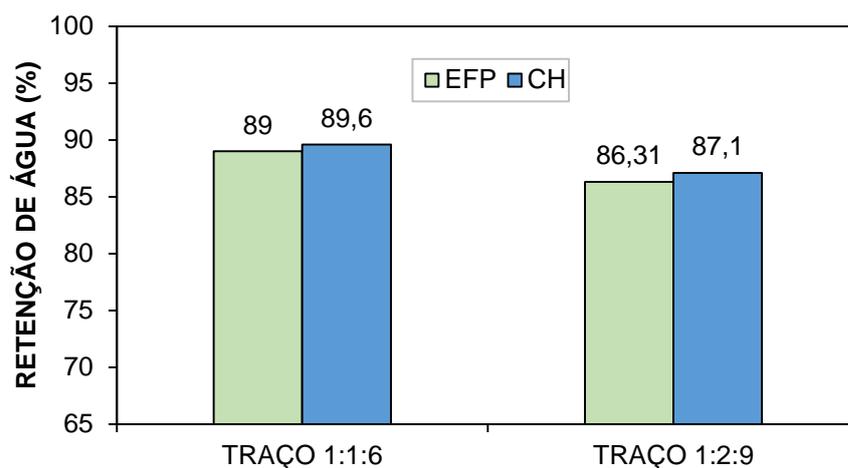


Figura 27- Retenção de água das argamassas.

De acordo com a NBR13281 (ABNT, 2005) as duas argamassas se enquadram na mesma classe (U4- 86% a 94%). De acordo com Rodriguez et al. (2009), indústrias de argamassas consideram que uma capacidade de retenção de água acima de 80% garantem uma boa trabalhabilidade. Assim, todos os traços adotados apresentaram retenção de água satisfatória em relação a esse autor.

4.4.3 Densidade de massa

A Figura 28 apresenta os resultados de densidade de massa no estado fresco.

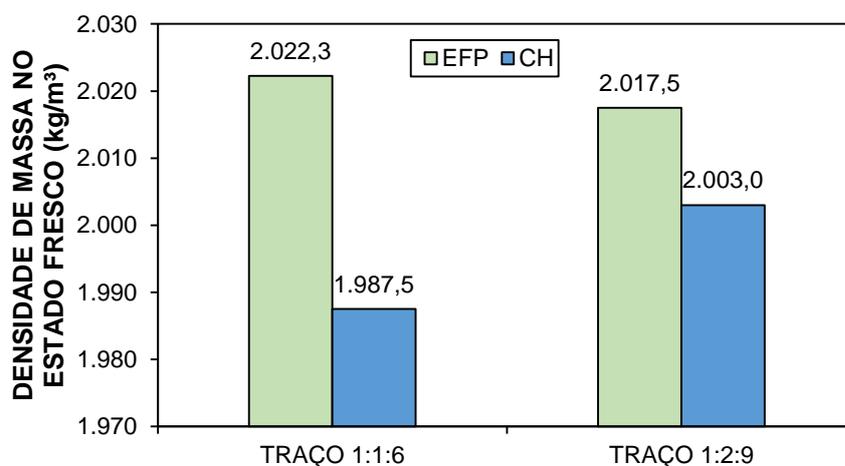


Figura 28- Densidade de massa das argamassas no estado fresco.

4.4.4 Teor de ar incorporado

A Figura 29 apresenta os resultados do ensaio de determinação do teor de ar incorporado.

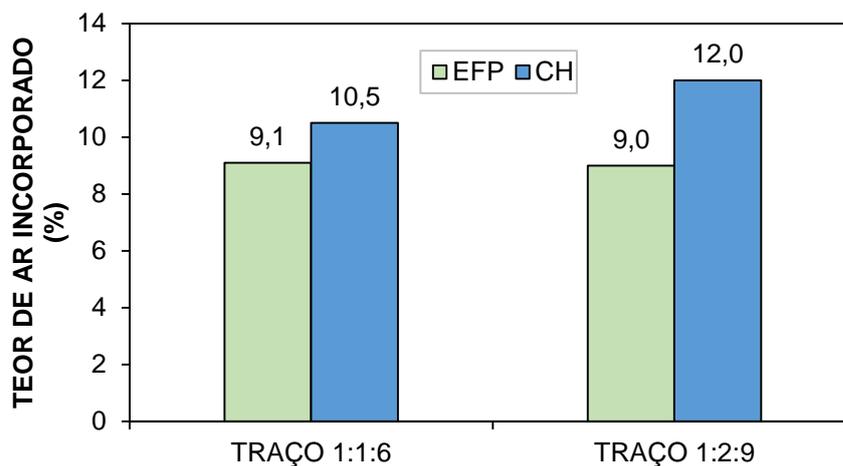


Figura 29- Teor de ar incorporado.

As argamassas de CH apresentaram maior teor de ar incorporado que as argamassas de EFP. Esse resultado concorda com achados de Rodriguez et al. (2009). Esse evento pode ser justificado pelo fato da CH apresentar finura reduzida em relação à EFP, como justifica Silva (2006). Além disso, na argamassa de CH houve variação desse índice para as diferentes proporções de aglomerantes totais.

Segundo Carasek (2010), a presença do ar na argamassa pode melhorar sua trabalhabilidade e reduzir o consumo de água de amassamento, já que serve de lubrificante entre os grãos sólidos da argamassa. No entanto, um elevado teor de ar incorporado pode prejudicar a aderência da argamassa com o substrato ou mesmo gerar um revestimento com baixa resistência superficial. Carasek (2010) sugere que argamassas com teores de ar acima de 20% podem representar problemas para os revestimentos. Abaixo desse valor crítico, o ar incorporado até melhora a aderência, devido aos ganhos na trabalhabilidade da argamassa. Todos os tratamentos apresentam valores dentro do limite proposto por esse autor.

4.5 Caracterização física e mecânica da argamassa no estado endurecido

4.5.1 Densidade de massa no estado endurecido

A Figura 30 apresenta os resultados obtidos para a análise da densidade de massa no estado endurecido em condições de cura úmida e cura ao ar.

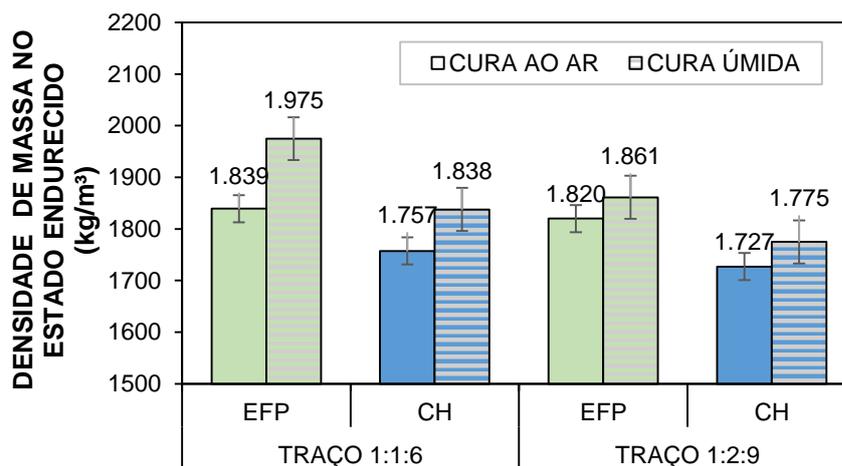


Figura 30- Resultados da densidade de massa das argamassas no estado endurecido.

Os resultados mostram que as argamassas de EFP são mais densas que as produzidas com CH. Isso pode ser explicado pelas características dos elementos que compõem esse resíduo, conforme mostrado nas análises de FRX e ao seu reduzido teor de ar incorporado. Além disso, a maior densidade de massa no estado endurecido da argamassa de EFP pode implicar em maior resistência mecânica, comparativamente à de CH.

4.5.2 Resistência à compressão

A Figura 31 apresenta os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão das argamassas.

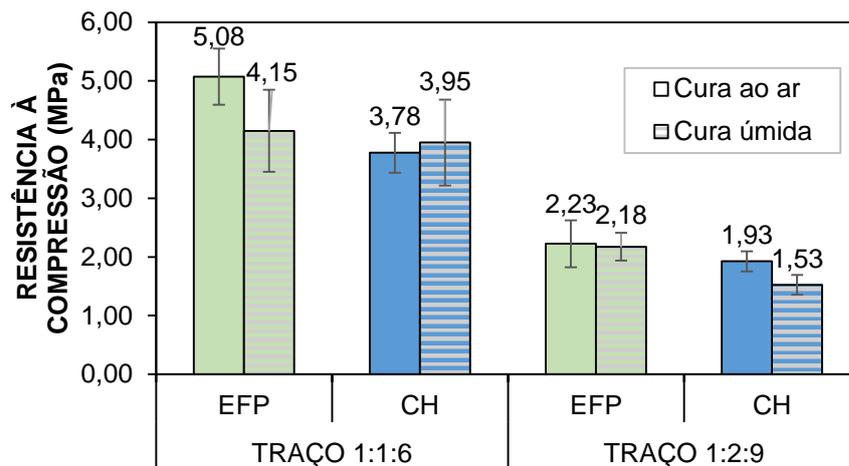


Figura 31- Resistência à compressão.

Os traços produzidos com a EFP apresentaram melhor comportamento à compressão, tendo um desempenho mecânico superior aos tratamentos de CH. Isso pode estar ligado ao potencial cimentante desse material. De acordo com Qiang e Peiyu (2010), o processo de hidratação da escória é muito similar à do cimento. Resultados do trabalho de Wang et al. (2013) também mostram que a escória funciona como um cimento com baixa atividade cimentante. Esse resultado também está de acordo com a análise do ensaio de determinação da densidade de massa dos corpos de prova.

De acordo com Rodriguez et al. (2009), embora a resistência mecânica não seja um fator determinante da utilização de uma argamassa de revestimento e assentamento, ela é uma indicação de qualidade, sendo um guia para avaliar sua durabilidade. Em análise a respeito da resistência e trabalhabilidade de argamassas produzidas com EFP, esses autores também encontraram resultados de resistência superiores para argamassas contendo EFP.

Apesar da cal favorecer a trabalhabilidade de uma argamassa e diminuir a absorção de água e o índice de vazios, ela também provoca uma redução na resistência à compressão. Conforme observado em todas as argamassas ensaiadas,

a resistência mecânica reduz com o aumento da proporção do aglomerante. Isso demonstra a influência do cimento sobre o comportamento mecânico das matrizes.

4.5.3 Resistência à tração na flexão

A Figura 32 apresenta os resultados obtidos na análise da resistência à tração na flexão para os tratamentos propostos.

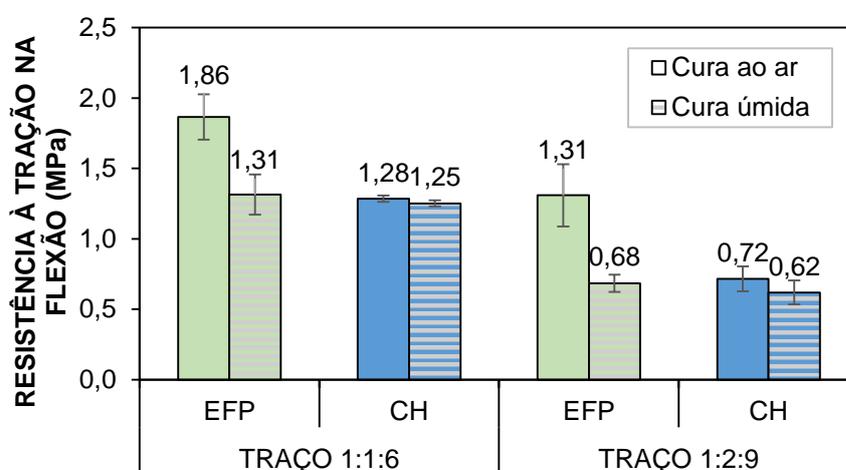


Figura 32- Resistência à tração na flexão.

As matrizes de EFP apresentaram resistência à tração na flexão superiores às matrizes de CH. Esse resultado pode ser consequência da incorporação de ar pelas matrizes compostas por CH. Também é possível correlacionar essa ocorrência aos resultados da resistência à compressão. Além disso, a resistência à tração da argamassa é um dos componentes que define a resistência de aderência à tração (Antunes, 2005).

4.5.4 Resistência potencial de aderência à tração

A Figura 33 apresenta os resultados das análises dos ensaios de resistência potencial de aderência à tração.

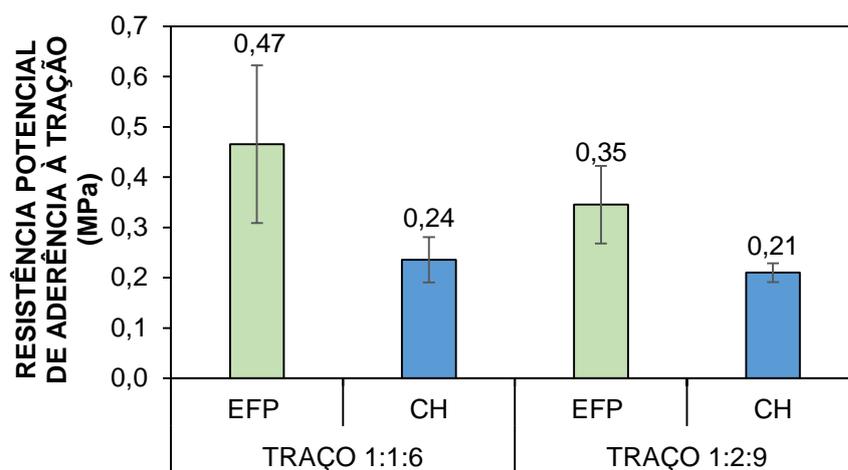


Figura 33- Resistência potencial de aderência à tração.

As argamassas produzidas com EFP apresentaram resistência de aderência superiores àquelas produzidas com CH, para ambos os traços. Isso pode ser explicado pela menor porosidade das argamassas de EFP, consequência da sua maior densidade de massa e menor teor de ar incorporado.

Além disso, à medida que a relação aglomerante/cimento aumenta, a resistência de aderência à tração diminui. Em seu estudo, Carasek (1996) constatou que a resistência de aderência à tração está relacionada com a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão, o que condiz com os resultados encontrados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avalia a potencialidade de argamassas de assentamento e revestimento produzidas com EFP em substituição integral à CH. Assim, esses dois aglomerantes foram caracterizados física e quimicamente. Posteriormente foram submetidos aos ensaios propostos pela norma que regula o desempenho das cales hidratadas. Por fim, foram produzidas argamassas de EFP e de CH em dois traços distintos e suas propriedades no estado fresco e endurecido foram estudadas.

Em relação à caracterização química, o ensaio de FRX mostrou que a EFP após a segregação metálica se constitui principalmente de cálcio (Ca), sílica (Si) e magnésio (Mg), enquanto a CH é composta basicamente de cálcio. Considerando a caracterização física, a curva granulométrica mostrou que a escória bruta possui partículas consideravelmente maiores que a CH, o que levou à necessidade do seu processamento granulométrico. O processo de moagem e uma nova distribuição granulométrica foram capazes de produzir um aglomerante com características físicas semelhantes à CH. A EFP apresentou massa específica e massa unitária maiores que a CH, justificado principalmente pela diferença química entre esses materiais.

As exigências da NBR 7175, que regula o desempenho das cales, foram analisadas. A argamassa de EFP apresentou maior plasticidade que a de CH e ambas estão dentro do limite normativo. A CH foi capaz de reter mais água que a EFP, e os dois aglomerantes atenderam ao limite mínimo exigido. O ensaio de capacidade de incorporação de areia mostrou que argamassas de CH são capazes de incorporar areia até a proporção de areia/aglomerante de 2,1 e nas argamassas de EFP essa proporção é de 1,6. Como a norma sugere incorporação de areia acima de 3,0, os aglomerantes analisados não atenderam a essa exigência. No ensaio de estabilidade, as amostras de CH não apresentaram pipocamentos ou protuberâncias, atendendo à especificação. Já nas amostras de CH houve o aparecimento de fissuras, provavelmente devido à perda de água inicial. A CH apresentou menor finura que a EFP e ambos os aglomerantes se encontram dentro do limite normativo.

No estado fresco, os traços produzidos com EFP apresentaram menor consumo de água e menor retenção de água. Esses resultados se devem, provavelmente, à

maior finura da CH, já que materiais mais finos demandam maior quantidade de água para obter a fluidez desejada. Os resultados de retenção de água encontrados para todos os traços são satisfatórios, segundo limites encontrados na literatura. As argamassas de CH apresentaram maior teor de ar incorporado, também devido à sua finura reduzida e a sua maior capacidade de retenção de água. Valores encontrados na literatura mostram que todos os traços apresentam teor de ar incorporado aceitável.

Nos ensaios no estado endurecido as argamassas de EFP mostraram-se mais densas que as de CH, devido às características dos elementos que compõem esse resíduo e ao seu reduzido teor de ar incorporado. Nos ensaios de resistência à compressão e à tração, os traços produzidos com escória tiveram um desempenho mecânico superior aos de CH. As argamassas de EFP ainda apresentaram resistência de aderência maior que as de CH. Isso pode ser explicado pela menor porosidade das argamassas de EFP, consequência da sua maior densidade de massa e menor teor de ar incorporado.

Em resumo, é possível produzir um aglomerante eficiente para argamassas de revestimento e assentamento a partir da EFP. Esse resíduo apresentou propriedades físicas e químicas similares à CH, além de comportamento mecânico superior. Assim, argamassas de EFP reduzem a utilização de recursos naturais e valorizam os rejeitos do processo de produção do aço, contribuindo para a sustentabilidade na construção civil e na indústria siderúrgica.

6 REFERÊNCIAS

ABCP. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, p. 27. 2002.

ABNT. **NBR 11578: Cimento Portland composto- Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1991.

ABNT. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1995.

ABNT. **NBR 9290: Cal hidratada para argamassas - Determinação de retenção de água - Método de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1996.

ABNT. **NBR 14399: Cal hidratada para argamassas - Determinação da água da pasta de consistência normal**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1999.

ABNT. **NBR 9207: Cal hidratada para argamassas - Determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2000.

ABNT. **NBR 9289: Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2000.

ABNT. **NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2000.

ABNT. **NBR 9205: Cal hidratada para argamassas - Determinação da estabilidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2001.

ABNT. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas- Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT. **NBR 7217: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT. **NBR 9206: Cal hidratada para argamassas - Determinação da plasticidade.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2004.

ABNT. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 15258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

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

ABNT. **NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2013.

ABNT. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento — Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2015.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimento de argamassas**. USP. São Paulo. 2005.

BAÍÁ, L. L.; SABBATINI, F. H. Projeto e execução de revestimento de argamassa. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. **O Nome da Rosa**, São Paulo, n. 1ª, p. 82, 2000.

BARRETO, M. F. O.; BRANDÃO, P. R. G. **Avaliação da Resistência de Aderência à Tração de Argamassas de Cimento Portland novas e envelhecidas**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Cuiabá: [s.n.]. 2014. p. 10.

BASTOS, P. K. X. **Retração e Desenvolvimento de Propriedade Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimento**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2001.

BAUER, E. **Revestimentos de Argamassa: Características e Peculiaridades**. LEM-UnB. Brasília. 2005.

CARASEK, H. **Aderência de argamassa à base de cimento portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1996.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 892-944.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimento de argamassa**. IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Brasília: [s.n.]. 2001.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico.** Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

CARDOSO, M. D. **Reciclagem de escória de forno panela de aciaria elétrica em material cerâmico.** Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, p. 166. 2009.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.** Universidade Federal de São Paulo. São Paulo. 1999.

CETEM. Exploração do calcário provoca diferentes impactos socioambientais no Brasil, 14 Fev 2013. Disponível em: <<http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=173>>. Acesso em: 05 Out 2018.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. **Boletim 68**, São Paulo, p. 118, 1995.

COELHO, A. Z. G.; TORRAL, F. P.; JALALI, S. **A Cal na Construção.** Universidade do Minho. Guimarães. 2009.

CONSTRUCTION; TICIANI, E. Racionalização de projetos e redução dos custos ambientais na construção civil, Florianópolis, 2005.

COUTINHO, D. S. **Materiais de Construção 2.** Universidade do Porto- Faculdade de Engenharia. [S.I.]. 2006.

DUARTE, I. C. D. **Modelo para predição de redução de temperatura do aço, entre o forno panela e o lingotamento contínuo no processo siderúrgico.** Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.

FIORITO, A. J. S. I. Manual de argamassas e revestimentos- Estudos e procedimentos de execução. **Pini**, São Paulo, n. 2ª, p. 232, Fevereiro 2010.

FISHBURN, C. C. **Effect of mortar properties on strength of masonry**. National Bureau of Standards. Washington. 1961.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 170. 2001.

GEYER, R. T. et al. Perspectivas de reciclagem de resíduos da indústria siderúrgica como material de construção civil, Canela, RS, 18 a 21 nov 1997.

IABR. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Instituto Aço Brasil. [S.l.]. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, p. 74. 2012.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. II, 2010.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Produção de Cal**. Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto. 2014.

JURAS, D. A. G. M. **Os impactos da indústria no meio ambiente**. Consultoria Legislativa. Brasília, p. 83. 2015.

LOBATO, C. C. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Indústria Siderúrgica**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 143. 2014.

MACHADO, L. A.; SCHNEIDER, I. A. H. Ensaio estático e cinético para a prevenção da geração de drenagem ácida de minas da mineração de carvão com escória de aciaria. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 61, p. 329-335, jul./set. 2008. ISSN 3.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. EPUSP. São Paulo. 1998.

MANSO, J. M. et al. Ladle Furnace Slag in Construction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 17, n. 5, p. 513-518, out. 2005.

MANSO, J. M. et al. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3508-3519, 2011.

MANSO, J. M. et al. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126-134, 2013.

MARGALHA, M. G. **Argamassas- Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Patrimônio**. Universidade de Évora. Évora. 2011.

MARINHO, A. L. B. **Aglomerante ecológico para argamassa- Reciclagem da Escória de Forno Panela**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2015.

MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F. Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 4, jun 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto- Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. Califórnia: IBRACON, 2014.

MENDES, J. C. et al. **Macroporous Mortars for Laying and Coating**. [S.l.]. em publicação.

MONTENEGRO, J. M. et al. Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 972-979, ago. 2013.

PAPAYIANNI, I.; ANASTASIOU, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, Greece, v. 34, p. 400-407, 2012.

PCA. Masonry Mortars. **Masonry Information**, Illinois, 2004. Disponível em: <https://www.floridamasonry.com/assets/resources/section_vi_-_pca_masonry_mortars.pdf>. Acesso em: 26 Set 2018.

QIANG, W.; PEIYU, Y. **Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag**. Tsinghua Univesity. Beijing. 2010.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, 1999.

ROCHA, B. P. **Estudo da viabilidade da reutilização da escória do refino secundário no forno elétrico a arco**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2011.

RODRIGUEZ, Á. et al. Strength and workability of masonry morars manufactured with ladle furnace slag. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, p. 645-651, May 2009.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária**. Escola Politécnica da USP. São Paulo. 1984.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 1986.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente**. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo. 1998.

SÉBAIBI, Y.; DHEILLY, R. M.; QUENEUDEC, M. Study of the water-retention capacity of a lime-sand mortar: influence of the physicochemical characteristics of the lime. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 689-696, 2003.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1989.

SILVA, J. O. D. **Produto RT 55- Perfil do Calcário Agrícola**. Ministério de Minas e Energia- MME. [S.l.]. 2009.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2006.

SILVA, R. D. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno - estudo do comportamento reológico e macânico**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

SJOSTROM; TICIANI, E. **Racionalização de Projetos e Redução dos Custos Ambientais na Construção Civil**, Florianópolis, 2005.

TAHA, M. M. R.; SHRIVE, N. G. **The use of pozzolans to improve bond and bon strength**. University of New Mexico. Calgary. 2014.

WANG, Q.; YANG, J.; YAN, P. **Cementitious properties of super-fine steel slag**. Tsinghua University. Beijing. 2013.